



DOI 10.37491/UNZ.105.4
УДК 351:502.174:004



Микола ВАВРИЩУК¹

ДОСВІД ЗАРУБІЖНИХ КРАЇН ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УПРАВЛІННІ ВІДХОДАМИ

Проаналізовано зарубіжний досвід впровадження цифрових технологій в управлінні відходами та визначено потенціал їх адаптації для України. Дослідження охоплює країни з різним рівнем економічного розвитку та різноманітними технологічними рішеннями, що забезпечує широкий спектр підходів до управління відходами. Проведено аналіз прикладів обраних країн на основі звітів Global Waste Management Outlook 2024, What a Waste 2.0 Update, Європейської агенції з довілля 2024 року. Основна увага приділяється технологіям інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (ШІ), блокчейну, великих даних (Big Data) та мобільних додатків, їхнім основним напрямом використання в управлінні відходами, кількісним результатам, а також інституційним і фінансовим механізмам впровадження. Для моніторингу наповненості контейнерів, сортування відходів, оптимізації логістики та екологічного моніторингу застосовується технологія IoT. Наприклад, у Барселоні (Іспанія) IoT-контейнери скоротили частоту вивозу відходів на 20–50 %, зменшивши викиди CO₂, а в Сінгапурі IoT-системи з GPS-трекерами знизили транспортні витрати на 15 % та заощадили \$2 млн щорічно. ШІ використовується для автоматизації сортування (Токіо, Японія: точність 95 %, зростання переробки пластику на 30 %) та оптимізації логістики й переробки (Мюнхен, Німеччина: переробка 65 % відходів, економія €5 млн щорічно). Блокчейн забезпечує прозорість ланцюга переробки, як у Китаї, де платформа AntChain відстежує

¹ аспірант, Хмельницький університет управління та права імені Леоніда Юзькова, vavryshchuk@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9334-086X>.



1,2 млн тонн пластику, скорочуючи нелегальне скидання на 12 %. Big Data сприяє прогнозуванню обсягів відходів і оптимізації процесів, як у США (Rubicon Global), а мобільні додатки, такі як: Recycle Coach (Канада/США) чи TrashOut (Словаччина/Чехія), — підвищують залученість громадян до сортування та екологічних ініціатив. В Україні, де управління відходами ускладнене через війну та обмежені ресурси, адаптація цих технологій має значний потенціал. Пропонується пілотне впровадження IoT-датчиків у містах, розширення функціоналу додатку «Сортуй» шляхом інтеграції мапи пунктів утилізації будівельних відходів, IoT-моніторингу та блокчейну для прозорості. Реалізація потребує міжнародного фінансування, грантів, модернізації інфраструктури та законодавчої підтримки. Впровадження цифрових технологій сприятиме економії (до 30 % витрат на захоронення), зменшенню екологічного впливу та розвитку циркулярної економіки в Україні.

Ключові слова: цифрові технології, управління відходами, інтернет речей (IoT), штучний інтелект (ШІ), блокчейн, великі дані (Big Data), мобільні додатки, оптимізація логістики, сортування відходів, прозорість переробки, екологічний моніторинг.

Постанова проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Управління відходами є однією з ключових глобальних проблем, що загострюється через зростання обсягів відходів, низьку ефективність їх переробки та екологічні наслідки. Згідно зі звітом Global Waste Management Outlook 2024 (GWMO 2024) [1], підготовленим Програмою ООН з навколишнього середовища (UNEP) та Міжнародною асоціацією твердих відходів (ISWA), глобальний обсяг муніципальних відходів зріс до 2,1 млрд тонн у 2023 році і прогнозується на рівні 3,8 млрд тонн до 2050 року через урбанізацію, зростання населення та споживання. В Україні ситуація ускладнена низьким рівнем сортування, залежністю від звалищ і наслідками війни, яка генерує значні обсяги відходів. Цифрові технології, такі як: інтернет речей (IoT), штучний інтелект (ШІ), блокчейн, великі дані та мобільні додатки, — пропонують рішення для оптимізації збору, сортування та переробки відходів. Однак їх впровадження в Україні гальмується через брак інфраструктури, фінансування та екологічної свідомості населення. Вивчення зарубіжного досвіду, підкріпленого даними GWMO 2024 та What a Waste 2.0 Update від Світового банку [2], дозволяє ідентифікувати ефективні практики для адаптації в українських реаліях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання цифровізації управління відходами активно досліджується у світовій науковій літературі. Звіт GWMO 2024 підкреслює, що цифрові технології, такі як: інтернет речей (IoT), технології штучного інтелекту та блокчейн, — можуть сприяти переходу до циркулярної економіки, знижуючи витрати на управління відходами до \$270,2 млрд до 2050 року [1]. Звіт Світового банку What a



