

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.02>

УДК 004.89:628.4

Архітектура інтелектуальної інформаційної системи для цифрового управління побутовими відходами на муніципальному рівні

Фамуляк Володимир Юрійович¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5347-9427>; vovfam@gmail.com

Тригуба Інна Леонтіївна¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5239-5951>; trinle@ukr.net

¹⁾ Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені Степана Гжицького, вул. Володимира Великого, 1. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна

АНОТАЦІЯ

Досліджено концептуальні та прикладні засади побудови інтелектуальної інформаційної системи для цифрового управління побутовими відходами на муніципальному рівні в умовах цифрової трансформації та розвитку концепції «розумного міста». Актуальність дослідження зумовлена зростанням обсягів утворення відходів, ускладненням логістичних процесів їх збору та потребою у зменшенні екологічного навантаження. Метою дослідження є обґрунтування архітектури системи, визначення принципів її побудови та формування адаптивного контуру управління. Для досягнення мети використано системний аналіз сучасних підходів до цифровізації управління відходами, структурно-функціональне та математичне моделювання, методи машинного навчання, евристичні алгоритми і багатоагентний підхід. Запропоновано багаторівневу архітектуру, що поєднує сенсорний збір даних, зберігання та управління даними, аналітичну обробку, багатоагентне інтелектуальне ядро, оркестрацію, інтеграцію із зовнішніми інформаційними джерелами, взаємодію з користувачами та виконання управлінських рішень. Розроблено математичну модель оптимізації логістики збору відходів, яка враховує динаміку заповнення контейнерів, обмеження транспортних засобів, часові обмеження та доступність дорожньої інфраструктури. Запропоновано алгоритм функціонування системи із перевіркою якості даних, генерацією та оцінюванням маршрутів, їх адаптивною оптимізацією, виконанням, моніторингом і зворотним зв'язком. Наукова новизна одержаних результатів полягає в інтеграції зазначених компонентів у єдину багаторівневу архітектуру з адаптивним циклом прийняття рішень. Практична значимість полягає у можливості використання запропонованої архітектури як методологічної основи для проєктування та впровадження цифрових систем управління побутовими відходами на рівні територіальних громад.

Ключові слова: інтелектуальні інформаційні системи; управління відходами; муніципальні відходи; Інтернет речей; штучний інтелект; аналітика великих даних; оптимізація логістики; циркулярна економіка

Для цитування: Фамуляк В. Ю., Тригуба І. Л. «Архітектура інтелектуальної інформаційної системи для цифрового управління побутовими відходами на муніципальному рівні». *Інформатика. Культура. Техніка.* 2026; Том 3 № 1 (3): 23–36. DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.02>

Актуальність. У сучасних умовах урбанізації та стрімкого зростання чисельності населення проблема ефективного управління побутовими відходами набуває критичного значення. Міські агломерації характеризуються високою щільністю населення, інтенсивним споживанням ресурсів та значними обсягами утворення відходів. За прогнозами Світового банку, до 2050 року глобальний обсяг побутових відходів може перевищити 3,4 млрд тонн, що створює значне навантаження на муніципальну інфраструктуру та екосистеми [1]. Особливо гостро ця проблема проявляється у великих містах, де темпи зростання відходів випереджають розвиток систем їх збору та переробки.

Побутові відходи характеризуються складною морфологічною структурою та різноманітністю компонентів, що включають органічні залишки, пластик, скло, папір, метал та небезпечні домішки. Накопичення відходів у контейнерах та на полігонах призводить до негативних екологічних наслідків, а саме забруднення ґрунтів і водних ресурсів, утворення фільтрату, а також викидів парникових газів, наприклад, метану. Додатковим негативним чинником є порушення санітарно-гігієнічних умов у місцях накопичення відходів, що створює ризики для здоров'я населення та сприяє поширенню патогенних мікроорганізмів.

Традиційні системи управління відходами, які використовуються у більшості муніципалітетів, базуються на фіксованих графіках і маршрутах збору, що не враховують

фактичний рівень заповнення контейнерів та динаміку утворення відходів. Унаслідок цього виникає низка проблем, зокрема перевантаження контейнерів у періоди пікового навантаження, передчасне обслуговування частково заповнених контейнерів, неефективне використання транспортних засобів, а також зростання витрат на паливо та обслуговування техніки. Відсутність оперативної інформації про стан контейнерів значно ускладнює планування логістичних процесів та знижує якість надання послуг.

Існуючі підходи до управління відходами також характеризуються обмеженими можливостями аналітичної обробки даних, оскільки у більшості випадків рішення приймаються на основі історичних даних або експертних оцінок, але це не дозволяє враховувати поточні зміни та оперативно реагувати на нестандартні ситуації. Вони призводять до суб'єктивності управлінських рішень і знижують загальну ефективність системи.

У сучасних дослідженнях дедалі більше уваги приділяється впровадженню цифрових технологій у сферу управління відходами. Зокрема, використання Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), геоінформаційних систем (GIS) та аналітики великих даних створює передумови для формування інтелектуальних систем, що зможуть забезпечити автоматизований моніторинг, прогнозування та оптимізацію процесів управління відходами. Застосування сенсорних мереж дозволяє отримувати дані про стан контейнерів у реальному часі, а алгоритми машинного навчання забезпечувати прогнозування утворення відходів і оптимізацію маршрутів їх збору.

Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері, відсутня узагальнена архітектура інтелектуальної інформаційної системи, яка б інтегрувала всі ключові компоненти – від збору даних до підтримки управлінських рішень – у єдину цифрову екосистему. Також недостатньо опрацьованими є питання інтеграції таких систем у контексті циркулярної економіки та забезпечення їх масштабованості на муніципальному рівні.

Саме тому розробка архітектури інтелектуальної інформаційної системи для цифрового управління побутовими відходами, яка забезпечує адаптивне управління логістикою, ефективне використання ресурсів та зменшення екологічного навантаження, є актуальною науково-прикладною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні підходи до управління побутовими відходами перебувають у стадії активної трансформації під впливом цифрових технологій. Традиційні системи, що базуються на статичних схемах збору та обмеженому використанні даних, поступово замінюються інтелектуальними системами, які забезпечують автоматизований моніторинг, аналіз і оптимізацію процесів поводження з відходами. У наукових публікаціях останніх років основна увага приділяється застосуванню Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), геоінформаційних систем (GIS) та аналітики великих даних (Big Data).

У роботі Ahmed K. та ін. [2] було запропоновано архітектуру системи управління відходами на основі IoT, яка передбачає використання сенсорів для контролю рівня заповнення контейнерів та передачу даних у реальному часі. Отримана інформація використовується для формування повідомлень для муніципальних служб і водіїв сміттєвозів, що дозволяє оперативно реагувати на зміну стану контейнерів. Застосування таких систем сприяє підвищенню ефективності логістики, зменшенню витрат пального та скороченню часу обслуговування.

