

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерних наук  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Формування концепту «розумне місто» на основі методів керованих даними

Виконав: студент IV курсу, групи СН-42

спеціальності 122 Комп'ютерні науки  
(шифр і назва спеціальності)

Савик О.О.  
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник

(підпис)

Кунанець Н.Е.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Липак Г.І.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Боднарчук І.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Тимощук Д.І.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2026

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії  
(повна назва факультету)  
Кафедра комп'ютерних наук  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Боднарчук І.О.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 8 » червня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр  
(назва освітнього ступеня)  
за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки  
(шифр і назва спеціальності)  
Студенту Савику Оресту Олеговичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Формування концепту «розумне місто» на основі методів керованих даними

Керівник роботи Кунанець Наталія Едуардівна, д.н.с.к., професор кафедри КН  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 14 » травня 2026 року № 4/7-239

2. Термін подання студентом завершеної роботи 23 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації щодо методів керованих даними та їх використання для «розумних міст»

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Теоретико-методологічні основи формування концепції «розумного міста» на засадах управління, керованого даними. 2. Інформаційно-технологічний інструментарій управління складними системами «розумного міста» за допомогою даних. 3. Практичні аспекти та прикладні сценарії застосування методів, керованих даними, в галузевих підсистемах «розумного міста». 4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

Висновки. Перелік джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

1 Титульна сторінка. 2 Тема та мета дослідження. 3 Завдання дослідження. 4 Актуальність дослідження. 5. Сталий розвиток «розумних міст» на основі даних. 6. Узагальнена структура «розумного міста». 7. Концептуальна структура керованого даними «розумного міста».

8. Функціональна структура та завдання концепту «розумне місто». 9. Мультиmodalні методи на основі даних для «розумних міст». 10. Вплив масштабу на складність проблем в «розумних містах». 11. Моделювання та обчислення для потреб «розумних міст».

12. Методологія керованого даними «розумного міста». 13. Кероване даними прогнозування для потреб «розумних міст». 14. Кероване даними моделювання для потреб «розумних міст»

15. Висновки. 16. Завершальний слайд.



## АНОТАЦІЯ

Формування концепту «розумне місто» на основі методів керованих даними // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Савик Орест Олегович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет комп'ютерно-інформаційних систем і програмної інженерії, кафедра комп'ютерних наук, група СН-42 // Тернопіль, 2026 // С. 71, рис. – 14, табл. – 2, кресл. – 16, додат. – 0, бібліогр. – 76.

**Ключові слова:** аналітичне опрацювання даних, міське управління, моделювання міських систем, прогнозування міського розвитку, сталий розвиток міст, управління на основі даних, цифрова трансформація міського середовища.

Кваліфікаційна робота присвячена формуванню концепту «розумне місто» на основі методів керованих даними. В першому розділі кваліфікаційної роботи подано теоретико-методологічні засади розбудови концепту «розумне місто». Висвітлено концептуалізацію структури «розумного міста» як інструменту сталого управління міськими ресурсами на основі даних. Розглянуто функціональну структуру та завдання концепту «розумне місто». Проаналізовано відмінності між «розумними містами» та традиційними дослідженнями міської науки. В другому розділі кваліфікаційної роботи досліджено цілі сталого міського розвитку в умовах «розумних міст». Розглянута методологія «розумного міста» з інтенсивним використанням даних. Описано «розумні» міські обчислення на основі даних. Проаналізоване кероване даними прогнозування для потреб «розумних міст». Висвітлено кероване даними моделювання для потреб «розумних міст». Досліджено керовані даними системи супроводу процесів прийняття рішень «розумних міст». В третьому розділі кваліфікаційної роботи подано сценарії застосування методів керованих даними у підсистемах «розумного міста». Описано прототипування сталого «розумного міста» майбутнього. Проаналізовано застосування методів аналізу даних для підтримки управлінських рішень.

## ANNOTATION

Forming the "Smart City" Concept Based on Data-Driven Methods // Qualification work of the educational level «Bachelor» // Orest Savyk // Ternopil Ivan Pulyu National Technical University, Computer and Information Systems and Software Engineering Faculty, Computer Sciences Department, group SN-42 // Ternopil, 2026 // P. 71 , fig. – 14, tabl. – 2, chair. – 16, annexes. – 0, references – 76.

**Keywords:** analytical data processing, urban management, urban systems modeling, urban development forecasting, sustainable urban development, data-driven management, digital transformation of the urban environment.

The qualification work is devoted to the formation of the concept of a “smart city” based on data-driven methods. The first chapter of the qualification work presents the theoretical and methodological foundations of developing the “smart city” concept. It highlights the conceptualization of the “smart city” structure as a tool for sustainable management of urban resources based on data. The functional structure and objectives of the “smart city” concept are considered. Differences between “smart cities” and traditional urban science research are analyzed.

The second chapter of the qualification work examines the goals of sustainable urban development in the context of “smart cities”. The methodology of a data-intensive “smart city” is considered. Data-based urban computing is described. Data-driven forecasting for the needs of “smart cities” is analyzed. Data-driven modelling for the needs of “smart cities” is presented. Data-driven decision-support systems for “smart cities” are investigated.

The third chapter of the qualification work presents application scenarios of data-driven methods in subsystems of a “smart city”. The prototyping of a sustainable “smart city” of the future is described. The application of data analysis methods for supporting managerial decision-making is analyzed.

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ООН – Організація Об'єднаних Націй.

ЦСР ООН – Цілі сталого розвитку ООН.

ШІ – штучний інтелект.

ІоТ (англ. Internet of Things) – Інтернет речей.

ML (англ. Machine Learning) – машинне навчання.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
<b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ</b>	
<b>КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНОГО МІСТА» НА ЗАСАДАХ</b>	
<b>УПРАВЛІННЯ, КЕРОВАНОГО ДАНИМИ.....</b>	
	11
1.1 Теоретико-методологічні засади розбудови концепту «розумне місто» .....	11
1.2 Концептуалізація структури «розумного міста» як інструменту сталого управління міськими ресурсами на основі даних .....	13
1.3 Функціональна структура та завдання концепту «розумне місто»....	16
1.4 Відмінності між «розумними містами» та традиційними дослідженнями міської науки.....	17
1.4.1 Мультиmodalьні методи на основі даних для «розумних міст» ..	18
1.4.2 Масштаб змінює проблеми у складних «розумних містах» .....	20
1.4.3 Моделювання та обчислення для потреб «розумних міст» .....	22
1.5 Висновок до першого розділу .....	23
<b>РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ</b>	
<b>УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ «РОЗУМНОГО</b>	
<b>МІСТА» ЗА ДОПОМОГОЮ ДАНИХ .....</b>	
	24
2.1 Цілі сталого міського розвитку «розумних міст» .....	24
2.2 Методологія «розумного міста» з інтенсивним використанням даних .....	29
2.3 «Розумні» міські обчислення на основі даних .....	32
2.4 Кероване даними прогнозування для потреб «розумних міст» .....	33
2.5 Кероване даними моделювання для потреб «розумних міст».....	35
2.6 Керовані даними системи супроводу процесів прийняття рішень «розумних міст».....	38
2.7 Висновок до другого розділу .....	40

РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ТА ПРИКЛАДНІ СЦЕНАРІЇ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ, КЕРОВАНИХ ДАНИМИ, В ГАЛУЗЕВИХ ПІДСИСТЕМАХ «РОЗУМНОГО МІСТА».....	42
3.1 Сценарії застосування методів керованих даними у підсистемах «розумного міста».....	42
3.2 Прототипування сталого «розумного міста» майбутнього.....	45
3.3 Застосування методів аналітичного опрацювання даних для підтримки управлінських рішень у «розумних містах» .....	47
3.3.1 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах просторового планування «розумних міст» .....	47
3.3.2 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах міського управління «розумних міст» .....	48
3.3.3 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумного» транспорту .....	49
3.3.4 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» екології .....	49
3.3.5 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» енергетики.....	50
3.3.6 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» охорони здоров'я.....	51
3.3.7 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» економіки .....	52
3.4 Проблеми та перспективи розвитку концепції «розумного міста» на основі методів аналітичного опрацювання даних.....	53
3.5 Висновок до третього розділу .....	55
РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	56
4.1 Моделювання та оцінювання життєздатності міських систем в умовах екстремальних деструктивних впливів .....	56
4.2 Забезпечення безпеки життєдіяльності та охорона праці під час оперування мережевими IoT-компонентами .....	59

4.3 Висновок до четвертого розділу .....	61
ВИСНОВКИ.....	62
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ.....	64

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний світ перебуває на етапі стрімкої урбанізації – за прогнозами ООН, до 2050 року понад 70% населення проживатиме в містах, які генеруватимуть понад 80% світового валового внутрішнього продукту та водночас понад 70% глобальних викидів парникових газів [1]. Сучасні міста є складними системами, розвиток яких зумовлений багаторівневою взаємодією між антропогенними та екологічними компонентами [2]. Динамічна взаємодія між міським населенням та муніципальними ресурсами вимагає безперервного балансування економічних, соціальних та екологічних процесів. Наприклад, нерівномірний розподіл фінансових ресурсів провокує соціальну нестабільність [3], а надмірне споживання енергії стимулює кліматичні зміни та посилює екологічні ризики [4]. Враховуючи деструктивний характер цих явищ, модернізація міського простору гостро потребує впровадження концепцій сталого розвитку [3], які впроваджують ефективне використання та раціональний розподіл ресурсів [5]. Такий вектор повністю відповідає Ціллю сталого розвитку ООН № 11 щодо забезпечення інклюзивності, безпеки, життєстійкості та сталості міст [1], що зумовлює активну підтримку створення уніфікованої концептуальної структури розвитку міст у наукових колах [6]. Виникнення таких критичних викликів, як транспортне перевантаження, забруднення повітря та соціально-економічна нерівність, вимагає розробки раціональних рішень. Зростання технологічного потенціалу уможлиблює генерацію масштабних масивів даних про функціонування міського середовища. Тому формування концепту «розумне місто» на основі методів керованих даними є актуальним напрямком сучасних досліджень.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр» є теоретичне обґрунтування та розроблення підходів до формування концепції «розумного міста» на основі методів, що базуються на опрацюванні та аналізі даних для підвищення ефективності

управління міськими системами та забезпечення їх сталого розвитку. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати ряд завдань, зокрема:

- Проаналізувати теоретико-методологічні засади формування концепції «розумного міста» та визначити її ключові складові.
- Дослідити особливості управління міськими системами на основі даних та встановити роль аналітичного опрацювання інформації у забезпеченні сталого розвитку міст.
- Узагальнити інформаційно-технологічні підходи до моделювання, прогнозування та підтримки прийняття рішень у міському середовищі.
- Розглянути практичні сценарії застосування методів, що базуються на аналізі даних, у різних підсистемах міського управління.
- Визначити основні проблеми та перспективи розвитку концепції «розумного міста» на основі методів, керованих даними.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у можливості використання розроблених підходів і узагальнень для вдосконалення процесів управління міськими системами на основі даних, підвищення ефективності прийняття управлінських рішень у різних галузевих підсистемах міського середовища, а також для обґрунтування впровадження аналітичних методів опрацювання інформації в задачах планування, моніторингу та прогнозування розвитку міської інфраструктури. Отримані результати можуть бути застосовані в діяльності органів місцевого самоврядування, проектних та аналітичних установ для підтримки сталого розвитку міських територій.

## РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ «РОЗУМНОГО МІСТА» НА ЗАСАДАХ УПРАВЛІННЯ, КЕРОВАНОГО ДАНИМИ

### 1.1 Теоретико-методологічні засади розбудови концепту «розумне місто»

В урбаністичних дослідженнях «розумне місто» – це складна система з високим рівнем нелінійних взаємодій між просторовими, соціальними, економічними та екологічними елементами [3]. Перманентна взаємодія населення з інфраструктурними мережами обумовлює самоорганізацію муніципального середовища [7], що вимагає залучення високоточних методів моделювання. Традиційні аналітичні інструменти неспроможні адекватно формалізувати ці властивості, що створює перешкоди на шляху до сталого розвитку (див. рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Сталий розвиток «розумних міст» на основі даних [3]

Динамічні характеристики міст ускладнюють прогнозування системних збурень, що яскраво проілюстрував деструктивний вплив пандемій на «розумну» охорону здоров'я та «розумну» інфраструктуру [8]. Стрімка зміна споживчої поведінки вимагає координації ресурсів в умовах надвеликого за обсягом масиву параметрів [9]. У дослідженні [3] сформовано комплексний огляд досягнень у сфері сталого урбаністичного розвитку та концептуалізовано місто як уніфіковану теоретичну «розумну» структуру (див. рисунок 1.2), що систематизує методи, керовані даними, для сталого функціонування «розумних» міських систем.

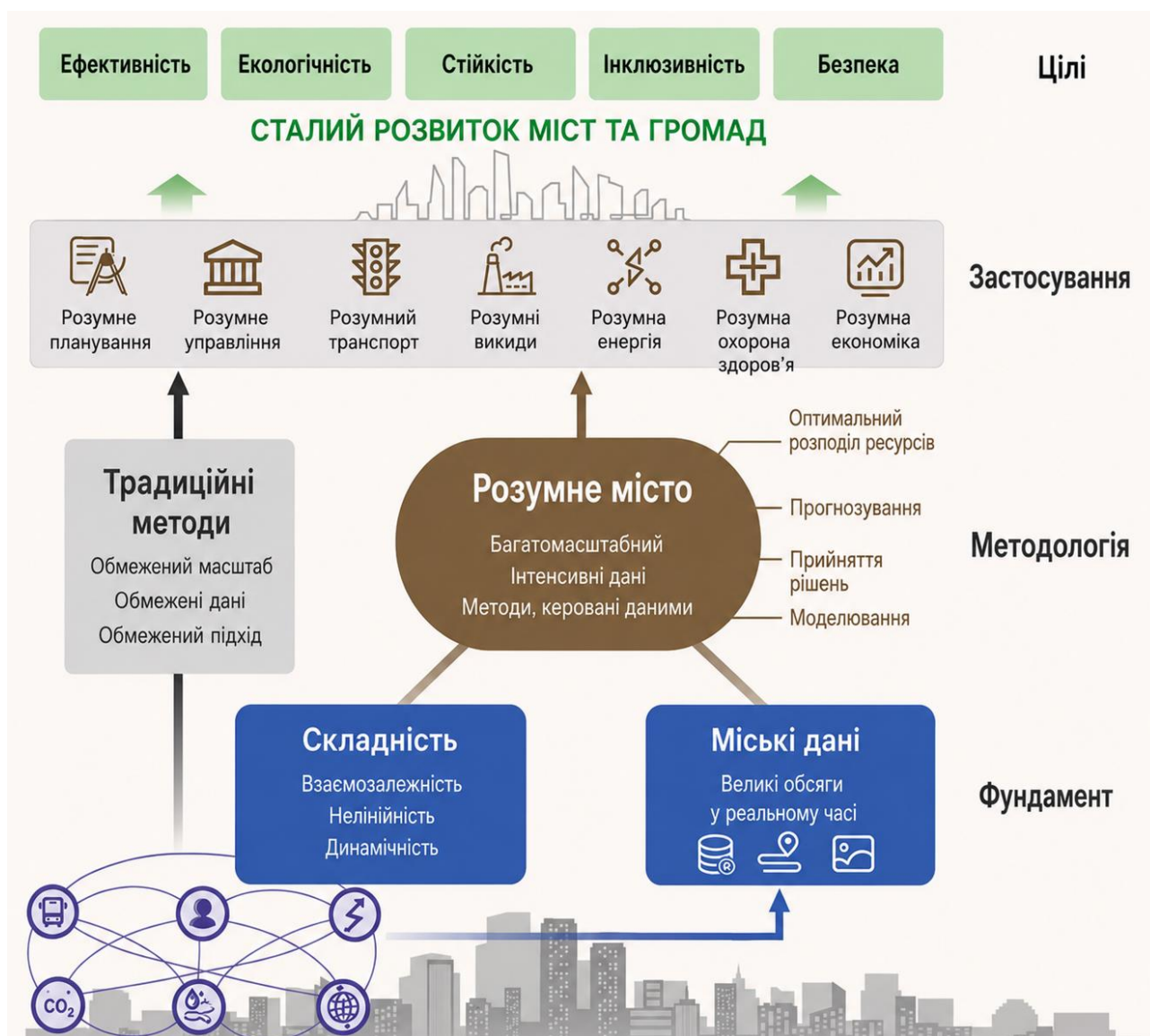


Рисунок 1.2 – Узагальнена структура «розумного міста» [3]

Окрім того, класичні підходи обмежені дефіцитом емпіричних даних – розробка планів «розумного» землекористування по частки базується на поодиноких прецедентах, а аналіз «розумного» енергоспоживання звужується до нерепрезентативних вибірок [3].

