

SECTION 5. ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGIES

DOI: 10.46299/ISG.2025.MONO.AGRO.1.5.1

5.1 Комплексний аналіз та прогнозування обсягів накопичених відходів в Україні: вплив інвестиційних і технологічних чинників

Постановка проблеми. В Україні щороку утворюється значний обсяг твердих побутових відходів – близько 48 млн м³, причому 94% із них і досі захоронюються на понад 6000 сміттєзвалищах, більшість з яких працюють без належної обробки та перевантажені понад свої можливі проєктні потужності. За офіційними та аналітичними оцінками, обсяги відходів в Україні залишаються значними, щорічне накопичення мільйонів тон побутових і промислових відходів створює довгострокові ризики для ґрунтів, підземних вод та здоров'я населення, а частка рециклінгу та безпечних технологій поводження є досить низькою.

У відповідь на критичний стан сфери управління відходами уряд за підтримки міжнародних партнерів, зокрема GIZ та ЄБРР, розробив Національну стратегію управління відходами до 2030 року. Цей документ визначає пріоритети щодо запобігання утворенню відходів, їх переробки, зменшення обсягів захоронення та розподілу повноважень між державними і місцевими органами влади відповідно до вимог ЄС. У контексті необхідності скорочення відходів, що підлягають захороненню, особливо гостро постає потреба модернізації інфраструктури, адже в країні фактично функціонує лише один сміттєспалювальний завод «Енергія». Україна розраховує на зовнішню підтримку для розвитку сучасних рішень, зокрема будівництва заводів з виробництва енергії з відходів [111].

Особливу складність становить просторово-неоднорідний характер генерації відходів: індустріально розвинені регіони (зокрема Дніпропетровська область, де концентрується важка промисловість) формують великі потоки промислових і змішаних відходів, які мають іншу морфологію та екологічну небезпеку порівняно з типовими міськими ТПВ. Це викликає значну

диспропорцію в навантаженні на полігони, інфраструктуру збору та системи переробки [112].

Починаючи з 2022 року додатковим і критичним чинником стала повномасштабна війна на території України: руйнування житлової та промислової інфраструктури, поява великих обсягів будівельних та небезпечних уламкових відходів, масове внутрішнє переміщення населення та ускладнення логістики поводження з відходами кардинально змінили їхні потоки і створили нові екологічні ризики. Через це традиційні моделі прогнозування та управління відходами вимагають перегляду з урахуванням воєнних, демографічних та економічних викликів [113].

Стан управління відходами в Україні характеризується низькими показниками переробки та значними масштабами накопичення. Лише близько 6% від загального обсягу утворених щороку майже 400 млн тон відходів проходять процеси переробки, що в кілька разів менше за середні показники країн ЄС. Додаткове зростання обсягів відходів у 2022 році, спричинене руйнуванням інфраструктури внаслідок війни, посилило дефіцит технологічних можливостей [114].

Глобальні тенденції свідчать про важливість економічного сектору управління відходами, особливо сегмента переробки, який демонструє найдинамічніший розвиток. У цьому контексті Дніпропетровська область залишається одним із найбільш проблемних регіонів. Велика кількість сміттєзвалищ і високі обсяги промислових та побутових відходів формують критичний екологічний та інфраструктурний тиск [114].

Ініціативи з будівництва сучасних сміттєпереробних комплексів (Кривий Ріг, Павлоградський регіон) становлять важливий елемент переходу від моделі захоронення до моделі відновлення ресурсів. Очікується, що запуск таких об'єктів забезпечить зменшення полігонного навантаження, розвиток сектору відновлюваних енергоресурсів і створення нових економічних можливостей [114].

Регіональні органи влади та фахівці з поводження із відходами потребують кількісних, просторово-часових оцінок потоків відходів для оптимізації розміщення полігонів, планування інфраструктурних інвестицій та розробки політик з переробки. Дніпропетровська область – є регіоном з високою індустріалізацією та значними накопиченнями відходів, що потребує окремого детального аналізу для розробки управлінських рішень [114].

У сучасних дослідженнях проаналізовано основні прояви негативного впливу сміттєзвалища на довкілля та здоров'я населення, що виникають у процесі його експлуатації. Встановлено, що внаслідок розкладання відходів формується фільтрат, який проникає в ґрунт і насичує його важкими металами, органічними сполуками та іншими токсикантами. Це зумовлює забруднення підземних вод, які забезпечують питне водопостачання прилеглих територій. Показано, що органічна частини відходів супроводжується інтенсивним виділенням біогазу (метану, CO_2 , H_2S), що належать до парникових газів і посилюють кліматичні зміни. Додаткову небезпеку створюють часті випадки самозаймання відходів, унаслідок чого у повітря надходять продукти горіння, зокрема діоксини, які є високотоксичними [115].

Установлено, що накопичення значних обсягів відходів, деградація земель та забруднення навколишніх ділянок негативно позначаються на стані природних екосистем, спричиняючи зменшення чисельності флори й фауни та трансформацію їх видового складу. Підкреслено, що мешканці поблизу сміттєзвалища зазнають підвищеного ризику розвитку респіраторних і алергічних захворювань, онкологічних патологій та інших порушень здоров'я через забруднене повітря та воду. На основі отриманих результатів виокремлено ключові джерела та чинники екологічної небезпеки, серед яких виокремлюють формування фільтрату, викиди біогазу та акумуляцію важких металів у ґрунті [115].

Реформи сектору поводження з відходами і міжнародні інвестиційні ініціативи (включно з проєктами технічної допомоги) активно спрямовані на модернізацію інфраструктури переробки й управління відходами в Україні.

Наукові результати підвищують ефективність інвестиційних рішень та сприяють більшій прозорості та цільовій направленості [111].

Україна має слабо реалізовані практики циркулярної економіки та значно нижчий відсоток переробки порівняно з ЄС; тому дослідження, що зіставляє внутрішні фактори утворення відходів із міжнародними практиками й економічними показниками, сприятиме створенню адаптованих стратегій переходу до більш циркулярних моделей. Так, в роботі [116] проводиться аналіз впровадження принципів циркулярної економіки у переробну промисловість та оцінка її впливу на навколишнє середовище. Автори досліджують динаміку забруднення, темпи його зростання, регіональні особливості використання відходів та екологічність продукції, а також застосовують методи оцінки структурних змін для визначення характеру цих процесів. На основі отриманих даних запропоновано концепцію замкнутого еколого-економічного циклу розвитку, яка поєднує практичний досвід впровадження циркулярної економіки та економіко-математичні моделі.

Сучасна система управління відходами в Україні стикається з низкою взаємопов'язаних проблем, які роблять неможливим ефективне планування інфраструктури з утилізації та безпечного розміщення небезпечних і небезпечних за потенційною шкодою відходів. По-перше, існує значна варіативність у динаміці утворення відходів за класами небезпеки та їх видами, що ускладнює формування адекватних прогнозів майбутніх потоків. По-друге, поточні підходи до обліку й звітності за відходами змінюються, так у 2023–2024 рр. були переглянуті форми державного статистичного спостереження та підходи до класифікації, що ставить завдання адаптації методик прогнозування до нових вимог обліку [117].

Особлива складність виникає при прогнозуванні накопичення відходів у спеціально відведених місцях (полігони, сховища, тимчасові майданчики), оскільки кінцевий обсяг накопичення залежить не тільки від темпів утворення відходів, але й від динаміки утилізації, спалення та фактичного видалення або експорту. Без узгодженого масового балансу для кожної категорії відходів

(включно з 1–3 класами небезпеки) планування площ полігонів, строки рекультивації та оцінка ризиків залишається емпіричною і нефункціональною. [118].

