

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ В УМОВАХ ПОСТВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ: ВПРОВАДЖЕННЯ ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЛОГІСТИКИ ТА ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ У МІСТАХ УКРАЇНИ

OPTIMIZATION OF WASTE MANAGEMENT SYSTEMS IN THE CONTEXT OF POST-WAR RECOVERY: IMPLEMENTATION OF IOT TECHNOLOGIES TO IMPROVE LOGISTICS AND REDUCE COSTS IN UKRAINIAN CITIES

У статті розглядаються проблеми поводження з твердими побутовими відходами в умовах поствоєнного відновлення українських міст. Особлива увага приділена загрозам, пов'язаним із руйнуванням сміттєпереробних потужностей, неконтрольованим обігом токсичних відходів і знищенням полігонів. Визначено пріоритетні напрями зниження ризиків: діджиталізація моніторингових систем, пересувні сортувальні станції та стратегічні запаси обладнання для небезпечних відходів. Ключовим є впровадження ІоТ-технологій для моніторингу заповнення контейнерів у реальному часі, що дозволяє оптимізувати логістику, знизити витрати на паливо, навантаження на персонал і транспорт, а також підвищити екологічну безпеку. Аналіз IEEE Xplore та власні розрахунки підтверджують ефективність використання ультразвукових сенсорів, GPS-модулів і сучасних комунікацій. Практичний приклад показує, що впровадження ІоТ-систем і оптимізація маршрутів скорочують середню відстань руху сміттєвозів і кількість активних машин, що значно знижує місячні витрати на логістику та викиди CO₂. Гіпотеза про зниження витрат щонайменше на 15% отримала підтвердження. Запропоновано рекомендації: встановлення датчиків, автоматизація планування маршрутів, регулярне обслуговування техніки, резервний автопарк та залучення міжнародних грантів. Результати дослідження мають практичне значення для органів влади, муніципалітетів і донорів, зацікавлених у модернізації систем поводження з відходами в деокупованих регіонах України.

Ключові слова: ІоТ-моніторинг, оптимізація логістики, відходи, поствоєнне відновлення, економія витрат.

The article examines the current problems of solid waste management in the post-war reconstruction of Ukrainian cities. Particular attention is paid to the analysis of threats associated with the destruction of waste processing facilities, uncontrolled circulation of toxic and medical waste, as well as the destruction of landfills. Priority areas for reducing risks are identified: digitalization of monitoring systems, creation of mobile sorting stations and formation of strategic reserves of equipment for working with hazardous waste. A key aspect of the study is the implementation of Internet of Things (IoT) technologies for monitoring the level of filling of garbage containers in real time. This allows not only to promptly respond to situations with overflow, but also to significantly optimize the logistics of waste removal, reducing fuel costs, reducing the load on personnel and transport fleet, and increasing environmental safety. Analysis of the IEEE Xplore database and our own calculations confirm the effectiveness of using ultrasonic sensors, GPS modules, and modern communication technologies in waste management systems. Using practical research as an example, a basic model for calculating garbage truck logistics costs is presented, taking into account distance, fuel consumption, and its cost. After implementing IoT systems and optimizing routes, a significant reduction in the average distance traveled by vehicles and the number of active garbage trucks is achieved, which allows for a significant reduction in monthly logistics costs. This also helps reduce the load on the transport fleet and reduce CO₂ emissions. The hypothesis of the study that the implementation of IoT solutions allows for a reduction in logistics costs by at least 15% has been confirmed in practice. Recommendations are proposed for the phased implementation of the following technologies: installation of filling sensors, automation of route planning, regular maintenance of equipment, formation of a reserve fleet of garbage trucks, and the search for international grants to finance innovations. The results of the study have practical significance for local governments, municipal services, and international donors interested in modernizing waste management systems in the deoccupied regions of Ukraine. The introduction of digital technologies will not only increase economic efficiency, but also contribute to improving the environmental situation and the quality of life of the population.

Key words: IoT monitoring, logistics optimization, waste, post-war recovery, cost savings.