Стрімке накопичення великих за обсягом масивів інформації робить методи, керовані даними, критично важливими інструментами для дослідження «розумної» міської інфраструктури [10]. Досягнення в галузі обчислювальних технологій та ШІ дають змогу вивчати міські процеси на безпрецедентному рівні деталізації [11], забезпечуючи ефективне моделювання процесів управління «розумними» міськими системами [12].

Проте проектування таких методів стримується проблемами інтеграції різнорідних, мультимодальних та дискретних даних із наявними пропусками. Подолання комплексних викликів потребує відмови від ізольованого вирішення окремих завдань на користь наскрізного підходу: від виявлення проблем до симуляції сценаріїв та оптимізації рішень.

Ураховуючи імперативи ЦСР ООН [3], системна складність міського середовища перешкоджає оптимізації обмежених муніципальних ресурсів. Масштабні масиви просторово-часових даних формують основу концепту «розумне місто», забезпечуючи математичне й комп'ютерне моделювання та симуляцію міських процесів і оцінювання альтернативних сценаріїв управління. Це безпосередньо сприяє раціоналізації розподілу ресурсів і впровадженню прикладних рішень для сталого функціонування «розумних» мегаполісів.

## **1.2 Концептуалізація структури «розумного міста» як інструменту сталого управління міськими ресурсами на основі даних**

Функціонування «розумного міста» пов'язане з експлуатацією обмежених муніципальних ресурсів – земельних площ, інфраструктурних мереж, енерго- та водопостачання, за які конкурують технічні засоби, промисловість, транспорт і

населення [13]. В умовах демографічного зростання пошук оптимальних шляхів використання обмеженого ресурсного потенціалу для задоволення потреб суспільства без шкоди для майбутніх поколінь стає фундаментальним завданням сталого розвитку міських систем.

Проте системна складність міського середовища перешкоджає раціональному розподілу ресурсів: через нелінійний характер процесів ізольована оптимізація окремого компонента може спричинити деструктивні наслідки в інших підсистемах. Вирішення цієї суперечності спирається на положення:

- теорії складних систем;
- дослідження операцій;
- кібернетику;
- теорію хаосу.

Як реакція на цю потребу сформовано концептуальну структуру «розумне місто», що використовує високопродуктивні обчислювальні ресурси для обробки великих за обсягом масивів просторово-часових даних, інтегруючи методи статистичного, машинного та симуляційного моделювання.

Ідея сприйняття міста як живого організму, здатного до еволюції, бере початок від праць Патріка Геддеса [14]. Вона трансформувалася в сучасну теорію системної складності міст [3]. Концепт «розумного міста» спрямований на виявлення глибинної динаміки й латентних взаємозв'язків міських процесів для максимізації їхньої координації на основі раціонального аналітичного опрацювання даних.

Відповідно до базової інформаційно-технологічної архітектури (див. рисунок 1.3), сталий розвиток виступає головною ціллю, великі за обсягом масиви міських даних створюють інформаційний фундамент, а системна складність визначає характер викликів [15].



Рисунок 1.3 – Концептуальна структура «розумного міста» [3]

Реалізація концепту досягається через синергію цих складових:

- аналітичного опрацювання даних дає можливість своєчасно виявляти деструктивні чинники;
- потреба у сталості фокусує увагу на проблемах розподілу ресурсів;
- подолання складності забезпечується аналітичними підходами.

Таким чином, «розумне місто» є уніфікованою теоретико-практичною структурою для оптимізації міських ресурсів за допомогою методів, керованих даними.

### 1.3 Функціональна структура та завдання концепту «розумне місто»

Для концептуальної структури «розумного міста» муніципальні ресурси, зокрема, земельні площі, транспортні мережі, житловий фонд, енерго- та водопостачання, є первинним об'єктом наукового пошуку. На рисунку 1.4 зображено функціональну структуру та завдання концепту «розумне місто».

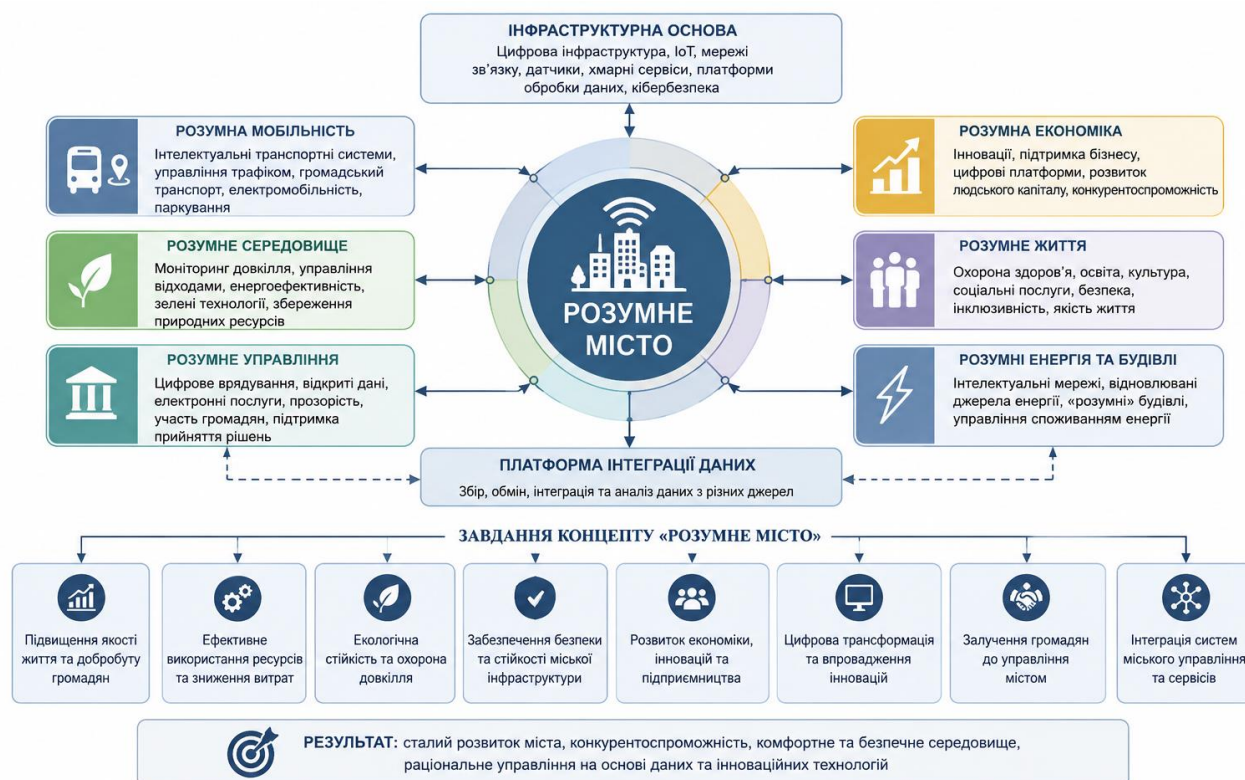


Рисунок 1.4 – Функціональна структура та завдання концепту «розумне місто»

З метою забезпечення сталого розвитку досліджуються процеси оптимізації міського ресурсного потенціалу, що охоплює аналіз просторового зосередження ресурсів, оцінювання актуальних суспільних потреб та визначення життєздатності системи у довгостроковій перспективі [3]. Для формування цілісної наукової картини сфера аналітичного опрацювання розширюється на етапи видобутку, циркуляції, регенерації та соціальної діяльності, яка пов'язана зі споживанням міських ресурсів.

Практична сфера застосування концепту «розумного міста» охоплює прикладні рішення, критично важливі для міської сталості. Наприклад, масштабний інфраструктурний проект реконструкції транспортної системи в Бостоні, витрати на який склали двадцять два мільярди доларів США та чотириста п'ятдесят тисяч кубічних метрів цементу, продемонстрував деструктивні наслідки дефіциту попереднього планування та системного оцінювання [3]. Тому для концепту «розумного міста» пропонується розмежування двох категорій завдань:

- Теоретико-урбаністичні – спрямовані на виявлення об'єктивних закономірностей функціонування міського середовища.
- Обчислювально-урбаністичні – зосереджені на розробці високоточних прогностичних моделей у режимі реального часу та алгоритмів ухвалення рішень на основі методів, керованих даними.

#### **1.4 Відмінності між «розумними містами» та традиційними дослідженнями міської науки**

Відмінності між «розумними містами» та традиційними дослідженнями міської науки визначають перехід від статичного та фрагментарного опису міських процесів до динамічного, наскрізного моделювання. При формуванні концепту «розумного міста» на основі методів, керованих даними, можна виділити три ключові методологічні розбіжності з класичною урбаністикою [3]:

- Перехід від ретроспективного аналізу до управління в режимі реального часу. Традиційна урбаністика здебільшого спирається на статичні статистичні дані, наприклад, періодичні переписи населення, що фіксують минулі стани систем. Підхід, керований даними, оперує безперервними потоками інформації від сенсорів та систем моніторингу, надаючи можливість прогнозувати та коригувати розподіл ресурсів у теперішньому часі.

– Подолання ізольованості міських підсистем. Традиційно класичні дослідження розглядають транспорт, енергетику чи екологію як автономні об'єкти. Модель «розумного міста» інтегрує ці шари в єдину структуру, що дає змогу враховувати нелінійні ефекти, наприклад, як зміна інтенсивності трафіку впливає на локальне забруднення повітря та споживання енергії суміжною інфраструктурою.

– Зміна дослідницької парадигми від гіпотез до пошуку латентних закономірностей. Замість тестування обмежених теоретичних моделей на малих вибірках, сучасні інтелектуальні методи аналітичного опрацювання здатні самостійно виявляти приховані взаємозв'язки та аномалії всередині масивних багатовимірних набір даних.

Таким чином, розгортання цієї концептуальної структури трансформує управління містом із реактивної ліквідації наслідків у проактивне – превентивну оптимізацію на основі обчислювальних моделей [3].

#### **1.4.1 Мультиmodalні методи на основі даних для «розумних міст»**

Як складна система, практично кожна деструктивна ситуація або завдання в «розумному місті» охоплює множину взаємопов'язаних процесів. Наприклад, «розумна» оптимізація транспортних потоків вимагає одночасного врахування функціонального зонування територій, інтенсивності трафіку, конфігурації дорожньої мережі, поведінки пішоходів та вимог екологічної безпеки [3]. Відповідно, вирішення подібних муніципальних завдань потребує комплексного аналітичного опрацювання різнопланових аспектів та глибокого дослідження відповідних масивів інформації.

Традиційні урбаністичні дослідження та класичні методи муніципального менеджменту значною мірою спираються на заздалегідь визначені припущення та теоретичні концепції. Мультиmodalні методи на основі даних для «розумних міст» зображено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Мультиmodalні методи на основі даних для «розумних міст»

Зазвичай керівники міських структур і дослідники прогнозують короткострокову та довгострокову еволюцію міського середовища, а також ухвалюють управлінські рішення на основі класичних фізичних або емпіричних законів. Зокрема, просторове переміщення населення моделюється за аналогією до закону всесвітнього тяжіння, а рівень привабливості різних міських локацій описується за допомогою закону Ципфа [16]. Проте, з одного боку, такі класичні закономірності нерідко виявляються неадекватними реальним емпіричним даним у специфічних сценаріях через надмірне спрощення початкових припущень. З іншого боку, спроби механічного поєднання різних законів для вирішення комплексного завдання призводять до накопичення значних системних помилок [3].

На відміну від традиційних підходів, концептуальна структура «розумного міста» орієнтована на використання реальних мультиmodalних даних, а не на результати теоретичного моделювання чи приблизного оцінювання. Завдяки агрегації колосальних обсягів просторово-часової інформації з'являється можливість здійснювати точніше прогнозування, моделювання та управління міськими процесами за допомогою потужних обчислювальних методів. При цьому, порівняно з нещодавніми досягненнями в

галузі обробки природної мови та теорії ігор [17], прикладні завдання в межах міського середовища є значно складнішими, оскільки вони оперують гетерогенними даними та вимагають формалізації набагато заплутаніших внутрішніх механізмів взаємодії.

### 1.4.2 Масштаб змінює проблеми у складних «розумних містах»

На відміну від інших наукових галузей, де прикладні рішення для дрібномасштабних «розумних» завдань можуть бути легко екстрапольовані на великомасштабні системи, у контексті міського середовища чинник масштабу потребує значно більшої уваги. Це зумовлено тим, що збільшення масштабів радикально змінює саму природу досліджуваної проблеми (див. рисунок 1.6), а навіть незначне розширення меж системи може призвести до виникнення емерджентних (непередбачуваних) системних ефектів та несподіваних форм поведінки об'єкта [18].



Рисунок 1.6 – Вплив масштабу на складність проблем в «розумних містах»

Традиційні урбаністичні дослідження та інженерні підходи переважно базуються на ізольованому вивченні окремих компонентів, ігноруючи при

цьому комплексну природу системної складності міського середовища [3]. Наприклад, для цивільної інженерії оптимізація роботи світлофорних об'єктів досліджується вже впродовж багатьох десятиліть. Попередні розвідки дали змогу створити обширну множину ефективних методів локального керування світлофорами на поодиноких перехрестях задля мінімізації затримок транспорту. Проте, коли виникає завдання синхронізованого координаційного управління тисячею взаємопов'язаних світлофорних об'єктів, проблема переходить із площини банальної мінімізації затримок у площину забезпечення стабільного функціонування всієї дорожньо-транспортної мережі загалом. Це вимагає врахування значно більшої кількості чинників, як от пропускна здатність накопичувальних смуг (буферизація транспортних засобів) та утворення критичних заторів (вузьких місць) у структурі «розумної» транспортної мережі [3].

На такому рівні масштабування ключовим науково-практичним завданням стає отримання синхронізованих просторово-часових даних спостереження з усіх перехресть одночасно та формування відповідних точкових керуючих впливів. За наявності повного масиву таких емпіричних даних навіть базові алгоритми світлофорного регулювання, наприклад, розподіл фаз зеленого світла пропорційно до щільності транспортного потоку, здатні демонструвати високу ефективність, що вкотре підтверджує критичну важливість залучення великих за обсягом масивів міських даних.