У дослідженні Belyamani I. [3] систематизовано сучасні підходи до використання штучного інтелекту в управлінні відходами. У своїй роботі автор розглядає застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування обсягів утворення відходів, оптимізації маршрутів їх збору та автоматизованої класифікації матеріалів. Було показано, що використання AI дозволяє підвищити точність прогнозів, зменшити залежність від людського фактора та забезпечити адаптивність системи до змінних умов функціонування.

У публікації Kochanek A. та ін. [4] було проаналізовано інтеграцію геоінформаційних систем, аналітики великих даних та штучного інтелекту в системах управління відходами. У

цій роботі встановлено, що поєднання просторового аналізу з великими масивами даних дозволяє ефективно моделювати розподіл відходів, оптимізувати розміщення контейнерів і переробних потужностей, а також підвищити обґрунтованість управлінських рішень.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням технологій комп'ютерного зору та автоматизованого сортування відходів. Зокрема, застосування алгоритмів глибинного навчання дозволяє здійснювати класифікацію матеріалів за їхніми фізичними та візуальними характеристиками, що створює передумови для підвищення ефективності переробки та зменшення обсягів захоронення відходів [3], [9].

У сучасних роботах також активно досліджується проблема оптимізації логістики збору відходів. Використання задач типу VRP (Vehicle Routing Problem) у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяє формувати адаптивні маршрути, що враховують рівень заповнення контейнерів, дорожню ситуацію та інші фактори. Такі підходи забезпечують зниження експлуатаційних витрат та підвищення ефективності використання транспортних засобів [2], [10].

Паралельно формується дослідницький напрям, пов'язаний із впровадженням кіберфізичних систем (Cyber-Physical Systems), які поєднують сенсорні мережі, обчислювальні моделі та виконавчі механізми у єдину систему управління. У таких системах використовується багаторівнева обробка даних, що дозволяє адаптувати процеси збору та переробки відходів до поточного стану середовища, що створює передумови для переходу до повністю автоматизованих систем управління відходами.

Важливим аспектом є інтеграція систем управління відходами у концепцію циркулярної економіки [6], [7], [11]. У наукових дослідженнях підкреслюється необхідність переходу від лінійної моделі «виробництво-споживання-утилізація» до замкнених циклів використання ресурсів, а застосування цифрових технологій дозволяє здійснювати контроль потоків матеріалів, підвищувати рівень переробки та зменшувати екологічне навантаження [3], [4], [5].

Аналіз наукових публікацій [12], [13], [14], [15], [16] показує, що більшість досліджень зосереджені на окремих аспектах проблеми, таких як сенсорний моніторинг, оптимізація логістики або автоматизоване сортування. Водночас недостатньо уваги приділяється розробці комплексних інтелектуальних інформаційних систем, які зможуть інтегрувати усі зазначені компоненти в єдину цифрову екосистему.

Отже, існує потреба у формуванні узагальненого підходу до побудови архітектури інтелектуальної системи управління побутовими відходами, яка б забезпечувала інтеграцію сенсорних технологій, аналітичних алгоритмів і управлінських інструментів. Саме це визначає актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Постановка завдання. Для підвищення ефективності процесів управління побутовими відходами на муніципальному рівні пропонується підхід до побудови інтелектуальної інформаційної системи, що базується на інтеграції сучасних цифрових технологій та адаптивних алгоритмів обробки даних. Він передбачає формування багаторівневої архітектури системи, що забезпечує безперервний моніторинг стану контейнерів, аналіз потоків відходів, прогнозування їх утворення та оптимізацію логістичних процесів збору [17], [18].

Розроблювана система ґрунтується на використанні сенсорних мереж, технологій Інтернету речей (IoT), геоінформаційних систем (GIS) та алгоритмів штучного інтелекту (AI), які забезпечують обробку великих обсягів даних у режимі реального часу. Це дозволяє перейти від статичних схем управління до адаптивних моделей, що зможуть враховувати фактичний стан інфраструктури, динаміку утворення відходів та зовнішні фактори впливу. Застосування аналітичних методів і моделей машинного навчання створює можливість автоматизованого прийняття рішень, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів і зменшення екологічного навантаження.

Мета статті полягає в обґрунтуванні архітектури інтелектуальної інформаційної системи для цифрового управління побутовими відходами на муніципальному рівні, а також

у визначенні принципів її побудови та функціонування. Особлива увага приділяється інтеграції різнорідних технологічних компонентів у єдину цифрову платформу, що забезпечує узгоджене функціонування всіх елементів системи.

Завдання. Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання: систематизація сучасних підходів до цифровізації процесів управління відходами, визначення ключових структурних компонентів інтелектуальної системи, розроблення багаторівневої архітектури з урахуванням вимог масштабованості та адаптивності, аналіз ефективності впровадження системи за показниками економічної, екологічної та операційної результативності.

Методи. У дослідженні використано системний аналіз для узагальнення сучасних підходів до цифровізації управління побутовими відходами та визначення функціональних вимог до системи; структурно-функціональне моделювання для формування багаторівневої архітектури та опису взаємодії її компонентів; математичне моделювання задачі маршрутизації транспортних засобів для формалізації оптимізації логістики збору відходів; методи машинного навчання, евристичні алгоритми та багатоагентний підхід для прогнозування, генерації, оцінювання й адаптивної корекції маршрутів; метод логічного узагальнення для формування висновків щодо інтеграції цифрових технологій у єдине інформаційне середовище.

Наукова новизна. Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробленні узгодженої багаторівневої архітектури інтелектуальної інформаційної системи управління побутовими відходами, яка інтегрує сенсорний рівень збору даних, управління даними, інтелектуальну аналітику, багатоагентне ядро, оркестрацію, зовнішню інтеграцію, користувацьку взаємодію та рівень виконання. Розвинено підхід до адаптивної маршрутизації шляхом поєднання математичної моделі задачі маршрутизації транспортних засобів із динамічними даними про заповнення контейнерів і механізмом багаторівневого зворотного зв'язку, що дає змогу коригувати управлінські рішення в процесі функціонування системи.

Практична значимість. Результати дослідження створюють методологічної основи для проєктування та впровадження інтелектуальних систем управління відходами, що забезпечують підвищення ефективності логістичних процесів, оптимізацію використання ресурсів та інтеграцію у концепцію сталого розвитку і циркулярної економіки.