УДК 338.246.8

DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.17-68>

Панасюк О.М.¹

аспірант,

Сумський державний університет

Росохата А.С.²

к.е.н., доцент,

Сумський державний університет

Сулим В.В.³

к.е.н., доцент,

Сумський державний університет

Panasiuk Oleksandr

Rosokhata Anna

Sulym Victoria

Sumy State University

Постановка проблеми. У контексті поствоєнного відновлення України проблема ефективного управління відходами набуває особливої актуальності, зважаючи на зростання обсягів твердих побутових та будівельних відходів, а також обмежені ресурси місцевих громад. Традиційні

системи збору та утилізації відходів є застарілими, малоефективними та економічно витратними, що ускладнює їх адаптацію до нових умов відбудови. Водночас відсутність належної логістики, моніторингу заповнюваності контейнерів, непрозорість маршрутизації сміттєвозів та відсутність даних

¹ ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-2784-2074>

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6944-1515>

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9114-068X>

для прийняття управлінських рішень стримують модернізацію галузі. У цьому контексті актуальним є впровадження інноваційних підходів на основі IoT-технологій, які дозволяють автоматизувати процеси збору, обробки та аналізу даних, що, у свою чергу, сприяє оптимізації логістичних маршрутів, підвищенню прозорості та скороченню витрат. Таким чином, виникає необхідність системного дослідження можливостей інтеграції IoT-рішень в інфраструктуру управління відходами в українських містах як одного з ключових чинників сталого розвитку в умовах відбудови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Актуальність цифрової трансформації у сфері управління відходами підтверджується низкою джерел. У проєкті «Екорезиденти» наголошено на значенні локальних екологічних ініціатив [1], Зварич І., досліджує циркулярну економіку і глобалізоване управління відходами [2]. Закон України «Про управління відходами» формує правове підґрунтя для впровадження інновацій [3]. Звіт ДСНС вказує на збільшення обсягів відходів внаслідок війни [4], що вимагає оперативних рішень. Погребнюк В., Коваль І., Джумеля Е. [5] досліджують тенденції розвитку методів і систем управління відходами. Пацева І., Герасимчук О., Кагукіна А. [6] аналізують системний підхід управління відходами об'єднаних територіальних громад.

Програма «U-LEAD з Європою» пропонує практичні рекомендації для громад [7].

Досвід деокупованого Ізюма демонструє критичну потребу в оптимізації сміттевої логістики [8]. Європейські аналітичні дані показують ефективність цифрових інструментів у зменшенні обсягів відходів [13]. Звіт UNECE акцентує на екологічних збитках та необхідності моніторингу [14]. У базі IEEE Xplore представлено приклади IoT-рішень для смарт-логістики [15]. Стандарт ISO 31000 слугує основою для управління ризиками в нових системах [16].

Постановка завдання. Мета дослідження – обґрунтувати теоретичні та прикладні засади впровадження IoT-технологій в систему управління відходами в умовах поствоєнного відновлення України з метою підвищення ефективності логістичних процесів, зниження операційних витрат та забезпечення сталого розвитку міської інфраструктури.

Гіпотези дослідження: впровадження IoT-рішень для моніторингу заповнення контейнерів для відходів дозволяє зменшити витрати на логістику щонайменше на 15% за рахунок оптимізації маршрутів та частоти збору.

Методологія: у процесі дослідження було використано комплексний міждисциплінарний підхід, що дозволив забезпечити повноцінне охоплення екологічних, енергетичних, соціальних та економічних аспектів управління бізнес-процесами в умовах післявоєнної відбудови України.

У теоретичній часті здійснено систематизацію сучасних наукових підходів до управління відходами, оцінки екологічної безпеки та ефективності функціонування муніципальних систем, з опорою на досвід посткризових країн.

Для аналізу зовнішнього середовища було застосовано PEST-аналіз, який дав змогу охарактеризувати політичні, економічні, соціальні та технологічні умови функціонування системи управління відходами в сучасних умовах. Для виявлення внутрішніх сильних та слабких сторін, а також зовнішніх можливостей і загроз проведено SWOT-аналіз системи поводження з відходами в Україні.

Ідентифікація екологічних та енергетичних загроз базувалася на використанні матриці ризиків (Risk Matrix) з подальшою класифікацією загроз за ймовірністю виникнення та рівнем їх впливу. Це дозволило обґрунтувати пріоритетні напрями мінімізації ризиків у процесі відбудови.

Емпірична частина роботи включає застосування математичних моделей для оцінки витрат на логістику вивозу відходів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

У період післявоєнної відбудови Україна стикається з комплексними викликами, що охоплюють не лише економічну стабілізацію та відновлення інфраструктури, а й необхідність забезпечення екологічної та енергетичної безпеки. Руйнування, спричинені війною, призвели до значного зростання обсягів відходів, зокрема будівельних і небезпечних, що потребують ефективного та сталого управління. Комплексний підхід до цих проблем дозволить не лише зменшити екологічне навантаження, а й сприятиме формуванню здорового середовища для громадян і розвитку економіки в нових реаліях.

