

УДК 330.34:004.9:711.4

**ЦИФРОВЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО: ПРОЦЕС ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ
РОЗУМНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ СТІЙКОГО ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА В КИЇВСЬКІЙ АГЛОМЕРАЦІЇ**

В. Назаренко, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки

E-mail: volodnz@nubip.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7433-2484

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Швидке зростання мегаполісів суттєво змінює життєздатність аграрного сектора економіки у приміських регіонах. Використовуючи Київську агломерацію як багатий на дані випробувальний полігон, це дослідження поєднує модульний робочий процес підтримки прийняття рішень за допомогою БПЛА та штучного інтелекту з емпіричними обмеженнями, що виникають у сфері землекористування, ринків праці, логістики та земельної ренти. Регіональні дані свідчать, що сільськогосподарські угіддя скоротилися до 0,21% площі ($\approx 0,18$ тис. га), проти $>54\%$ зелених зон; різниця в оплаті праці (16 500 грн харчова промисловість проти 14 000 грн у сільському господарстві) та транспортні витрати на рівні 20–250 грн/км підривають маржу фермерських господарств та утримання робочої сили, тоді як орендна плата в прайм-зоні до 25 млн грн/га/рік посилює тиск на конверсію (базові таблиці та цифри Києва та області). Проведені розрахунки свідчать про доцільність активного використання цифрових технологій у аграрній сфері з метою зменшення витрат. Тому, запропоновано створити прототип робочого процесу підтримки прийняття рішень, який поєднує аналіз знімків БПЛА/супутників, дані із розумних пристроїв у полі та статистичні дані про зміни клімату/врожаю з адміністративно-економічними показниками (орендна плата, градієнти заробітної плати, витрати на перевезення). Інформаційна система перетворює вхідні дані з кількох джерел у швидке та результативне виявлення

проблемних моментів, оптимізує обробку даних, пришвидшує її та вносить рекомендації щодо розподілу вхідних даних. У той же час, системний програмний модуль бізнес-логіки оцінює вибір маршруту/транспортного засобу відповідно до статей витрат та процесів діяльності у приміському регіоні — процес спільного проектування зацікавленими сторонами (фермери, переробники продукції та плановики,) визначає зручність використання та передачу інформації. В дослідженні представлено (1) базовий рівень приміського розвитку Києва (земля, заробітна плата, логістика, розподіл підприємств), (2) архітектуру робочого процесу БПЛА-штучного інтелекту та точок інтеграції з CRM-системами для ферм та показників діяльності аграрного виробництва, а також (3) систему оцінювання, яка пов'язує KPI аграрного сектору та промисловості з просторово-економічними обмеженнями з врахуванням екологічних вимог. Цей підхід розроблений для транскордонного реплікації (Україна – Німеччина) та для інформування про ефективні результати політики щодо цифрового управління земельними ресурсами та стійкості приміських агропродовольчих фондів.

Ключові слова: *точне землеробство, цифрове землеробство, БПЛА, підтримка прийняття рішень штучним інтелектом, приміське землеробство, зміна землекористування, логістичні витрати, Київська агломерація, стійкість, інтеграція політик.*

Вступ. Стрімка урбанізація та цифровізація економічних процесів – дві визначальні тенденції 21 століття. Разом вони спричиняють структурні зміни як у розвинених, так і в перехідних економіках, змінюючи розподіл землекористування, активність діяльності підприємств та потоки робочої сили. У Східній Європі, зокрема в Україні, ці процеси прискорюються геополітичними та економічними потрясіннями, які оголюють вразливі місця в аграрному та міському секторах.

Київський столичний регіон є переконливим прикладом таких процесів. З одного боку, в регіоні спостерігається значне скорочення сільськогосподарських

угідь у поєднанні зі швидким зростанням несільськогосподарських підприємств, логістики та послуг. З іншого боку, розвиток інноваційних міських ініціатив — від оптимізації міського транспорту до платформ цифрового врядування — ілюструють, як цифрова економіка змінює підходи міста до управління інфраструктурою та послугами.

Дослідження має на меті об'єднати два напрямки дослідження: I - просторово-економічний аналіз аграрної та міської динаміки та II - розвиток інноваційної міської архітектури, керованих проміжним програмним забезпеченням (middleware). Робота полягає у тому, щоб дослідити, як цифрові рішення, що використовують IoT, БПЛА та підтримку прийняття рішень на основі штучного інтелекту, допоможуть міським адміністраціям у процесі прийняття оптимальних та раціональних рішень (Рис.1).