Waste 2.0 Update [2] акцентує увагу на ролі великих даних і мобільних додатків, які підвищують ефективність переробки до 36 % у країнах із високим рівнем доходу. Європейська агенція з довкілля у звіті 2024 року [3] зазначає, що IoT-системи скоротили логістичні витрати на 30 % у країнах ЄС. В Україні дослідження зосереджені на правових аспектах [4; 5; 6], проте варто проводити аналіз цифрових рішень. GWMO 2024 і What a Waste 2.0 Update надають актуальні дані, підтверджені національними звітами та статистичними моделями, але недостатньо враховують специфіку країн із перехідною економікою, наприклад: Україна, де війна та слабка інфраструктура створюють унікальні виклики. Це підкреслює потребу в систематизації зарубіжного досвіду для адаптації в Україні.

Метою статті є аналіз зарубіжного досвіду щодо впровадження цифрових технологій в управлінні відходами, оцінка їхнього потенціалу для України з урахуванням даних GWMO 2024 і What a Waste 2.0 Update, а також формулювання рекомендацій для адаптації. Проаналізувати практики впровадження цифрових технологій у країнах із різним рівнем економічного розвитку (Сінгапур, Іспанія, Японія, Німеччина, Китай, Канада, Швеція, Ірландія, США, Чехія, Словаччина, Індія). Оцінити релевантність цих практик для України з урахуванням місцевих викликів, таких як: війна, обмежене фінансування та низька екологічна свідомість. Визначити перспективи подальших досліджень у контексті цифровізації управління відходами в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналізуючи зарубіжний досвід впровадження цифрових технологій в управлінні відходами, ми досліджуємо для обраних країн конкретні цифрові технології та їх застосування, кількісні результати (економічні, екологічні, соціальні), інституційні та фінансові механізми впровадження та розглядаємо потенціал адаптації цього досвіду для України. Країни відібрано за критеріями економічного розвитку, згідно з класифікацією Світового банку та різноманітності технологій, щоб охопити широкий спектр рішень.

Інтернет речей (*Internet of Things*, IoT) — це технологічна концепція, що передбачає створення мережі фізичних об'єктів (пристроїв, датчиків, обладнання), оснащених сенсорами, програмним забезпеченням і засобами зв'язку для збору, обробки та обміну даними через мережу «Інтернет» без прямого втручання людини. IoT базується на принципах міжмашинної взаємодії, хмарних обчислень, великих даних (*Big Data*) та штучного інтелекту, що забезпечують автоматизацію процесів і підвищення ефективності систем [7].

Управління відходами є однією з ключових сфер застосування IoT, де технологія сприяє оптимізації збору, транспортування, переробки та утилізації відходів, зменшенню екологічного впливу та підвищенню економічної ефективності. Основні аспекти використання IoT в цій сфері:

1) моніторинг наповненості контейнерів, а саме смартконтейнери оснащуються ультразвуковими або інфрачервоними датчиками для визначення рівня заповнення, далі дані передаються в реальному часі через IoT-



мережі до центральної системи управління. Перевагами є оптимізація маршрутів смітєвозів, зменшення витрат пального та викидів CO₂, уникнення переповнення контейнерів. Наприклад, в Іспанії, у місті Барселона, IoT-контейнери дозволяють скоротити частоту вивозу відходів на 20–50 % за рахунок динамічного планування;

2) сортування та класифікація відходів, що здійснюється за допомогою датчиків комп'ютерного зору та спектроскопії, які інтегровані в IoT-системи та ідентифікують типи відходів (пластик, скло, органічні відходи) на етапі збору чи переробки. Така автоматизація сортування підвищує ефективність переробки та зменшує кількість відходів, що потрапляють на звалища, оскільки IoT-системи на сортувальних станціях можуть розпізнавати до 95 % матеріалів із точністю, що перевищує ручне сортування;

3) відстеження логістики відходів за допомогою GPS-трекерів та RFID-міток на смітєвозах і контейнерах, що дозволяють відстежувати переміщення відходів у реальному часі. IoT-платформи аналізують дані для оптимізації логістичних процесів, що зменшує час транспортування, зниження операційних витрат і забезпечення прозорості ланцюга утилізації. Наприклад, у Сінгапурі IoT-системи логістики відходів скоротили транспортні витрати на 15 % шляхом оптимізації маршрутів;

4) моніторинг екологічних параметрів через використання датчиків; IoT вимірюють параметри: газовиділення (метан, CO₂) на звалищах або якість повітря поблизу переробних заводів, що дозволяє зробити своєчасне виявлення екологічних ризиків, таких як: витоки газу чи забруднення, швидке реагування. У Швеції IoT-системи на полігонах дозволяють прогнозувати викиди метану з точністю до 90 %, сприяючи своєчасному вжиттю заходів;

5) інтеграція з розумними містами, де IoT-платформи інтегруються з міськими інформаційними системами, забезпечуючи координацію між різними службами (комунальними, транспортними, екологічними), що створює комплексне управління відходами в рамках концепції розумного міста, що сприяє сталому розвитку. У Канаді в місті Торонто IoT-системи для управління відходами інтегровані з міською платформою Smart City, що забезпечує координацію збору відходів із трафіком і погодними умовами.