Реформування системи управління відходами в Україні відбувається у контексті широкомасштабної децентралізації, яка передбачає передачу повноважень і відповідальності від центральних органів влади до органів місцевого самоврядування. Одним із ключових інституційних кроків стало ухвалення нового Закону України «Про управління відходами» (2023) [3], що наблизив національне законодавство до європейського acquis та визначив сучасну модель управління цією сферою відповідно до принципів ієрархії поводження з відходами, циркулярної економіки й розширеної відповідальності виробника [1]. Цей закон створив чітку інституційну архітектуру управління, де муніципалітети набули ключової ролі як організатори систем місцевого управління відходами. Згідно з положеннями документа, саме органи місцевого самоврядування відповідальні за розробку регіональних та місцевих планів управління відходами, створення відповідної інфраструктури (переробні комплекси, сміттесортувальні станції, майданчики

для зберігання) та забезпечення інформування населення про правильне поводження з відходами.

У цьому контексті надзвичайно цінним є внесок програми «U-LEAD з Європою» [7], яка сприяє підвищенню інституційної спроможності громад у реалізації реформ у сфері управління відходами. Зокрема, у межах програми було проведено серію методичних тренінгів, надано аналітичну та консультативну підтримку територіальним громадам, розроблено шаблони для місцевих стратегій поводження з відходами, а також забезпечено доступ до європейських практик та інструментів.

Успішна реалізація положень Закону «Про управління відходами» можлива лише за умови належного ресурсного забезпечення громад, фахової підготовки управлінських кадрів та координації зусиль між усіма рівнями влади.

Управління відходами в Україні є складною багаторівневою проблемою, яка охоплює політичну, економічну, соціальну та технологічну площини. У контексті євроінтеграційного курсу держави та актуальних викликів післявоєнної відбудови, особливої актуальності набуває стратегічний аналіз зовнішнього середовища функціонування галузі. PEST-аналіз дозволяє систематизувати основні зовнішні фактори, які впливають на розвиток сфери управління відходами, та визначити можливості й загрози, що випливають із них (табл. 1).

PEST-аналіз показує, що найбільш сприятливими умовами для розвитку управління відходами в Україні є політична воля до реформ та євроінтеграційний вектор, який передбачає трансформацію галузі згідно з директивами ЄС. Прийняття

Закону «Про управління відходами» у 2023 році створило правове підґрунтя для побудови нової системи з розширеною відповідальністю виробника, ієрархією поводження з відходами та підвищеною роллю муніципалітетів. У економічному аспекті основним бар'єром є обмеженість національного бюджету на екологічні ініціативи, що компенсується певною мірою доступом до іноземних інвестицій і грантових програм. Разом з тим, впровадження розширеної відповідальності виробника та залучення приватного сектору створює нові економічні стимули.

Соціально, галузь стикається з низькою поінформованістю населення, проте водночас спостерігається позитивна динаміка – активізація громадянського суспільства, участь у сортуванні, екопросвітницькі кампанії, підтримані громадськими організаціями та міжнародними партнерами. Найбільше відставання фіксується в технологічному блоці: дефіцит переробної інфраструктури, застарілі полігони, обмежені потужності збору й вивезення відходів. Водночас цифрові інновації (електронна звітність, реєстри відходів, платформи контролю) лише починають впроваджуватись.

Сфера управління відходами у повоєнний період стає одним із пріоритетних напрямів національного відновлення. З огляду на масштабні руйнування, екологічні ризики та необхідність адаптації до європейських стандартів, важливо провести всебічний аналіз внутрішніх сильних і слабких сторін системи, а також зовнішніх можливостей і загроз. SWOT-аналіз допомагає структуровано оцінити стратегічну ситуацію в секторі та виявити орієнтири для його модернізації (табл. 2).

Таблиця 1

PEST-аналіз сфери управління відходами в Україні

Категорія	Фактори
Політичні	Ухвалення Закону України «Про управління відходами» (2023)
	Євроінтеграційні зобов'язання (імплементация директив ЄС)
	Децентралізація та передача повноважень громадам
	Військові дії: зміщення політичного фокусу на оборону
Економічні	Обмежене фінансування сектору з державного бюджету
	Доступ до міжнародних грантів і технічної допомоги
	Зростання вартості інфраструктурних проєктів
	Потреба у розвитку механізмів розширеної відповідальності виробника
Соціальні	Низький рівень екологічної культури населення
	Високий рівень генерації побутових відходів
	Зростання запиту на чисте середовище у містах
	Підвищення інтересу до сортування серед молоді
Технологічні	Відсутність сучасних сміттєпереробних підприємств
	Високий рівень зношеності інфраструктури збору та транспортування
	Впровадження інформаційних систем моніторингу
	Початок цифровізації галузі (електронні реєстри, платформи обліку)

Джерело: сформовано автором на основі [9]