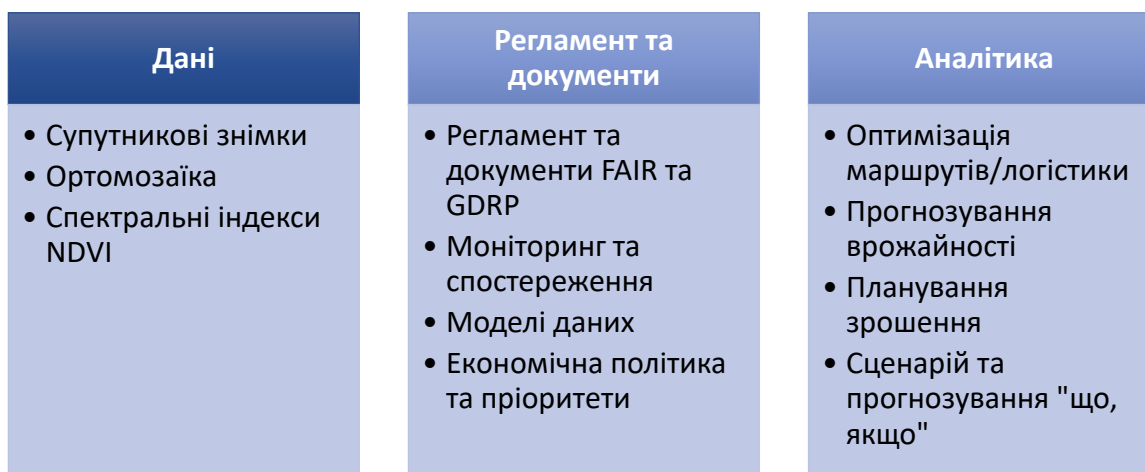


Рис 1. Основні складові розумної системи підтримки прийняття рішень

(підготовлено Назаренко В.А. на основі даних дослідження)

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до поточних технологічних інновацій Agriculture 4.0, три технологічні домени – зображення БПЛА, телеметрія IoT та аналітика AI/ML – формують стек датчиків для оперативного ведення землеробства. Оглядові статті, присвячені безпілотним

платформам у точному землеробстві, фіксують стійке розширення спектра завдань: від раннього виявлення стресів та моніторингу водного режиму до картографування хвороб та прогнозування врожайності [1, 2]. Комбінація «розумних датчиків» та алгоритмів машинного навчання, узагальнена в систематичному огляді з IoT та AI, лежить в основі переходу від точкових випадків до наскрізних рішень підтримки прийняття рішень, що узгоджується з архітектурою платформи, представленою в цій статті [3].

У другому кластері літературних джерел автори наголошують на сумісності та рольовій функції рівня middleware у перехресному зв'язуванні доменних сервісів та даних. Робота над узгодженням архітектур цифрових аграрних платформ і «прагматичної сумісності» в ланцюгах поставок показує, що саме стандартизовані API, модельні схеми і подієво-керовані конектори забезпечують масштабованість і керованість складними екосистемами [4, 5] Стандарти OGC SensorThings API та їх галузеві вдосконалення демонструють практичні механізми сумісності потоків даних датчиків, а фреймворки наступного покоління для «просторів даних» та автоматизацій OPC UA окреслюють інфраструктура для безпечного обміну та повторного використання сільськогосподарських даних [6-8].

Нарешті, новітні напрямки — цифрові двійники ферм, метрики життєвого циклу та питання впровадження технологій — зміщують акцент із суто технічної ефективності на системну ефективність та стійкість. Огляди цифрових двійників та «розумного» землеробства окреслюють потенціал віртуальних копій для моделювання сценаріїв та оптимізації ресурсів, тоді як оцінки LCA вказують на екологічні та економічні наслідки впровадження точного землеробства [9, 10]. Паралельно дослідження СППР та бар'єрів на шляху до впровадження підкреслюють важливість зрозумілих інтерфейсів, прозорих показників якості та економічної доцільності для різних виробників [11, 12]. Це підтверджує реалістичність обраної у статті архітектури проміжного програмного забезпечення, з ваговими критеріями (час-вартість-ризик-якість) та контекстуальним

економічним коригуванням для приміських умов Київської агломерації, де витрати на логістику та конкуренція за землю суттєво впливають на прийняття оперативних рішень.

Мета. Це дослідження має на меті розробити та продемонструвати модульний робочий процес підтримки прийняття рішень, який об'єднує геопросторові та економічні дані для підвищення стійкості та конкурентоспроможності сектора приміського аграрного виробництва під тиском швидкого зростання мегаполісів. Використовуючи Київську агломерацію як приклад, дослідження має на меті встановити надійну емпіричну базу динаміки землекористування, трудових ресурсів, логістики та ренти, які формують життєздатність систем землеробства; розробити та створити прототип платформи БПЛА–AI–IoT, здатної об'єднувати багато інформаційні просторові, кліматичні та експлуатаційні дані з адміністративно-економічними показниками.

Матеріали та методи досліджень. Дослідження спирається на статистичні дані щодо Київської області у період з 2000 по 2022 рік, включаючи записи земельного кадастру, статистику щодо розмірів заробітної плати, розподіл підприємств за галузями і транспортні витрати (Рис.2). Базові висновки включають скорочення земель сільськогосподарського призначення, розподіл зелених зон, ціни на оренду землі в прайм-зоні, середню місячну заробітну плату, транспортні витрати на логістику та інші дані (Таблиця 1).