Детальніше опишемо використання інтернет речей (IoT) для моніторингу контейнерів у Сінгапурі. Компанія Sembcorp у 2023 році встановила IoT-датчики на 10 000 смітєвих контейнерах, які відстежують рівень заповнення в реальному часі, оптимізуючи маршрути смітєвозів. Датчики інтегровані з GPS-системами, що дозволяє динамічно коригувати логістику [8]. Скорочення виїздів смітєвозів на 20 %, зменшення викидів CO₂ на 15 %, економія \$2 млн щорічно на логістиці. При цьому задіяні такі інституційні механізми, як: державно-приватне партнерство між урядом Сінгапуру та Sembcorp, фінансування через Національну екологічну агенцію (NEA) [9; 10]. В Україні, де логістика збору відходів ускладнена через війну та обмежені бюджети, IoT-датчики можуть бути пілотовані в містах, як Львів чи Хмельницький. Як пропозиція, щоб реалізувати пілотний проект, наприклад, встановити IoT-датчики на 1 000 контейнерів, варто залучити гранти; і це сприятиме скороченню витрат.



Штучний інтелект (ШІ) у сфері управління відходами — це використання алгоритмів, машинного навчання, комп'ютерного зору та інших технологій ШІ для оптимізації процесів збору, сортування, переробки, утилізації та моніторингу відходів [11].

Основні напрями використання ШІ у цій сфері є:

1) розумне сортування, де ШІ за допомогою комп'ютерного зору розпізнає типи відходів (пластик, скло, папір) і автоматизує їх сортування, підвищуючи точність і зменшуючи ручну працю;

2) оптимізація логістики, де алгоритми ШІ аналізують дані з датчиків у сміттєвих баках і оптимізують маршрути сміттєвозів, знижуючи витрати пального та час;

3) прогнозування ШІ щодо обсягів відходів на основі даних про споживання, сезони чи промислову активність, допомагаючи планувати ресурси;

4) переробка, де ШІ використовується для розробки методів переробки, аналізуючи склад відходів; і це сприяє циркулярній економіці, наприклад, через хімічну переробку пластику;

5) екологічний моніторинг за допомогою ШІ, щоб виявляти незаконні звалища чи забруднення, аналізувати супутникові зображення або дані з дронів.

Досвід використання штучного інтелекту (ШІ) для автоматизованого сортування є у Японії. У Токіо ZenRobotics використовує роботів із комп'ютерним зором для сортування відходів (пластик, скло, папір) із швидкістю 4 000 одиниць на годину [12]. Система аналізує склад відходів і оптимізує переробку. Точність сортування складає 95 %, зростання переробки пластику на 30 %, переробка 70 % муніципальних відходів у Токіо [12]. Фінансування через державні субсидії та приватні інвестиції з підтримкою Міністерства навколишнього середовища Японії [13].

Штучний інтелект та робототехніка для переробки сміття використовується у Німеччині. У Мюнхені завод TOMRA використовує ШІ для сортування змішаних відходів, ідентифікуючи матеріали за спектром і складом. Переробка 65 % муніципальних відходів, економія 5 млн євро щорічно, скорочення викидів метану на 10 % [14]. Федеральне фінансування здійснюється через програми, а також співпрацю з муніципалітетами. У сучасних реаліях України для запровадження пілотного заводу по переробці сміття із технологіями штучного інтелекту та які мали б потужність переробляти не менше 50 000 тонн відходів щорічно необхідні міжнародне фінансування, модернізація інфраструктури та законодавча підтримка.

Блокчейн — це децентралізована цифрова технологія, яка забезпечує прозорий, безпечний і незмінний запис даних у розподіленому реєстрі. У сфері управління відходами блокчейн використовується для відстеження, документування та оптимізації процесів, пов'язаних із збором, сортуванням, переробкою та утилізацією відходів. Завдяки своїй прозорості, незмінності та здатності до автоматизації через смартконтракти, блокчейн сприяє підвищенню ефективності, зниженню шахрайства та підтримці циркулярної економіки [15].



Основна ідея полягає в тому, що блокчейн створює єдину базу даних, доступну для всіх учасників ланцюга управління відходами (органи влади, компанії з переробки, логістичні оператори, споживачі), де кожен етап процесу фіксується і не може бути змінений без згоди.