SWOT-аналіз системи управління відходами в Україні

Категорія	Фактори
Сильні сторони (Strengths)	Прийняття Закону України «Про управління відходами» (2023) Початок імплементації директив ЄС Активна участь громад і місцевого самоврядування Залучення міжнародної технічної допомоги
Слабкі сторони (Weaknesses)	Зношена або зруйнована інфраструктура Нестача сміттєпереробних потужностей Низький рівень міжмуніципальної координації Недостатня цифровізація процесів обліку і контролю
Можливості (Opportunities)	Повоєнна відбудова як шанс на системне оновлення Діджиталізація управління відходами (електронні реєстри, трекінг, аналітика) Розвиток державно-приватного партнерства Створення нових "зелених" робочих місць
Загрози (Threats)	Масове утворення будівельних та небезпечних відходів Руйнування логістичних ланцюгів Мінування територій, ускладнення доступу до звалищ Обмежений бюджет у громадах на екологічні ініціативи

Джерело: сформовано автором на основі [4]

На етапі післявоєнного відновлення ключовими сильними сторонами системи управління відходами є оновлена законодавча база (зокрема, Закон «Про управління відходами», 2023), який визначає європейську ієрархію поводження з відходами, а також зростаюча роль громад у впровадженні локальних ініціатив. Активне залучення міжнародних донорів (наприклад, UNDP, GIZ, USAID) забезпечує ресурсну підтримку для пілотних проєктів.

Водночас слабкі сторони значною мірою зумовлені наслідками війни: фізичне знищення полігонів, пунктів сортування, сміттєвозів; нестача сучасних технологій та відсутність інтегрованих систем обліку. Це ускладнює забезпечення прозорого й ефективного поводження з відходами.

До можливостей, які відкриває ситуація, належить цифрова трансформація сфери – впровадження цифрових реєстрів, автоматизованих систем контролю, інтерактивних платформ для жителів щодо графіків вивозу, сортування тощо. Позитивним трендом є зростання інтересу бізнесу до участі в проєктах державно-приватного партнерства у сфері переробки та утилізації.

Однак загрози залишаються серйозними: численні зруйновані об'єкти породжують значний обсяг будівельних, небезпечних (асбест, металобрухт, батареї) та побутових відходів. Міни й снаряди ускладнюють доступ до місць збору або потенційної рекультивзації. Відсутність довгострокового фінансування може призвести до затримки реалізації критичних інфраструктурних проєктів.

У контексті повоєнної відбудови України особливої актуальності набуває питання комплексної ідентифікації загроз, що впливають на екологічну та енергетичну безпеку. Результати оцінок, здійснених міжнародними організаціями, зокрема Програмою ООН з навколишнього середовища (UNEP), вказують на широке коло деструктивних

чинників, що виникають унаслідок військових дій, руйнування критичної інфраструктури та порушення природних систем (табл. 3).

Згідно з даними UNEP, війна в Україні призвела до утворення масштабної екологічної шкоди. Особливо небезпечними є непередбачувані зміни у складі ґрунтів, атмосфери та вод, а також систематичне руйнування ланцюгів енергопостачання. Потенційно отруйні речовини потрапляють у довкілля через підриви складів, нафтобаз, обстріли хімічних підприємств, що може мати довгострокові наслідки для здоров'я населення.

З боку енергетики загрози носять як інфраструктурний, так і інформаційний характер – маємо справу з небезпекою фізичних руйнувань і з кібератаками. В умовах відновлення необхідно впроваджувати енергетичну децентралізацію, розвивати відновлювану енергетику та захищати інфраструктуру засобами кібербезпеки.

У післявоєнний період управління відходами в Україні стикається з підвищеним рівнем ризиків, пов'язаних із екологічною безпекою, відсутністю інфраструктури, нормативною невизначеністю та обмеженими ресурсами. Для системного підходу до прийняття управлінських рішень доцільно використовувати інструментарій стандарту ISO 31000: Risk Management Framework, який передбачає ідентифікацію ризиків, їхню оцінку за ймовірністю (Probability) та впливом (Impact), а також визначення пріоритетів реагування (табл. 4).