1. Основні результати досліджень для міста Києва та Київської області (зона Київської агломерації)*

Категорія	Дані (2022)
Землі сільськогосподарського призначення	зменшено до 0,21% від загальної площі 0,18 тис га
Зелені зони	На зелені зони припадає 54% земель
Орендна плата за землю в прайм-зоні	25 млн грн/га/рік
Середньомісячна заробітна плата у сфері харчової промисловості	16,500 грн
Середньомісячна заробітна плата в сільському господарстві	14 000 грн у сільському господарстві

Транспортні витрати на логістику	20–250 грн/км
----------------------------------	---------------

* підготовлено Назаренко В.А. на основі даних досліджень [15-16]

Авторами було змодельована трирівнева архітектура проміжного програмного забезпечення для яскравого управління міських сервісів: Application Layer (послуги з мобільності, управління, енергетики та моніторингу навколишнього середовища); Middleware Layer (маршрутизація на основі подій, зважені параметри прийняття рішень, API-шлюзи); основні послуги (зберігання даних, керування пристроями IoT, безпека та механізми резервування). Модель параметричної маршрутизації застосовує вагові коефіцієнти до запитів на обслуговування для оптимізації часу реакції в режимі реального часу та розподілу ресурсів.

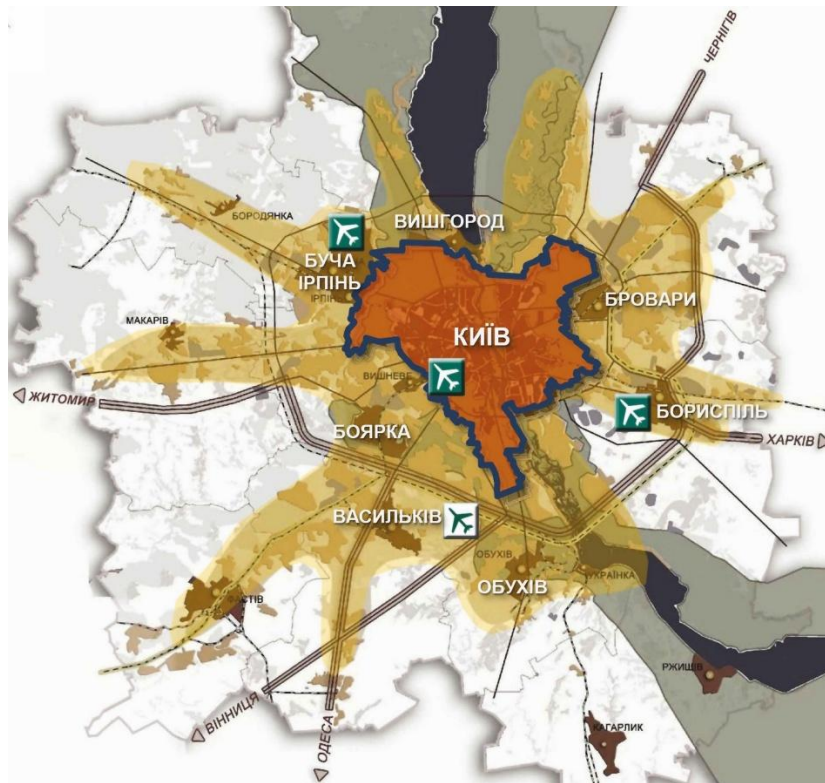


Рис 2. Межі київської агломерації (підготовлено Назаренко В.А. на основі даних дослідження) [16]

Метод порівнянь був використаний для зв'язку емпіричного впливу міського тиску з можливостями проміжного програмного забезпечення. За результатами інтерв'ю з представниками місцевих зацікавлених сторін (фермерами, ІТ-

провайдерами, муніципальними планувальниками) було враховано міркування щодо зручності використання. Дослідницьке інтерв'ю проводилося за допомогою особистого спілкувань та співбесід, а також опитування за онлайн-формами. Повні результати опитування поки що не оприлюднені для широкої громадськості.