Результати. Інтелектуальна інформаційна система управління побутовими відходами розглядається як кіберфізична система, що інтегрує фізичну інфраструктуру збору та транспортування відходів із цифровими технологіями обробки та аналізу даних. Такий підхід передбачає тісну взаємодію між матеріальними об'єктами, наприклад, контейнерами, транспортними засобами, сенсорними пристроями та інформаційними компонентами, що забезпечують обробку, інтерпретацію та використання даних для підтримки управлінських рішень.

Концепція системи базується на принципі безперервного інформаційного циклу, який охоплює етапи збору, передачі, накопичення, обробки, аналізу та використання даних. На етапі збору здійснюється фіксація параметрів стану об'єктів інфраструктури за допомогою сенсорних пристроїв, далі інформація передається до обчислювального середовища, де відбувається її структуризація, фільтрація та підготовка до аналітичної обробки. Ключовим елементом цієї концепції є використання інтелектуальних алгоритмів, які забезпечують перетворення первинних даних у знання, необхідні для прийняття ефективних управлінських рішень. Це включає прогнозування утворення відходів, виявлення аномальних ситуацій, оптимізацію логістичних процесів та підтримку стратегічного планування розвитку інфраструктури.

Запропонована концепція системи формує основу для створення інтегрованої цифрової платформи, здатної забезпечити адаптивне управління процесами поводження з побутовими відходами на муніципальному рівні з урахуванням динамічних змін середовища функціонування.

Архітектура інтелектуальної інформаційної системи управління побутовими відходами формується відповідно до концепції кіберфізичної системи, що передбачає інтеграцію фізичної інфраструктури з цифровими компонентами обробки та аналізу даних. Запропонована архітектура реалізує принцип безперервного інформаційного циклу, який охоплює всі етапи роботи з даними – від їх збору до формування управлінських рішень та зворотного впливу на систему.

З метою забезпечення масштабованості, адаптивності та модульності система побудована за багаторівневим принципом, де кожен рівень виконує окремі функції, але водночас інтегрується в єдину інформаційну екосистему.

На Рис.1 представлено узагальнену багаторівневу архітектуру інтелектуальної інформаційної системи управління побутовими відходами.

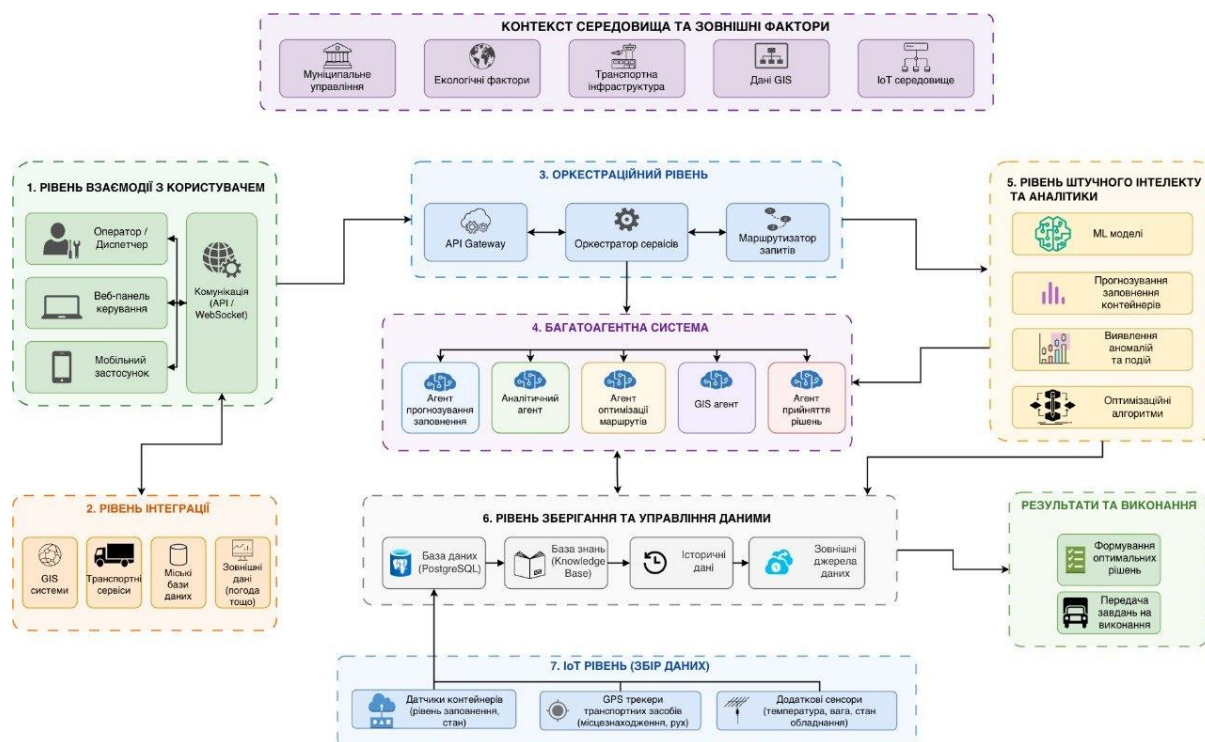


Рис. 1. Багаторівнева архітектура інтелектуальної інформаційної системи управління відходами
Джерело: розроблено авторами

Архітектура інтелектуальної інформаційної системи управління побутовими відходами, представлена на Рис. 1, є реалізована за багаторівневим принципом, який передбачає ієрархічну організацію функціональних компонентів та їх узгоджену взаємодію. Кожен рівень виконує визначені функції обробки, передачі або аналізу даних, що забезпечує формування наскрізного інформаційного потоку в межах системи

Формально архітектуру можна представити у вигляді множини рівнів:

$$S = \{L_1, L_2, \dots, L_7\}, \quad (1)$$

де кожен рівень виконує визначену функцію, а взаємодія між рівнями описується відображенням:

$$F: L_i \rightarrow L_{i+1} \quad . \quad (2)$$

Функціонування системи відбувається в умовах впливу зовнішнього середовища, яке включає муніципальні, екологічні та інфраструктурні фактори. Вони формують контекст функціонування системи та визначають обмеження і параметри прийняття рішень. Взаємодія з контекстом реалізується через інтеграційний, аналітичний та оркестраційний рівні, що забезпечують адаптацію системи до змінних умов експлуатації.

На рівні взаємодії з користувачем (L_1) здійснюється забезпечення доступу до системи та формування інтерфейсів управління. Він містить веб-панелі, мобільні застосунки та інтерфейси диспетчерського управління, що дозволяють виконувати моніторинг стану системи, аналіз даних та формування управлінських рішень. Взаємодія реалізується через механізми комунікації, що забезпечують двосторонній обмін інформацією між користувачем та системою.

Рівень інтеграції (L_2) забезпечує підключення зовнішніх інформаційних джерел та систем, таких як геоінформаційні сервіси, транспортні платформи та міські бази даних. Це дозволяє розширити інформаційне середовище системи та враховувати додаткові фактори при аналізі та оптимізації процесів управління відходами.