Блокчейн застосовується в управлінні відходами за такими напрямками: відстеження ланцюга переробки, оскільки блокчейн дозволяє створювати цифровий «паспорт» для відходів, де фіксується їх походження, склад, шлях транспортування та спосіб переробки. Це забезпечує прозорість і допомагає уникнути незаконного скидання відходів. Як приклад, компанії можуть підтвердити, що пластик був перероблений, а не відправлений на звалище; смартконтракти для автоматизації — це програми, які автоматично виконують дії за заданими умовами. Наприклад, коли сміттєвоз доставляє відходи до переробного заводу, смартконтракт може автоматично переказати оплату логістичній компанії, якщо дані про вагу та склад відходів підтверджені; стимулювання переробки, бо блокчейн може використовуватися для створення систем винагород, де споживачі отримують токени (цифрові активи) за здачу відходів на переробку. Ці токени можна обмінювати на знижки чи інші бонуси; боротьба з незаконними звалищами; завдяки прозорості блокчейну можна відстежувати, куди саме направляються відходи, що ускладнює їх незаконне скидання. Усі транзакції в ланцюжку фіксуються, що полегшує аудит; покращення довіри в циркулярній економіці, технологія блокчейн допомагає підтверджувати, що продукти виготовлені з перероблених матеріалів, що підвищує довіру споживачів до брендів, які підтримують екологічні ініціативи.

Варто відмітити, що перевагами блокчейну в управлінні відходами будуть прозорість, бо всі учасники мають доступ до однакових даних, що зменшує ризик маніпуляцій; безпека, дані в блокчейні захищені від змін, що забезпечує їхню надійність; ефективність, оскільки автоматизація через смартконтракти скорочує час і витрати на адміністрування та екологічність, підтримка циркулярної економіки через точне відстеження матеріалів сприяє зменшенню відходів. Наприклад, у Китаї блокчейн використовується для відстеження відходів. Платформа AntChain відстежує ланцюжок переробки 1,2 млн тонн пластикових відходів, забезпечуючи прозорість від збору до утилізації [16]. Скорочення нелегального скидання на 12 %, підвищення довіри до переробки, переробка 20 % пластику в містах [16]. Державна підтримка здійснюється через Національну комісію з розвитку та реформ [17], приватні інвестиції. GWMO 2024 підкреслює, що блокчейн економічно вигідний, знижуючи витрати на управління відходами на 10–15 % за рахунок зменшення нелегального скидання та оптимізації процесів [1]. Для України це важливо, оскільки витрати на захоронення відходів перевищують \$100 млн щорічно, а переробка могла б заощадити до 30 % цих коштів [28].

Великі дані (*Big Data*) — це масиви структурованої та неструктурованої інформації, які генеруються з різних джерел, таких як: датчики IoT, мобільні додатки, супутникові зображення, дані з відкритих реєстрів, соціальні мережі тощо. У сфері переробки *Big Data* допомагає аналізувати ці



дані для прогнозування, оптимізації логістики, підвищення ефективності сортування та розробки стратегій зменшення відходів [18].

Напрямами застосування Big Data в управлінні відходами та оптимізації переробки є прогнозування обсягів відходів, оскільки Big Data дозволяє прогнозувати обсяги відходів на основі історичних даних, сезонних факторів, демографічних показників і споживацької поведінки, що допомагає планувати ресурси для збору та переробки, уникати перевантаження звалищ і оптимізувати роботу переробних заводів; оптимізація логістики, бо аналіз даних про заповненість контейнерів і транспортні потоки дозволяє створювати оптимальні маршрути для сміттевозів, знижуючи витрати пального та викиди CO₂. Big Data також допомагає координувати логістику між пунктами збору, сортувальними центрами та переробними підприємствами; покращення сортування та переробки через використання алгоритмів аналізу даних, що дозволяють ідентифікувати склад відходів, оцінювати їхню цінність для переробки та оптимізувати технологічні процеси. Наприклад, Big Data може визначити, які типи пластику найчастіше потрапляють у відходи, і адаптувати обладнання для їх ефективної обробки; моніторинг і боротьба з незаконними звалищами; Big Data використовується для аналізу супутникових зображень і даних із дронів, щоб виявляти незаконні звалища, що дозволяє оперативніше реагувати на порушення та координувати прибирання; підтримка циркулярної економіки за допомогою аналізу даних відстежувати життєвий цикл матеріалів, визначати можливості їх повторного використання та розробляти стратегії зменшення відходів. Big Data сприяє створенню платформ, які об'єднують виробників, переробників і споживачів. Прикладами є Rubicon Global (США) [19]; це технологічна компанія, яка використовує Big Data для оптимізації управління відходами. Їхня платформа аналізує дані з датчиків у контейнерах, GPS-трекерів сміттевозів і звітів клієнтів, щоб створювати ефективні маршрути збору та підвищувати частку переробки. Алгоритми прогнозують обсяги відходів і визначають, які матеріали можна переробити чи продати на вторинному ринку.