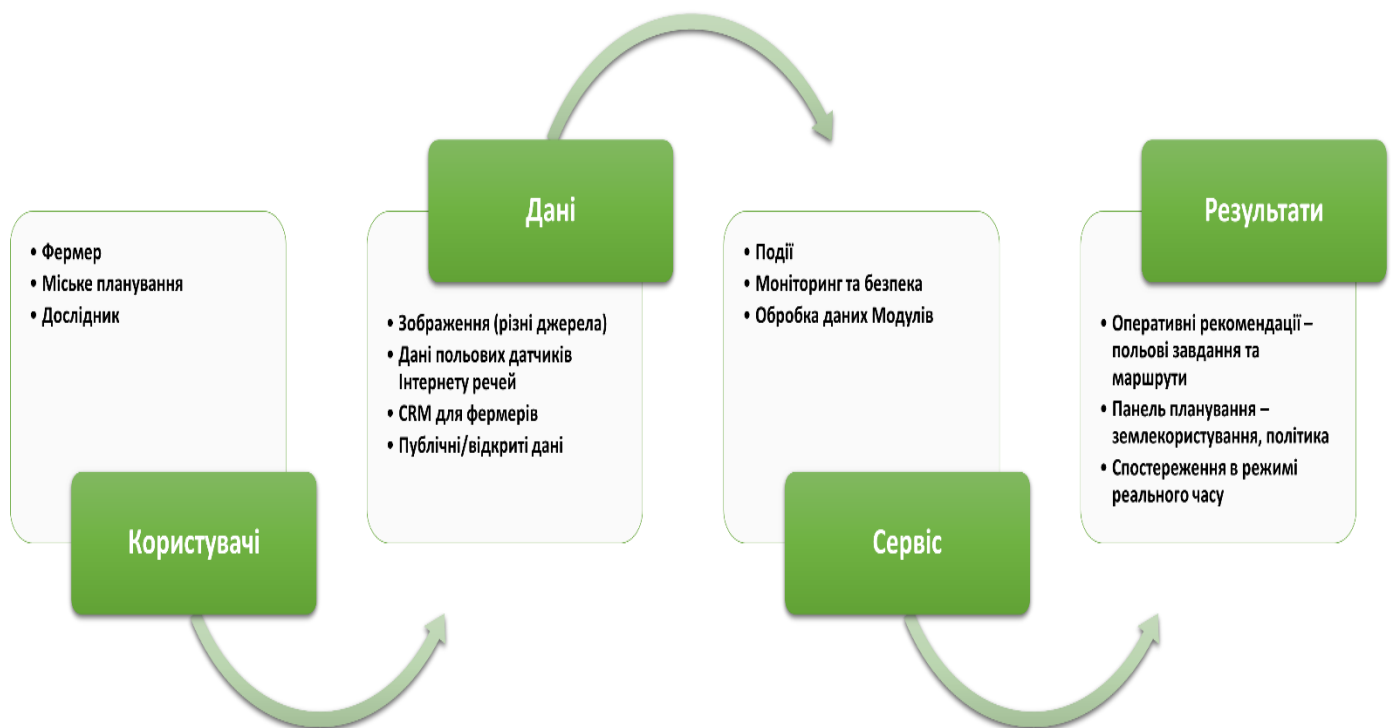
Важливо відзначити актуальні обмеження на використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в Україні в умовах воєнного часу. Через обмеження безпеки, регуляторний контроль та ризики перехоплення, широкомасштабне розгортання БПЛА для моніторингу сільського господарства та збору даних не завжди є можливим. Тому, хоча БПЛА залишаються важливим компонентом цифрової агрономії та довгострокового вимірювання стійкості, їх застосування в найближчій перспективі слід розглядати обережно. У таких випадках альтернативні джерела, такі як супутникові знімки, наземні датчики IoT та адміністративно-економічні набори даних, можуть частково компенсувати обмеженість повітряних даних. Це застереження наголошує на необхідності гнучких архітектур з кількома джерелами для підтримки функцій підтримки прийняття рішень, незважаючи на тимчасові технологічні обмеження.

Результати та їх обговорення. Скорочення площ сільськогосподарських угідь і різке зростання орендної плати за землю підірвали життєздатність приміського землеробства. Диспропорції в оплаті праці ще більше знижують привабливість зайнятості в сільському господарстві, тоді як витрати на логістику підривають конкурентоспроможність. Результатом став структурний зсув у бік підприємств сфери послуг та логістики в приміських зонах.

Зростання інноваційних міських ініціатив зумовлене попитом на більш ефективне врядування та послуги для громадян. Пілотні проєкти в місті Києві включають системи моніторингу трафіку, цифрові муніципальні послуги та розгортання екологічного IoT.

Фреймворк проміжного програмного забезпечення вирішує три основні проблеми в інноваційному управлінні міськими послугами: масштабованість,

сумісність та стійкість процесів і даних. Масштабованість досягається за рахунок підтримки зростаючого обсягу пристроїв IoT і потоків даних, які повинні оброблятися в режимі реального часу. Сумісність гарантує, що різноманітні служби та платформи можуть ефективно обмінюватися даними завдяки впровадженню загальних стандартів даних. У той же час стійкість гарантує, що операції можуть продовжуватися, незважаючи на збої, чи то будь технічні збої або зовнішні потрясіння. Ці функції створюють міцну основу для інтеграції складних міських систем в єдиному адаптивному цифровому середовищі.