В умовах поствоєнного відновлення найбільшу загрозу становлять високої ймовірності та великого впливу події, як-от руйнування полігонів, знищення сміттєпереробних потужностей і неконтрольований обіг токсичних та медичних відходів. Ці ризики потребують негайного втручання з боку органів місцевого самоврядування та держави, включаючи:

Таблиця 3

Основні загрози безпеці України в екологічній, енергетичній та соціоінституційній сферах у післявоєнний період

Категорія загроз	Конкретні прояви
Екологічні загрози	- Забруднення ґрунтів важкими металами, хімікатами та паливно-мастильними матеріалами - Руйнування природоохоронних територій та екосистем - Забруднення водних ресурсів (включно з ґрунтовими водами) - Викиди шкідливих речовин через пожежі на нафтобазах та промислових об'єктах
Енергетичні загрози	- Руйнування об'єктів енергогенерації (ТЕС, ГЕС, ВДЕ) - Знищення ліній електропередач і паливно-транспортної інфраструктури - Залежність від зовнішніх джерел енергії в умовах кризи - Ризики саботажу чи кібератак на енергетичну систему
Системні загрози	- Недостатній моніторинг стану довкілля у зонах бойових дій - Відсутність сучасної системи поводження з військовими та небезпечними відходами - Недофінансування та фрагментарна політика у сфері охорони довкілля та енергетики
Інституційні загрози	- Відсутність координації між державними органами та місцевою владою - Брак кваліфікованих кадрів у сфері екологічного моніторингу та енергетики - Низька ефективність впровадження державних стратегій і планів дій
Соціально-гуманітарні загрози	- Зниження екологічної свідомості населення через зосередження уваги на базових потребах - Недостатнє інформування населення щодо наслідків екологічних катастроф - Високий рівень енергетичної бідності серед уразливих груп
Техногенні загрози	- Залишки вибухонебезпечних предметів, що створюють ризики техногенних катастроф - Пошкодження або зношеність екологічно небезпечної інфраструктури (очисні споруди, сховища відходів тощо) - Високий ризик аварій на об'єктах критичної інфраструктури через відсутність технічного обслуговування

Джерело: сформовано автором на основі [10]

Таблиця 4

Матриця оцінки ризиків (Risk Matrix)

Ризик	Ймовірність	Вплив	Загальний рівень ризику
Руйнування сміттєзвалищ та накопичувачів відходів	Висока	Критичний	Червоний (Негайне реагування)
Неконтрольоване накопичення небезпечних (військових, медичних) відходів	Висока	Високий	Червоний
Відсутність оновленої інфраструктури для сортування та переробки	Середня	Високий	Помаранчевий (План дій)
Незабезпечення моніторингу поводження з відходами на деокупованих територіях	Висока	Середній	Помаранчевий
Порушення логістики вивезення відходів через зруйновані дороги	Середня	Середній	Жовтий (Контроль ситуації)
Низький рівень обізнаності громад щодо сортування відходів	Середня	Низький	Зелений (Превентивні заходи)

Джерело: власна розробка автора на основі [12]

- швидке відновлення та діджиталізацію моніторингових систем;
- створення пересувних сортувальних і знезаражувальних станцій;
- формування стратегічних запасів обладнання для збирання та обробки небезпечних відходів.

Ризики середнього рівня (помаранчева зона) можуть бути мінімізовані за допомогою регіонального планування, логістичної координації та публічно-приватного партнерства. Ризики

з нижчим рівнем (жовта й зелена зона) все одно вимагають системного інформування населення, розвитку освітніх ініціатив і залучення громад до роздільного збору та повторного використання відходів.

У сучасній системі управління відходами все більшого значення набуває впровадження технологій Інтернету речей (IoT), зокрема – сенсорних систем, які дозволяють моніторити рівень заповнення смітєвих контейнерів у режимі реального часу. Це забезпечує не лише оперативне

реагування, а й дозволяє значно оптимізувати логістику, знизити навантаження на муніципальні служби, зменшити витрати на транспортування та підвищити загальну ефективність системи поводження з відходами.

Дослідження, опубліковані в базі IEEE Xplore (Smart Waste Management Systems), підтверджують доцільність використання IoT у міському середовищі, особливо в умовах великих навантажень на інфраструктуру через зростання кількості населення та інтенсивність утворення відходів (табл. 5).

Механізми економії та ефективності:

- скорочення кількості виїздів спецтехніки – до 40% менше витрат на паливо та обслуговування;
- зниження навантаження на персонал, зменшення витрат на ручний моніторинг;
- покращення екологічної ситуації завдяки вчасному вивезенню переповнених контейнерів;
- підвищення прозорості роботи комунальних служб через візуалізацію процесів на публічних онлайн-платформах;
- інтеграція з іншими смарт-системами міста, наприклад транспортом, відеоспостереженням, енергомережами тощо.

Рекомендації щодо покращення системи IoT-моніторингу:

- пілотне впровадження в найбільш навантажених районах великих міст або у громадах, що вже мають цифрову інфраструктуру;
- створення єдиного міського центру обробки даних, інтегрованого з геоінформаційними системами;
- підтримка державних та міжнародних грантових програм для закупівлі обладнання та розробки ПЗ;
- навчання персоналу муніципалітетів з експлуатації IoT-систем;
- партнерство з вітчизняними та європейськими розробниками IoT-рішень у сфері екології та управління відходами;
- залучення громадськості – інформування про те, як працює система, і як вона підвищує якість життя.