Оркестраційний рівень (L_3) виконує функції координації взаємодії між компонентами системи та управління потоками даних. Використання API Gateway, оркестраторів сервісів та механізмів маршрутизації забезпечує узгоджене функціонування системи та передачу задач до інтелектуального ядра. На цьому етапі здійснюється попередня обробка даних та їх підготовка до подальшого аналізу.

Інтелектуальне ядро системи, представлене багатоагентною системою (L_4), забезпечує розподілену обробку даних та підтримку прийняття рішень. Кожен агент виконує спеціалізовану функцію, зокрема прогнозування заповнення контейнерів, аналіз даних, оптимізацію маршрутів та просторову обробку інформації. Взаємодія між агентами формує узгоджений процес прийняття рішень на основі комплексного аналізу.

Рівень штучного інтелекту та аналітики (L_5) забезпечує реалізацію моделей машинного навчання та аналітичних алгоритмів. Тут здійснюється прогнозування, виявлення аномалій та оптимізація логістичних процесів. Використання методів штучного інтелекту дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління системою.

Рівень зберігання та управління даними (L_6) забезпечує накопичення, обробку та доступ до інформаційних ресурсів системи. Він включає бази даних, бази знань, історичні та зовнішні джерела інформації, що формують основу для аналітичної обробки та прогнозування.

ІоТ-рівень (L_7) забезпечує збір первинних даних із фізичних об'єктів системи у режимі реального часу. Використання сенсорних пристроїв дозволяє здійснювати моніторинг стану контейнерів, транспорту та інших елементів інфраструктури, формуючи початковий інформаційний потік системи.

Завершальним етапом функціонування системи є рівень результатів та виконання, на якому сформовані управлінські рішення трансформуються у практичні дії. Це включає передачу оптимальних маршрутів збору відходів до виконавчих підсистем та їх реалізацію у фізичному середовищі.

Таким чином, у межах архітектури реалізується узагальнений інформаційний потік:

$$D_{out} = F(L_7 \cdot L_6 \cdot L_5 \cdot L_4 \cdot L_3 \cdot L_2 \cdot L_1)(D_0), \quad (3)$$

де D_0 – початковий інформаційний потік (сенсорні та зовнішні дані); D_{out} – результуючі управлінські рішення; F – композиція функцій обробки на відповідних рівнях.

Запропонована багаторівнева архітектура забезпечує узгоджену взаємодію між усіма компонентами системи та формує основу для ефективного, адаптивного та масштабованого управління побутовими відходами.

Для узагальнення характеристик кожного рівня багаторівневої архітектури у таблиці 1 наведено їх структурований опис.

Важливою складовою запропонованої багаторівневої архітектури є наявність механізму зворотного зв'язку, який забезпечує передачу результатів виконання та аналітичних висновків до нижчих рівнів системи, зокрема до рівня даних та ІоТ-інфраструктури. Це дозволяє реалізувати адаптивне управління, при якому система динамічно реагує на зміни стану середовища, коригуючи параметри функціонування та сценарії прийняття рішень у реальному часі.

Таблиця 1. Опис рівнів багаторівневої архітектури інтелектуальної системи управління побутовими відходами

Назва рівня	Опис	Основні компоненти	Функції
Контекст середовища та зовнішні фактори	Визначає зовнішні умови функціонування системи та накладає обмеження а процеси прийняття рішень. Не входить до обчислювального ядра, але впливає на всі рівні системи	Муніципальне управління, екологічні фактори, транспортна інфраструктура, GIS-дані, IoT-середовище	Формування зовнішніх умов функціонування, визначення обмежень, вплив на аналітичні та оптимізаційні процеси
Рівень взаємодії з користувачем (L_1)	Забезпечує взаємодію користувачів із системою через інтерфейси та відображення результатів роботи системи	Оператор/диспетчер, веб-панель керування, мобільний застосунок, модуль комунікації (API / WebSocket)	Візуалізація даних, введення інформації, моніторинг, формування запитів, підтримка прийняття рішень
Рівень інтеграції (L_2)	Забезпечує підключення зовнішніх інформаційних систем та джерел даних, що розширюють інформаційну базу системи	GIS системи, транспортні сервіси, міські бази даних, зовнішні дані (погода тощо)	Інтеграція зовнішніх джерел, агрегація даних, забезпечення багатфакторного аналізу
Оркестраційний рівень (L_3)	Координує взаємодію між компонентами системи, управляє потоками даних і забезпечує маршрутизацію запитів	API Gateway, оркестратор сервісів, маршрутизатор запитів	Управління потоками даних, маршрутизація, координація сервісів, передача задач
Багатоагентна система (L_4)	Інтелектуальне ядро системи, що реалізує обробку даних через взаємодію спеціалізованих агентів	Агент прогнозування заповнення, аналітичний агент, агент оптимізації маршрутів, GIS-агент, агент прийняття рішень	Аналіз даних, прогнозування, оптимізація маршрутів, просторовий аналіз, підтримка прийняття рішень
Рівень штучного інтелекту та аналітики (L_5)	Забезпечує інтелектуальну обробку даних на основі методів машинного навчання та аналітики	ML-моделі, модулі прогнозування, виявлення аномалій, оптимізаційні алгоритми	Прогнозування, виявлення аномалій, оптимізація, аналітична підтримка
Рівень зберігання та управління даними (L_6)	Забезпечує накопичення, зберігання та доступ до даних, необхідних для функціонування системи	База даних (PostgreSQL), база знань (Knowledge Base), історичні дані, зовнішні джерела	Зберігання даних, інтеграція інформації, підтримка аналітики, історичний аналіз
IoT рівень (збір даних) (L_7)	Забезпечує отримання первинних даних із фізичних об'єктів системи у реальному часі	Датчики контейнерів, GPS-трекери, додаткові сенсори (температура, вага, стан обладнання)	Збір даних, моніторинг стану, передача даних у систему
Рівень результатів та виконання	Забезпечує реалізацію прийнятих рішень у фізичному середовищі та їх передачу на виконання	Модулі формування рішень, системи диспетчеризації, виконавчі механізми	Формування оптимальних рішень, передача задач, виконання маршрутів

Джерело: розроблено авторами

Запропонована архітектура забезпечує інтеграцію фізичних, інформаційних та інтелектуальних компонентів у єдину систему, що дозволяє реалізувати повний цикл управління побутовими відходами – від збору первинних даних до формування оптимальних управлінських рішень та їх практичного виконання. Особливістю архітектури є чітке розмежування функціональних рівнів, представлених у Таблиці 1, що забезпечує модульність, масштабованість та гнучкість системи.