На регіональному рівні (як приклад Дніпропетровської області) проблема ускладнюється концентрацією промислових джерел утворення небезпечних відходів, існуванням обмеженої кількості спеціалізованих майданчиків та необхідністю узгодження регіонального планування з національними правилами класифікації та звітності. Недостатня увага до прогнозування накопичення тягне за собою ризики екологічних інцидентів, неспроможність своєчасно планувати інвестиції у переробку та рекультивацію й збільшення економічних витрат у довгостроковій перспективі [119].

Ключова проблема, що потребує вирішення, полягає у розробці методично обґрунтованого підходу до прогнозування загальних обсягів накопичення відходів у спеціально відведених місцях для України загалом та для Дніпропетровської області з урахуванням чотирьох компонентів масового балансу: утворення, утилізації, спалення та видалення або експорту. Рішення цієї проблеми має забезпечити можливість сценарного прогнозування, оцінки невизначеності та просторового розподілу накопичень.

Актуальність дослідження. У 2023–2024 рр. в Україні було оновлено підходи до обліку відходів (затвердження форми звітності №1-відходи і супутні роз'яснення), а також переглянуто порядок класифікації відходів. Це створює необхідність розробки прогнозних моделей, які сумісні з новими формами даних і можуть інтерпретувати тренди як до, так і після змін у звітності. Така адаптація важлива для достовірних оцінок накопичення відходів на полігонах [117].

На сьогодні існує висока значимість регулювання небезпечних відходів 1–3 класів. Небезпечні відходи таких класів становлять найбільший ризик для ґрунтів, підземних і поверхневих вод та здоров'я населення. Кількісні прогнози накопичення усіх класів відходів необхідні для обґрунтування пріоритетів щодо інвестицій (спеціалізовані сховища, термічні установки, системи нейтралізації)

та для планування заходів із мінімізації ризиків на національному й регіональному рівнях [118].

Також виокремлюється регіональна специфіка та практична потреба Дніпропетровської області. Дніпропетровська область – індустріально інтенсивний регіон з відносно великою питомою вагою утворення небезпечних відходів, що робить локальні прогнози особливо затребуваними для регіонального планування та виконання Регіонального плану управління відходами до 2030-2034 рр. [119].

Неконтрольоване накопичення небезпечних відходів має наслідки для довкілля, здоров'я і економіки. Здатне викликати довготривалі екологічні та соціально-економічні збитки: забруднення підземних вод, деградація ґрунтів, виникнення вогнищ захворювань, збільшення витрат на екстрені заходи з ліквідації наслідків. Кількісне прогнозування накопичення таких відходів дозволяє оцінити часові інтервали наповнення полігонів і потреби у рекультивації, що дає можливість планувати витрати заздалегідь і мінімізувати загальні витрати суспільства.

Зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Дане дослідження безпосередньо пов'язане з вирішенням актуальних наукових та прикладних проблем у сфері управління виробничими та іншими відходами на національному рівні. Наукове значення роботи полягає в удосконаленні методичного підходу до прогнозування обсягів утворення, утилізації, спалювання, видалення у спеціально відведені місця та загального накопичення відходів, що є одним із ключових завдань сучасної екологічної науки та державної політики у сфері поводження з відходами.

Дослідження спрямоване на встановлення закономірностей зміни основних потоків відходів у часі, формування аналітичної бази для оцінки ризиків подальшого накопичення, а також виявлення диспропорцій між обсягами утворення та фактичним рівнем утилізації, спалювання чи видалення. Отримані результати створюють підґрунтя для підвищення ефективності

управлінських рішень у сфері поводження з відходами та оптимізації екологічної політики.

З практичної точки зору, дослідження орієнтоване на підтримку виконання державних і регіональних стратегічних документів, зокрема, Національного плану управління відходами до 2030 року, регіональних планів поводження з відходами та вимог Директив ЄС у частині управління небезпечними потоками. Запропоновані підходи дають можливість:

- оцінювати реальні й перспективні обсяги накопичених небезпечних відходів;
- виявляти зони потенційного екологічного ризику;
- планувати необхідні потужності інфраструктури з утилізації та видалення;
- визначати тенденції, що потребують управлінського втручання;
- формувати обґрунтовані сценарії розвитку системи поводження з відходами як на державному, так і на регіональному рівні.

Таким чином, дослідження поєднує наукову новизну у сфері прогностико-аналітичних методів із вагомою практичною значущістю для державних органів, органів місцевого самоврядування, підприємств та фахівців, відповідальних за прийняття рішень у сфері екологічної безпеки. Результати дослідження сприяють підвищенню ефективності екологічної політики та зменшенню ризиків, пов'язаних із накопиченням небезпечних відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання утворення, оброблення та накопичення відходів, зокрема небезпечних, широко розглядається у вітчизняних і міжнародних дослідженнях. На рівні національної статистики базовим джерелом є методологічні документи та аналітичні звіти Державної служби статистики України, що визначають підходи до збору, класифікації та узагальнення даних про обсяги утворення, утилізації, видалення та накопичення відходів. Ці матеріали забезпечують стандартизовану основу для аналізу тенденцій, однак не містять методик моделювання та прогнозування довгострокових обсягів накопичених відходів за класами небезпеки.

На регіональному рівні важливим джерелом є Регіональний план управління відходами Дніпропетровської області до 2030 року, який містить просторовий та інфраструктурний аналіз системи поводження з відходами, зокрема характеристику місць видалення та проблем їх екологічного стану. Незважаючи на значний обсяг інформації щодо інфраструктурної спроможності, документ не пропонує кількісних прогнозів накопичення відходів і не розділяє їх за класами небезпеки, що створює прогалину у формуванні сценарних оцінок на середньо- і довгострокову перспективу [119].

Низка громадських і експертних досліджень, зокрема аналітичні записки Екологічної платформи EPL [120], акцентують увагу на деяких бар'єрах: недосконалості реєстру небезпечних відходів, проблемах ліцензування, низькій прозорості потоків і ризиках накопичення у нелегальних або застарілих об'єктах. Попри детальний проблемний аналіз, такі роботи переважно не містять кількісних моделей і не дають прогнозів щодо майбутніх обсягів відходів.

У наукових статтях українських дослідників [121] розглядаються питання накопичення відходів на місцях видалення та можливі шляхи оптимізації управління. Однак більшість робіт має описовий характер і зосереджена на загальному аналізі ситуації без застосування математичних моделей прогнозування чи масово-балансових оцінок, що необхідно для визначення майбутніх обсягів накопичених відходів.

Водночас у міжнародній науковій літературі запропоновані різноманітні підходи до прогнозування та моделювання потоків відходів. Зокрема у звіті [122] представлено глобальні моделі оцінки утворення відходів до 2050 року, однак ці моделі орієнтовані переважно на комунальні потоки.

У роботі [123] виконано систематичний огляд наявних підходів до моделювання утворення відходів, включаючи статистичні та машинні методи. Попри значну методичну цінність, автори зосереджуються на прогнозуванні утворення відходів, а не на моделюванні накопичення у спеціально відведених місцях.

Сучасні data-driven підходи демонструються у публікації [124], де для прогнозу небезпечних відходів використано великі дані промислових процесів і стічних вод. Такий підхід є інноваційним і потенційно можливим для застосування в Україні, проте потребує адаптації через обмежену доступність первинних даних.

Дослідження поводження з відходами на полігонах, зокрема оцінка впливів накопичення, представлена у роботі [125], де аналізуються характеристики фільтратів і пов'язані екологічні ризики. Однак у цих працях увага зосереджена на екологічних наслідках, а не на прогнозних моделях накопичення відходів.