Рациональне управління логістикою сміттєвозів є критичним фактором для ефективного функціонування системи поводження з відходами, особливо в деокупованих містах. Для оцінки витрат на перевезення твердих побутових відходів часто використовується проста, але інформативна формула, яка враховує ключові параметри: відстань, витрати пального та його вартість.

Формула (1) дає можливість оцінити витрати на логістику сміттєвозів:

$$C = D * F * T(1)$$

де:

C – загальні витрати на логістику (грн),

D – загальна відстань, яку проходить сміттєвоз за день (км),

F – витрата пального на 1 км (л/км),

T – ціна одного літра пального (грн/л).

Після деокупації місто Ізюм зіткнувся з проблемою масштабного сміттєзабруднення, яка ускладнюється обмеженими фінансовими можливостями місцевого бюджету [8]. Умови тривалої окупації та зруйнована інфраструктура призвели до критичного стану системи поводження з відходами, що потребує термінової оптимізації [9].

Наведемо приклад розрахунку: м. Ізюм, Харківська область.

Вихідні дані:

– кількість сміттєвозів: 4;

– середня щоденна дистанція одного сміттєвоза: 70 км;

– витрата пального: 0.35 л/км;

– ціна дизельного пального: 57 грн/л.

Для одного сміттєвоза на день:

$$C = 70 * 0,35 * 57 = 1395,75 \text{ грн.}$$

Для всього автопарку (4 сміттєвози):

$$C_{\text{загальне}} = 1395,75 * 4 = 5583 \text{ грн / день}$$

Загальні витрати на логістику сміттєвозів у місті Ізюм становлять орієнтовно 167490 грн на місяць (табл. 6).

Це підкреслює необхідність оптимізації маршрутів, використання альтернативного транспорту або інноваційних рішень на базі IoT, що дозволяють контролювати заповнення контейнерів у режимі реального часу.

Таблиця 5

Переваги використання IoT у моніторингу заповнення контейнерів

Компонент IoT-системи	Призначення	Переваги
Сенсори ультразвукові / інфрачервоні	Вимірювання рівня заповнення контейнера	Зниження потреби у візуальному огляді, автоматичне оновлення даних
GPS-модулі у контейнерах	Визначення місця розташування	Точне планування маршрутів для сміттєвозів
GSM/L0RaWAN/ NB-IoT комунікаційні модулі	Передача інформації до центрального сервера	У реальному часі передається інформація про стан контейнерів
Аналітична платформа	Обробка даних, побудова маршрутів, аналіз тенденцій	Можливість прогнозування, формування статистики, виявлення проблемних зон

Джерело: сформовано автором на основі [11]

Таблиця 6
Оцінка витрат на логістику в м. Ізюм

Показник	Значення
Кількість сміттевозів	4
Середня відстань одним сміттевозом (км)	70
Витрата пального (л/км)	0.35
Ціна пального (грн/л)	57
Вартість одного виїзду (грн)	1395.75
Загальні витрати за день (4 машини)	5583.00
Витрати за місяць (30 днів)	167 490 грн

Джерело: власна розробка автора

Оптимізуємо витрати логістики сміттевозів у місті Ізюм на основі впровадження розумних технологій моніторингу (IoT), оптимізації маршрутів та графіків вивезення сміття. Ми порівнюємо базовий сценарій із покращеним і подивимося, як це впливає на економію.

Після впровадження IoT-сенсорів заповнення контейнерів та оптимізації маршрутів через GPS-навігацію можливо:

- скоротити середню відстань на 30% (з 70 км до 49 км/день);
- зменшити кількість виїздів у неефективні дні – 1 сміттевоз із 4 залишається в резерві (тобто працюють 3).

Для одного сміттевоза:

$$C = 49 \cdot 0,35 \cdot 57 = 976,35 \text{ грн / день}$$

Для 3 сміттевозів:

$$\text{Снове} = 976,35 \cdot 3 = 2929,05 \text{ грн / день}$$

За місяць:

$$\text{Смісяць} = 2929,05 \cdot 30 = 87871,5 \text{ грн.}$$

Результати порівняння відображено у табл. 7.