З огляду на це, концептуальна структура «розумного міста» має здійснити перехід від традиційних редукціоністських підходів до врахування емерджентних характеристик складних систем [3]. Завдяки інтеграції прескриптивного (приписувального) та генеративного моделювання, «розумне місто» дає можливість ефективно вирішувати муніципальні завдання на різних рівнях масштабування, адаптуючи управлінські рішення до унікальної динаміки та специфіки взаємодій у міському середовищі.

### 1.4.3 Моделювання та обчислення для потреб «розумних міст»

Проведення експериментів безпосередньо в межах усього мегаполіса зазвичай є або технічно неможливим, або економічно недоцільним. Через це ефективним методологічним підходом є побудова адекватної моделі, яка повністю відповідає реальному міському середовищу, з її подальшим використанням для проведення симуляцій, порівняльного аналізу можливих наслідків та вибору життєздатніших управлінських рішень (див. рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Моделювання та обчислення для потреб «розумних міст»

Традиційні урбаністичні дослідження зазвичай не надають можливість повною мірою реалізувати потенціал методів симуляційного моделювання. Наприклад, як наближені моделі для опису просторового зростання міст переважно застосовуються спрощені інструменти, як от клітинні автомати, а результати моделювання на рівні окремих «розумних» будівель, зокрема, щодо обсягів енергоспоживання, механічно екстраполюються на масштаби всього міста [3]. Надмірне спрощення загальноміського контексту, ігнорування поведінкових чинників, пов'язаних із життєдіяльністю населення, а також

відсутність інтегрованого підходу до взаємодії різних міських компонентів суттєво знижують ступінь адекватності та точність таких симуляцій.

Для концепту «розумного міста» особливий акцент робиться на розширенні можливостей «розумних» міських обчислень та комплексного моделювання. Методи ML, особливо генеративні інтелектуальні технології [19], дали змогу значно підвищити виразні можливості моделей та забезпечити створення міських симуляцій, максимально наближених до реального контексту. Яскравим прикладом цього є досягнення у сфері застосування навчання з підкріпленням для оптимізації транспортних потоків [3] та координації світлофорного регулювання [20]. Водночас наявність високоточних міських даних у режимі реального часу дає можливість фіксувати актуальний стан системи для оперативної калібрування симуляційних моделей та безпосереднього формування управлінських стратегій, як-от обґрунтування механізмів запровадження протиепідемічних обмежень освіти на основі загальноміських емпіричних даних під час пандемії [21]. Стрімке зростання обчислювальної потужності та модернізація технологічної інфраструктури зумовлюють зміну наукової парадигми, де високоточні обчислення та наскрізне симуляційне моделювання набуватимуть вирішального значення у найближчій перспективі.

## **1.5 Висновок до першого розділу**

В першому розділі кваліфікаційної роботи подано теоретико-методологічні засади розбудови концепту «розумне місто». Висвітлено концептуалізацію структури «розумного міста» як інструменту сталого управління міськими ресурсами на основі даних. Розглянуто функціональну структуру та завдання концепту «розумне місто». Проаналізовано відмінності між «розумними містами» та традиційними дослідженнями міської науки.

## **РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТРУМЕНТАРІЙ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ «РОЗУМНОГО МІСТА» ЗА ДОПОМОГОЮ ДАНИХ**

### **2.1 Цілі сталого міського розвитку «розумних міст»**

Місто як складна система поєднує множину структурних компонентів – населення, житло, енергетику, транспорт, екологію, охорону здоров'я, чії цільові орієнтири сталого розвитку є глибоко взаємопов'язаними, а методологічні підходи до їх реалізації – подібними. Наприклад, забезпечення доступного житла та інклюзивних транспортних систем відповідно до ЦСР ООН спрямоване на підвищення інклюзивності міського середовища через раціональний перерозподіл муніципальних ресурсів. На основі цієї узгодженості у дослідженні [3] виокремлено множину інтегральних цілей сталого розвитку міських систем:

- ефективність;
- екологічність;
- життєстійкість;
- інклюзивність;
- безпека.

Практична реалізація цих цілей в умовах нелінійних реакцій міського середовища супроводжується ризиками непередбачуваних наслідків. Зокрема, просторовий дисбаланс під час озеленення територій може спричинити екологічну джентрифікацію, що посилює соціальну нерівність. Труднощі виникають також на етапах моніторингу, оцінювання наслідків та досягнення суспільного консенсусу. Концептуальна структура «розумного міста» (див. рисунок 2.1) долає ці виклики завдяки методам, керованим даними, які забезпечують точне прогнозування попиту, превентивне виявлення системних збурень та оптимізацію розподілу обмежених ресурсів [3].



Рисунок 2.1 – Цілі сталого розвитку міст та відповідні проблеми, які можна вирішити за допомогою «розумних міст» [3]

У контексті сталого міського розвитку, відповідно до орієнтирів ЦСР ООН № 11.b, важливим аспектом є ефективність раціонального розподілу та використання муніципальних ресурсів задля максимізації продуктивності, мінімізації відходів та зниження антропогенного впливу. Існує обширний перелік індикаторів для оцінювання раціональності землекористування, використання природних ресурсів, енергоефективності та транспортної політики [3]. Проте класичні аналітичні підходи нерідко є фрагментарними й обмеженими через дефіцит та низьку оперативність оновлення статистичних даних, складні міжсекторальні обмеження міського господарства, а також слабку координацію зацікавлених сторін при модернізації інфраструктури.

Концептуальна структура «розумного міста» докорінно змінює процеси муніципального управління. Розвиток IoT-технологій спрощує збір та інтеграцію колосальних масивів гетерогенних міських даних [22] від:

- сенсорів;
- транспорту;
- інженерних споруд;
- населення.

Еволюція аналітичних методів ШІ, керованих даними, надає можливість виявляти латентні процеси всередині складних міських систем [3]. Своєю чергою, функціонування централізованих інформаційно-технологічних платформ забезпечує оперативний обмін інформацією та реалізацію високоточних симуляційних моделей у режимі реального часу [23].

Екологічність виступає базовим орієнтиром сталого розвитку міст, які споживають значні обсяги ресурсів і створюють антропогенні загрози для населення [3]. Цей критерій поєднує два аспекти:

- екологізацію простору – захист екосистем, розвиток зелених зон та інфраструктури;
- екологізацію життєдіяльності – циркулярна економіка, чисте виробництво, енергоефективність.

Досягнення екологічності базується на трьох універсальних етапах: секторальному узгодженні даних для формування комплексних індексів, моніторингу багатофакторних екологічних ризиків для ухвалення рішень та залученні громадськості задля забезпечення соціально-екологічної справедливості [3].

Концептуальна структура «розумного міста» має вирішальне значення для реалізації стратегічних завдань ЦСР № 11.7. Ця модель забезпечує безперервний моніторинг екологічних параметрів у режимі реального часу, зокрема якості повітря, води та рівня енергоспоживання [24]. Сформовані масиви просторово-часової інформації інтегруються в єдину аналітичну систему для міжсекторального узгодження даних та симуляційного моделювання превентивних управлінських рішень. Крім того, залучення аналітичних методів ШІ, керованих даними, сприяє побудові прозорого процесу ухвалення колективних рішень із залученням міської громади [3].

Зростання масштабів міст і їхньої системної складності пропорційно збільшує потенційні збитки від природних катаклізмів, соціально-економічних потрясінь та інфраструктурного дефіциту [3]. Це виводить життєстійкість – здатність системи чинити опір, відновлюватися та адаптуватися до зовнішніх

збурень – у розряд центральних орієнтирів сталого розвитку [3]. Створення такої інформаційно-технологічної архітектури охоплює:

- стратегічне планування землекористування;
- посткризову реконструкцію;
- адаптивну трансформацію управлінських структур.

Проте наразі бракує стандартизованих процедур оцінювання життєстійкості, а раціональний розподіл ресурсів і розробка планів відновлення взаємопов'язаних мереж на основі спрощених принципів в умовах криз є майже неможливими.

Концептуальна структура «розумного міста» вирішує ці проблеми за допомогою методів, керованих даними. Використання репрезентативних масивів інформації – дистанційного зондування, даних мобільних операторів, дає змогу прогнозувати кризові явища та формувати системи раннього попередження [25]. Під час катастроф інтеграція міських даних у режимі реального часу забезпечує моніторинг переміщення населення й оперативне надання допомоги. Моделі на основі ШІ здатні миттєво генерувати точні рекомендації для протидії каскадним процесам. Зрештою, «розумне місто» максимізує оптимізаційний потенціал як для довгострокового просторового планування, так і для короткострокового розгортання логістики доставки допомоги [3].

Інклюзивність є фундаментальною характеристикою міст згідно з положеннями ЦСР № 11, що формується під впливом просторових, соціальних та економічних чинників [26]. Просторова інклюзивність забезпечує забезпечення базових потреб – доступне житло, водопостачання, санітарія тощо [3]. Соціальна – орієнтована на інтеграцію маргіналізованих верств для запобігання суспільним потрясінням [27]. Економічна – полягає у створенні робочих місць та рівному доступі до результатів зростання [28]. На відміну від життєстійкості, яка орієнтована на надійність інфраструктури, інклюзивність акцентує увагу на соціальній справедливості. Розвиток цього напрямку потребує

глибокого аналізу умов проживання громадян для нівелювання суб'єктивних чинників у муніципальному управлінні [3].

Застосування підходів, керованих даними, для концепту «розумного міста» дає можливість ефективно ідентифікувати вразливі групи та депресивні райони за допомогою дистанційного зондування й даних мобільних операторів, детально моделюючи їхні локальні проблеми [29]. Проектування інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» інтегрує інструменти суспільного залучення безпосередньо на етапах збору та аналітичного опрацювання даних. Це дає змогу використовувати методи прогностичного моделювання для симуляції потенційних наслідків управлінських стратегій та вибору оптимальних рішень [3]. Крім того, «розумне місто» виступає каталізатором розширення прав громадськості через надання цифрових платформ для взаємодії, що забезпечує реальну участь громадян у процесах муніципального врядування. Близько 60% міських жителів у країнах, що розвиваються, ставали жертвами злочинів впродовж останніх п'яти років [3]. Прояви насильства не виникають спонтанно, а стимулюються деструктивним станом міського середовища, виключенням громадян із процесів розподілу благ та дефіцитом політичної участі. Інститути кримінальної юстиції самостійно не здатні забезпечити стале управління безпекою. Громадська безпека потребує розбудови партнерства між органами самоврядування та локальними громадами.

Безперервний моніторинг міського середовища в режимі реального часу в межах концепту «розумного міста» виступає ефективним інструментом профілактики злочинності. Оперативне відстеження криміногенної ситуації надає можливість раціонально розподіляти патрульні сили правоохоронних органів та знижувати витрати на розшук правопорушників [30]. Модернізація фізичного простору й ревіталізація депресивних районів отримують вагомі переваги завдяки залученню точних просторово-часових даних [3]. Партисипативне планування територій та адаптація середовища під потреби жителів зміцнюють громадянські цінності. Завдяки репрезентативній доказовій

базі та аналітичним методам, керованим даними, «розумне місто» всебічно обґрунтовує ефективність безпекових програм за допомогою симуляційного моделювання [3].

## **2.2 Методологія «розумного міста» з інтенсивним використанням даних**

Здатність концептуальної структури «розумного міста» вирішувати завдання сталого міського розвитку є одним із ключових методологічних принципів її побудови. У цьому контексті в [3] обґрунтовано переваги наукових підходів, що базуються на інтенсивному використанні даних, а також здійснено аналітичний огляд сучасних досягнень у сфері методологій «розумних» міських обчислень, керованих даними, які застосовуються для оптимізації муніципальних ресурсів у складних міських системах.

Фундаментальною основою концептуальної структури «розумного міста» є використання масштабних масивів муніципальних даних та передових аналітичних інструментів, які дають змогу екстрагувати об'єктивні закономірності та правила функціонування міського середовища з цієї інформації [3]. Напряму урбаністики, що базується на інтенсивному використанні даних, є базовою методологією концепту «розумного міста» (див. рисунок 2.2) та використовує детальне оперування різними формами просторово-часових міських даних у режимі реального часу задля всебічного дослідження й вирішення муніципальних проблем.

Усі подальші прикладні рішення, зокрема симуляційне моделювання міських процесів, розподіл ресурсів та ухвалення рішень щодо забезпечення сталості, розробляються на основі інформації з різноманітних джерел. Сюди належать [31]:

- дані IoT-давачів;
- результати моніторингу соціальних мереж;
- матеріали дистанційного зондування;

- адміністративна звітність;
- веб-контент тощо.

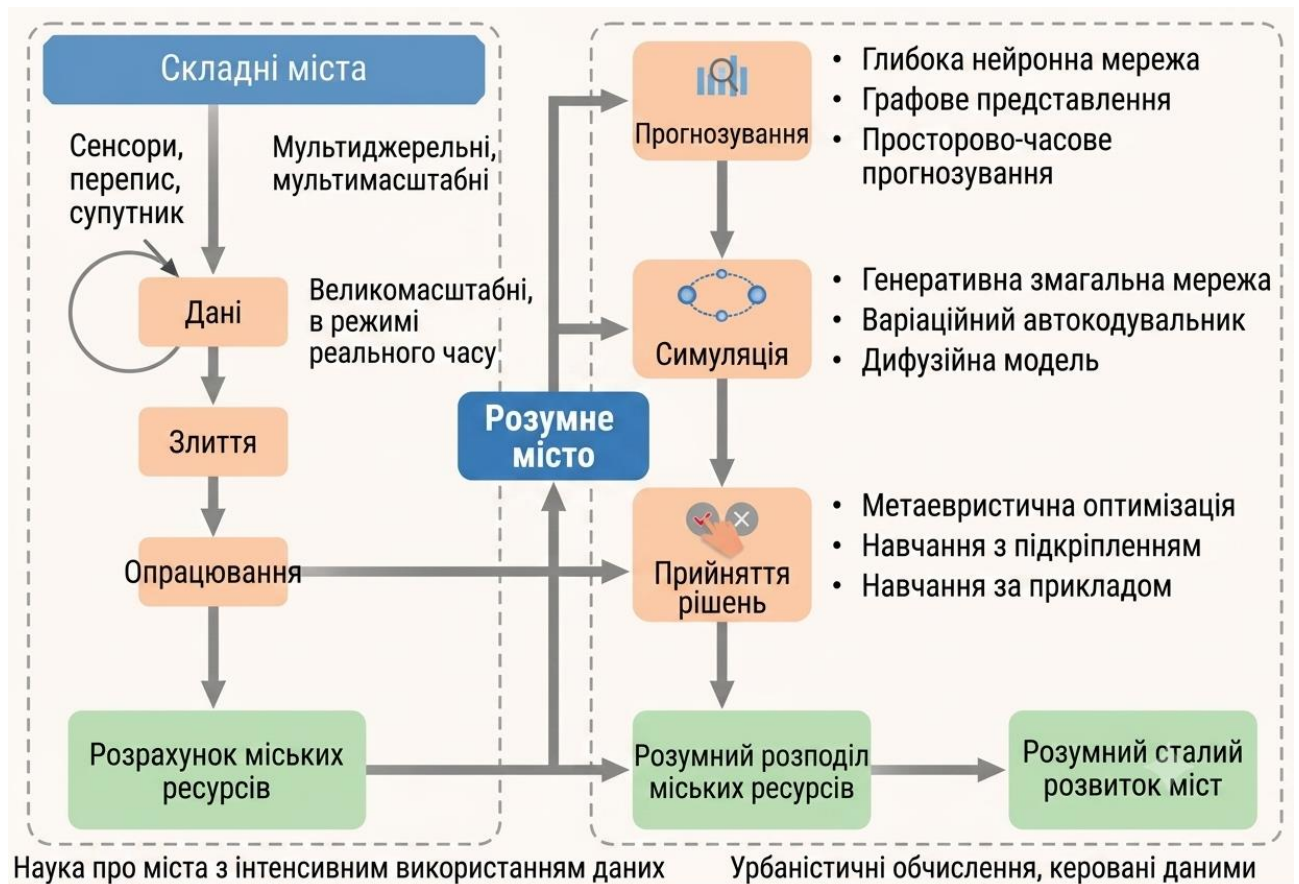


Рисунок 2.2 – Методологія керованого даними «розумного міста» [3]

Таким чином, запропонована концептуальна структура потребує збору та зберігання значних масивів інформації, здатних фіксувати комплексні взаємодії та процеси життєдіяльності в межах «розумних міст», що є фундаментом для її практичного застосування в інтересах сталого розвитку. Методи на основі парадигми «розумних» міських обчислень на основі даних вирішують проблеми розподілу міських ресурсів для досягнення сталого розвитку [3]. Масштабність, а також динамічний характер змін у даних про міські взаємодії виступають ключовими характеристиками напряму урбаністики, що базується на інтенсивному використанні даних. Достовірність та якість зібраної інформації мають вирішальне значення для вирішення проблем сталого розвитку міських територій; відтак пріоритет надається пошуку даних із

високою просторово-часовою дискретністю, зокрема потоковій та мережевій міській інформації в режимі реального часу [32]. Дані, що надходять у режимі реального часу – як от параметри транспортних потоків, активність у соціальних мережах, показники якості атмосферного повітря та рівень електроспоживання – відображають динаміку функціонування міського середовища та поточний стан міст на шляху до досягнення стратегічних цілей. Саме тому безперервне оновлення масштабних масивів міських даних у режимі реального часу є невід’ємною частиною концепту «розумного міста» [3].