Мобільні додатки відіграють важливу роль у сфері управління відходами, забезпечуючи зручний інструмент для споживачів, органів публічного управління і компаній з переробки. Вони сприяють підвищенню ефективності збору, сортування, переробки відходів, а також залученню громадян до екологічних ініціатив. Завдяки інтеграції з технологіями, такими як: штучний інтелект (ШІ), інтернет речей (IoT) та блокчейн, мобільні додатки трансформують управління відходами, роблячи його більш доступним і прозорим.

Основні напрями використання мобільних додатків:

1) допомога в сортуванні відходів, а саме надаючи інформацію користувачам про те, до якого типу належить той чи той матеріал (пластик, скло, органічні відходи тощо). Деякі додатки використовують ШІ та комп'ютерний зір: користувач фотографує предмет, а додаток визначає його склад і рекомендує, куди його викинути. Наприклад, додаток Recycle Coach (доступний у Канаді та США) [20] пропонує інструкції з сортування



залежно від місцевих правил переробки, допомагаючи користувачам уникати помилок;

2) інформування про графік збору відходів, бо через додатки користувачі отримують сповіщення про розклад вивезення сміття, розташування контейнерів або пунктів переробки. Це особливо корисно в містах із різними графіками для різних типів відходів. Інструмент MyWaste (Ірландія) [21] надає персоналізовані нагадування про дні збору сміття та інформацію про найближчі пункти прийому відходів;

3) пошук пунктів переробки, дані додатки допомагають знайти найближчі пункти прийому відходів, включаючи спеціалізовані контейнери для батарейок, електроніки чи небезпечних матеріалів. Вони часто інтегруються з GPS для відображення мапи. RecycleNation (США) [22] містить базу даних пунктів переробки по всій країні, дозволяючи користувачам знайти місця для здачі специфічних матеріалів, наприклад, поломаної та жививаної електроніки;

4) стимулювання екологічної поведінки. Ці додатки використовують гейміфікацію або системи винагород, щоб заохочувати користувачів до сортування та здачі відходів. Користувачі можуть отримувати бали, знижки чи цифрові токени за екологічні дії. Наприклад, Plastic Bank [23] дозволяє користувачам здавати пластик у пункти збору та отримувати цифрові токени через додаток, які можна обміняти на товари чи послуги;

5) звітність і зворотний зв'язок, оскільки додатки дозволяють користувачам повідомляти про незаконні звалища, переповнені контейнери або інші проблеми, надсилаючи фото та геолокацію муніципальним службам. Наприклад, TrashOut (Словаччина, Чехія) [24] дозволяє громадянам повідомляти про незаконні звалища у своїх районах. Користувачі можуть зробити фото, вказати геолокацію та надіслати звіт муніципальним службам або екологічним організаціям. Додаток також показує найближчі пункти переробки та смітєві баки, а також дозволяє відстежувати статус звітів (наприклад, чи було звалище прибрано). Організації можуть оновлювати статус звітів, додаючи коментарі про хід прибирання, а користувачі отримують сповіщення через email або push-повідомлення. Додаток Swachhata (Індія) [25] дозволяє громадянам повідомляти про проблеми, пов'язані з чистотою (наприклад, незаконні звалища чи брудні місця), надсилаючи фото та геолокацію. Звіти надходять до муніципальних корпорацій, які призначають відповідальних працівників для вирішення проблеми. Після виконання завдання (наприклад, прибирання) працівник завантажує фото як доказ, а користувач отримує сповіщення про статус. Користувачі можуть оцінити якість виконання (наприклад, «задоволений», «нейтрально», «незадоволений») або повторно відкрити скаргу, якщо проблема не вирішена;

6) освіта та підвищення обізнаності, додатки цього напрямку надають навчальні матеріали про переробку, компостування чи зменшення відходів, сприяючи формуванню екологічної свідомості, а також допомагають користувачам зрозуміти принципи сталого поводження з відходами, пропонують практичні поради та використовують гейміфікацію для мотивації до екологічних дій. Наприклад, додаток JouleBug (США) [26] пропонує навча-



льні матеріали та завдання, пов'язані з переробкою, компостуванням, зменшенням відходів і збереженням ресурсів. Користувачі отримують бали за виконання завдань, таких як: використання багаторазової пляшки, сортування сміття чи компостування органічних відходів, — і можуть змагатися з друзями чи громадою. Додаток Too Good To Go (доступний у Європі, США та інших країнах) [27] зосереджений на зменшенні харчових відходів, що дозволяє купувати надлишкову їжу з ресторанів і магазинів за зниженою ціною, а також містить освітній контент про вплив харчових відходів на довкілля та способи їх зменшення. Користувачі отримують поради щодо компостування залишків їжі та зберігання продуктів для уникнення псування.