Функціонування системи значною мірою визначається впливом контексту середовища та зовнішніх факторів, які включають муніципальне управління, екологічні умови, транспортну інфраструктуру, геоінформаційні дані та IoT-середовище. Дані фактори формують зовнішні обмеження та параметри функціонування системи, які враховуються на рівнях інтеграції,

аналітики та прийняття рішень. Отже, система функціонує не ізольовано, а як частина більш широкого цифрового та фізичного середовища.

Рівень взаємодії з користувачем забезпечує інтерфейс доступу до системи та виступає точкою входу і виходу інформаційних потоків. Через веб-панелі, мобільні застосунки та диспетчерські інтерфейси користувачі здійснюють моніторинг, аналіз та управління системою. Використання сучасних механізмів комунікації (API, WebSocket) забезпечує оперативний обмін даними та інтерактивну взаємодію з системою.

Рівень інтеграції відіграє ключову роль у розширенні інформаційної бази системи за рахунок підключення зовнішніх джерел даних, таких як GIS-системи, транспортні сервіси, міські реєстри та погодні сервіси. Це дозволяє враховувати широкий спектр факторів при аналізі та прийнятті рішень, що підвищує точність та обґрунтованість управлінських дій.

Оркестраційний рівень забезпечує координацію взаємодії між усіма компонентами системи. Використання API Gateway, оркестраторів сервісів та механізмів маршрутизації запитів дозволяє реалізувати узгоджене управління потоками даних та ефективну взаємодію між модулями системи. Саме тут відбувається передача задач до інтелектуального ядра.

Ключовим елементом архітектури є багатоагентна система, яка виступає інтелектуальним ядром. Вона включає набір спеціалізованих агентів, що виконують функції аналізу, прогнозування, оптимізації та прийняття рішень. Мультиагентний підхід забезпечує розподілену обробку даних, підвищує адаптивність системи та дозволяє ефективно опрацьовувати складні багатфакторні задачі.

Рівень штучного інтелекту та аналітики забезпечує реалізацію моделей машинного навчання та алгоритмів аналізу даних. На ньому виконуються задачі прогнозування заповнення контейнерів, виявлення аномальних ситуацій та оптимізації логістичних процесів. Використання методів штучного інтелекту дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління системою.

Рівень зберігання та управління даними забезпечує накопичення, зберігання та обробку інформації, необхідної для функціонування системи. Використання баз даних, баз знань, історичних та зовнішніх джерел інформації створює основу для аналітики, прогнозування та підтримки прийняття рішень.

IoT-рівень (рівень збору даних) забезпечує отримання первинної інформації про стан об'єктів системи у реальному часі. Використання сенсорних технологій (датчики заповнення, GPS-трекери, додаткові сенсори) дозволяє здійснювати постійний моніторинг стану контейнерів, транспорту та інфраструктури.

Рівень результатів та виконання забезпечує трансформацію аналітичних результатів у практичні дії. З його допомогою формуються оптимальні управлінські рішення та здійснюється передача задач на виконання, зокрема формування маршрутів збору відходів та їх реалізація у фізичному середовищі.

Ефективне функціонування запропонованої архітектури значною мірою визначається використанням сучасних цифрових технологій, серед яких ключову роль відіграють геоінформаційні системи (GIS), аналітика великих даних (Big Data) та штучний інтелект (AI). Інтеграція цих технологій у єдину інформаційну платформу забезпечує можливість комплексного аналізу даних, підтримки прийняття рішень та адаптивного управління системою.

Геоінформаційні системи забезпечують просторовий аналіз та візуалізацію даних, дозволяючи інтегрувати інформацію про розташування контейнерів, транспортних засобів та об'єктів інфраструктури. Аналітика великих даних забезпечує обробку значних обсягів інформації, виявлення закономірностей та багатфакторний аналіз процесів утворення відходів. Штучний інтелект забезпечує інтелектуалізацію системи, реалізуючи задачі прогнозування, оптимізації та автоматичного виявлення аномалій.

Синергетичне поєднання GIS, Big Data та AI формує інтегроване інформаційне середовище, у якому дані трансформуються у ефективні управлінські рішення. Це дозволяє підвищити ефективність логістичних процесів, знизити витрати та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Одним із ключових функціональних компонентів системи є підсистема оптимізації логістики збору та транспортування відходів, яка реалізується на рівнях штучного інтелекту та багатоагентної системи. Вона забезпечує адаптивне формування маршрутів на основі поточного стану контейнерів, даних сенсорів та прогнозних моделей, що дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів та забезпечити своєчасне обслуговування інфраструктури.

Задача оптимізації логістичних процесів у межах інтелектуальної інформаційної системи управління побутовими відходами формалізується як задача маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP), яка реалізується на аналітико-оптимізаційному рівні системи (L_5) у взаємодії з інтелектуальним ядром (L_4). Основною метою є мінімізація сумарних витрат на переміщення транспорту між пунктами обслуговування з урахуванням динамічного стану системи

Цільова функція оптимізації може бути представлена у вигляді:

$$\min \sum d_{ij} x_{ij}, \quad (4)$$

де d_{ij} – відстань між пунктами i та j ; x_{ij} – бінарна змінна, що визначає факт переміщення транспортного засобу між відповідними пунктами ($x_{ij} \in \{0,1\}$).

Математична модель враховує низку обмежень, які відображають реальні умови функціонування системи:

- обмеження місткості транспортних засобів;
- часові обмеження обслуговування контейнерів;
- пріоритетність обслуговування окремих об'єктів;
- обмеження доступності дорожньої інфраструктури.

Особливістю запропонованого підходу є врахування динамічного характеру утворення відходів, що безпосередньо пов'язано з функціонуванням IoT-рівня (L_7) та рівня управління даними (L_6).

Обсяг відходів у кожному контейнері змінюється в часі та може бути описаний залежністю:

$$q_i(t) = q_i(t-1) + \Delta q_i(t), \quad (5)$$

де $q_i(t)$ – поточний обсяг відходів у контейнері; $q_i(t-1)$ – обсяг відходів у попередній момент часу; $\Delta q_i(t)$ – приріст відходів за інтервал часу.

Використання даної залежності дозволяє враховувати зміну стану контейнерів у режимі реального часу, що є принципово важливим для переходу від статичних до адаптивних моделей маршрутизації. Це забезпечує формування більш точних прогнозів та своєчасну реакцію системи на зміни в навантаженні.

Інтеграція математичної моделі з аналітико-оптимізаційним рівнем (L_5) та інтелектуальним ядром системи (L_4) забезпечує можливість прогнозування заповнення контейнерів і формування оптимальних маршрутів із урахуванням як поточного, так і очікуваного стану системи.