Зазначений, керований даними, підхід дає можливість виявляти реальні проблеми у сфері споживання та розподілу ресурсів на основі зібраної оперативної інформації, що реалізується в три етапи. На першому етапі дані з різною просторово-часовою дискретністю та формами подання систематизуються й інтегруються на відповідному рівні. Наприклад, матеріали супутникової зйомки зазвичай фіксуються у вигляді растрових зображень певної роздільної здатності в межах міських координатних сіток, тоді як демографічна та адміністративна інформація збирається відповідно до встановлених меж адміністративно-територіального устрою. Для отримання високоточних оцінок стану муніципальних ресурсів ці дані потребують ретельного та коректного просторового узгодження.

На другому етапі інтегрована інформація з різних джерел піддається математико-статистичній обробці. Цей крок охоплює виділення інформативних ознак із масивів просторових траєкторій, графічних, аудіо- та відеоданих, перетворення часових рядів, а також перерозподіл демографічних показників за геоінформаційними сітками дистанційного зондування тощо [33]. Така обробка спрямована на формування повнішого контекстуального уявлення про просторовий розподіл та динаміку муніципальних ресурсів. На основі оброблених міських даних стає можливим виведення об’єктивних урбаністичних законів, які описують особливості розвитку та масштабування міст, наприклад, закономірності просторового переміщення та мобільності населення [16], а також закони масштабування об’єктів міської інфраструктури.

На заключному етапі оброблений масив інформації залучається до виконання прикладних завдань керованих даними «розумних» обчислень.

Загалом, урбаністика, що базується на інтенсивному аналітичному опрацюванні даних, становить теоретичний фундамент дослідження [3]. Сформований підхід забезпечує побудову наскрізного методологічного шляху, який пов'язує мультидисциплінарні потокові дані складних міських систем із вирішенням практичних обчислювально-управлінських завдань.

### 2.3 «Розумні» міські обчислення на основі даних

Напрямок урбаністики, що базується на інтенсивному аналітичному опрацюванні даних, акцентує увагу на залученні масштабних масивів міської інформації в режимі реального часу для вирішення проблем сталого розвитку територій. Відповідно, задля розв'язання цих завдань у сценаріях складних міських систем, для концептуальної структури «розумного міста» застосовуються відповідні методи «розумних» міських обчислень, керованих даними (див. рисунок 2.3).

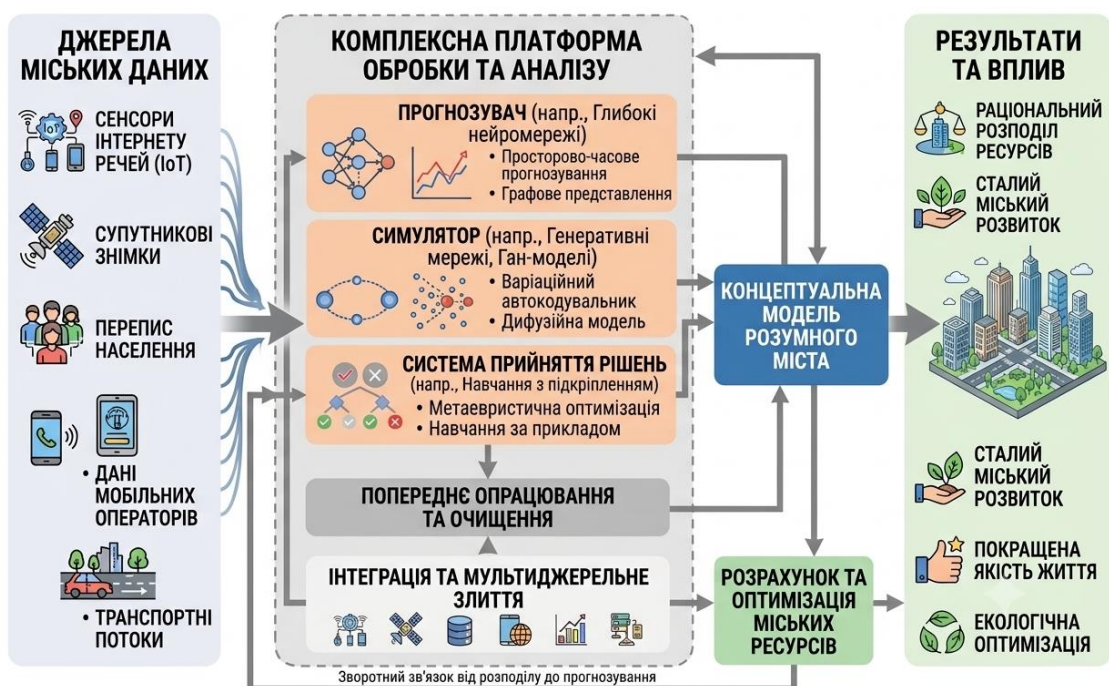


Рисунок 2.3 – «Розумні» міські обчислення на основі даних

Для цього підходу виокремлено ключові класи методів «розумних» міських обчислень, призначених для вирішення завдань сталого розвитку складних міст:

- прогнозування;
- симуляційне моделювання;
- ухвалення рішень.

«Розумні» міські обчислення спрямовані на ефективне інтелектуальне видобування знань з гетерогенних міських даних за допомогою обчислювальних методів, що виступає основою для надання якісних муніципальних послуг та сервісів [3].

#### **2.4 Кероване даними прогнозування для потреб «розумних міст»**

Завдання «розумного» міського прогнозування можна розглядати як процедуру виявлення комплексних взаємозв'язків міського середовища, зокрема оцінювання рівня життєстійкості муніципальної інфраструктури до катастроф або моделювання динаміки поширення пандемій через міські мережі [34]. Однією з важливих проблем у цій сфері є прогнозування обсягу прихованих, незалежних від прямих спостережень, міських ресурсів. Наприклад, точна фіксація фактичних обсягів викидів вуглецю або реальної інтенсивності дорожнього руху є тривалим і малоефективним процесом. Оцінювання цих показників на основі легкодоступних даних, як от рівень споживання електроенергії та газу, матеріали дистанційного зондування та завантаженість паркувальних майданчиків, виступає життєздатною альтернативою для подальшого використання.

Проте отримання високоточних прогнозів ускладнюється тим, що на стан міських ресурсів впливає обширна множина гетерогенних чинників .

## Інтеграція даних, аналітики та прогнозних моделей для підтримки прийняття рішень і підвищення якості міського життя



Рисунок 2.4 – Керване даними прогнозування для потреб «розумних міст»

Традиційні методи оцінювання та прогнозування, зокрема, аналіз часових рядів та моделі статистичної регресії, демонструють свою ефективність, але мають суттєві обмеження при застосуванні до масштабних масивів інформації або складних сценаріїв з обширною множиною взаємопов'язаних змінних [3]. Такі класичні підходи нерідко неспроможні коректно описувати заплутані нелінійні залежності, що характеризують сучасні міські системи.

Сучасні досягнення в галузі глибокого навчання надали можливість значно підвищити точність і ефективність вирішення завдань «розумного» міського прогнозування, особливо в сценаріях, що оперують великими за обсягом наборами даних та складними інтермедіальними взаємодіями [35]. Глибокі нейронні мережі, відомі своєю здатністю апроксимувати складні математичні функції, стали центральним елементом прогностичних моделей. Ці мережі переважно інтегруються з моделями просторово-часового прогнозування, які мають критичне значення для «розумних» міських обчислень. Просторово-часові моделі дають змогу прогнозувати такі динамічні

явища, як транспортні потоки, рівень забруднення довкілля або метеорологічні умови, шляхом фіксації особливостей еволюції цих змінних як у просторі, так і в часі [36].

Наприклад, сучасні моделі прогнозування трафіку використовують графові згорткові нейронні мережі для формалізації просторової структури дорожніх мереж у поєднанні з рекурентними нейронними мережами або механізмами часової уваги для моделювання змін у транспортних шаблонах. Такі інтегровані інформаційно-технологічні архітектури здатні обробляти диверсифіковані джерела інформації, зокрема дані глобальних систем позиціонування, матеріали з камер спостереження та історичні логи, забезпечуючи точні прогнози в режимі реального часу для інформаційної підтримки транспортного планування та менеджменту заторів [3].

Моделі архітектури трансформерів, спочатку розроблені для завдань обробки природної мови, наразі адаптовані для «розумного» міського прогнозування завдяки їхній здатності ефективно враховувати довгострокові залежності в даних [37]. На відміну від традиційних підходів на основі рекурентних мереж, трансформери спираються на механізми самоуваги, що дає їм можливість аналізувати всі елементи послідовності одночасно. Це робить їх особливо ефективними для завдань, які потребують розуміння тривалих інтервальних взаємозв'язків [3]. Завдяки залученню алгоритмів глибокого навчання, концептуальна структура «розумного міста» надає можливість досягти високої точності прогнозування при вирішенні різнопланових проблем сталого розвитку міських територій.

## **2.5 Кероване даними моделювання для потреб «розумних міст»**

Саме лише прогнозування показників сталого міського розвитку не здатне забезпечити макроскопічного бачення наявних проблем, особливо на етапі розробки важливих управлінських та стратегічних рішень. Перспективним методологічним кроком для подолання цього розриву є перехід

від суто прогностичних моделей до наскрізного симуляційного моделювання складних міських систем на основі реальних емпіричних даних [3].

Відображення об'єктивних законів функціонування реальних складних міст у середовищі симуляційних систем дає змогу створити гнучку та відкриту інформаційно-технологічну платформу для вирішення управлінських завдань, зокрема для подальшого формування муніципальної політики. Традиційні методи симуляційного моделювання через дефіцит обчислювальних ресурсів зазвичай обмежені малим масштабом, що унеможлиблює їхню пряму екстраполяцію на складні загальноміські сценарії [3].

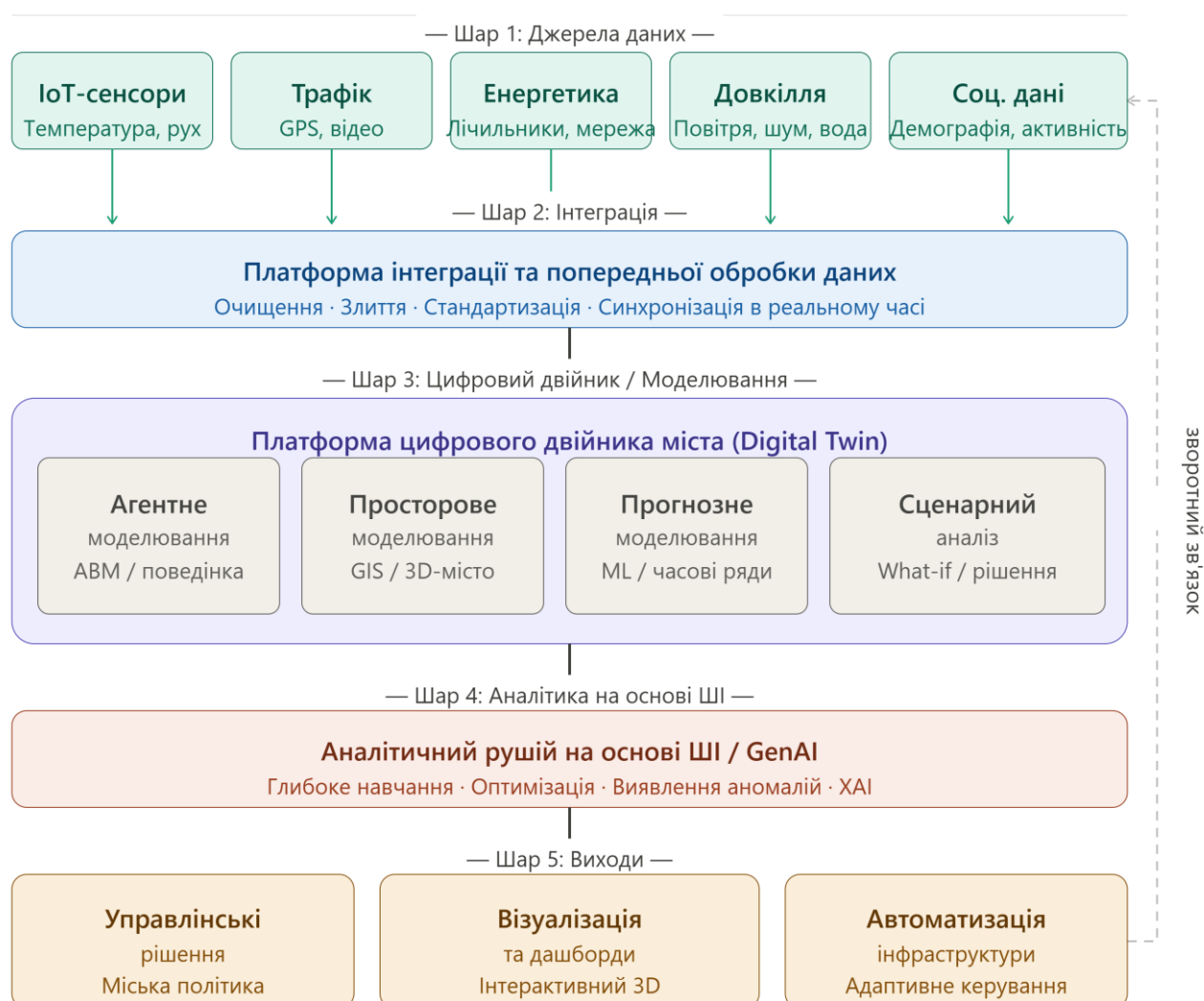


Рисунок 2.5 – Керване даними моделювання для потреб «розумних міст»

Сучасні досягнення в галузі генеративного моделювання продемонстрували високу ефективність при відтворенні мовних структур, часових рядів, просторових траєкторій переміщення населення тощо на основі реальних спостережень із повним збереженням їхніх фундаментальних характеристик [38]. Зокрема, генеративно-змагальні нейронні мережі функціонують за принципом взаємодії генератора, що створює синтетичні дані, та дискримінатора, який оцінює їхню автентичність. Це забезпечує безперервне вдосконалення вихідного результату до його максимального наближення до характеристик реальних масивів інформації.