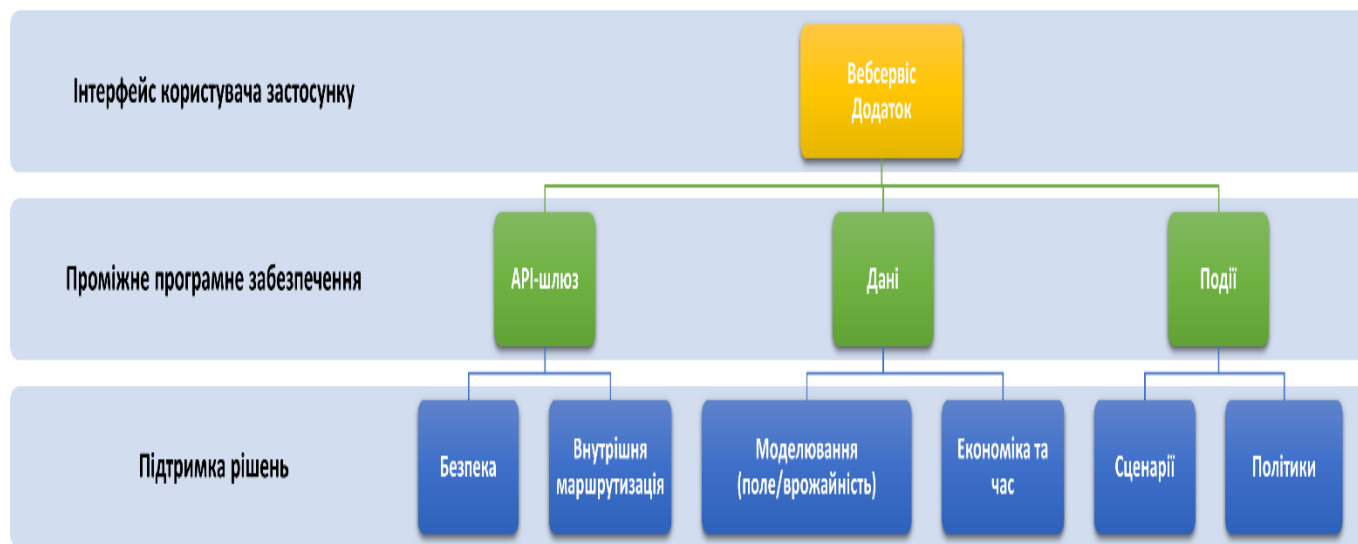


Рис. 3. Шари архітектури middleware для багаторівневого управління міськими сервісами (головні функції програмної системи – рис. вгорі, трьох-рівнева архітектура програмного забезпечення – рис. внизу).

Моделювання сценаріїв маршрутизації додатково демонструє, як оптимізація проміжного програмного забезпечення покращує та оптимізує логістику та надання послуг. Система підвищує продуктивність у кількох доменах, застосовуючи зважені параметри, щоб збалансувати витрати, час і ресурсні обмеження. У логістиці це призводить до зниження витрат на кілометр і більш ефективної прокладки маршрутів в умовах заторів. У сфері врядування ця модель дозволить швидше та ефективніше реагувати на запити громадян, покращуючи надання послуг та довіру громадськості. У сільському господарстві інтеграція даних БПЛА та датчиків у процеси міського планування сприяє прийняттю більш точних рішень щодо землекористування та посилює стійкість систем приміського землеробства.

Отримані результати ілюструють, як інноваційні міські рішення можуть частково пом'якшити виклики урбанізації. Наприклад, інтеграція даних БПЛА в систему проміжного програмного забезпечення забезпечує видимість змін у землекористуванні в режимі реального часу, дозволяючи планувати, передбачати та керувати розширенням приміського району. Аналогічним чином, оптимізована

логістика може зменшити вразливість продовольчої системи за рахунок зниження транспортних витрат.

Платформа розумного управління аграрними підприємствами та міського проміжного програмного забезпечення має координувати різноманітні потоки сільськогосподарських даних (зображення БПЛА, польовий IoT, кадастрові/адміністративні набори даних, кліматичні та ринкові канали) та спрямовувати запити до оптимального аналітичного мікросервісу або мікросервісу зберігання в умовах чітких обмежень вартість–час–ризик–якість. Ми адаптуємо трирівневу архітектуру (Applications <-> Middleware <-> Core Services) з подієвим диспетчером і зваженими повідомленнями, перевіреними в контексті Smart-City, до кейсів використання в сільському господарстві та приміських умовах Києва (витрати на логістику, градієнти зарплати/оренди, тиск на землекористування). Базове представлення параметрів і функцій систем проміжного програмного забезпечення наведено в таблиці 2 (технічні деталі ми не представляємо, оскільки вони виходять за рамки теми даного дослідження, але вони будуть представлені в наступних наукових публікаціях). Сценарій використання алгоритму наступний: фермер із передмістя Києва подає запит у систему для визначення оптимальний маршрут на день збору врожаю (подія - запит на планування маршруту) під час заторів, 80 км в обидві сторони, поточна смуга = 120–250 грн/км. Система вибирає оптимальний шлях планування маршруту на основі ваги, а вибір маршруту ґрунтується безпосередньо на економічних критеріях (встановлених заздалегідь), що призводить до швидшого/дешевшого обчислення, коли транспорт дорогий.

2. Алгоритм маршрутизації middleware для проектування платформи розумного міста та розумного аграрного виробництва *

Категорія	Деталі
Системні події	Готовність до вильоту (маршрутна карта) БПЛА Порушення порогу датчика Ідентифікатор фермера в CRM Перенавчання пакетної моделі Запит на планування маршруту

	Запит політики/KPI
Системні сервіси	Зображення pre-proc Модель «стрес-культура» Планування поливу Синоптик врожайності Оптимізатор маршрутів Автор Data Mart API інформаційної панелі політики
Основні параметри даних (вхідні)	Профілі приміських витрат (наприклад, 20–250 грн/км) Різниця у заробітній платі (наприклад, 16 500 проти 14 000 грн) Тиск на землекористування (сільськогосподарські землі = 0,21%) використовується для зважування економічного ризику/часу для Київської агломерації
Ваги та дані алгоритмів	Час (затримка) Вартість (CPU або UAH) за запит Діапазон точності (%) Економічні дані Пріоритет завдань/кроків