У межах загального інформаційного потоку це відповідає етапу інтелектуального перетворення даних:

$$D_{opt} = f_{opt}(D_{in}), \quad (6)$$

де D_{opt} – вхідні дані (сенсорні, історичні, зовнішні); D_{in} – оптимізовані управлінські рішення (маршрути, графіки, пріоритети обслуговування).

Реалізація даного підходу дозволяє:

- уникати переповнення контейнерів;
- зменшувати кількість порожніх виїздів транспорту;
- оптимізувати використання ресурсів;
- підвищувати загальну ефективність логістичних процесів.

Запропонована математична модель є складовою інтелектуального контуру управління

системи та інтегрується у загальну багаторівневу архітектуру, забезпечуючи адаптивність, ефективність та відповідність сучасним вимогам цифрових систем управління.

Функціонування інтелектуальної інформаційної системи управління побутовими відходами базується на послідовному виконанні етапів збору, обробки, аналізу та прийняття рішень, що реалізуються у вигляді інтегрованого алгоритму. Він забезпечує узгоджену взаємодію IoT-рівня, рівня даних, аналітичного рівня та рівня прийняття рішень, формуючи єдиний замкнений цикл управління логістикою збору відходів.

Алгоритм функціонування інтелектуальної інформаційної системи управління побутовими відходами відображає безперервний циклічний процес обробки даних, що відповідає концепції кіберфізичної системи та узгоджується із багаторівневою архітектурою, наведеною на Рис. 1. Узагальнена блок-схема алгоритму, представлена на Рис. 2, відображає послідовність перетворення даних – від етапу їх збору до формування, реалізації та корекції управлінських рішень у режимі реального часу.

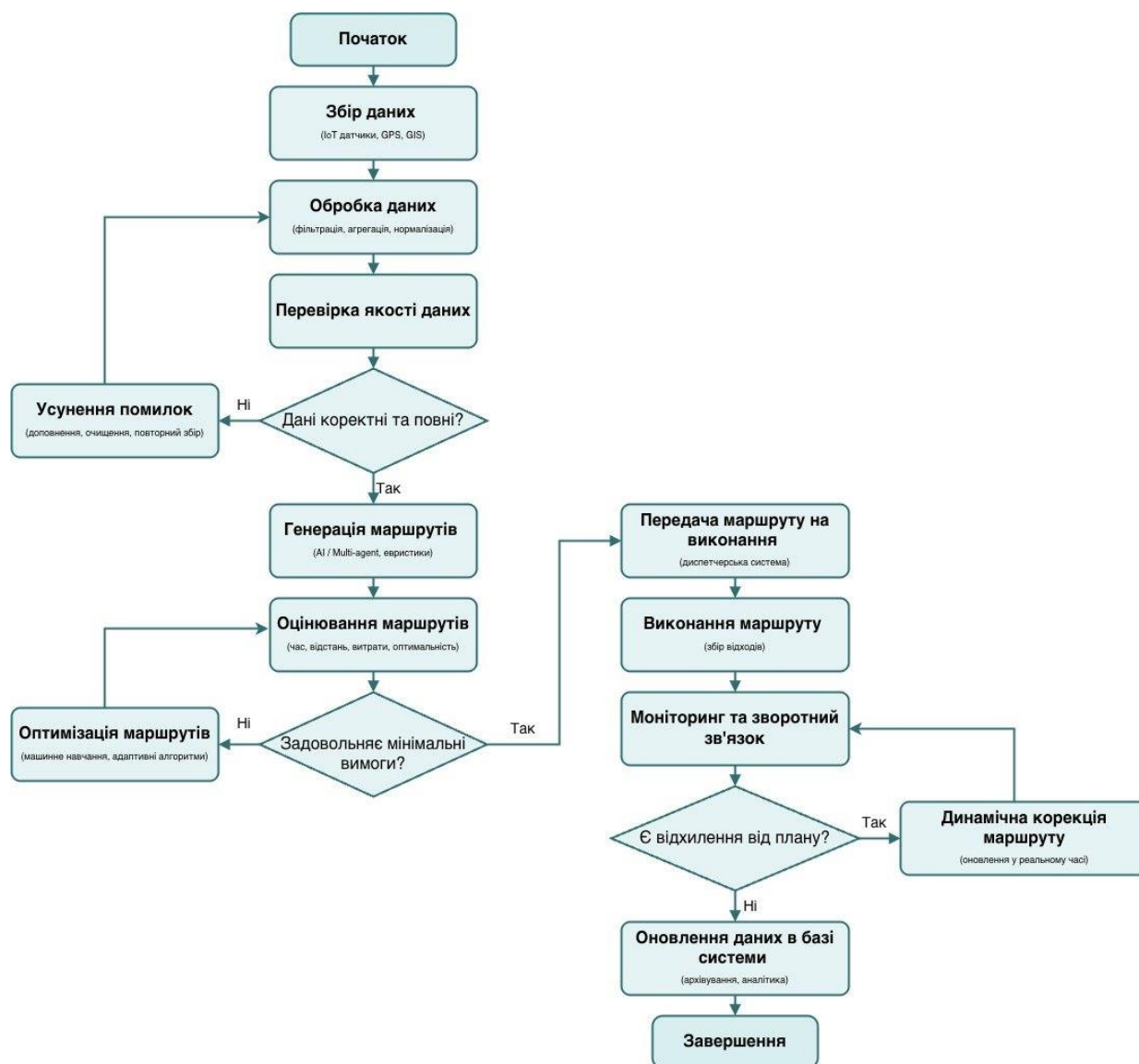


Рис. 2. Узагальнений алгоритм функціонування системи цифрового управління побутовими відходами

Джерело: розроблено авторами

На початковому етапі здійснюється збір даних, який включає отримання інформації від IoT-датчиків, GPS-трекерів транспортних засобів та геоінформаційних систем (GIS). Зібрані дані характеризують поточний стан контейнерів (рівень заповнення, стан), просторове розташування об'єктів, а також додаткові параметри, що впливають на логістичні процеси.

Цей етап відповідає IoT-рівню (L_7) та формує первинний інформаційний потік системи.

На етапі обробки даних виконується попередня обробка отриманої інформації, що включає фільтрацію, агрегацію та нормалізацію даних. У результаті формується узгоджений інформаційний масив, придатний для подальшого аналізу. Цей етап відповідає рівню зберігання та управління даними (L_6) у взаємодії з оркестраційним рівнем (L_3).

Важливим етапом алгоритму є перевірка якості даних, на якому здійснюється оцінка коректності та повноти отриманої інформації. У разі виявлення некоректних або неповних даних система переходить до етапу усунення помилок, який включає очищення, доповнення або повторний збір даних. Після цього обробка даних виконується повторно, що забезпечує достовірність інформаційної бази системи.