Варіаційні автокодувальники [3] забезпечують стиснення та перетворення вихідних даних у прихований простір ознак із їхньою подальшою декодуванням для генерації нових варіативних станів, що є вкрай ефективним для моделювання та симуляції різноманітних сценаріїв розвитку міського середовища. Генеративно-змагальне навчання з наслідуванням об'єднує принципи змагальних мереж із підходами навчання за зразками для адекватного відтворення та реплікації складних поведінкових шаблонів населення на основі реальних прикладів. Своєю чергою, дифузійні моделі [39] здійснюють ітераційне перетворення випадкового шуму на структуровані масиви даних, що дає можливість отримувати високоточні симуляції з високим ступенем деталізації складних процесів реального світу.

Для концептуальної структури «розумного міста» зазначені моделі потребують подальшої модифікації, масштабування та комбінування задля їхньої повної адаптації до комплексних взаємодій усередині міського середовища та задоволення вимог міждисциплінарного моделювання даних. Крім того, генеровані в процесі симуляції дані повинні мати високий рівень достовірності для надійного обґрунтування складних інтермедіальних взаємозв'язків у місті та інформаційного забезпечення подальших процесів ухвалення рішень [3].

Через це методи симуляційного моделювання, керовані даними, мають бути наскрізними та міжмасштабними, що надасть можливість інтегрувати

макро- і мікрорівні функціонування міських систем. Вони також повинні підсилюватися прикладними знаннями у сфері сталого міського розвитку для формування максимально точного й достовірного відображення процесів реальних міст.

## **2.6 Керовані даними системи супроводу процесів прийняття рішень «розумних міст»**

Спираючись на інтегровану систему симуляційного моделювання складних міст, концептуальна структура «розумного міста» спрямована на ухвалення стратегічних рішень щодо оптимізації розподілу муніципальних ресурсів для досягнення цілей сталого розвитку. Результативність таких рішень безпосередньо залежить від урахування різноманітних комплексних взаємодій у міському середовищі. Яскравими прикладами цього є:

- координація роботи світлофорних об'єктів на основі моделювання міських транспортних потоків для мінімізації часу очікування та зниження обсягів викидів вуглецю;

- регулювання розподілу потужностей у промислових та побутових електромережах для зменшення витрат при повному задоволенні потреб населення й виробництва;

- оперативне виділення медичних ресурсів категоріям громадян із високим ризиком інфікування під час пандемій;

- проектування маршрутів громадського транспорту й цільових пасажирських перевезень для точної відповідності наявному попиту на переміщення.

Задля підвищення ефективності процесів ухвалення рішень для концепту «розумне місто» доцільно перейти від традиційних алгоритмів оптимізації, що базуються на експертних знаннях, до аналітичних методів, керованих даними (див. рисунок 2.6).

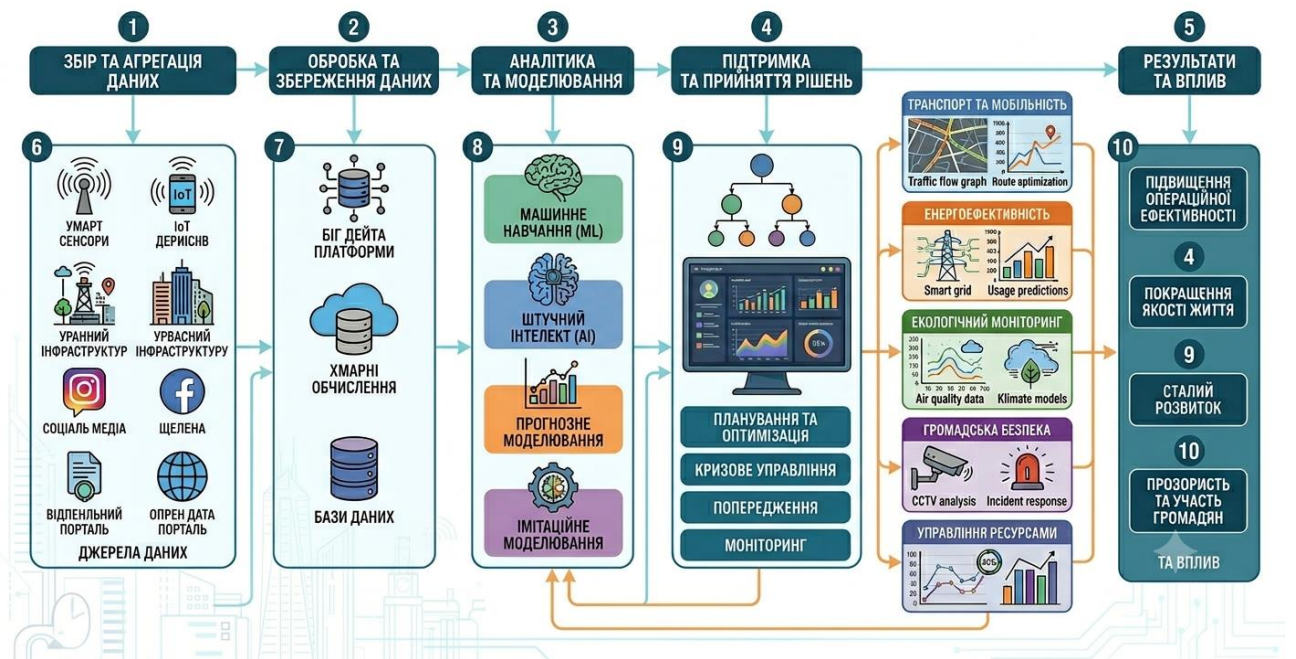


Рисунок 2.6 – Узагальнена структура керованих даними систем супроводу процесів прийняття рішень «розумних міст»

Класичні підходи, як от евристичні та строгі математичні методи оптимізації, почасти виявляються малоефективними при взаємодії зі складними системами через колосальний простір пошуку рішень та необхідність надмірного спрощення моделей, що суттєво знижує їхню точність та дієвість [3].

Сучасні досягнення в галузі розробки моделей навчання з підкріпленням відкривають суттєві перспективи для оптимізації довгострокових результатів сталого розвитку шляхом формування послідовних управлінських рішень за допомогою інтелектуальних агентів. Для концепції навчання з підкріпленням програмні агенти проходять процес навчання для ухвалення оптимальних рішень шляхом безперервної взаємодії з модельованим середовищем. Агенти отримують зворотний зв'язок у формі винагород або штрафів залежно від результативності своїх дій, що дає їм змогу накопичувати досвід та вдосконалювати власні стратегії поведінки з плином часу. Цей методологічний підхід є найбільш адаптованим для вирішення завдань оптимізації міських ресурсів, оскільки дає можливість інтелектуальним агентам орієнтуватися на

досягнення довгострокових сталих результатів, а не лише на отримання миттєвої локальної вигоди [3].

На даний момент часу методи навчання з підкріпленням успішно інтегровані в процеси розв'язання обширного переліку проблем сталого розвитку [3], зокрема:

- розподілу ресурсів у системі охорони здоров'я;
- диспетчеризації енергетичних мереж;
- автоматизованого керування світлофорними об'єктами;
- просторового планування міських територій тощо.

Важливим доповненням до зазначеного підходу є навчання з наслідуванням [40], яке надає агентам можливість засвоювати ефективні алгоритми дій на основі демонстраційних експертних сценаріїв. Замість навчання виключно шляхом спроб і помилок, цей метод забезпечує можливість аналізу та реплікації дій досвідчених фахівців-аналітиків. Такий підхід дає змогу істотно прискорити обчислювальний процес навчання моделей та підвищити результативність функціонування агентів у складних міських сценаріях.

Характерно, що ухвалені рішення та сформовані стратегії можуть бути попередньо протестовані всередині симуляційного контуру, що мінімізує фінансові ризики та часові витрати. У такий спосіб базовий методологічний підхід «розумного міста» функціонує як цілісна замкнена система, що охоплює повний цикл від первинного збору просторово-часових даних до безпосереднього формування ефективних управлінських рішень.

## **2.7 Висновок до другого розділу**

В другому розділі кваліфікаційної роботи досліджено цілі сталого міського розвитку в умовах «розумних міст». Розглянута методологія «розумного міста» з інтенсивним аналітичним опрацюванням даних. Описано «розумні» міські обчислення на основі даних. Проаналізоване кероване даними

прогнозування для потреб «розумних міст». Висвітлено кероване даними моделювання для потреб «розумних міст». Досліджено керовані даними системи супроводу процесів прийняття рішень «розумних міст».

### РОЗДІЛ 3. ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ТА ПРИКЛАДНІ СЦЕНАРІЇ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ, КЕРОВАНИХ ДАНИМИ, В ГАЛУЗЕВИХ ПІДСИСТЕМАХ «РОЗУМНОГО МІСТА»

#### 3.1 Сценарії застосування методів керованих даними у підсистемах «розумного міста»

Спираючись на цілі сталого розвитку та загальні орієнтири сталого міського розвитку в межах концепту «розумного міста», а також урахувавши переваги його методологічного апарату, спочатку наведено репрезентативні прикладні сценарії, які безпосередньо відображають специфіку методології керованих даними «розумних міст» [3]. Використовуючи великі за обсягом набори та колекції міських даних, «розумне місто» застосовує методи, керовані даними, для прогнозування, моделювання та прийняття рішень, спрямованих на досягнення Цілей сталого розвитку. Потенційні напрями практичного розгортання цієї концептуальної структури крізь призму стратегічних аспектів: просторового планування, муніципального врядування, транспортної системи подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Структура прикладного застосування керованих даними методів, у плануванні, врядуванні та транспортній системі «розумного міста»

Галузь	Вхідні дані	Прикладні завдання / Сфери застосування
1	2	3
<b>Міське планування</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Дані про землекористування.</li> <li>– Економічні індикатори.</li> <li>– Мобільність населення.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Управління депресивними районами та нетрями.</li> <li>– Розміщення об'єктів міської інфраструктури.</li> <li>– Просторове планування територій міст.</li> </ul>

## Продовження таблиці 3.1

1	2	3
<b>Муніципаль- не врядування</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Дані систем відеоспостереження.</li> <li>– Соціальні мережі.</li> <li>– Географічна інформація.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Поводження з відходами.</li> <li>– Моніторинг та аналіз суспільної думки.</li> <li>– Інклюзивне залучення громадськості.</li> </ul>
<b>Транспортна система</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Швидкість транспортних потоків у режимі реального часу.</li> <li>– Відеоматеріали з камер спостереження.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Прогнозування дорожнього трафіку.</li> <li>– Адаптивне керування світлофорними об'єктами.</li> <li>– Впровадження платних зон для зменшення заторів.</li> </ul>

Для кожного з визначених напрямів проаналізовано диверсифіковані масиви міських даних, що становлять інформаційну основу функціонування інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста», а також визначено перспективні методи, керовані даними, які можуть бути залучені для вирішення актуальних проблем сталого розвитку міських територій на основі наявних науково-практичних напрацювань. В таблиці 3.2 подано структуру прикладного застосування керованих даними методів, для екологічності, енергетики, охорони здоров'я та міської економіки «розумного міста». При цьому підсумовуємо важливі дані про міста та відповідні застосування «розумних міст» з семи типових точок зору сталого розвитку міст.

Об'єктивне оцінювання рішень у сфері сталого міського розвитку до їхнього впровадження є складним завданням. Для вирішення цієї проблеми обґрунтовано використання «Міраж» [41] – великомасштабного середовища симуляційного моделювання міст, яке забезпечує формування рішень на основі методів, керованих даними. Спираючись на інформаційно-технологічну архітектуру розподілених систем, «Міраж» дає можливість моделювати процеси взаємодії між простором, фізичними об'єктами та громадянами у вигляді інтелектуальних агентів.

Таблиця 3.2 – Структура прикладного застосування керованих даними методів, у підсистемах «розумного міста»

Галузь	Вхідні дані	Прикладні завдання / Сфери застосування
<b>Екологія</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Показники щорічних викидів.</li> <li>– Глобальні дані моніторингу вуглецю.</li> <li>– Супутникові дані космічної обсерваторії.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Прогнозування обсягів вуглецевих викидів.</li> <li>– Симуляційне моделювання викидів вуглецю.</li> <li>– Формування політики декарбонізації.</li> <li>– Ефективне вловлювання вуглецю.</li> </ul>
<b>Енергетика</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Дані нічного освітлення територій [42].</li> <li>– Обсяги споживання електроенергії.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ефективне забезпечення електропостачання.</li> <li>– Симуляційне моделювання енергомереж.</li> <li>– Розподіл відновлюваних джерел енергії.</li> <li>– Проектування життєстійких енергетичних мереж.</li> </ul>
<b>Охорона здоров'я</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Статистика захворюваності, зокрема випадки коронавірусної інфекції.</li> <li>– Електронні медичні картки.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Прогнозування кризових ситуацій у сфері охорони здоров'я.</li> <li>– Справедливий розподіл медичних ресурсів.</li> <li>– Розбудова життєстійкої системи охорони здоров'я.</li> </ul>
<b>Економіка</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Показники глобальної торгівлі.</li> <li>– Обсяги локального споживання.</li> <li>– Рівень зайнятості населення.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Прогнозування економічного зростання.</li> <li>– Формування муніципальної економічної політики.</li> <li>– Зниження рівня бідності.</li> </ul>

Для цього підходу залучено методи ML для високоточного відтворення емпіричних поведінкових даних, просторової мобільності та дорожнього руху.

Спеціалізований модуль спроможний забезпечувати одночасну симуляцію поведінки до дев'ятсот тисяч агентів на прикладі транспортної

мережі зі швидкістю двісті мілісекунд на один крок. Така обчислювальна ефективність надає можливість здійснювати безперервне моделювання міжкомпонентних взаємодій у режимі реального часу. На відміну від традиційних систем, «Міраж» враховує комплексні потреби населення – попит на водо- й електрозабезпечення, зв'язок, переміщення [3]. Це відкриває можливості для оцінювання вразливості територій, прогнозування дефіциту енергопотужностей та оптимізації транспортних систем, даючи змогу попередньо тестувати управлінські стратегії на відповідність цілям сталого розвитку.

### 3.2 Прототипування сталого «розумного міста» майбутнього

На рисунку 3.1 подано особливості функціонування концептуальної структури «розумного міста» в умовах реального практичного застосування.