Таблиця 7
Порівняння витрат

Показник	Поточна модель	Оптимізована модель
Кількість сміттевозів	4	3
Середня відстань/день (1 машина)	70 км	49 км
Загальні витрати/день	5583 грн	2929 грн
Загальні витрати/місяць	167 490 грн	87 871,50 грн
Економія/місяць	–	~79 619 грн
Зниження навантаження на автопарк	–	-25%
Скорочення викидів CO ₂	–	-30%

Джерело: власна розробка автора

Рекомендації для впровадження:

1. Встановити датчики заповнення на контейнери – дані передаються в систему диспетчеризації.
2. Автоматизувати планування маршрутів – відповідно до наповнення контейнерів і стану трафіку.

3. Проводити технічне обслуговування машин рідше – менше зношення техніки.

4. Перевести частину автопарку у «резервний режим» – зменшення навантаження на бюджет.

5. Пошук міжнародних донорів для придбання обладнання IoT (зокрема через GIZ, USAID, UNEP).

5. Регулярна аналітика та звітність, публікація кейсів успішних громад.

Висновки. Дослідження підтверджує, що впровадження IoT-рішень для моніторингу заповнення контейнерів дозволяє зменшити витрати на логістику щонайменше на 15% завдяки оптимізації маршрутів та частоти збору відходів. На прикладі міста Ізюм показано, що застосування сенсорів і GPS-навігації дозволило скоротити середню дистанцію руху сміттевозів на 30%, зменшити кількість активних машин та знизити місячні витрати на логістику майже вдвічі. Такі зміни не лише забезпечують економію бюджетних коштів (понад 79 тис. грн на місяць), а й знижують навантаження на автопарк і викиди CO₂, підвищуючи екологічну безпеку громади. Результати підтверджують ефективність цифровізації систем поводження з відходами у поствоєнних містах.

Для сталого розвитку рекомендується встановити IoT-сенсори, автоматизувати планування маршрутів, підтримувати технічний стан техніки, а також залучати міжнародних партнерів для фінансування інновацій. Прозорість і регулярна аналітика допоможуть зміцнити довіру громади та підвищити ефективність системи. Таким чином, цифрові технології і оптимізація логістики є ключовими чинниками для підвищення ефективності управління відходами у деокупованих містах України.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Екорезиденти: підсумки проекту. Zero Waste Alliance Ukraine. 2023. URL: <https://zerowaste.org.ua/2023/07/11/ekorezydenty-pidsumky-proyektu/>
2. Зварич І. Циркулярна економіка і глобалізоване управління відходами. *Журнал європейської економіки*. 2017. № 16. С. 41-57.
3. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2023 р. № 2320-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
4. Звіт про результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій за 2024 рік. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/zvit-pro-rezultaty-diialnosti-derzhavnoi-sluzhby-ukrainy-z-nadzvychnykh-sytuatsii->
5. Погребнюк В., Коваль І., Джумеля Е. Тенденції розвитку методів і систем управління відходами. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2019. № 29(1). С. 78-82.
6. Пацева І., Герасимчук О., Кагукіна А. Системний підхід управління відходами об'єднаних територіальних громад. *Науково-практичний журнал*. 2022. № 4. С. 181-184.

7. Програма «U-LEAD з Європою»: Матеріали з управління відходами в громадах. 2023. URL: <https://u-lead.org.ua>

8. Проблема сміттєзабруднення в деокупованому Ізюмі: виклики та потреба в оптимізації. *Український політолог*. 2023. URL: <http://www.politolog.net.ua/uk/2023/04/23/problema-smittiezabrudnennya-v-deokupovanomu-izyumi-vyklyky-ta-potreba-v-optimizatsiyi/>

9. Проблема з вивозом сміття по місту вирішуються. Ізюм інформаційний. 2023. URL: <https://city-izyum.pp.ua/the-problem-with-the-removal-of-garbage-in-the-city-is-being-solved-improvement59242-2/>

10. Організаційно-економічні засади формування систем управління відходами в регіонах України: науково-аналітична доповідь / наук. ред. д.е.н., с.н.с. Колодійчук І. А. Львів, ІРД НАНУ. 2022. 170 с. URL: <https://ird.gov.ua/irdp/p20220038.pdf>

11. Сергєєв О. А. Європейський досвід запобігання утворенню побутових відходів та можливості його адаптації в Україні. *Трансформаційна економіка*. 2025. № 4(09). С. 71-77. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-9-11>

12. World Values Survey: official site. URL: <https://www.worldvaluessurvey.org/wvs.jsp>

13. European Environment Agency. Waste management in Europe: State of play and outlook to 2030. 2022. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/reaching-the-2030-residual-municipal-waste-target-indicator-1>

14. Grygaski T. Comprehensive Report on Ukraine Environmental Damage Assessments (unpublished report), Informal inter-agency coordination group on environmental assessments for Ukraine. 2023. URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-02/Comprehensive%20Report_Ukr%20Env%20Damage%20Assessments_IACG_Dec.%202023.pdf