У сучасних дослідженнях взаємозв'язок між економічним зростанням і утворенням відходів досліджується на різних рівнях. Так, в статті [126] виявлено двонаправлену коротко- та довгострокову причинність між економічним зростанням та генерацією відходів, а також взаємозв'язок між обсягами відходів та споживанням теплової енергії. Попри цінність підходу, дослідження обмежене муніципальними відходами і не охоплює усі відходи, які є ключовими для оцінки ризиків у промислових регіонах України та для прогнозування обсягів накопичення у спеціально відведених місцях.

У роботі [127] застосовано математичну модель для оптимального планування інвестицій у відновлювану енергетику з використанням сміттєвих потоків, враховано невизначеність у ресурсах та інвестиційних обмеженнях. Запропоновані способи для оцінки потенціалу відходів як ресурсу, але вони не стосуються прогнозування обсягів накопичення відходів; також модель не інтегрує повний масовий баланс відходів (утворення, утилізація, спалювання, видалення), що є ключовим для регіональної оцінки в Україні.

У статті [128] розглянуто використання прогнозного моделювання як інструменту для ефективної політики управління муніципальними відходами на різних територіальних рівнях. Автори застосували кількісні моделі для оцінки утворення, збору та переробки відходів у Чехії, що дозволяє прогнозувати майбутні потоки та оцінювати ефективність політик управління. Хоча підхід є

цінним для планування та прогнозування, він не враховує специфіку накопичення відходів та не обґрунтовує оцінку ризиків від їх накопичення у спеціально відведених місцях.

У дослідженні [129] здійснено огляд літератури, присвячений прогнозуванню утворення муніципальних твердих відходів (MSW) та впливу на це соціоекономічних факторів. Автори проаналізували понад 300 чинників, зокрема валовий внутрішній продукт, населення, доходи, розмір домогосподарств, споживання енергії та води. Це дало можливість визначити, які фактори суттєво впливають на утворення відходів, щоб покращити прогнозування та планування систем управління відходами. У межах дослідження здійснено узагальнення та всебічний аналіз наукових публікацій, проте власні практичні напрацювання, зокрема моделі прогнозування чи оцінка масового балансу відходів, у роботі не проводилися.

В роботі [130] досліджено глобальні тенденції утворення муніципальних твердих відходів та їхній вплив на довкілля. Результати показують, що навіть за умови підвищення ефективності поводження з відходами, загальносвітовий обсяг відходів продовжуватиме зростати, створюючи додаткове навантаження на системи їх обробки та видалення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Таким чином, аналіз наукових джерел засвідчує наявність значної кількості робіт, присвячених методології обліку відходів, проблемам управління ними та оцінці екологічних впливів полігонів. Водночас прогнозні дослідження, що враховують повний масовий баланс потоків відходів (утворення, утилізація, спалювання, видалення) та дозволяють оцінити майбутні обсяги їх накопичення в Україні та окремих регіонах, практично відсутні. Саме ця прогалина зумовлює актуальність представленого дослідження.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає у формуванні системного підходу до прогнозування накопичення небезпечних відходів на основі інтеграції статистичних даних про утворення,

утилізацію, спалювання та видалення. Запропонована методика побудови масового балансу може бути використана як універсальний спосіб для аналізу динаміки небезпечних відходів у регіональному та національному масштабах.

Викладання основного матеріалу. В даному дослідженні розглядалася задача статистичної оцінки динаміки зміни масових обсягів відходів: утворених, утилізованих, спалених, видалених та накопичених у спеціально відведених місцях за 2010–2025 роки.

За статистичною інформацією державної служби статистики України щодо загальних обсягів відходів проаналізовано закономірності зміни відповідних обсягів відходів за 2010–2020 роки. Оскільки відповідна статистична інформація державної служби статистики України на 2021 та 2025 роки відсутня, то в середовищі Excel було отримано результати прогнозу трьома способами: на основі тренду за поліноміальною кривою третього порядку; за допомогою функції тенденції, що повертає значення величини відповідно до лінійної апроксимації за методом найменших квадратів; за допомогою функції росту, на основі експоненціального тренду. Найменша відносна похибка фактичних даних та числових, розрахованих за допомогою статистичних функцій, була отримана за функцією тенденції і склала 2.4 %.

У межах даного дослідження на першому етапі було розглянуто завдання статистичної оцінки динаміки масових обсягів відходів: утворених, утилізованих, спалених, видалених та накопичених у спеціально відведених місцях за період 2010–2025 років. Оскільки офіційні статистичні дані за 2021–2025 роки відсутні, для отримання прогнозних значень у середовищі Excel було застосовано чотири підходи прогнозування. Перший передбачав побудову трендової лінії на основі поліноміальної апроксимації третього порядку. Другий підхід ґрунтувався на використанні функції TENDENCY, яка формує прогноз відповідно до лінійної моделі, розрахованої методом найменших квадратів. Третій підхід передбачав застосування функції GROWTH, що дозволяє побудувати експоненціальний тренд зміни показника. Четвертий – використання функції FORECAST.LINEAR, яка надає можливість обчислювати прогнозні

значення показника на основі статистичної залежності між відомими аргументами та результатами.

Отримані показники описової статистики дають можливість глибше охарактеризувати динаміку утворення відходів у 2010–2020 рр. та виявити структурні особливості зміни даного екологічного параметра (рис. 1) [131]. Загальні обсяги утворених відходів за досліджуваний період становить 4 343 740,4 тис. т. Максимальне значення 462 373,5 тис. т показник досяг у 2020 році. Пік утворення відходів у 2020 році може бути зумовлений низкою чинників: активізацією промислового виробництва перед пандемічними обмеженнями, збільшенням обсягів добування корисних копалин у промислових регіонах, а також зміною підходів до статистичного обліку.



Рисунок 1. Зміна обсягів утворених відходів у 2010–2020 рр. та прогноз за моделлю FORECAST.LINEAR на 2021–2026 рр. [розробка автора]

Максимум свідчить про можливу перевантаженість інфраструктури поводження з відходами та збільшення екологічних ризиків у цей період. Мінімальне значення 295 870,1 тис. т. спостерігалось у 2016 році. Найнижчі показники утворення відходів припадають на 2016 рік, що може пов'язуватися з економічним спадом, частковим простоєм підприємств, зменшенням обсягів

видобувної промисловості та оптимізацією виробничих процесів. Мінімум вказує на період відносного зниження техногенного навантаження на регіони.

Середнє значення дорівнює 394 885,5 тис. т. Середній рівень утворення відходів відображає усереднений стан техногенного навантаження на територію за 11 років. Значення, що помітно нижче за максимум і ближче до медіани, свідчить про наявність окремих пікових років, які «підтягують» загальну динаміку вгору. Медіана – 422 549,9 тис. т. Той факт, що медіана перевищує середнє, свідчить про правобічну асиметрію розподілу даних: у ряді є кілька низьких значень (2015–2016 рр.), які знижують середнє арифметичне, але не впливають на центральне положення медіани. Медіанний показник підтверджує тенденцію до переважання вищих значень у більшості років.

Розмах становить 166 03,4 тис. т. Великий розмах свідчить про значну міжрічну варіабельність утворення відходів. Для екологічного прогнозування та планування інфраструктури це означає необхідність урахування нестабільності техногенних потоків, які можуть різко змінюватися залежно від економічної та політичної ситуації. Середнє квадратичне відхилення дорівнює 59 977,8 тис. т. Високе значення стандартного відхилення вказує на суттєву дисперсію між річними показниками. Така мінливість створює складності для розрахунку потужностей полігонів, визначення потреб у переробних потужностях та оцінки ризиків накопичення відходів. Чим більше відхилення, тим менш стабільною є система утворення відходів.