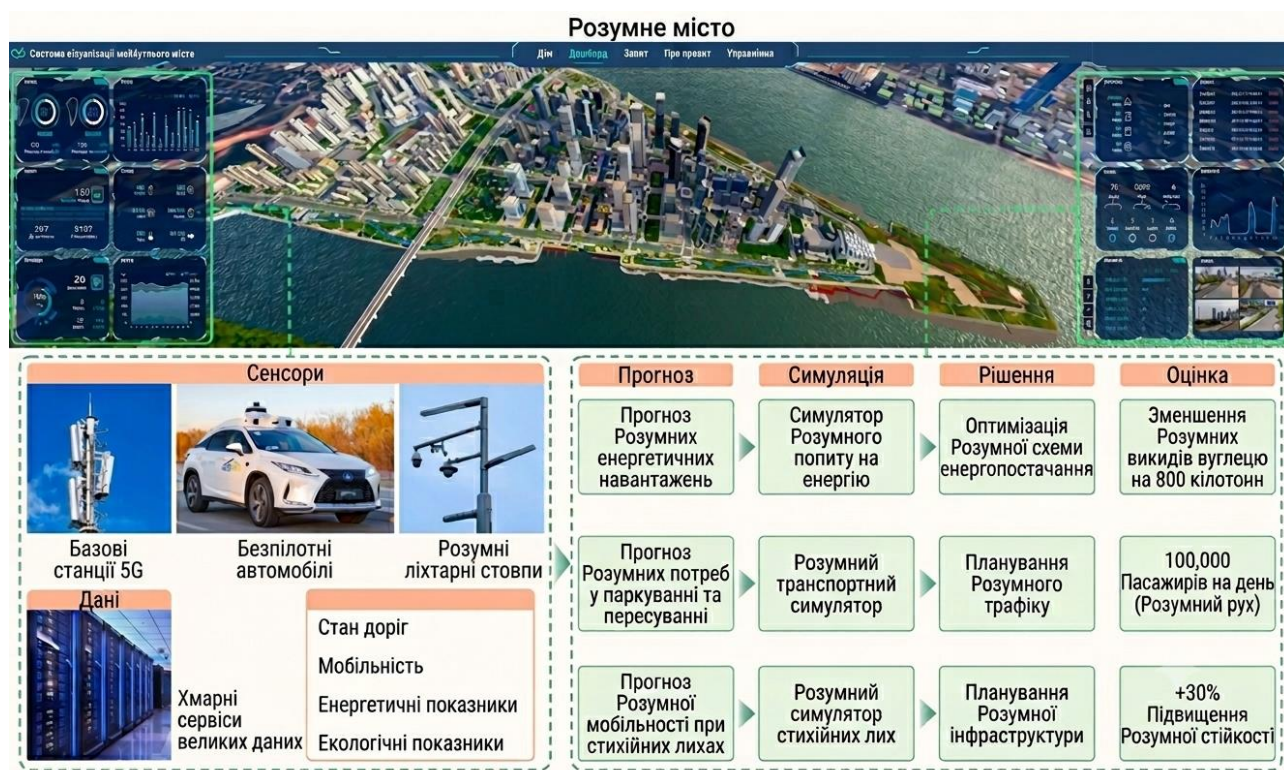


Рисунок 3.1 – Демонстрація практичного застосування «розумного міста» [3]

Як практичний приклад розглянуто проєкт розбудови перспективного міського простору, реалізований в одному з нових районів Китаю, де засади концептуальної структури «розумного міста» було застосовано для створення екологічного, ефективного та життєстійкого муніципального середовища [3]. Відповідно до базової методології, зазначений проєкт охоплює два ключові компоненти:

- сенсорне зчитування та обробку даних;
- розв’язання завдань «розумних» міських обчислень, керованих даними.

На етапі сенсорного зчитування концепту «розумне місто» розгорнуто понад півтори тисячі інтелектуальних опор освітлення з «розумними» сенсорами та залучено безпілотні транспортні засоби. Вони генерують багатомодальні потоки даних про дорожню ситуацію, мобільність, енергоспоживання та стан довкілля, які піддаються первинній обробці в центрах аналітичного опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних. Цей інформаційний фундамент забезпечує реалізацію методів, керованих даними, для досягнення трьох стратегічних цілей: екологічності, ефективності та життєстійкості [3].

На етапі прогнозування застосовано методи просторово-часового глибокого навчання. За допомогою автокодувальної нейронної мережі реалізовано прогнозування шаблонів операційного попиту та тенденцій споживання енергії. Графові нейронні мережі використано для моделювання мобільності транспорту й пішоходів, а їхню архітектуру на основі звичайних диференціальних рівнянь – для прогнозування впливу катастроф на критичну інфраструктуру [43].

Розроблений урбаністичний симулятор інтегрує показники демографії, інфраструктури, енергетики та транспорту. Модуль енергетичних потоків генерує профілі попиту з похибкою менше ніж один процент, а варіаційні автокодувальники та дифузійні моделі симулюють траєкторії руху понад ста тисяч автомобілів і двохсот тисяч пішоходів [44]. Симулятор також містить модуль моделювання катастроф для аналізу наслідків природних

катаклізмів [3]. Для ухвалення рішень застосовуються алгоритми оптимізації просторового розміщення об'єктів, що дало можливість спланувати роботу десяти енергостанцій та знизити викиди вуглецю на 800 кілотонн завдяки перерозподілу енергії між зонами з неоднорідним попитом. Алгоритми глибокого навчання з підкріпленням інтегровано для оптимізації транспортної інфраструктури та диспетчеризації безпілотного громадського транспорту, який обслуговує понад 100 000 пасажирів щодня [3]. Задля зміцнення життєстійкості впроваджено природоорієнтовані рішення для оптимізації землекористування та збудовано об'єкти цивільної оборони [45], що підвищило загальний рівень життєстійкості району більш ніж на 30%.

### **3.3 Застосування методів аналітичного опрацювання даних для підтримки управлінських рішень у «розумних містах»**

#### **3.3.1 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах просторового планування «розумних міст»**

Понад половину світового населення проживає в містах, через що раціональне просторове планування є критично важливим для забезпечення належних умов життєдіяльності. Дисбаланс між економічним розвитком та нехтуванням принципами планування призводить до появи депресивних районів і нетрів, що провокує просторову сегрегацію та соціально-екологічні кризи [3]. Неefективність традиційних підходів у запобіганні появі таких зон зумовлена дефіцитом апріорних знань про закономірності їх розвитку, структуру пропозиції земельних ресурсів та динаміку ринку нерухомості [46].

Концептуальна структура «розумного міста» має суттєвий потенціал для просторового планування та перерозподілу муніципальних ресурсів. Інтеграція даних про землекористування та економічних показників [47] відкриває можливості для прогнозування й симуляційного моделювання розвитку депресивних територій. Водночас аналітичне опрацювання масивів даних про

просторову мобільність населення надає можливість оцінювати й підвищувати рівень доступності критично важливих послуг – охорони здоров'я, освіти тощо, що забезпечує стратегічно вивірене розміщення муніципальних об'єктів [3]. Комплексне використання цих індикаторів на основі методів, керованих даними, дає змогу вирішувати широкі просторові виклики – деурбанізацію, екологічну джентрифікацію, відповідно до завдань ЦСР № 11.1 щодо модернізації міських територій.

### **3.3.2 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах міського управління «розумних міст»**

Технології інтелектуального простору є дієвим інструментом подолання демографічного тиску та зростаючого попиту на муніципальні послуги [48]. Цей ефект досягається через залучення систем відеоспостереження та адміністративних даних для оптимізації дорожнього руху, координації правоохоронних органів і надання послуг, що є найбільш опрацьованим напрямом розгортання «розумного міста» [3].

Перспективним, але менш дослідженим напрямом муніципального менеджменту є застосування комп'ютерного зору для екологічного моніторингу та управління відходами [3]. Інтеграція потокових даних про накопичення сміття, дислокацію сортувальних станцій та рух логістичного транспорту дає можливість раціонально розподіляти заявки на утилізацію відповідно до ЦСР № 11.6. Окрім цього, аналіз масивів інформації з соціальних мереж із геопросторовою прив'язкою дає змогу моніторити суспільну думку та забезпечувати адресне надання послуг [49]. Наостанок, концептуальна структура «розумного міста» через цифрові платформи активізує залучення громадськості до процесів ухвалення рішень – ЦСР № 11.3 [50]. Такий інклюзивний підхід, керований даними, допомагає створювати інтегровані простори для соціально незахищених груп, оперативно вирішувати специфічні проблеми та забезпечувати участь громадян у врядуванні.

### **3.3.3 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумного» транспорту**

Транспортні затори суттєво стримують ефективність міського середовища. Дослідження цієї проблематики зазвичай охоплюють прогнозування потоків та формування регуляторної політики для розвитку сталої мобільності – ЦСР № 11.2. Для концептуальної структури «розумного міста» прогностика транспортних процесів спрямована на отримання високоточних оцінок часових інтервалів та просторових локацій. Задля цього масиви даних структурують у вигляді просторових сіток або графів із застосуванням методів ML, зокрема глибоких нейронних мереж та градієнтного бустингу [3]. Цей аналітичний апарат надає можливість здійснювати прогнозування на масштабах, що охоплюють сотні перехресть одночасно, забезпечуючи надійну основу для локалізації заторів та підвищення пропускної спроможності мереж [51].

Заходи транспортної політики, як от координоване керування світлофорами або обмеження на рух, тривалий час розглядалися через детерміновані задачі оптимізації [3]. Проте класичні статичні підходи демонструють низьку ефективність в умовах динамічного трафіку. З огляду на це, у дослідженнях концепту «розумного міста» пропонується залучення методів на основі навчання з підкріпленням. Їхньою ключовою особливістю є здатність безпосередньо видобувати закономірності з потокових даних без опирання на суб'єктивні припущення, що забезпечує значно вищий рівень інтелектуалізації при вирішенні інфраструктурних завдань [3].

### **3.3.4 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» екології**

На міській території припадає понад сімдесят процентів світових викидів вуглецю, що зумовлює провідну роль міст у досягненні нульового рівня чистих

викидів та виконанні умов Паризької угоди [52]. Технологічні рішення, зокрема, уловлювання та зберігання вуглецю, потребують залучення методів, керованих даними, для підвищення їхньої ефективності [53]. Для концептуальної структури «розумного міста» управління декарбонізацією спирається на диференційовану інформаційну базу, яка охоплює виробництво електроенергії, транспорт, промисловість і житлово-комунальний сектор [3]. Оскільки офіційна звітність є щорічною, високодискретні дані в режимі реального часу отримують з альтернативних джерел: показників завантаженості транспортних мереж, енергоємності підприємств, а також супутникових матеріалів космічних апаратів, наприклад, китайського супутника TanSat, які фіксують концентрацію діоксиду вуглецю [3].

Ці джерела забезпечують проведення вуглецевого обліку на основі методів «розумних» міських обчислень [54]. Поточні підходи переважно спираються на емпіричні алгоритми непрямого перерахунку параметрів, проте методи ML, керовані даними, мають високий потенціал для калібрування цих знань. Застосування алгоритмів ML у поєднанні з супутниковим моніторингом дає змогу з високою точністю ідентифікувати локальні джерела критичного екологічного навантаження. Оперування такою інформацією в режимі реального часу уможливорює проектування ефективної муніципальної політики за допомогою методів оптимізації [55]. Зрештою, виявлені математичні залежності між обсягами викидів та функціонуванням транспорту стають основою для нормативно-правового регулювання й оптимізації міських потоків [56].

### **3.3.5 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» енергетики**

Ціль сталого розвитку ООН № 7 спрямована на формування справедливого розподілу енергетичних ресурсів у глобальному масштабі [3]. Концептуальна структура «розумного міста» може бути адаптована для

управління енергетичними системами з метою досягнення цих стратегічних орієнтирів. Нерівність у доступі до енергоносіїв та взаємозв'язок інвестиційних потоків із шаблонами використання ресурсів чітко простежуються через аналітичне опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних [3]. Для інформаційно-технологічної архітектури «розумного міста» методи, керовані даними, зокрема, прогнозування на основі аналізу часових рядів, дають можливість математично моделювати ці взаємодії та кількісно оцінювати ефект від інвестиційного моделювання для прискорення розгортання екологічно чистої інфраструктури.

Проектування нових енергетичних систем вимагає обов'язкового врахування життєстійкості мережі, особливо для регіонів із високим рівнем бідності, які є найбільш вразливими до природних і техногенних катастроф [57]. Дослідження структурної стійкості визначають методологічні шляхи побудови складних систем із топологічними інформаційно-технологічними архітектурами, що є інваріантними до зовнішніх збурень [3]. Для модернізації цих підходів пропонується інтегрувати просторові дані про демографічний та соціально-економічний статус територій, що забезпечує високий ступінь деталізації оцінювання їхньої вразливості [58]. Моделі, які враховують ці параметри, надають можливість здійснювати симуляційне моделювання динаміки енергосистем із вищою точністю, створюючи аналітичний фундамент для підвищення показників енергоефективності відповідно до завдань ЦСР № 7.3.

### **3.3.6 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» охорони здоров'я**

Наслідки пандемії коронавірусної інфекції та поширення хронічних захворювань і розладів ментального здоров'я зумовили підвищену увагу до сталості системи охорони здоров'я [3]. Сучасна міська охорона здоров'я об'єднує параметри фізичного середовища, медичні показники та

психоемоційні реакції населення [3]. Концептуальна структура «розумного міста» має спиратися на розгалужені масиви медико-санітарних даних задля точного прогнозування санітарно-епідеміологічних криз, раціонального розподілу ресурсів для забезпечення соціальної рівності та побудови життєстійких медичних комплексів.

Цифровізація забезпечує формування електронних медичних карток, тоді як IoT-давачі здійснюють безперервний збір даних про екологічні ризики й якість повітря [59]. Для «розумного міста» оперативна інформація про випадки інфікування опрацьовується в аналітичних моделях, які інтегрують експертні знання та емпіричні закономірності для точної симуляції траєкторії поширення захворювань [3]. На основі цих моделей застосовуються алгоритми оптимізації, керовані даними, для справедливого просторового розподілу медичних ресурсів – вакцин, обладнання, з мінімізацією логістичних витрат [60]. Ретроспективні медичні дані та індикатори стану середовища необхідно комплексно поєднувати для побудови життєстійкої системи охорони здоров'я, здатної функціонувати в умовах непередбачуваного зростання навантаження [3].

### **3.3.7 Методи аналітичного опрацювання даних у задачах «розумної» економіки**

Глобальна рецесія та нерівномірний розподіл матеріальних благ, що загострилися внаслідок пандемії коронавірусної інфекції, поставили під загрозу добробут домогосподарств і актуалізували проблему бідності [61]. Негативні економічні тенденції чітко простежуються через аналіз масштабних за обсягом масивів відкритих економічних даних. Інтеграція цих показників у концептуальну структуру «розумного міста» створює передумови для подальшого симуляційного моделювання й обґрунтування управлінських рішень. Міські економічні результати перебувають у складній взаємодії із соціальними контактами, функціонуванням транспорту, обсягами споживання, рівнем зайнятості та структурою землекористування [3]. Математичне

моделювання цих зв'язків за допомогою методів, керованих даними, дає змогу об'єктивно оцінити ефекти від упровадження муніципальних стратегій і забезпечити раціональний вибір векторів розвитку [62].

Важливим викликом для країн, що розвиваються, залишається дефіцит системних інструментів економічного оцінювання [63]. Дослідження концепту «розумного міста» пропонують прогностичні інструменти, які дають можливість реконструювати ключові економічні індикатори на основі непрямих джерел інформації – супутникових знімків та матеріалів панорамного знімання вулиць [3]. У поєднанні з ретроспективним аналізом динаміки забудови, глибоке розуміння наслідків розподілу муніципальних ресурсів на основі аналітичного опрацювання великих за обсягом наборів та колекцій даних здатне зробити вагомий внесок у подолання бідності й досягнення соціально-економічної стабільності міських територій.

### **3.4 Проблеми та перспективи розвитку концепції «розумного міста» на основі методів аналітичного опрацювання даних**

Концептуальна структура «розумного міста» відкриває значні перспективи для сталого розвитку муніципального середовища, проте її великомасштабне розгортання пов'язане з низкою системних викликів.