* підготовлено Назаренко В.А. на основі даних та матеріалів досліджень автора

З практичної точки зору, стійкість запропонованої архітектури, орієнтованої на дані, полягає в її розподіленому та адаптивному дизайні. Кожен рівень платформи проміжного програмного забезпечення - прийом даних, їх обробка та управління сервісами - працює в умовах модульного резервування, що дозволяє системним компонентам залишатися функціональними, навіть якщо частини інфраструктури тимчасово деградують. Вузли периферійних обчислень можуть виконувати важливу аналітику локально, коли підключення до центральних серверів переривається, тоді як асинхронні черги повідомлень забезпечують кешування та синхронізацію вхідних даних після стабілізації мережі. Впровадження відкритих стандартів (OGC SensorThings, ISO, OPC UA) дозволяє швидко підміняти джерела даних і сервіси без переписування основної логіки. Крім того, використання входів з кількох джерел - супутникових знімків, телеметрії IoT, адміністративних наборів даних та економічних показників - забезпечує безперервність функцій підтримки прийняття рішень у разі недоступності

конкретних каналів передачі даних (таких як зображення БПЛА) (Рис. 4). У сукупності ці механізми підтримують операційну стабільність, забезпечують цілісність даних і зберігають аналітичну безперервність у перехідних умовах, що підтверджує застосовність платформи для планування стійкості та адаптивного до кризи сільського господарства.

Однак, розгортання таких систем вимагає ретельної уваги до кількох критичних факторів. Управління даними має забезпечуватися шляхом дотримання принципів FAIR щодо даних та дотримання GDPR, що гарантує прозорість, доступність та захист конфіденційної інформації. Не менш важливим є адаптація користувачів, яка залежить від розробки інтерфейсів, які є інтуїтивно зрозумілими та доступними для широкого кола зацікавлених сторін, від муніципальних адміністраторів до фермерів та громадян.

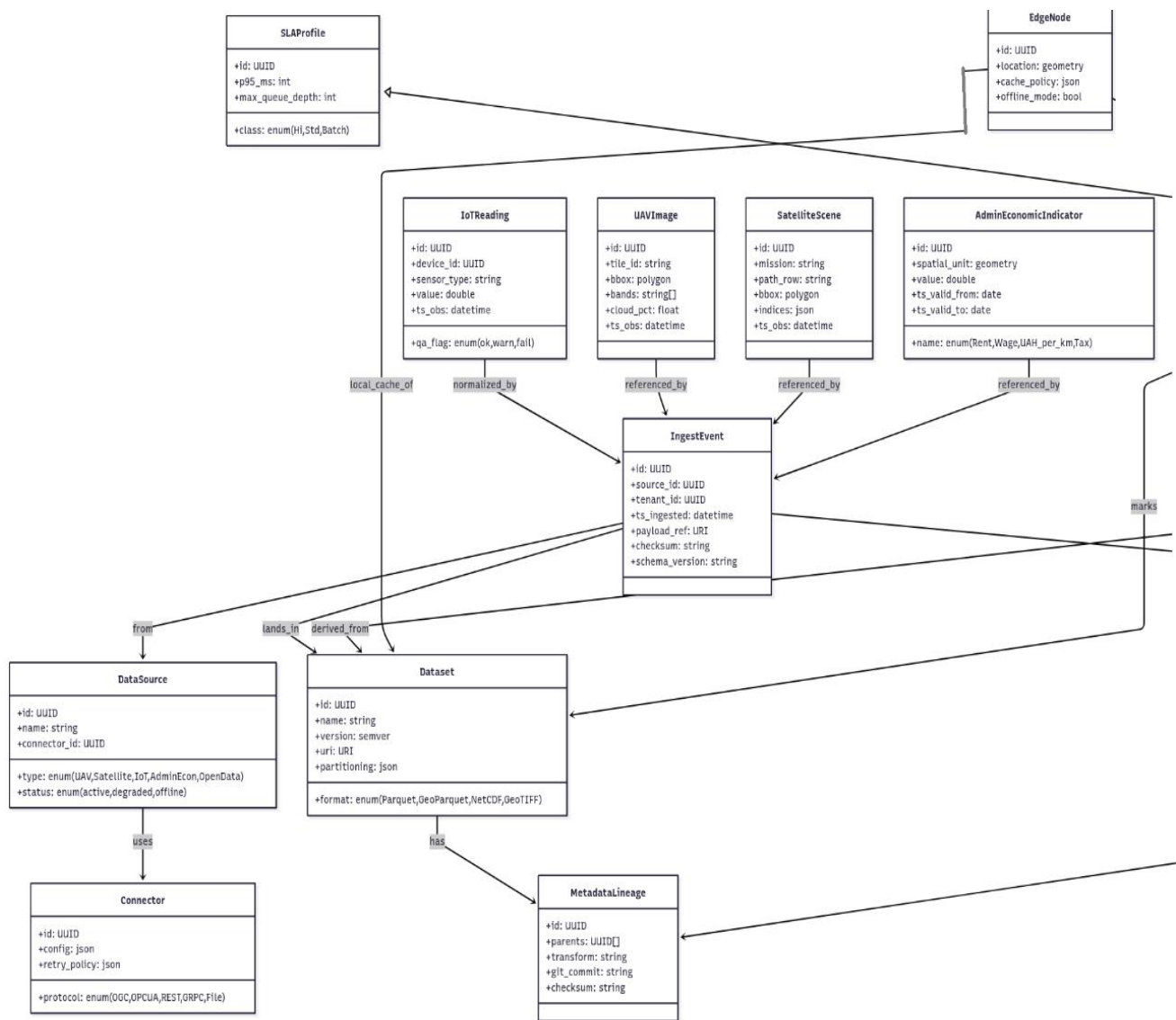


Рис. 4. Діаграма класів Data-Centric Resilience Model (на основі даних досліджень Назаренко В.В.)