Більш детальний аналіз річних показників утворених відходів виконано на основі розрахунку відносних відхилень фактичних обсягів від середнього значення, що представлено на рисунку 2.

Дослідження міжрічних відхилень показує, що динаміка утворення відходів у 2010–2020 рр. була нерівномірною та характеризувалася значними коливаннями. Найбільше негативне відхилення від середнього значення маси утворених відходів спостерігалось у 2016 році, коли фактичний обсяг був на 25 % нижчим за середньорічний рівень.

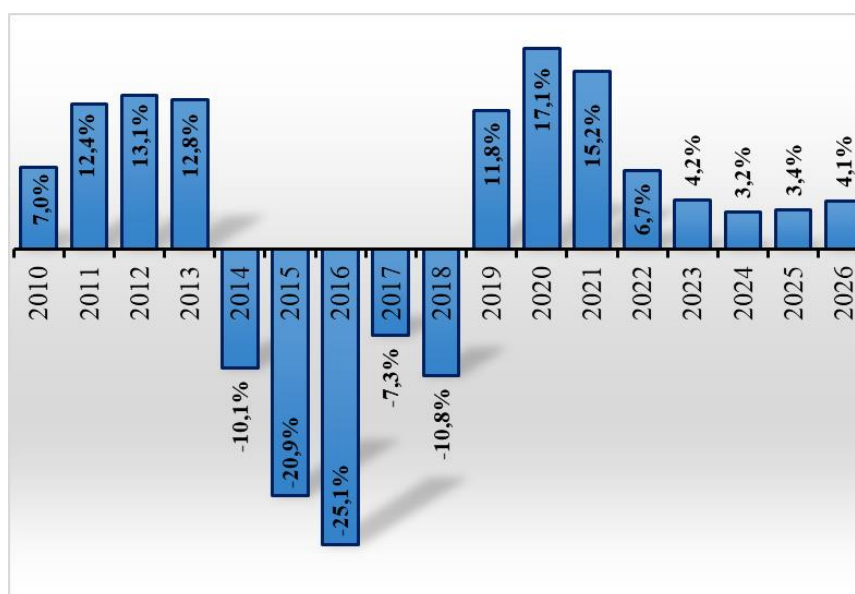


Рисунок 2. Динаміка відносних відхилень річних обсягів утворених відходів від середнього значення за 2010-2026 роки, % [розробка автора]

Це свідчить про період мінімального техногенного навантаження, що може бути пов'язано з економічним спадом та зменшенням активності промисловості.

Натомість максимальне позитивне відхилення зафіксовано у 2020 році, коли обсяг утворених відходів перевищив середнє значення на 17 %. Це відображає різке зростання техногенного навантаження та досягнення пікового рівня утворення відходів у досліджуваному періоді.

У середньому, абсолютна величина річних відхилень становила 13,5 %, тобто щороку маса утворених відходів змінювалася (збільшувалася або зменшувалася) приблизно на таку величину відносно середнього. Такий рівень варіабельності вказує на нестабільність процесів утворення відходів, що необхідно враховувати при прогнозуванні, проєктуванні потужностей інфраструктури та оцінюванні екологічних ризиків.

Порівняння фактичних значень та результатів прогнозування показало, що найменше середнє значення відносної похибки (7,4%) було отримано для моделі, побудованої за допомогою функції FORECAST.LINEAR, що свідчить про її найвищу адекватність у межах досліджуваного масиву даних.

Аналіз динаміки обсягів утворених відходів за 2010–2020 рр. свідчить про наявність можливої циклічності з орієнтовною періодичністю 8–9 років між локальними максимумами. Це дає підстави припустити, що у наступні 2026–

2027 рр. може спостерігатися тенденція до незначного зростання рівня утворення відходів, що узгоджується з фактичним економічним станом, спричиненим військовими наслідками в Україні, що закономірно зменшує обсяги промислового виробництва і, відповідно, формування відходів. У середньостроковій перспективі, за умови стабілізації ситуації та відновлення економіки, ймовірним є чергове підвищення обсягів утворених відходів у межах 2030–2031 рр. Очікуване зростання може бути пов'язане з активізацією промислового сектору, реалізацією програм відбудови та посиленням інвестиційної діяльності. Таким чином, прогноз має сценарний характер і враховує як статистичні тенденції, так і макроекономічні чинники.

Порівняння фактичних значень утилізованих відходів за 2010–2020 рр. із результатами прогнозування показало, що серед усіх розглянутих моделей найменше середнє відносне відхилення (8,2%) отримане для експоненціального тренду, побудованого за допомогою функції GROWTH. Це свідчить, що саме експоненціальна модель найкраще відтворює внутрішню закономірність зміни обсягів утилізованих відходів та може бути використана як основний інструмент для середньострокового прогнозування.

Динаміка зміни утилізованих відходів за 2010–2020 (рис. 3) характеризується високою мінливістю, що проявляється у значному діапазоні річних коливань. Загальні обсяги утилізованих відходів за 2010–2020 рр. становить 1 286 715,4 тис. т. Максимальне значення – 153 368,2 тис. т. спостерігалось у 2011 р., що може бути пов'язано з високою промисловою активністю та реалізацією масштабних інвестиційних програм у відповідних регіонах. Мінімальне значення – 84 630,3 тис. т. було зафіксовано у 2016 р., що відображає період економічного спаду, скорочення виробництв та зниження інвестицій у переробні й утилізаційні потужності. Середнє значення – 116 974,1 тис. т., що вказує на загальний рівень сталого функціонування системи утилізації відходів у країні.

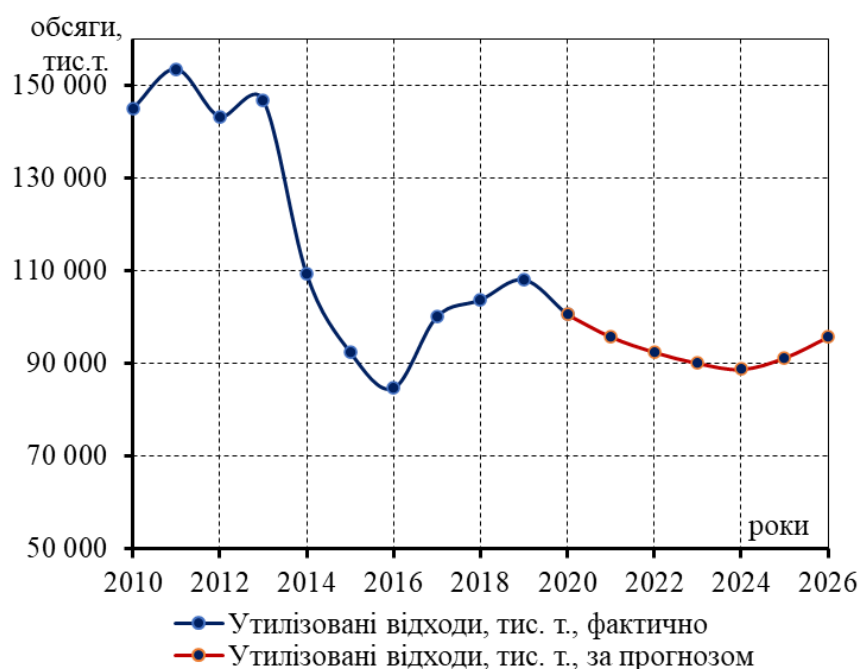


Рисунок 3. Зміна обсягів утилізованих відходів у 2010–2020 рр. та прогноз за моделлю GROWTH на 2021–2026 рр. [розробка автора]

Медіана – 108 024,1 тис. т., нижча за середнє значення, що свідчить про певний зсув розподілу вправо та наявність окремих аномально високих значень у перші роки. Розмах даних – 68 737,9 тис. т. підтверджує значну амплітуду коливань від року до року. Середнє квадратичне відхилення – 24 882,8 тис. т, що відображає високий рівень дисперсності даних та нестабільність роботи сектору утилізації.