Україна має досвід у створенні мобільних додатків, наприклад, додаток «Сортуї» [29], розроблений неурядовою організацією «Україна без сміття», є одним із провідних інструментів в Україні для популяризації сортування відходів і підвищення екологічної свідомості громадян. Пропонується зробити розширення функціоналу цього додатку, додавши мапу пунктів утилізації будівельних відходів, що актуально через війну; інтегрувати IoT для моніторингу контейнерів, як у Сінгапурі, та впровадити блокчейн для прозорості переробки, як у Китаї.

Органи публічної влади України відіграють ключову роль у формуванні політики, створенні регуляторної бази та координації впровадження цифрових технологій у сфері управління відходами. З урахуванням викликів, визначених у звіті Global Waste Management Outlook (GWMO) 2024 та What a Waste 2.0 Update, а також національних особливостей (низький рівень переробки відходів (3 % від загального обсягу) і вплив війни), державні органи мають забезпечити стратегічний підхід до цифровізації. Цей процес охоплює нормативне регулювання, фінансування, координацію міжвідомчої взаємодії, залучення міжнародної підтримки та підвищення обізнаності громадян.

Закон України «Про управління відходами» [30] закладає основу для гармонізації з європейськими стандартами, зокрема Директивою ЄС 2008/98/ЄС [31], і передбачає використання цифрових інструментів для моніторингу та звітності. Органи влади мають розробити підзаконні акти, які визначатимуть технічні стандарти для IoT-датчиків, блокчейн-платформ і систем ІІІ, а також вимоги до кібербезпеки. Наприклад, створення національного реєстру відходів, інтегрованого з Big Data, потребує чітких нормативів щодо збору, обробки та захисту даних. Такий підхід сприятиме прозорості та відповідності міжнародним стандартам, як зазначено в GWMO 2024.

Державні органи, зокрема Міністерство фінансів України та Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, відіграють важливу роль у забезпеченні фінансування для впровадження цифрових технологій. Згідно з What a Waste 2.0 Update, країни з середнім доходом, як Україна, потребують значних інвестицій для модернізації інфраструктури управління відходами. Органи влади можуть залучати кошти через державно-приватне партнерство, міжнародні гранти (наприклад, EU4DigitalUA) та програми Європейського банку реконструкції та розвитку. Наприклад, пілотні проекти з IoT-датчиками для смартконтейнерів у містах (Київ чи Львів) можуть фінансуватися за підтримки міжнародних



донорів. Органи влади також мають розробити механізми пільгового оподаткування для компаній, які впроваджують цифрові рішення, що сприятиме масштабуванню технологій.

Міністерство цифрової трансформації України та органи місцевого самоврядування відіграють центральну роль у координації впровадження цифрових технологій. Наприклад, інтеграція IoT-систем із міськими платформами Smart City потребує співпраці між місцевими адміністраціями, комунальними підприємствами та центральними органами влади. Згідно з GWMO 2024, успішні приклади, такі як: Сеул чи Сінгапур, — демонструють важливість міжвідомчої координації для синхронізації даних із різних джерел (IoT, Big Data, супутникові зображення). В Україні органи влади можуть створювати міжвідомчі робочі групи для розробки єдиних стандартів і платформ, які забезпечать інтеграцію цифрових рішень у національну систему управління відходами. Місцеві органи влади, у свою чергу, відповідальні за впровадження пілотних проєктів і моніторинг їхньої ефективності.

Впровадження III, блокчейну та Big Data вимагає кваліфікованих кадрів, здатних розробляти, впроваджувати та обслуговувати ці системи. Згідно з GWMO 2024, брак спеціалістів є однією з ключових перешкод для цифровізації в країнах із перехідною економікою. Органи влади можуть співпрацювати з університетами та міжнародними партнерами для створення навчальних програм із фокусом на цифрові технології в екології. Наприклад, тренінги з використання III для сортування відходів або аналізу великих даних можуть бути інтегровані в програми професійної освіти. Це сприятиме розвитку людського капіталу та підвищенню ефективності впровадження технологій.