15. IEEE Xplore Digital Library – Smart Waste Management Systems, 2022–2024. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

16. ISO 31000: Risk Management – Guidelines. 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/65694.html>

REFERENCES:

1. Ekorezydenty: pidsumky proiektu (2023). Zero Waste Alliance Ukraine. Available at: <https://zerowaste.org.ua/2023/07/11/ekorezydenty-pidsumky-proyektu/> [in Ukrainian]

2. Zvarych, I. (2017). Tsyrukuliarna ekonomika i hlobalizovane upravlinnia vidkhodamy [Circular economy and globalized waste management]. *Zhurnal yevropeiskoi ekonomiky*, 16, 41-57. [in Ukrainian]

3. Zakon Ukrainy «Pro upravlinnia vidkhodamy» vid 20.06.2023 r. № 2320-IX. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> [in Ukrainian]

4. Zvit pro rezultaty diialnosti Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii za 2024 rik. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/news/zvit-pro-rezultaty-diialnosti-derzhavnoi-sluzhby-ukrainy-z-nadzvychainykh-sytuatsii-za-2024-rik> [in Ukrainian]

5. Pohrebniuk, V., Koval, I., Dzhumelia, E. (2019). Tendentsii rozvytku metodiv i system upravlinnia vidkhodamy [Trends in the development of waste management methods and systems]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(1), 78-82. [in Ukrainian]

6. Patseva, I., Herasymchuk, O., Kahukina, A. (2022). Systemnyi pidkhid upravlinnia vidkhodamy obiednanykh terytorialnykh hromad [A systematic approach to waste management of united territorial communities]. *Naukovo-praktychnyi zhurnal*, 4, 181-184. [in Ukrainian]

7. Prohrama «U-LEAD z Yevropoiu»: Materialy z upravlinnia vidkhodamy v hromadakh [U-LEAD with Europe Program: Materials on Waste Management in Communities] (2023). Available at: <https://u-lead.org.ua> [in Ukrainian]

8. Problema smittiezabrudnennia v deokupovanomu Izyumi: vyklyky ta potreba v optimizatsii [The problem of waste pollution in deoccupied Izyum: challenges and the need for optimization] (2023). *Ukrainskyi politolog*. Available at: <http://www.politolog.net.ua/uk/2023/04/23/problema-smittiezabrudnennya-v-deokupovanomu-izyumi-vyklyky-ta-potreba-v-optimizatsiyi/> [in Ukrainian]

9. Problema z vyvozom smittia po mistu vyrishuiut-sia [The problem with the removal of garbage in the city is being solved. Izyum information] (2023). Izyum informatsiyni. Available at: <https://city-izyum.pp.ua/the-problem-with-the-removal-of-garbage-in-the-city-is-being-solved-improvement59242-2/> [in Ukrainian]

10. Orhanizatsiino-ekonomichni zasady formuvania system upravlinnia vidkhodamy v rehionakh Ukrainy: naukovo-analitychna dopovid [Organizational and economic principles of waste management systems formation in regions of Ukraine: scientific and analytical report] (2022) / nauk. red. d.e.n., s.n.s. Kolodiichuk I. A. Lviv, IRD NANU. 170 p. Available at: <https://ird.gov.ua/irdp/p20220038.pdf> [in Ukrainian]

11. Serhieiev, O. A. (2025) Yevropeyskyi dosvid zapobihannia utvorenniu pobutovykh vidkhodiv ta mozhlyvosti yoho adaptatsii v Ukraini [European experience in preventing the formation of household waste and the possibilities of its adaptation in Ukraine]. *Transformatsiina ekonomika*, 4(09), 71-77. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-9-11> [in Ukrainian]

12. World Values Survey: official site. Available at: <https://www.worldvaluessurvey.org/wvs.jsp>

13. European Environment Agency (2022). Waste management in Europe: State of play and outlook to 2030. Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/reaching-the-2030-residual-municipal-waste-target-indicator-1>

14. Grygaski, T. (2023). Comprehensive Report on Ukraine Environmental Damage Assessments (unpublished report), Informal inter-agency coordination group on environmental assessments for Ukraine. Available at: https://unece.org/sites/default/files/2024-02/Comprehensive%20Report_Ukr%20Env%20Damage%20Assessments_IACG_Dec.%202023.pdf

15. IEEE Xplore Digital Library – Smart Waste Management Systems, 2022–2024. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

16. ISO 31000 (2018): Risk Management – Guidelines. Available at: <https://www.iso.org/standard/65694.html>