– Безпека даних та конфіденційність. Оскільки функціонування «розумного міста» базується на обробці великих за обсягом масивів інформації від диверсифікованих суб'єктів, критично важливою є розробка механізмів безпечного спільного використання даних [3]. Для захисту приватного життя пропонується інтеграція централізованого протоколу управління, де інформаційні масиви концептуалізуються як динамічні потоки всередині системи без переходу у постійне володіння користувачів. Еволюція таких протоколів є необхідною для підтримки суспільної довіри до методів, керованих даними.

– Обмеження базових припущень. Реальна доступність інформації нерідко лімітується комерційними обмеженнями та відсутністю уніфікованих стандартів, що знижує точність моделей. Задля адаптації концепту «розумного міста» в умовах обмежених ресурсів перспективним є попереднє навчання моделей на базі мегаполісів із подальшим перенесенням отриманих знань під локальні умови [64]. Для розширення вибірок можуть залучатися генеративні моделі, а інтеграція експертних знань надасть можливість створювати адаптивні гібридні моделі, оскільки певні культурні та політичні аспекти міських проблем неможливо повноцінно оцифрувати [3].

– Достовірність та інтерпретованість методів. Алгоритми автоматизованого ухвалення рішень на основі ШІ повинні володіти високим ступенем інтерпретованості та надійності для їх впровадження в муніципальну політику [65]. Через ризик генерації зміщених результатів унаслідок неповноти даних, особливу увагу слід приділяти просторово-часовій відтворюваності алгоритмів та побудові «карт придатності» для їхньої коректної екстраполяції на різні сценарії [3].

– Розгортання та інформаційно-технологічна архітектура систем. Замість дублювання витрат, майбутні наукові пошуки мають орієнтуватися на створення уніфікованої базової інформаційно-технологічної платформи, наприклад, системи оцінювання загального рівня життєстійкості міських територій, з можливістю її гнучкого кастомізованого розширення під специфічні умови конкретного об'єкта.

– Міждисциплінарна взаємодія. Концептуальна структура «розумного міста» спроможна консолідувати зусилля фахівців із просторового планування, транспорту, енергетики, охорони здоров'я та комп'ютерних наук [66]. Для цього необхідне формування інтегрованих комунікаційних платформ та нової дослідницької парадигми, яка забезпечить досягнення консенсусу при вирішенні складних урбаністичних завдань.

– Новітні ресурси та інноваційний розвиток. Нематеріальні активи, зокрема, людський капітал, масиви даних, знання, відіграють дедалі вагомішу

роль у трансформації міст [67]. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вивчення механізмів ефективного інтегрування цих ресурсів «розумного міста» для обґрунтування оптимальних траєкторій інноваційного розвитку.

– Інтеграція з великими мовними моделями. Важливим вектором є залучення великих мовних моделей у контур «розумного міста» для підвищення якості планування й ухвалення рішень [68]. Вони дають змогу створювати інтелектуальних агентів підтримки для взаємодії користувачів з аналітичними інструментами, а також проводити семантичний аналіз великих за обсягом наборів та колекцій текстової інформації та прогнозувати соціодинамічні тенденції [69].

### **3.5 Висновок до третього розділу**

В третьому розділі кваліфікаційної роботи подано сценарії застосування методів керованих даними у підсистемах «розумного міста». Описано прототипування сталого «розумного міста» майбутнього. Проаналізовано застосування методів аналізу даних для підтримки управлінських рішень у «розумних містах». Описано проблеми та перспективи розвитку концепції «розумного міста» на основі методів аналізу даних.

## РОЗДІЛ 4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Моделювання та оцінювання життєздатності міських систем в умовах екстремальних деструктивних впливів

Під час інтегрування геопросторових масивів для підвищення надійності просторових комплексів, аналіз спроможності господарського сектору протистояти уражальним чинникам зброї масового знищення (зокрема ядерної) набуває фундаментального значення. Цифрові платформи керування «розумним містом», які спираються на просторові координати для оптимізації транспортних потоків, розподілу ресурсів чи моніторингу життєво важливих об'єктів, прямо залежать від стабільності економічного базису. Останній слугує фундаментом для ліквідації наслідків, регенерації та подальшого розвитку.

Екстремальний вплив радіаційного, теплового та ударного характеру здатний спричинити системну деструкцію: тотальний розрив енергетичних та комунікаційних мереж, зупинку логістики й руйнацію промислового потенціалу. Без чіткого математичного та географічного розуміння алгоритмів реагування господарських зв'язків на подібні катаклізми, використання просторових даних втрачає практичну цінність, оскільки цифрові алгоритми автоматизації опиняться в інформаційному вакуумі на базі зруйнованого середовища.

Цифрове моделювання катастрофічних сценаріїв, яке охоплює імітацію руйнувань вузлових елементів інфраструктури, дозволяє локалізувати найбільш критичні точки системи. Отримані аналітичні результати імпортуються в геоінформаційні комплекси для формування стратегій захисту. Якщо прогнозні алгоритми фіксують високу ймовірність ліквідації певних галузей у конкретних районах, просторовий аналіз дозволяє завчасно розробити заходи з децентралізації об'єктів, сформувати дублювальні логістичні шляхи та створити гнучкі математичні моделі перерозподілу ресурсів, здатні функціонувати в умовах глибокої системної кризи.

Визначення межі міцності елементів життєзабезпечення під дією уражальних чинників є обов'язковою умовою безперервного функціонування агломерації. Алгоритм такого дослідження базується на системному аналізі вразливостей та проектуванні архітектурних і організаційних загороджувальних бар'єрів.

– Ідентифікація опорного каркаса. На початковому етапі визначаються ключові об'єкти, що забезпечують життєдіяльність населення (водопостачання, зв'язок, енергетичні мережі). Для кожного об'єкта розраховуються параметри потенційного навантаження від повітряної ударної хвилі, світлового випромінювання, іонізуючої радіації та електромагнітного імпульсу.

– Аналіз інженерної та управлінської стійкості. Наступний крок передбачає оцінювання міцності споруд, наявності автономних джерел живлення, захищених сховищ та швидкості регенерації систем. Особлива увага приділяється вузлам зв'язку, оскільки їхня втрата призводить до повної дезорганізації процесів ліквідації наслідків.

– Розробка комплексних інженерно-організаційних заходів. На основі розрахованих моделей упроваджуються технічні рішення: структурне зміцнення будівель, екранування електроніки, дублювання ліній передачі інформації. Паралельно створюються чіткі регламенти дій, проводяться тренування персоналу та оптимізуються алгоритми цивільного захисту.

– Верифікація та коригування моделей. Завершальний етап включає симуляцію різних за потужністю та координатами критичних сценаріїв для перевірки дієвості впроваджених рішень, що дозволяє вчасно усунути слабкі місця в архітектурі безпеки [70].

Масштаби наслідків застосування зброї масового ураження виходять далеко за межі суто технічних руйнувань, переформатовуючи соціальну матрицю суспільства. Гуманітарний аспект охоплює не лише прямі демографічні втрати, а й деструкцію соціальних інститутів, тривалу дезорганізацію ринку праці та демографічний дисбаланс [71]. На рівні

макроекономіки фіксується різке падіння виробничих потужностей, деградація інвестиційної привабливості та тривала депресія ринків.

На глобальному рівні виникають ризики планетарних кліматичних трансформацій (так зване тривале похолодання через ефект задимлення атмосфери) та жорсткі міжнародні санкційні та торговельні обмеження. Загалом загроза характеризується комплексним тиском: від втрати унікальних цифрових архівів до психологічного шоку серед населення.

Вибухова деструкція знищує не лише фізичні активи, а й інформаційні ресурси. Втрата даних може паралізувати фінансову систему, державні реєстри та системи керування підприємствами, якщо вони не мають просторово рознесених дублювальних центрів обробки інформації [70]. Пошкодження систем енергозабезпечення та очищення води миттєво знижує рівень колективної безпеки, провокуючи логістичний та продовольчий колапс.

Екологічна складова катастрофи зумовлює тривалу непридатність територій для господарської діяльності через радіоактивне зараження біосфери. Попадання ізотопів у ґрунт і водоносні горизонти через ланцюги живлення створює довгострокову загрозу для людського капіталу. Руйнація логістичних ланцюгів через фізичне знищення транспортних вузлів паралізує постачання товарів першої необхідності, а високий рівень тривожності та депресивних станів серед населення вимагає від органів управління розробки стратегій психологічної реабілітації [70].

Захисні стратегії мають охоплювати розгортання систем протиповітряної та протиракетної оборони, модернізацію планів цивільного захисту та поглиблення міждержавної координації у сфері безпеки.

Отже, забезпечення життєздатності сучасного простору в умовах глобальних загроз вимагає багатовекторного аналізу та динамічного моделювання ризиків. Протидія подібним викликам полягає не лише у фізичному відновленні споруд, а й у формуванні високої адаптивності та здатності всієї системи «розумного міста» до трансформації в екстремальних умовах [72].

## **4.2 Забезпечення безпеки життєдіяльності та охорона праці під час оперування мережевими IoT-компонентами**

У процесі розгортання та подальшого технічного супроводу вузлів інтернету речей, зокрема інтегрованих у контури «розумного» постачання ресурсів та послуг, першочерговим завданням є неухильне виконання нормативних вимог з охорони праці та безпекових стандартів, затверджених національним законодавством. Проектування робочих процесів має чітко корелювати з положеннями Кодексу законів про працю та чинними Державними стандартами України. Монтажні роботи, що пов'язані з розміщенням засобів відеофіксації, блоків керування, давачів руху та малогабаритних однокристальних мікрокомп'ютерів, необхідно організовувати у спосіб, який повністю нівелює ризики травмування або виникнення загроз для здоров'я інженерного персоналу [73].

Передумовою початку робіт є обов'язковий комплексний аудит робочого простору задля виявлення потенційно небезпечних чинників, як-от близькості ліній високої напруги, недостатнього рівня освітлення або просторових обмежень у зоні закріплення апаратури. Також невід'ємною частиною підготовки є проведення цільових інструктажів для монтажних бригад з урахуванням конструктивних та експлуатаційних особливостей конкретних технічних засобів. Фіксацію пристроїв слід здійснювати за допомогою сертифікованих кріпильних елементів на висоті, яка унеможливорює випадковий фізичний контакт і травмування людей [74].

Етап безперервного функціонування передбачає проведення регулярного моніторингу технічного стану вузлів, планово-попереджувальних оглядів та регламентного обслуговування. До переліку таких операцій належать очищення оптичних поверхонь засобів спостереження, перевірка щільності комутаційних з'єднань, а також діагностика коректності роботи вимірювальних елементів, модулів керування та обчислювальних платформ.

Фундаментальним аспектом створення безпечного робочого середовища під час взаємодії з комплексами інтернету речей є суворе дотримання правил захисту від ураження електричним струмом. Керуючись вимогами стандарту ДСТУ EN 60204-1:2015 щодо безпеки машин та їхнього електрообладнання, необхідно реалізувати такі захисні заходи:

- Експлуатувати виключно ті технічні засоби, які пройшли державну сертифікацію, мають відповідне маркування та документи, що підтверджують їхню якість і безпеку.

- Забезпечити надійне з'єднання всіх металевих корпусних частин із захисним заземлювальним контуром.

- Здійснювати систематичний інструментальний контроль цілісності ізоляційного покриття силових та сигнальних кабелів.

- Оснащувати електричні мережі автоматичними пристроями захисту від надструмів та коротких замикань.

- Інтегрувати в систему блоки безперебійного живлення для стабілізації параметрів мережі [75].

Обов'язковою умовою є системне підвищення кваліфікації та навчання технічного персоналу правилам електробезпеки. Співробітники, які виконують налаштування та ремонт апаратури, повинні мати належну групу допуску та регулярно проходити перевірку знань.

Правильна організація робочого простору для диспетчерів та інженерів є базовим чинником підтримання їхнього здоров'я та високої інтенсивності праці. Основні ергономічні, світлотехнічні та акустичні вимоги включають:

- Оснащення робочих місць функціональними меблями з можливістю індивідуального регулювання висоти сидінь, стільниць та кута нахилу моніторів.

- Забезпечення рівня освітленості робочих поверхонь відповідно до Державних будівельних норм, що для приміщень із дисплеями становить щонайменше 300–500 люксів [76].

– Захист робочих зон від проникнення зовнішніх шумів (граничний рівень звукового тиску не повинен перевищувати 50 децибел), що дозволяє утримувати високу концентрацію уваги та знижує стомлюваність.

– Розміщення моніторів у спосіб, який мінімізує появу світлових відблисків на екранах і запобігає перенапруженню зорових аналізаторів операторів.

Створення безпечного та ергономічного середовища під час оперування інфраструктурою інтернету речей «розумного міста» є критичною умовою забезпечення загальної відмовостійкості міських інтелектуальних систем. Цей процес поєднує в собі як технічні заходи електрозахисту й заземлення, так і гуманітарні чинники оптимізації праці. Помилки в діях диспетчерів чи техніків, викликані хронічною втомою, стресовими навантаженнями або ігноруванням інструкцій, можуть спровокувати збої в алгоритмах збору даних, роботі комунікаційних плат чи контролерів. Це, у свою чергу, дестабілізує процеси автоматичного регулювання процесів надання «розумних» послуг, знизить швидкість реагування на аварійні ситуації та безпосередньо погіршить безпеку життєдіяльності й рівень комфорту жителів міста.

### **4.3 Висновок до четвертого розділу**

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто процес моделювання та оцінювання життєздатності міських систем в умовах екстремальних деструктивних впливів. Описано забезпечення безпеки життєдіяльності та охорона праці під час оперування мережевими IoT-компонентами.

## ВИСНОВКИ

Формування концепту «розумне місто» на основі методів, керованих даними, забезпечує науково обґрунтоване управління міськими системами шляхом інтеграції, аналітичного опрацювання та використання даних для підвищення ефективності прийняття рішень, сталого розвитку територій і покращення якості життя населення.

В першому розділі кваліфікаційної роботи освітнього рівня «Бакалавр»:

- Подано теоретико-методологічні засади розбудови концепту «розумне місто».

- Висвітлено концептуалізацію структури «розумного міста» як інструменту сталого управління міськими ресурсами на основі даних.

- Розглянуто функціональну структуру та завдання концепту «розумне місто».

- Проаналізовано відмінності між «розумними містами» та традиційними дослідженнями міської науки.

В другому розділі кваліфікаційної роботи:

- Досліджено цілі сталого міського розвитку в умовах «розумних міст».

- Розглянута методологія «розумного міста» з інтенсивним використанням даних.

- Описано «розумні» міські обчислення на основі даних.

- Проаналізоване кероване даними прогнозування для потреб «розумних міст».

- Висвітлено кероване даними моделювання для потреб «розумних міст».

- Досліджено керовані даними системи супроводу процесів прийняття рішень «розумних міст».

В третьому розділі кваліфікаційної роботи:

- Подано сценарії застосування методів керованих даними у підсистемах «розумного міста».

- Описано прототипування сталого «розумного міста» майбутнього.
- Проаналізовано застосування методів аналізу даних для підтримки управлінських рішень у «розумних містах».
- Описано проблеми та перспективи розвитку концепції «розумного міста» на основі методів аналізу даних.