Оцінка тенденцій у поведінці зміни утилізованих відходів добре відображається за допомогою проведених розрахунків відносних відхилень фактичних обсягів від середнього значення, що представлено на рисунку 4. Загалом динаміка утилізації відходів не має монотонного зростання чи спаду. Спостерігається виражене падіння у 2013–2016 рр., що корелює з економічними кризами та зниженням промислової активності в країні. Часткове відновлення спостерігається у 2017–2020 рр., але не до рівня попередніх максимумів. Тобто система утилізації відходів в Україні протягом цього періоду залишається чутливою до економічних факторів, інвестицій та регуляторних змін.

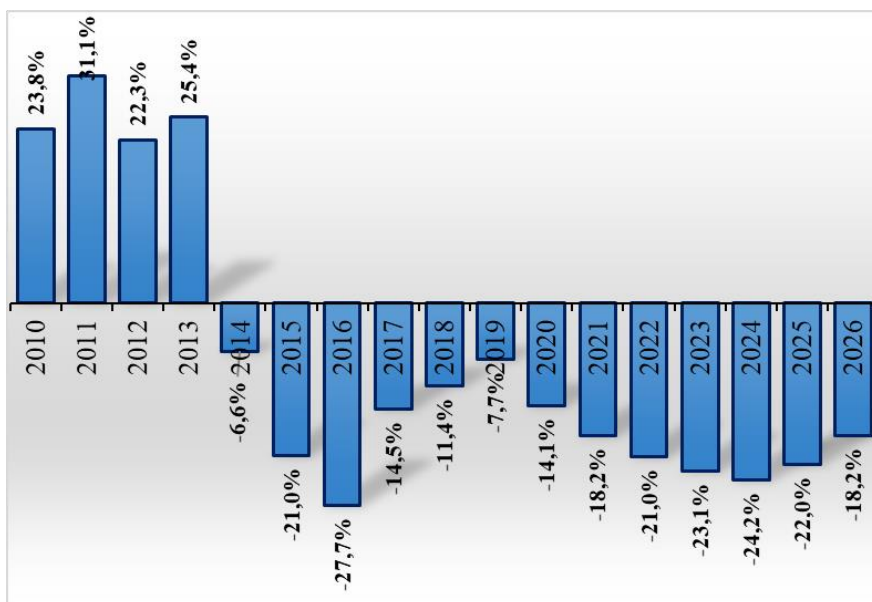


Рисунок 4. Динаміка відносних відхилень річних обсягів утилізованих відходів від середнього значення за 2010-2026 роки, % [розробка автора]

Найбільше позитивне відхилення спостерігалось у 2011 р. – приблизно +31% від середнього рівня, що вказує на сприятливі умови для утилізації у той період. Найбільше негативне відхилення у 2016 р. близько (–28%) підтверджує кризовий характер цього року. Середнє абсолютне відхилення становить близько 21%, що свідчить про нестабільність темпів утилізації та нерівномірність навантаження на інфраструктуру.

З огляду на найкращу точність експоненціальної функції GROWTH, прогноз побудовано саме за цією моделлю. Прогноз свідчить, що у 2021–2024 рр. можливе збереження тренду до зниження темпів утилізації через воєнний стан в Україні, падіння обсягів промислового виробництва, скорочення інвестицій у інфраструктуру поводження з відходами, зниження загального рівня утворення відходів. Але починаючи з 2025-2026 років ймовірно збільшення обсягів утилізації відходів за рахунок закордонних інвестицій у відновлення та розвиток економіки України.

Результати аналізу свідчать, що рівень утилізації відходів в Україні суттєво залежить від макроекономічної ситуації. Інфраструктура утилізації не демонструє сталого нарощування потужностей. Високі коливання утилізації

відображають нестабільність управління відходами та обмеженість переробних потужностей. У найближчій перспективі (до 2026 р.) на систему утилізації буде впливати військова та економічна ситуація, що приведе до зниження обсягів утилізації або їх стабілізації на мінімальному рівні.

Отримані результати прогнозування обсягів спалених відходів на основі експоненціального тренду, побудованого за допомогою функції GROWTH, демонструють найвищу узгодженість із фактичними даними, середня відносна похибка становить 8,8%. Це підтверджує доцільність застосування цієї моделі для короткострокового прогнозу динаміки спалювання відходів.

Тенденція зміни обсягів спалених відходів представлена на рисунку 5, її можна охарактеризувати статистичними показниками. Загальні обсяги спалених відходів за період 2010–2020 роки становить 11 560,4 тис. т. Максимальне значення було досягнуто у 2012 році і дорівнювало 1 201,1 тис. т. Мінімальне значення зафіксовано у 2013 році і становило 917,9 тис. т.

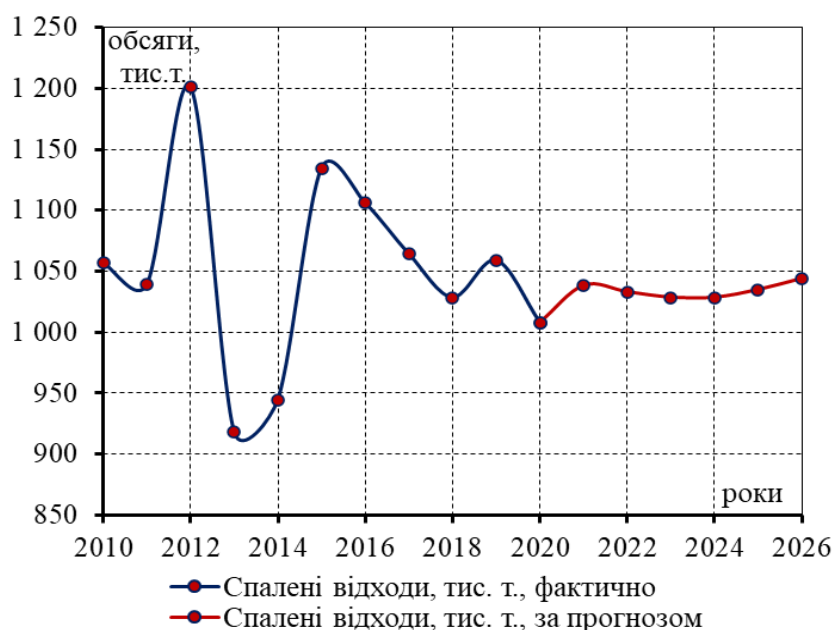


Рисунок 5. Зміна обсягів спалених відходів у 2010–2020 рр. та прогноз за моделлю GROWTH на 2021–2026 рр. [розробка автора]

Середнє значення за вказаний період – 1 050,9 тис. т., медіана – 1 056,8 тис. т., розмах (max–min) – 283,2 тис. т., середнє квадратичне відхилення – 80,2 тис. т.

Характеристика динаміки у 2010–2020 роках полягає в тому, що фактичні дані демонструють наступні закономірності:

- 2010–2012 рр. – зростання, максимальний пік у 2012 році (1 201,1 тис. т).
- 2013 р. – найглибший спад (–24% відносно максимуму).
- 2014–2017 рр. – часткове відновлення, показники стабілізуються на рівні ~1 050–1 130 тис. т.
- 2018–2020 рр. – поступове зниження, що може бути пов'язано зі скороченням виробництва та переходом на інші методи поводження з відходами.