У випадку, якщо дані є коректними та повними, система переходить до етапу генерації маршрутів, який реалізується із застосуванням методів штучного інтелекту, мультиагентного підходу та евристичних алгоритмів. На цьому етапі формується множина можливих маршрутів збору відходів з урахуванням поточного стану системи та обмежень задачі маршрутизації.

На етапі оцінювання маршрутів здійснюється аналіз сформованих варіантів за визначеними критеріями ефективності, такими як час виконання, довжина маршруту, витрати ресурсів та загальна оптимальність. Отримані результати використовуються для подальшого прийняття рішення.

Основним елементом алгоритму є вузол перевірки відповідності мінімальним вимогам, у якому визначається доцільність використання сформованого маршруту. У разі невідповідності заданим критеріям система переходить до етапу оптимізації маршрутів, де застосовуються методи машинного навчання та адаптивні алгоритми для покращення параметрів маршруту. Після цього оптимізований маршрут повторно оцінюється, що забезпечує ітераційний характер процесу.

У випадку, якщо маршрут задовольняє задані вимоги, він передається до виконавчої підсистеми, де здійснюється його передача на виконання у диспетчерську систему. На наступному етапі відбувається безпосереднє виконання маршруту, що включає процес збору відходів транспортними засобами.

Після виконання маршруту система переходить до етапу моніторингу та зворотного зв'язку, на якому здійснюється збір актуальних даних про виконання завдання. Отримана інформація включає фактичні параметри маршруту, відхилення від плану та поточний стан системи. У межах цього етапу виконується перевірка наявності відхилень від запланованих параметрів. Якщо виявлено відхилення, система переходить до етапу динамічної корекції маршруту, який передбачає оновлення маршруту у режимі реального часу з урахуванням нових даних. Скоригований маршрут повторно передається до етапу моніторингу, що формує замкнений цикл адаптивного управління.

У випадку відсутності відхилень система виконує оновлення даних у базі, що включає архівування, накопичення історичних даних та підготовку інформації для подальшої аналітики. Після цього алгоритм переходить до завершального етапу, який завершує поточний цикл обробки.

Отже, запропонований алгоритм має ітераційний та адаптивний характер, забезпечує безперервне оновлення даних та дозволяє системі ефективно реагувати на змінні умови функціонування. Його структура узгоджується з багаторівневою архітектурою (Рис. 1) та забезпечує інтеграцію процесів збору даних, їх перевірки, аналітичної обробки, оптимізації та реалізації управлінських рішень.

Висновки. Виконаний аналіз сучасних підходів до управління побутовими відходами показав, що традиційні системи, які базуються на фіксованих маршрутах і статичних графіках обслуговування, не забезпечують достатнього рівня ефективності в умовах зростання обсягів відходів та ускладнення міської інфраструктури. Встановлено, що існуючі рішення мають обмеження, пов'язані з відсутністю оперативного моніторингу, недостатнім використанням даних та низькою адаптивністю до змінних умов функціонування. Це

обґрунтовує доцільність переходу до інтелектуальних інформаційних систем, побудованих на основі інтеграції сучасних цифрових технологій.

1. У роботі обґрунтовано концепцію інтелектуальної інформаційної системи як кіберфізичної структури, що поєднує фізичну інфраструктуру збору відходів із цифровими засобами обробки, аналізу та управління даними. Запропонована багаторівнева архітектура (Рис. 1) реалізована у вигляді ієрархічної системи, що включає IoT-рівень збору даних, рівень зберігання та управління даними, аналітичний рівень, багатоагентне інтелектуальне ядро, оркестраційний рівень, рівень інтеграції, рівень взаємодії з користувачем, а також рівень результатів та виконання. Особливістю архітектури є врахування контексту середовища та зовнішніх факторів, що визначають умови функціонування системи. Такий підхід забезпечує формування наскрізного інформаційного потоку та створює основу для адаптивного управління процесами поводження з відходами.

2. Визначено роль ключових цифрових технологій, таких як геоінформаційні системи (GIS), аналітика великих даних (Big Data) та штучний інтелект (AI), у підвищенні ефективності функціонування системи. Встановлено, що їх інтеграція дозволяє здійснювати просторово-часовий аналіз, прогнозування утворення відходів, виявлення аномалій та оптимізацію логістичних процесів. Синергетичне поєднання цих технологій формує інтегроване інформаційне середовище, у якому дані трансформуються в обґрунтовані управлінські рішення відповідно до принципів цифрової трансформації та концепції “розумного міста”.

3. Розроблено математичну модель оптимізації логістики збору відходів, яка базується на задачі маршрутизації транспортних засобів і враховує динамічний характер утворення відходів. Запропонована модель включає цільову функцію мінімізації витрат та систему обмежень, що відображають реальні умови функціонування, а також динамічну компоненту, яка описує зміну рівня заповнення контейнерів у часі. Це дозволяє реалізувати адаптивну маршрутизацію, підвищити ефективність використання транспортних ресурсів та зменшити кількість неефективних виїздів.

4. Запропоновано алгоритм функціонування інтелектуальної системи управління відходами (Рис. 2), який забезпечує інтеграцію процесів збору, обробки та перевірки якості даних, генерації та оцінювання маршрутів, їх оптимізації, виконання та моніторингу у єдиний замкнений цикл. Особливістю алгоритму є наявність багаторівневого механізму зворотного зв'язку, що включає як етапи перевірки якості даних, так і динамічну корекцію маршрутів у процесі виконання. Це забезпечує адаптацію системи до змін у реальному часі та підвищує стійкість її функціонування.

Конфлікт інтересів: Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження та його результати

Фінансування: Дослідження проводилося без фінансової підтримки

Доступність даних: Усі дані, моделі, схеми та узагальнені результати, необхідні для розуміння дослідження, подано в основному тексті рукопису

Використання засобів штучного інтелекту (ШІ): під час підготовки рукопису використовувався інструмент ChatGPT (модель GPT-5.6 SoI) штучного інтелекту (ШІ) для граматичної та стилістичної перевірки тексту. Усі фрагменти, опрацьовані за його допомогою, були перевірені й відредаговані автором. ШІ не використовувався для генерації тексту, формул і таблиць, формування наукових положень, отримання результатів або формулювання висновків. Наукові положення, результати та висновки є власним інтелектуальним внеском авторів

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. “What a Waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050”. *World Bank*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
2. Ahmed, K., Dubey, M. & Kumar, A. “Artificial intelligence and IoT driven system architecture for smart waste management”. *Measurement: Sensors*. 2024; 31: 101395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101395>.