Оперативна сумісність також відіграє вирішальну роль, вимагаючи від місцевих платформ приведення їх у відповідність до міжнародних стандартів, таких як ISO та OGC, для полегшення інтеграції через системи та кордони. Ці міркування позиціонують дослідження в рамках більш широких дискусій щодо інноваційного розвитку міст та цифрової економіки, підкреслюючи важливість міжсекторальної інтеграції та міжнародного співробітництва.

Висновки. Урбанізація в Києві ілюструє зростання тиску столичного регіону на аграрний сектор та регіональну стійкість. Інструменти цифрової економіки, зокрема інноваційні міські платформи, керовані middleware, пропонують реальні шляхи для вирішення цих проблем. Поєднуючи емпіричні економічні дані міст з управлінням послуг через алгоритми, це дослідження демонструє, як архітектури, орієнтовані на дані, можуть підтримувати стійкість і стабільність при складних перехідних умовах.

У подальших дослідженнях автори планують розширити тестування платформ за межами України (наприклад, Україна – Німеччина), включити точне землеробство з використанням даних БПЛА та оцінити наслідки політики для управління містом та сільською місцевістю. Дослідження сприяє досягненню SDGs 9, 11, 12 та 17 шляхом просування інновацій, сталого розвитку міст, відповідального виробництва та глобального партнерства (SDG 9 – промисловість, інновації та інфраструктура; SDG 11 – сталий розвиток міст та громад; SDG 12 - відповідальне споживання та виробництво; SDG 17 – Партнерство заради досягнення цілей) [17].

Список використаних джерел

1. Agrawal J., Arafat M. Y. Transforming farming: A review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. P. 664. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8110664>.
2. Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. P. 686. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>.
3. Miller T., Mikiciuk G., Durlík I., Mikiciuk M., Łobodzińska A., Śnieg M. The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review of smart sensing

- technologies. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 12. P. 3583. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25123583>.
4. Urdu D., Berre A. J., Sundmaeker H., Rilling S., Roussaki I., Marguglio A., Wolfert S. Aligning interoperability architectures for digital agri-food platforms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 224. P. 109194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109194>.
 5. Obayi R., Choudhary S., Nayak R., Ramanjaneyulu G. V. Pragmatic interoperability for human–machine value creation in agri-food supply chains. *Information Systems Frontiers*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10567-x>.
 6. Falcão L., Matar S., Rauch E., Elberzhager F., Koch K. Next-generation interoperability: A framework for data spaces and OPC UA-based automations. *Information*. 2023. Vol. 14, No. 8. P. 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/info14080440>.
 7. Open Geospatial Consortium (OGC). OGC SensorThings API Part 1: Sensing (v1.1). 2022. URL: <https://docs.ogc.org/is/18-088/18-088.html> (дата звернення: [вказати дату]).
 8. Arz von Straussenburg S., Aldenhoff T., Riehle D. Improving OGC SensorThings API for industrial IoT use cases: Lessons from real-world scenarios. *Proceedings of the 27th AGILE Conference on Geographic Information Science*. 2024. CEUR-WS.
 9. Awais M., Wang X., Hussain S., Aziz F., Mahmood M. Q. Advancing precision agriculture through digital twins and smart farming technologies: A review. *AgriEngineering*. 2025. Vol. 7, No. 5. P. 137. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050137>.
 10. Bahmutsky S., Grassauer F., Arulnathan V., Pelletier N. A review of life cycle impacts and costs of precision agriculture for cultivation of field crops. *Sustainable*

- Production and Consumption.* 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.010>.
11. Zhai Z., Martínez J. F., Beltran V., Martínez N. L. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 170. P. 105256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.
 12. Yousaf H., Kayvanfar V., Mazzoni S., Elomri A. From decision support to Agriculture 4.0: A systematic review of data-driven systems and adoption challenges. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023. Vol. 7. P. 1107026. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1107026>.
 13. Nazarenko V., Martyn A. Urban growth and agrarian dynamics: Evaluating the Kyiv agglomeration's economic landscape. *Economics and Business Management*. 2025. Vol. 2, No. 16. P. 24–41.
 14. Nazarenko V. *Urban futures reimaged: Advanced ecological-economic frameworks for sustainable growth*: монографія. Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 2023. URL: <https://dglb.nubip.edu.ua/handle/123456789/10692>.
 15. Nazarenko V., Ostroushko B. Smart city management system utilizing micro-services and IoT-based systems. *Energiya*. 2024. No. 1. P. 29–38. DOI: [https://doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.029](https://doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.029).
 16. United Nations. *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.

References

1. Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). *Transforming farming: A review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture*. *Drones*, 8(11), 664. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8110664>.