Структура ряду коливається навколо середнього значення без вираженого довгострокового тренду, що робить експоненціальну модель об'єктивною, тобто вона добре відтворює незначні коливання, але не передбачає різких стрибків.

Також було доцільно та методологічно обґрунтовано побудувати графіки відхилень річних показників спалених відходів відносно середнього значення за 2010–2026 роки та, оскільки це дозволяє не лише підсилити якість статистичної інтерпретації, але й забезпечує підґрунтя для більш точного прогнозування та розуміння структурних змін у системі поводження з відходами. Так на рисунку 6 наведено динаміку зміни показників відхилень річних показників спалених відходів відносно середнього значення за 2010-2026 роки.

Аналіз прогнозних даних дозволяє зробити наступні висновки:

1. Загальна тенденція – слабо спадна, що узгоджується з трендом 2017–2020 років.
2. Показники залишаються в діапазоні $\pm 2\%$ від середнього значення, що свідчить про відсутність різких змін у структурі утворення та спалювання відходів.
3. Мінімум прогнозу припадає на 2023–2024 роки (~1028,6 тис. т).
4. Поступове зростання після 2024 року може свідчити про:
 - відновлення економічної активності,
 - збільшення обсягів утворення відходів,
 - стабілізацію інфраструктури поводження з відходами.

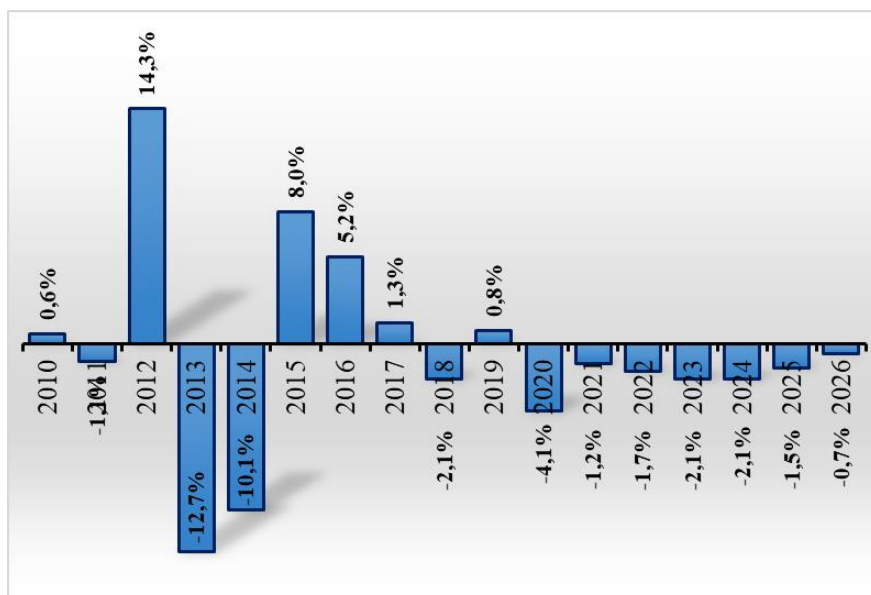


Рисунок 6. Динаміка відносних відхилень річних обсягів спалених відходів від середнього значення за 2010-2026 роки, % [розробка автора]

Порівняння фактичних та прогнозних значень підтверджує точність моделі GROWTH. Середнє відносне відхилення 8,8% свідчить, що експоненціальний тренд найбільш повно відтворює характер змін маси спалених відходів. Це зумовлено тим, що фактичні дані демонструють не лінійний, а згладжено-хвилеподібний характер, що добре описується експоненційними залежностями.

Також спостерігається достатньо високий рівень узгодженості прогнозів із реальними трендами:

- Прогноз не виходить за межі середньоквадратичного відхилення та розмаху ряду.
- Прогнозовані значення логічно вписуються в динаміку та не суперечать довгостроковим коливанням.

Підсумовуючи виконаний аналіз виявлених закономірностей розподілу фактичних та прогнозних даних відносно спалених відходів, можна зробити загальні висновки:

1. Фактичні дані (2010–2020) характеризуються помірними коливаннями без вираженої тенденції до зростання чи зниження.

2. Експоненціальний тренд GROWTH найкраще відтворює структуру ряду та забезпечує мінімальну похибку прогнозу.

3. Прогноз на 2021–2026 рр. показує стабільний рівень спалювання відходів з незначним зниженням до 2023–2024 рр. та подальшим зростанням.

4. Отримані результати можуть бути використані для:

- оцінки навантаження на інфраструктуру поводження з відходами,
- планування потужностей сміттєспалювальних установок,
- економічного прогнозування в екологічній сфері.

Для характеристики динаміки видалення відходів у спеціально відведені місця за 2010–2020 рр. було проведено статистичну оцінку основних параметрів ряду даних (рис. 7). Динаміка видалення відходів у спеціально відведені місця у 2010–2020 роках характеризується яскраво вираженою хвилеподібною тенденцією зі значними спадами та періодами часткового відновлення.

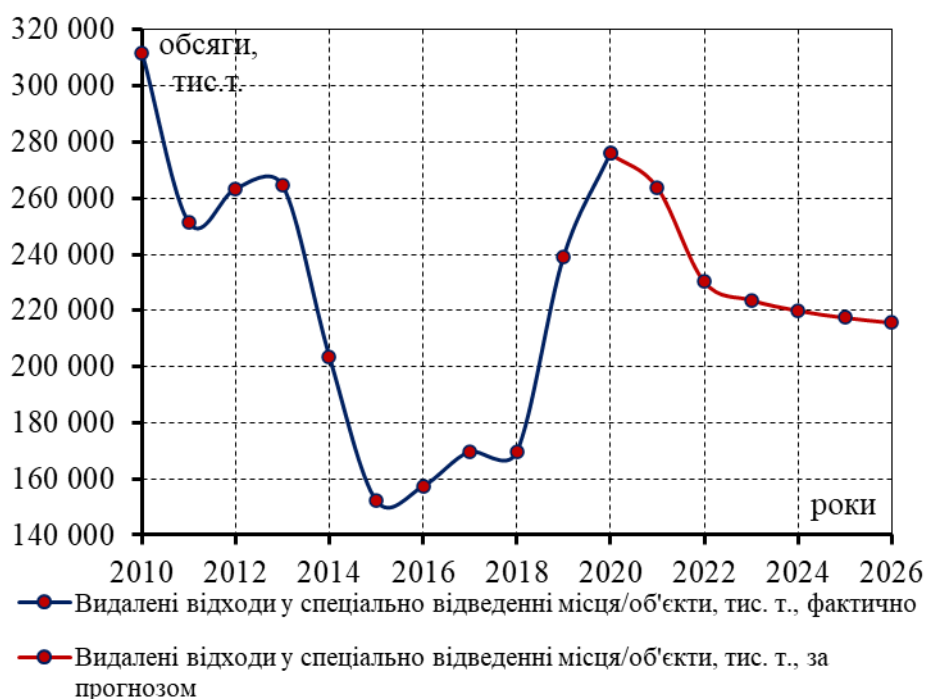


Рисунок 7. Зміна обсягів видалених відходів у спеціально відведені місця/об'єкти за 2010–2020 рр. та прогноз за моделлю FORECAST.LINEAR на 2021–2026 рр. [розробка автора]

Описова статистика включала загальні статистичні характеристики. Загальні обсяги видалених відходів за 2010–2020 рр. становили 2 458 909.4 тис. т., що свідчить про значне сумарне навантаження на полігони та інші об'єкти захоронення. Максимальне значення було у 2010 році 311 649 тис. т., коли обсяги видалених відходів були найвищими. Це може бути пов'язано з високою промисловою активністю та недостатньою розвиненістю технологій рециклінгу.