3. Belyamani, I. “Artificial intelligence in waste management systems: Applications, challenges, and prospects”. *Waste Management Bulletin*. 2025; 2 (1): 100269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.100269>
4. Kochanek, A., et al. “Integration of GIS, Big Data, and Artificial Intelligence in modern waste management systems”. *Sustainability*. 2026; 18 (1): 385. DOI: <https://doi.org/10.3390/su18010385>.
5. Tryhuba, A., Koval, N., Tryhuba, I., Firman, I., Famuliak, V., Tatomyr, A., Hulko, B., Rozhko, I., Rudynets, M. & Fedorchuk-Moroz, V. “A Data-driven risk-informed decision support framework for sustainable municipal organic waste management in smart cities”. *Sustainability*. 2026; 18 (12): 5862, <https://www.scopus.com/pages/publications/105043042347>. DOI: <https://doi.org/10.3390/su18125862>.
6. Tryhuba, A., Mudryk, K., Tryhuba, I., Kotsylovskiy, M., Sorokin, D., Bezalychna, O., Pysz, P. & Hutsol, T. “Models for sustainable management of livestock waste based on neural network architectures”. *Scientific Reports*. 2025; 15 (1): 28082, <https://www.scopus.com/pages/publications/105012409526>. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13150-9>.
7. Tryhuba, A., Hutsol, T., Česna, J., Tryhuba, I., Mudryk, K., Francik, S., Kukharets, S., Mishchenko, I. & Oliinyk, R. “Optimizing energy systems of livestock farms with computational intelligence for achieving energy autonomy”. *Scientific Reports*. 2025; 15 (1): 10777, <https://www.scopus.com/pages/publications/105001479568>. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92836-6>.
8. Longhi, S., Marzioni, D., Alidori, E., et al. “Solid waste management architecture using wireless sensor network technology”. *Proceedings of the 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security*. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/NTMS.2012.6208742>.
9. Anagnostopoulos, T., et al. “A smart waste management system using IoT”. *Sensors*. 2017; 17 (10): 2386. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17102386>.
10. Dey, S. & Ashok, R. “Machine learning approaches for waste generation forecasting”. *Environmental Modelling & Software*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025>
11. Chen, J., et al. “Deep learning-based waste classification systems: A review”. *Waste Management*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025>.
12. Kucher, O., Hutsol, O., Prokopchuk, L., Hutsol, T., Vasylyshen, Y., Tryhuba, A., Gajda, J., Kornas, R. & Borusiewicz, A. “Application of marketing tools in the bioeconomic sector”. *Sustainability*. 2025; 17 (8): 3590, <https://www.scopus.com/pages/publications/105003800227>. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17083590>.
13. Hess, C., Dragomir, A. G., Doerner, K. F. & Vigo, D. “Waste collection routing: a survey on problems and methods”. *Central European Journal of Operations Research*. 2024; 32 (2): 399–434. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10100-023-00892-y>.
14. Mienye, I. D. & Swart, T. G. “A comprehensive review of deep learning: architectures, recent advances, and applications”. *Information*. 2024; 15 (12): 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/info15120755>.
15. Dahmane, W. M., Ouchani, S. & Bouarfa, H. “Smart cities services and solutions: A systematic review”. *Data and Information Management*. 2025; 9 (2): 100087. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dim.2024.100087>.
16. Dritsas, E. & Trigka, M. “Big data and Internet of Things applications in smart cities: Recent advances, challenges, and critical issues”. *Internet of Things*. 2025; 34: 101770. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101770>.
17. Cárdenas-León, I., Koeva, M., Nourian, P. & Davey, C. “Urban digital twin-based solution using geospatial information for solid waste management”. *Sustainable Cities and Society*. 2024; 115: 105798, <https://www.scopus.com/pages/publications/85204687861>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105798>.
18. Zhang, D., et al. “Dynamic vehicle routing for waste collection”. *Transportation Research Part B*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020>.

Отримано 15.07.2026

Отримано після перегляду 26.08.2026

Прийнято 02.09.2026

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.03.2026.02>

UDC 004.89:628.4

Architecture of an intelligent information system for digital municipal solid waste management

Volodymyr Yu. Famuliak¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5347-9427>; vovfam@gmail.com

Inna L. Tryhuba¹⁾

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5239-5951>; trinle@ukr.net

¹⁾ Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, 1, Volodymyr Velykyi St. Dubliany. Lviv District, Lviv Region, Ukraine

ABSTRACT

The paper examines the conceptual and applied foundations of an intelligent information system for digital municipal solid waste management in the context of digital transformation and the smart city concept. The relevance of the study is determined by the growth of waste generation, the increasing complexity of collection logistics, and the need to reduce environmental impacts. The aim is to substantiate the system architecture, define the principles of its construction, and form an adaptive management loop. The study applies systems analysis of modern approaches to waste-management digitalization, structural and functional modelling, mathematical modelling, machine-learning methods, heuristic algorithms, and a multi-agent approach. A multi-level architecture is proposed that integrates sensor-based data acquisition, data storage and management, analytical processing, a multi-agent intelligent core, orchestration, integration with external information sources, user interaction, and the execution of management decisions. A mathematical model for waste-collection logistics optimization is developed, taking into account the dynamics of container filling, vehicle-capacity constraints, service time constraints, and road-infrastructure availability. An operating algorithm is proposed that combines data-quality verification, route generation and evaluation, adaptive optimization, execution, monitoring, and feedback. The scientific novelty lies in integrating these components into a coherent multi-level architecture with an adaptive decision-making cycle. The practical significance is the possibility of using the proposed architecture as a methodological basis for designing and implementing digital municipal waste-management systems for territorial communities.

Keywords: Intelligent information systems; waste management; municipal solid waste; Internet of Things; artificial intelligence; Big Data analytics; logistics optimization; circular economy

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ



Фамуляк Володимир Юрійович - аспірант. Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені Степана Гжицького, вул. Володимира Великого, 1. Дубляни, Львівський р-н, Львівська обл., Україна

Галузь досліджень: інформаційні системи та технології; інтелектуальні інформаційні системи; цифрове управління побутовими відходами

Volodymyr Yu. Famuliak - PhD student. Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, 1, Volodymyr Velykyi St., Dubliany, Lviv Region, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5347-9427>; vovfam@gmail.com

Research field: information systems and technologies; intelligent information systems; digital household waste management



Тригуба Інна Леонтіївна - кандидат сільськогосподарських наук. Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені Степана Гжицького, вул. Володимира Великого, 1. Дубляни, Львівська обл., Україна

Галузь досліджень: сталий розвиток; управління процесами утилізації відходів; моделювання та прогнозування агротехнологічних процесів; управління проектами у рослинництві

Inna L. Tryhuba - PhD. Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, 1, Volodymyr Velykyi St. Dubliany, Lviv Region, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5239-5951>; trinle@ukr.net

Research field: sustainable development; waste management; modeling and forecasting of agricultural processes; project management in crop production