2. Guebsi, R., Mami, S., & Chokmani, K. (2024). *Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges*. *Drones*, 8(11), 686. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>.
3. Miller, T., Mikiciuk, G., Durlik, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). *The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review of smart sensing technologies*. *Sensors*, 25(12), 3583. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25123583>.
4. Urdu, D., Berre, A. J., Sundmaeker, H., Rilling, S., Roussaki, I., Marguglio, A., ... Wolfert, S. (2024). *Aligning interoperability architectures for digital agri-food platforms*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 109194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109194>.
5. Obayi, R., Choudhary, S., Nayak, R., & Ramanjaneyulu, G. V. (2024). *Pragmatic interoperability for human–machine value creation in agri-food supply chains*. *Information Systems Frontiers*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10567-x>.
6. Falcão, L., Matar, S., Rauch, E., Elberzhager, F., & Koch, K. (2023). *Next-generation interoperability: A framework for data spaces and OPC UA-based automations*. *Information*, 14(8), 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/info14080440>.
7. Open Geospatial Consortium (OGC). (2022). *OGC SensorThings API Part 1: Sensing (v1.1)*. Available at: <https://docs.ogc.org/is/18-088/18-088.html>. (Standards reference for middleware/FAIR alignment.)
8. Arz von Straussenburg, S., Aldenhoff, T., & Riehle, D. (2024). *Improving OGC SensorThings API for industrial IoT use cases: Lessons from real-world scenarios*. In *Proceedings of the 27th AGILE Conference on Geographic Information Science*. CEUR-WS.
9. Awais, M., Wang, X., Hussain, S., Aziz, F., & Mahmood, M. Q. (2025). *Advancing precision agriculture through digital twins and smart farming technologies: A review*. *AgriEngineering*, 7(5), 137. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050137>.

10. Bahmutsky, S., Grassauer, F., Arulnathan, V., & Pelletier, N. (2024). *A review of life cycle impacts and costs of precision agriculture for cultivation of field crops. Sustainable Production and Consumption*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.010>.
11. Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). *Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. Computers and Electronics in Agriculture*, 170, 105256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.
12. Yousaf, H., Kayvanfar, V., Mazzoni, S., & Elomri, A. (2023). *From decision support to Agriculture 4.0: A systematic review of data-driven systems and adoption challenges. Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1107026. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1107026>.
13. Nazarenko, V., & Martyn, A. (2025). Urban growth and agrarian dynamics: Evaluating the Kyiv agglomeration's economic landscape. *Economics and Business Management*, 2(16), 24-41.
14. Nazarenko, V. (2023). *Urban futures reimaged: Advanced ecological-economic frameworks for sustainable growth [Monograph]*. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Available at: <https://dglib.nubip.edu.ua/handle/123456789/10692>.
15. Nazarenko, V., Ostroushko, B., (2024). Smart city management system utilizing micro-services and iot-based systems. *Energiya*, (1), 29-38. DOI: [https://doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.029](https://doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.029).
16. Kyiv City State Administration. (n.d.). *Proekt Heneralnoho Planu Kyieva [General Plan of Kyiv Project]*. Kyiv: KCSA. Retrieved [2025], from <https://kga.gov.ua/generalplan>.
17. United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations. Available at: <https://sdgs.un.org/2030agenda>.

V. Nazarenko

DIGITAL AGRONOMY: SMART DECISION-SUPPORT WORKFLOW FOR CLIMATE-RESILIENT FARMING IN THE KYIV AGGLOMERATION

Rapid metropolitan growth is reshaping agrarian viability in peri-urban regions. Using the Kyiv agglomeration as a data-rich testbed, this study couples a modular UAV–AI decision-support workflow with empirical constraints emerging from land use, labour markets, logistics, and land rents. Regional evidence shows agricultural land has been squeezed to 0.21% of the area (≈ 0.18 k ha), against >54% green zones; wage differentials (16,500 UAH food processing vs 14,000 UAH agriculture) and transport costs of 20–250 UAH/km undermine farm margins and labour retention, while prime-zone rents up to 25 million UAH/ha/year intensify conversion pressure (Kyiv & oblast baseline tables and figures). These structural frictions motivate digital agronomy that is explicitly policy- and cost-aware. We therefore prototype a decision-support workflow that fuses UAV/satellite imagery, in-field IoT, and historical climate/crop data with administrative-economic layers (rents, wage gradients, haulage costs). The system translates multisource inputs into actionable stress detection, irrigation timing, and input allocation recommendations. At the same time, a logistics module evaluates route/vehicle choices under peri-urban cost profiles—a stakeholder-co-design process (farmers, processors, and planners) anchors usability and transferability. We report (1) the peri-urban baseline for Kyiv (land, wages, logistics, enterprise distribution), (2) the architecture of the UAV–AI workflow and integration points with farm CRMs and public agri-data, and (3) an evaluation framework linking agronomic KPIs to spatial-economic constraints for resilient adoption. The approach is designed for cross-border replication (Ukraine - Germany) and to inform respectable policy outputs on digital land management and peri-urban agrifood resilience.

Keywords: *precision agriculture, digital agronomy, UAV, AI decision support, peri-urban farming, land use change, logistics costs, Kyiv agglomeration, resilience, policy integration.*