Мінімальне значення зафіксовано у 2015 році – 152 295 тис. т., тобто зниження у 2 рази порівняно з 2010 роком. Це падіння часто інтерпретується як наслідок економічної кризи та зменшення виробництва в ключових галузях. Загальне скорочення за цей період становило 49,5 %. Причини такого тренду можуть включати: скорочення промислового виробництва, поступовий розвиток утилізаційних технологій, часткову зміну структури поводження з відходами (перенаправлення на переробку або спалювання).

Далі у 2016–2018 роки спостерігалася стабілізація обсягів видалених відходів, вони коливаються в діапазоні 157–170 млн. т, що свідчить про період відносної стабільності без різких стрибків. Наприкінці періоду 2019–2020 років спостерігається нове суттєве збільшення: 2019 р. – 238 997 тис. т., 2020 р. – 275 985 тис. т. Зростання на 36 % за два роки може бути пов'язане з: збільшенням обсягів промислових відходів, економічними коливаннями, обмеженою потужністю альтернативних технологій утилізації.

Таким чином, фактична динаміка має чіткий спадний тренд до 2016 р., стабілізацію в 2016–2018 рр. і відновлення зростання у 2019–2020 рр.

Середнє значення становить 223 637.2 тис. т, що демонструє типовий середньорічний рівень видалених відходів за період. Медіана – 238 997.2 тис. т, що лише трохи вище за середнє значення. Це свідчить про відсутність сильних асиметрій у розподілі даних, хоча крайні значення 2010 і 2015 років створюють певну варіабельність. Розмах ряду даних – 159 354 тис. т., тобто різниця між найвищим і найнижчим значеннями. Така величина показує високу міжрічну мінливість, зумовлену економічними та структурними змінами в системі

поводження з відходами. Середнє квадратичне відхилення – 55 201.1 тис. т., що свідчить про значний рівень статистичної дисперсії. Це означає, що річні значення в середньому відхилялися від середнього приблизно на 25 %.

Різниця між піком 2010 року та мінімумом 2015 року відображає: глибоку економічну трансформацію (післякризове падіння), скорочення промислового виробництва, часткову зміну підходів до утилізації та видалення відходів, зростання ролі альтернативних технологій.

Близькість середнього й медіани свідчить про помірну симетричність розподілу, тобто немає значних статистичних перекосів. Однак два екстремальні значення (2010 і 2015 рр.) впливають на загальну картину, підсилюючи варіації.

Високе стандартне відхилення (55 млн т.) та розмах понад 159 млн т. демонструють: суттєву міжрічну нестабільність, залежність обсягів видалених відходів від зовнішніх макроекономічних умов, наявність чітких спадів та зростань, а не плавного тренду.

Ряд має високий рівень варіабельності, що підтверджується великим розмахом та стандартним відхиленням. Двовершинна структура розподілу, максимум 2010 і локальний максимум 2020 проти мінімуму 2015, вказує на циклічні зміни. Медіанне значення вище середнього, що може свідчити про незначну правосторонню асиметрію, тобто про більшу кількість років з відносно меншими значеннями.

Статистична картина відповідає реальним економічним подіям, включаючи падіння 2014–2015 рр. і відновлення 2019–2020 рр.

Одночасно було проведено прогноз за моделлю FORECAST.LINEAR на 2021–2026 рр. Спостерігається загальна тенденція зменшення у прогностичному періоді 2021–2026 роки і становить: від 264 000 до 215 700 тис. т., тобто мінус 18,3 % за 6 років. Лінійний тренд відображає припущення про продовження раніше сформованої тенденції, згладжуючи різкі коливання 2019–2020 років. При цьому прогноз передбачає: затухаюче зниження обсягів видалених відходів; сповільнення темпів скорочення після 2023 року.

Це може свідчити про: стабілізацію технологій поводження з відходами, перехід до більш ефективних моделей управління відходами, зменшення промислової активності у зв'язку з економічною кризою та воєнним станом, тимчасове падіння виробництва в ключових секторах.

Проведене порівняння фактичних та прогнозних даних вказує на перехід від зростання до зниження обсягів відходів видалених у спеціальні місця. Характерної рисою є контраст між фактичним зростанням у 2019–2020 рр. та прогнозованим зменшенням після 2021 р. Це може бути пояснено тим, що лінійна модель «згладжує» значення й реагує на всю тенденцію в цілому, а не лише на аномальні піки.

Для підвищення інформативності та виявлення прихованих закономірностей у динаміці видалених відходів проведено аналіз відхилень фактичних та прогнозних значень відносно середнього рівня за весь період 2010–2026 роки. Такий підхід дозволяє оцінити не лише абсолютні коливання, але й ступінь аномальності окремих років відносно типового (усередненого) рівня, що підвищує достовірність подальших прогнозних оцінок.

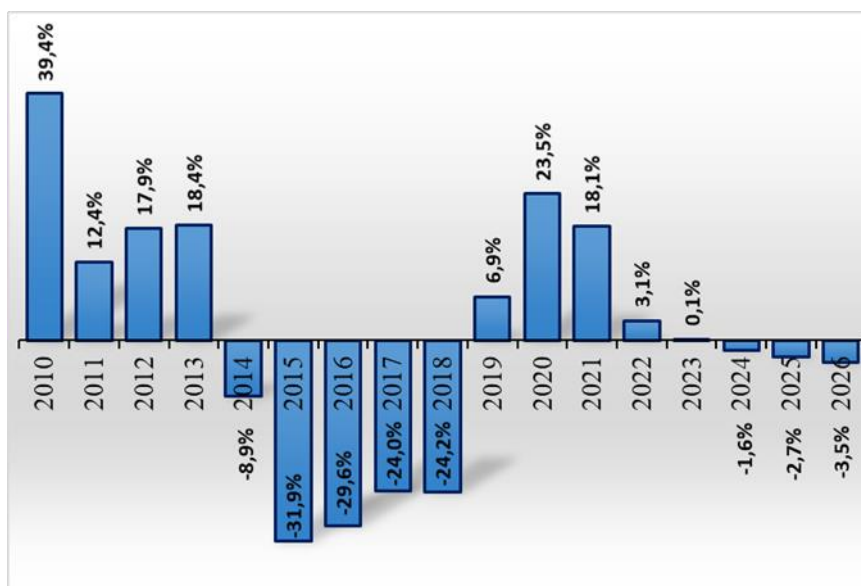


Рисунок 8. Динаміка відносних відхилень річних обсягів видалених відходів у спеціально відведені місця/об'єкти від середнього значення за 2010–2026 роки, % [розробка автора]

Середнє відносне відхилення 5,8 % є дуже малим для екологічних часових рядів, що підтверджує: стабільність прогнозних даних, відповідність тренду характеру зміни даних у більшості років, можливість використання цього прогнозу для подальших оцінок накопичення відходів.

2010 рік демонструє найбільше позитивне відхилення ($\approx +88$ тис. т.), що вказує на пікову інтенсивність видалення відходів на початку періоду. 2019–2021 рр. вказує на повторне зростання обсягів вище середнього, що може бути пов'язано з: активізацією економічної діяльності; зменшенням рівня перероблення відходів, зміною структури промисловості або воєнними чинниками (після 2014 р. та перед 2022 р.). Ці роки формують локальні максимуми у динаміці.

Найбільші негативні відхилення зафіксовано у 2015 році, близько 71 тис. т – 31,9%, що є історичним мінімумом. У 2024–2026 рр. спостерігалися стабільні негативні відхилення в межах ($-6 \dots -8$ тис. т.) – ($-3,5\% \dots -1,6\%$), що вказує на загасання тенденції та можливе досягнення нового рівноважного стану.