Згідно з What a Waste 2.0 Update, успішне впровадження цифрових рішень залежить від участі громадськості, зокрема через використання мобільних додатків для сортування чи моніторингу відходів. Органи влади можуть розробляти інформаційні кампанії, які пояснюють переваги цифрових технологій (наприклад, прозорість блокчейн-систем або зручність IoT-додатків). Крім того, органи місцевого самоврядування можуть створювати платформи для зворотного зв'язку, де громадяни повідомлятимуть про проблеми з відходами, що інтегруватимуться з Big Data для подальшого аналізу.

Органи публічної влади України відіграють багатогранну роль у впровадженні цифрових технологій в управлінні відходами, охоплюючи регуляторну, фінансову, координаційну, освітню та комунікаційну функції. Створення нормативної бази, залучення інвестицій, міжвідомча координація, підготовка кадрів і залучення громадськості є ключовими напрямками діяльності. У контексті післявоєнного відновлення України цифрова трансформація управління відходами, підкріплена активною участю органів влади, може стати важливим кроком до сталого розвитку та економічного зростання.

Висновки. Зарубіжний досвід, підкріплений даними GWMO 2024 і What a Waste 2.0 Update, показує, що цифрові технології (IoT, III, блокчейн, великі дані, мобільні додатки, віртуальна реальність VR) знижують



витрати на 20–30 %, скорочують викиди на 15 % і підвищують переробку до 70 % у розвинених країнах. В Україні ці технології можуть зменшити залежність від звалищ (90 % відходів) і впоратися з будівельними відходами, спричиненими війною. Рекомендації включають пілотні проекти, міжнародне фінансування та освітні кампанії.

Подальшими напрямками досліджень цієї теми є інтеграція нових технологій, розвиток циркулярної економіки, аналітика великих даних, соціально-економічні аспекти, економічна та екологічна оцінки цифрових технологій в умовах викликів, аналіз впливу війни на впровадження цифрових рішень, розробка моделей державно-приватного партнерства, дослідження соціальних факторів для підвищення обізнаності населення. Для України ці дослідження є особливо актуальними в контексті післявоєнного відновлення, євроінтеграції та необхідності модернізації системи управління відходами. Аналіз досвіду зарубіжних країн може допомогти розробити адаптивні моделі, які враховують обмежену інфраструктуру та фінансові ресурси. Ці дослідження сприятимуть створенню науково обґрунтованої бази для впровадження цифрових технологій, що забезпечать економічну ефективність, екологічну безпеку та соціальну залученість. Описані цифрові технології відкривають шлях до сталого управління відходами в Україні, але потребують адаптації до місцевих викликів, включаючи реальності сьогодення та обмежені ресурси.

Список використаних джерел

1. Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an Age of Waste — Turning Rubbish into a Resource. *UN Environment Document Repository*. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/44939>.
2. Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. 2018. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development; World Bank. *The World Bank Open Knowledge Repository*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
3. European Environment Agency. Trends and projections in Europe 2024. *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2800/7574066>.
4. Синчанський С. О. Приведення законодавства України щодо управління небезпечними відходами у відповідність з вимогами права Європейського Союзу. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*. 2025. Вип. 86, част. 3. С. 180–189. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.86.3.27>.
5. Єрмолаєва Т. В., Кузуб О. О., Козьміна Ю. Г. До питання щодо вирішення проблемних аспектів правового регулювання управління відходами в контексті адаптації екологічного законодавства України до ЄС. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*. 2025. Вип. 86, част. 3. С. 114–125. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.86.3.17>.
6. Белов Д. М., Легеза Є. О. Форми та методи правового регулювання захисту прав споживачів щодо поводження з відходами на державному рівні. *Аналітичне-порівняльне правознавство*. 2024. № 1. С. 105–109. <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2024.01.17>.



7. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*. 2010. Vol. 54, Iss. 15. P. 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>.
8. Ushasree R., Pandey I., Sinha G., Srivastava A. IoT-Based Smart Bin Sensors for Efficient Landfill Management and Sustainable Disposal *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, S14. P. 1794–1805. <https://doi.org/10.62441/nano-ntp.vi.3009>.
9. Integrated Urban Solutions Annual Report 2023 Singapore. *Sembcorp*. URL: <https://t.ly/RJJMG>.
10. National Environment Agency. URL: <https://www.nea.gov.sg>.
11. Linde N., Balian A., Shabatura T., et al. Artificial Intelligence in Waste Management in the Context of Implementing Circular Economy Grassroots. *Journal of Natural Resources*. Vol. 7, Iss. 3. P. 149–172. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.0703ukr08>.
12. Yagi M., Kokubu K. Waste decomposition analysis in Japanese manufacturing sectors for material flow cost accounting. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 224. P. 823–837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.196>.
13. Ministry of the Environment. *Government of Japan*. URL: <https://www.env.go.jp/en>.
14. Circular economy country profile 2024 — Germany. *European Environment Agency*. URL: <https://t.ly/EXYOv>.
15. Taylor P., Steenmans K., Steenmans I. Blockchain Technology for Sustainable Waste Management *Frontiers in Political Science*. 2020. Vol. 2. <https://doi.org/10.3389/fpos.2020.590923>.
16. Faiz F., Ninduwezuor-Ehiobu N., Adanma U. M., Solomon N. O. Blockchain for sustainable waste management: Enhancing transparency and accountability in waste disposal. *Comprehensive Research and Reviews in Science and Technology*. 2024. Vol. 02(01). P. 045–069. <https://doi.org/10.57219/crrst.2024.2.1.0032>.
17. National Development and reform commission. People's Republic of China. URL: <https://en.ndrc.gov.cn>.
18. Adewuyi A. Y., Adebayo K. B., Adebayo D., et al. Application of big data analytics to forecast future waste trends and inform sustainable planning. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 23(01). P. 2469–2479 <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.1.2229>.
19. Rubicon Global URL: <https://www.rubicon.com>.
20. Recycle Coach. URL: <https://www.recyclecoach.com>.
21. MyWaste — Ireland's official guide to managing waste. URL: <https://mywaste.ie>.
22. RecycleNation-Search. Find. Recycle. URL: <https://recyclenation.com>.
23. Plastic Bank. URL: <https://plasticbank.com>.
24. TrashOut — Contribute to a cleaner world with TrashOut. URL: <https://www.trashout.ngo>.
25. Swachhata App. URL: <https://sbmurban.org/swachhtha-app>.
26. JouleBug. URL: <https://www.joulebug.com>.
27. Too Good To Go. URL: <https://www.toogoodtogo.com/en-us>.
28. Звіт про стан виконання у 2024 році Національного плану дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року. Затв. Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.04.2021 р. № 443. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України URL: <https://t.ly/oMnol>.



29. Сортуй — помічник із сортування відходів у твоєму смартфоні. URL: <https://sortui.org.ua>.
30. Про управління відходами. Закон України від 20.06.2022 р. № 2320—IX. Верховна Рада України. Законодавство України. URL: <https://t.ly/9tGih>.
31. Директива Європейського Парламенту і Ради 2008/98/ЄС від 19.11.2008 р. про відходи та про скасування деяких директив. Верховна Рада України. Законодавство України. URL: <https://t.ly/1KOWr>.

Надійшла до редакції 11.06.2025
Рекомендовано до друку 10.07.2025

Mykola VAVRYSHCHUK

(Leonid Yuzkov Khmelnytskyi University of Management and Law)

Experience Of Foreign Countries In Implementing Digital Technologies In Waste Management

The foreign experience of implementing digital technologies in waste management has been analyzed, and the potential for their adaptation in Ukraine has been identified. The study covers countries with varying levels of economic development and diverse technological solutions, providing a broad range of approaches to waste management. The analysis of selected countries is based on reports such as the Global Waste Management Outlook 2024, What a Waste 2.0 Update, and the European Environment Agency 2024. Primary focus is given to Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), blockchain, big data, and mobile applications, their key applications in waste management, quantitative outcomes, and institutional and financial mechanisms for implementation. IoT is applied for monitoring container fill levels, waste sorting, logistics optimization, and environmental monitoring. For instance, in Barcelona (Spain), IoT-enabled containers reduced waste collection frequency by 20–50 %, lowering CO2 emissions, while in Singapore, IoT systems with GPS trackers cut transport costs by 15 %, saving \$2 million annually. AI is utilized for automated sorting (Tokyo, Japan: 95 % accuracy, 30 % increase in plastic recycling) and logistics and recycling optimization (Munich, Germany: 65 % waste recycling, €5 million annual savings). Blockchain ensures transparency in the recycling chain, as in China, where the AntChain platform tracks 1.2 million tons of plastic, reducing illegal dumping by 12 %. Big data facilitates waste volume forecasting and process optimization, as seen in the USA (Rubicon Global), while mobile apps like Recycle Coach (Canada/USA) and TrashOut (Slovakia/Czechia) enhance citizen engagement in sorting and environmental initiatives. In Ukraine, where waste management is hindered by war and limited resources, adapting these technologies holds significant potential. Pilot implementation of IoT sensors in cities, expansion of the Sortuy app's functionality by integrating a map of construction waste disposal sites, IoT monitoring, and blockchain for transparency are proposed. Implementation requires international funding, grants, infrastructure modernization, and legislative support. Adopting digital technologies could lead to savings (up to 30 % of disposal costs), reduced environmental impact, and the development of a circular economy in Ukraine.

Keywords: Digital technologies, waste management, Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), blockchain, Big Data, mobile applications, logistics optimization, waste sorting, recycling transparency, environmental monitoring.