У розділі «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» розглянуто процес моделювання та оцінювання життєздатності міських систем в умовах екстремальних деструктивних впливів. Описано забезпечення безпеки життєдіяльності та охорона праці під час оперування мережевими IoT-компонентами.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ**

- 1 Nations, U. (2020). Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable. DOI:<https://doi.org/10.5040/9781509934058.0017>.
- 2 Shi, K., Yu, B., Ma, J. et al. (2023). Impacts of slope climbing of urban expansion on global sustainable development. *Innovation* 4:100529. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100529>.
- 3 Zhang, Yunke, et al. "MetaCity: Data-driven sustainable development of complex cities." *The Innovation* 6.2 (2025).
- 4 Yang, W., Zhang, J., Hua, P. et al. (2023). Global framework for flood risk management under climate change and urbanization. *Innov. Geosci.* 1:100009. DOI:<https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2023.100009>.
- 5 Wu, X., Fu, B., Wang, S. et al. (2023). Three main dimensions reflected by national SDG performance. *Innovation* 4:100507. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100507>.
- 6 Roberts, P., Carleton, W.C., Amano, N. et al. (2024). Using urban pasts to speak to urban presents in the Anthropocene. *Nat. Cities* 1:30–41. DOI:<https://doi.org/10.1038/s44284-023-00014-4>.
- 7 Moroni, S., Rauws, W. and Cozzolino, S. (2020). Forms of self-organization: Urban complexity and planning implications. *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.* 47:220–234. DOI:<https://doi.org/10.1177/2399808319857721>.
- 8 Duda O., Kunanets N., Matsiuk O., Pasichnyk V., Rzhеuskyi A. Aggregation, Storing, Multidimensional Representation and Processing of COVID-19 Data // *Advances in Intelligent Systems and Computing V. CSIT 2020*. Springer, Cham, 2021. Vol. 1293. DOI: 10.1007/978-3-030-63270-0\_60. ISSN 2194-5357, EISSN 2194-5365.
- 9 Silvestro, D., Goria, S., Sterner, T. et al. (2022). Improving biodiversity protection through artificial intelligence. *Nat. Sustain.* 5:415–424. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41893-022-00851-6>.

10 Xu, Y., Wang, F., An, Z. et al. (2023). Artificial intelligence for science—bridging data to wisdom. *Innovation* 4:100525. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100525>.

11 Wang, F., Yao, D., Li, Y. et al. (2023). Ai-enhanced spatial-temporal data-mining technology: New chance for next-generation urban computing. *Innovation* 4:100405. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100405>.

12 Baggio, G., Bassett, D.S. and Pasqualetti, F. (2021). Data-driven control of complex networks. *Nat. Commun.* 12:1429. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41467-021-21554-0>.

13 Bettencourt, L.M. (2021). *Introduction to Urban Science: Evidence and Theory of Cities as Complex Systems* (MIT Press). DOI:<https://doi.org/10.7551/mitpress/13909.001.0001>.

14 Geddes, P. (1915). *Cities in evolution: an introduction to the town planning movement and to the study of civics* (Williams). DOI:<https://doi.org/10.2307/1779702>.

15 Zhao, Y., Zhu, Z., Chen, B. et al. (2023). Towards parallel intelligence: An interdisciplinary solution for complex systems. *Innovation* 4:100521. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100521>.

16 Schlapfer, M., Dong, L., O'Keefe, K. et al. (2021). The universal visitation law of human mobility. *Nature* 593:522–527. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41586-021-03480-9>.

17 Reed, S., Zolna, K., Parisotto, E. et al. (2022). A generalist agent. *Trans. Mach. Learn. Res.* DOI:<https://doi.org/10.15607/rss.2020.xvi.076>.

18 Zhang, J., Wang, S., Liu, Y. et al. (2022). Does having more sustainable communities bring better sustainability? *Innovation* 3:100267. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100267>.

19 Wang, Q., Feng, Y., Huang, J. et al. (2023). Large-scale generative simulation artificial intelligence: The next hotspot. *Innovation* 4:100516. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100516>.

20 Chu, T., Wang, J., Codeca, L. et al. (2020). Multi-agent deep reinforcement learning for largescale traffic signal control. *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 21:1086–1095. DOI:<https://doi.org/10.1109/tits.2019.2901791>.

21 Duda O., Kunanets N., Martsenko S., Nykytyuk V., Pasichnyk V. Information technology platform for COVID-19 analysis // *IEEE CSIT 2021*. P. 231–238. DOI: 10.1109/CSIT52700.2021.9648839.

22 Duda O., Matsiuk O., Kunanets N., Pasichnyk V., Rzheskyi A., Bilak Y. Formation of hypercubes based on data obtained from IoT devices // *International Journal of Sensors, Wireless Communications and Control*. 2021. Vol. 11(5). P. 498–504. DOI: 10.2174/2210327910999201210145151.

23 Duda O., Stanko A. Architecture of monitoring platform in smart cities // *Вісник ХНУ*. 2023. No. 4. P. 10–19. DOI: 10.31891/2307-5732.

24 Mahajan, S. (2022). Design and development of an open-source framework for citizencentric environmental monitoring and data analysis. *Sci. Rep.* 12:14416. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41598-022-18700-z>.

25 Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V. et al. (2023). Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nat. Rev. Earth Environ.* 4:51–64. DOI:<https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>.

26 Liang, D., De Jong, M., Schraven, D. et al. (2022). Mapping key features and dimensions of the inclusive city: A systematic bibliometric analysis and literature study. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 29:60–79. DOI:<https://doi.org/10.1080/13504509.2021.1911873>.

27 Salahub, J.E., Gottsbacher, M. and De Boer, J. (2018). *Social Theories of Urban Violence in the Global South* (Routledge). DOI:<https://doi.org/10.4324/9781351254724>.

28 Delmelle, E., Nilsson, I. and Adu, P. (2021). Poverty suburbanization, job accessibility, and employment outcomes. *Soc. Incl.* 9:166–178. DOI:<https://doi.org/10.17645/si.v9i2.3735>.

29 Löfving, L., Kamuf, V., Heleniak, T. et al. (2022). Can digitalization be a tool to overcome spatial injustice in sparsely populated regions? the cases of digital

vasterbotten (sweden) € and smart country side (germany). *Eur. Plann. Stud.* 30:917–934. DOI:<https://doi.org/10.1080/09654313.2021.1928053>.

30 Long, D., Liu, L., Xu, M. et al. (2021). Ambient population and surveillance cameras: The guardianship role in street robbers' crime location choice. *Cities* 115:103223. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103223>.

31 Huang, J., Boles, S.T. and Tarascon, J.-M. (2022). Sensing as the key to battery lifetime and sustainability. *Nat. Sustain.* 5:194–204. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41893-022-00859-y>.

32 Wang, J. and Lu, F. (2021). Modeling the electricity consumption by combining land use types and landscape patterns with nighttime light imagery. *Energy* 234:121305. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121305>.

33 Lehmann, M.K., Gurlin, D., Pahlevan, N. et al. (2023). Gloria-a globally representative hyperspectral in situ dataset for optical sensing of water quality. *Sci. Data* 10:100. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112860>.

34 Duda O., Kunanets N., Martsenko S., Nykytyuk V., Pasichnyk V. COVID-19 data collections and processing // *IEEE CSIT 2021*. P. 252–257. DOI: 10.1109/CSIT52700.2021.9648658.

35 Wang, S. and Cao, J. (2021). AI and deep learning for urban computing. *Urban. Inf.* 815–844. DOI:[https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8983-6_43).

36 Li, F., Feng, J., Yan, H. et al. (2023). Dynamic graph convolutional recurrent network for traffic prediction: Benchmark and solution. *ACM Trans. Knowl. Discov. Data* 17:1–21. DOI:<https://doi.org/10.1145/3532611>.

37 Li, G., Zhao, Z., Guo, X. et al. (2024). Towards integrated and fine-grained traffic forecasting: A spatiotemporal heterogeneous graph transformer approach. *Inf. Fusion* 102:102063. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102063>.

38 Qian, T., Chen, Y., Cong, G. et al. (2024). Adaptraj: A multi-source domain generalization framework for multi-agent trajectory prediction. In *2024 IEEE 40th International Conference on Data Engineering (ICDE) (IEEE)*, pp. 5048–5060. DOI:<https://doi.org/10.1109/icde60146.2024.00113>.

39 Ho, J., Jain, A. and Abbeel, P. (2020). Denoising diffusion probabilistic models. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 33:6840–6851. DOI:<https://doi.org/10.7551/mitpress/7503.003.0070>.

40 Hussein, A., Gaber, M.M., Elyan, E. et al. (2017). Imitation learning: A survey of learning methods. *ACM Comput. Surv.* 50:1–35. DOI:<https://doi.org/10.1145/3054912>.

41 Zhang, J., Ao, W., Jin, D. et al. (2023). A city-level high-performance spatiotemporal mobility simulation system. In *Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Sustainable Mobility*, pp. 23–32. DOI:<https://doi.org/10.1145/3615899.3627936>.

42 Vaskiv R. I., Hrybovskyi O. M., Kunanets N. E., Duda O. M. Information system of street lighting control in smart city // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2024. No. 3(70). P. 212–223. DOI: 10.15588/1607-3274-2024-3-18.

43 Li, J., Wang, H. and Chen, X. (2024). Physics-informed neural ode for post-disaster mobility recovery. In *Proceedings of the 30th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 1587–1598. DOI:<https://doi.org/10.1145/3637528.3672027>.

44 Yuan, Y., Ding, J., Shao, C. et al. (2023). Spatiotemporal diffusion point processes. In *Proceedings of the 29th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 3173–3184. DOI:<https://doi.org/10.1145/3580305.3599511>.

45 Fredericks, J., Hespanhol, L., Parker, C. et al. (2018). Blending pop-up urbanism and participatory technologies: Challenges and opportunities for inclusive city making. *City Cult. Soc* 12:44–53. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ccs.2017.06.005>.

46 Batty, M. (2024). Digital twins in city planning. *Nat. Comput. Sci.* 4:192–199. DOI:<https://doi.org/10.1038/s43588-024-00606-7>.

47 Agyemang, F.S.K., Silva, E. and Fox, S. (2022). Modelling and simulating ‘informal urbanization’: An integrated agent-based and cellular automata model of urban residential growth in ghana. *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.* 50:863–877. DOI:<https://doi.org/10.1177/23998083211068843>.

48 Marques, E.C.L. (2024). Continuities and transformations in the studies of urban politics and governments. *Nat. Cities* 1:22–29. DOI:<https://doi.org/10.1038/s44284-023-00004-6>.

49 Hodorog, A., Petri, I. and Rezgui, Y. (2022). Machine learning and natural language processing of social media data for event detection in smart cities. *Sustain. Cities Soc.* 85:104026. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104026>.

50 Jang, S.-G. and Gim, T.H.T. (2022). Considerations for encouraging citizen participation by information-disadvantaged groups in smart cities. *Sustain. Cities Soc.* 76:103437. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103437>.

51 Chen, C., Wei, H., Xu, N. et al. (2020). Toward a thousand lights: Decentralized deep reinforcement learning for large-scale traffic signal control. *Proc. AAAI Conf. Artif. Intell.* 34:3414–3421. DOI:<https://doi.org/10.1609/aaai.v34i04.5744>.

52 Zhang, H., Luo, M., Pei, T. et al. (2023). Unequal urban heat burdens impede climate justice and equity goals. *Innovation* 4:100488. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100488>.

53 Seger, B., Robert, M. and Jiao, F. (2023). Best practices for electrochemical reduction of carbon dioxide. *Nat. Sustain.* 6:236–238. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41893-022-01034-z>.

54 Dou, X., Wang, Y., Ciais, P. et al. (2022). Near-real-time global gridded daily co2 emissions. *Innovation* 3:100182. DOI:<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3303>.

55 Zhu, R., Zhang, F., Yan, J. et al. (2023). A sustainable solar city: From utopia to reality facilitated by giscience. *Innov. Geosci.* 1:100006. DOI:<https://doi.org/10.59717/j.xinn-geo.2023.100006>.

56 Cheng, S., Zhang, B., Peng, P. et al. (2023). Health and economic benefits of heavy-duty diesel truck emission control policies in beijing. *Environ. Int.* 179:108152. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108152>.

57 Asghar, N., Amjad, M.A., Rehman, H.u. et al. (2022). Achieving sustainable development resilience: Poverty reduction through affordable access to

electricity in developing economies. *J. Cleaner Prod.* 376:134040. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134040>.

58 Baetens, R. and Saelens, D. (2016). Modelling uncertainty in district energy simulations by stochastic residential occupant behaviour. *J. Build. Perform. Simul.* 9:431–447. DOI:<https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1070203>.

59 Orlov M. V., Duda O. M., Zhovnir Y. I., Hrybovskiy O. M. DevOps tools in IoT systems // Комп'ютерно-інтегровані технології. 2024. Vol. 57. P. 128–138. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2024-57-15.

60 Chen, L., Xu, F., Han, Z. et al. (2022). Strategic covid-19 vaccine distribution can simultaneously elevate social utility and equity. *Nat. Human Behav.* 6:1503–1514. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41562-022-01429-0>.

61 Pangallo, M., Aleta, A., del Rio-Chanona, R.M. et al. (2023). The unequal effects of the health–economy trade-off during the covid-19 pandemic. *Nat. Human Behav.* 8. DOI:<https://doi.org/10.1038/s41562-023-01747-x>.

62 Gao, J., Jun, B., Pentland, A.' et al. (2021). Spillovers across industries and regions in china's regional economic diversification. *Reg. Stud.* 55:1311–1326. DOI:<https://doi.org/10.1080/00343404.2021.1883191>.

63 Liu, Y., Du, J., Wang, Y. et al. (2024). Overlooked uneven progress across sustainable development goals at the global scale: Challenges and opportunities. *Innovation* 5:100573. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100573>.

64 Yuan, Y., Shao, C., Ding, J. et al. (2024). Spatiotemporal few-shot learning via diffusive neural network generation. In *The Twelfth International Conference on Learning Representations*. DOI:<https://doi.org/10.1109/nnice61279.2024.10498780>.

65 Liang, W., Tadesse, G.A., Ho, D. et al. (2022). Advances, challenges and opportunities in creating data for trustworthy ai. *Nat. Mach. Intell.* 4:669–677. DOI:<https://doi.org/10.1038/s42256-022-00516-1>.

66 Luo, L., Wang, X. and Guo, H. (2022). Contribution of unesco designated sites to the achievement of sustainable development goals. *Innovation* 3:100227. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2022.100227>.

67 Wang, K., Li, A. and Qu, X. (2023). Urban aerial mobility: Network structure, transportation benefits, and sino-us comparison. *Innovation* 4:100393. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100393>.

68 Wei, J., Tay, Y., Bommasani, R. et al. (2022). Emergent abilities of large language models. *Trans. Mach. Learn. Res.* DOI:<https://doi.org/10.18653/v1/2021.emnlp-main.465>.

69 Gao, C., Lan, X., Li, N. et al. (2024). Large language models empowered agent-based modeling and simulation: A survey and perspectives. *Humanit. Soc. Sci. Commun.* 11:1259–1324. DOI:<https://doi.org/10.1057/s41599-024-03611-3>.

70 9 Практичне заняття. Оцінка стійкості роботи промислового підприємства за надзвичайних ситуацій. StudFiles. URL: <https://studfile.net/preview/9726254/page:50>.

71 Das A., Nandi N., Ray S. Alpha and SSVEP power outperform gamma power in capturing attentional modulation in human EEG. *Cerebral Cortex*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad412>.

72 Стручок, Володимир Сергійович. "Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання." (2022).

73 НПАОП 0.00-1.28-10. Правила охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин. – Затверджено наказом Міністерства праці та соціальної політики України.

74 НПАОП 40.1-1.32-01. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Міністерство енергетики України.

75 Стручок В.С. Техноекоекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник. 2022.

76 ДБН В.2.5-28-2018 "Природне і штучне освітлення". [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3074958732556240833?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2).