Низхідні відхилення 2014–2018 рр. можуть бути пов'язані з: падінням промислового виробництва після 2014 р.; структурною кризою; посиленням екологічних вимог або зменшенням звітності підприємств.

Загальні висновки за відхиленнями полягають в наступному: тренд відхилень відображає циклічність зміни обсягів видалених відходів: спад $\rightarrow$ мінімум $\rightarrow$ зростання $\rightarrow$ спад $\rightarrow$ стабілізація.

Найбурхливіші зміни спостерігалися у 2010–2015 рр., що підтверджується високими позитивними та негативними відхиленнями. Після 2016 р. відбувається вирівнювання та стабілізація. Прогноз 2021–2026 рр. свідчить про поступовий перехід до нового середнього рівня ≈ 215 –223 тис. т.

Аналіз відхилень є важливим для: виявлення аномальних років; перевірки достовірності прогнозу; з'ясування структурних змін у сфері поводження з відходами; оцінки екологічних ризиків у періоди різких коливань.

Основні висновки аналізу проведеного по фактичним та прогнозним даним обсягів видалених відходів у спеціально відведені місця/об'єкти:

1. За 2010–2016 рр. обсяги видалених відходів різко зменшувались, майже вдвічі.
2. У 2016–2018 рр. спостерігалася стабільність рівнів.
3. У 2019–2020 рр. відбулося різке зростання – це відновлення промислової активності перед кризовими подіями.
4. Прогноз на 2021–2026 рр. свідчить про загальну тенденцію до зменшення видалених відходів із можливим уповільненням темпів.
5. Модель FORECAST.LINEAR є найточнішою із застосованих методів, що підтверджується мінімальною помилкою (5,8 %).
6. Прогноз може бути використаний для оцінки навантаження на полігони та планування інфраструктури поводження з відходами.

Значна варіабельність даних обґрунтовує необхідність побудови прогнозних моделей, оскільки візуальний огляд може бути недостатнім для надійних висновків.

Динаміка зміни загальних обсягів відходів, накопичених у спеціально відведених місцях та об'єктах упродовж 2010–2020 рр., а також із урахуванням прогнозних значень, розрахованих за допомогою функції TENDENCY, яка серед чотирьох застосованих методів забезпечила найменшу відносну похибку – 9,2%, наведена на рисунку 9.

Аналіз закономірності зміни загальних обсягів відходів, накопичених протягом експлуатації у спеціально відведених місцях та об'єктах, за 2010–2020 роки характеризується суттєвими коливаннями (рис. 9). За цей період було фактично накопичено від 12,21 млн. т. у 2014 році до 15,64 млн. т. у 2020 році, що відповідає мінімальному та максимальному значенням відповідно. Загальний обсяг накопичених відходів за весь період становив 141,0 млн. т, а середнє річне значення – 14,10 млн. т. Медіанне значення ряду дорівнює 14,73 млн. т, що свідчить про незначну асиметрію розподілу даних відносно центру.

Розмах вибірки становив 3,43 млн. т., що вказує на істотну варіабельність у річних обсягах накопичених відходів, зумовлену як економічними циклами,

так і змінами у структурі промислового виробництва та обмеженнями на видобувну діяльність у певні роки.

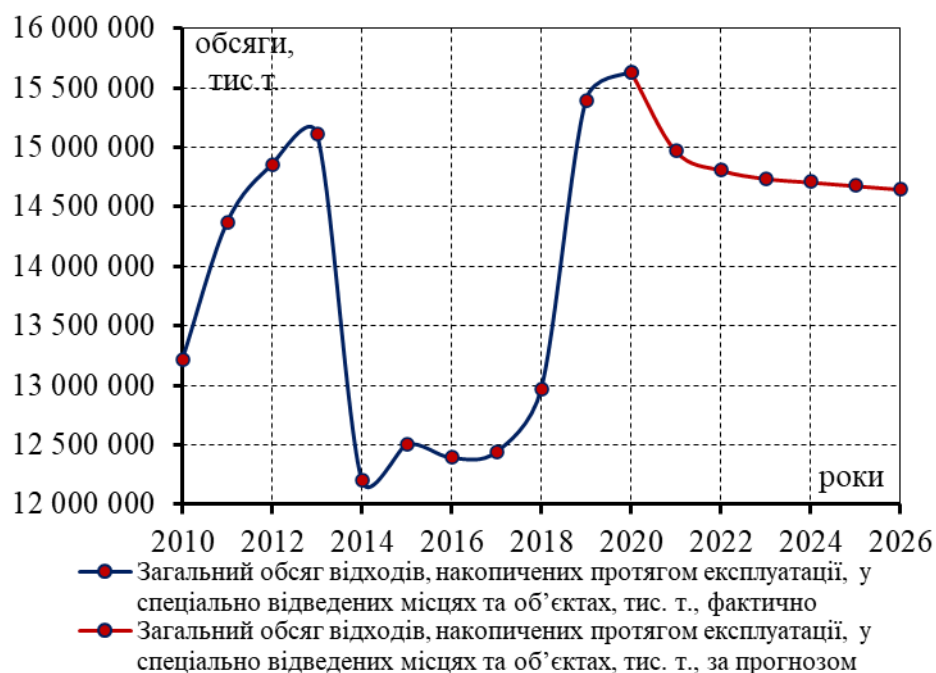


Рисунок 9. Зміна загальних обсягів відходів, накопичених протягом експлуатації, у спеціально відведених місцях та об'єктах за 2010–2020 рр. фактично та прогноз за моделлю TENDENCY [розробка автора]

Середньоквадратичне відхилення дорівнює 1,35 млн. т, що також підтверджує високий рівень нестабільності динаміки. Показник асиметрії, рівний 0,3, свідчить про слабко виражену правосторонню асиметрію, тобто наявність дещо більших за величиною значень у правій частині розподілу.

Оцінюючи фактичні тенденції за 2010–2020 рр. можна виокремити наступні закономірності. У 2010–2013 рр. спостерігалось стабільне зростання накопичення відходів: від 13,22 млн. т. до 15,11 млн.т. Це зростання корелює з відносною стабільністю промислового виробництва у цей період. Найрізкіше зменшення відбулося у 2014 році, коли обсяг накопичених відходів знизився до 12,21 млн. т, що пов'язано з економічним спадом, зміною промислових потоків та кризовими подіями в країні.

У 2015–2018 рр. показники залишалися відносно стабільними, коливаючись у межах 12,39–13,97 млн. т, що свідчить про період консолідації та

уповільнення темпів нагромадження. Починаючи з 2019 року, знову спостерігалось зростання – до 15,70 млн т у 2019 році та 15,64 млн. т. у 2020 році, що може бути пов'язано з відновленням роботи окремих виробничих підприємств та збільшенням обсягів видобутку та переробки сировини.

Для підвищення точності оцінки прогнозних значень було також застосовано функцію TENDENCY, яка реалізує лінійну регресію методом найменших квадратів. За результатами порівняння моделей встановлено, що середнє відносне відхилення між фактичними та розрахованими за допомогою TENDENCY значеннями становило 9,2%, що є одним з найнижчих показників серед використаних методів прогнозування. Використання цієї функції дало можливість додатково уточнити тенденцію зміни накопичених відходів та підвищити узгодженість прогнозу у межах досліджуваного часово-статистичного ряду.

Отриманий прогноз демонструє плавну тенденцію до зниження обсягів накопичених відходів у спеціально відведених місцях. Зокрема, очікується, що у 2021 році вони становитимуть 14,97 млн. т., у 2022–2024 роках – поступово зменшуються до 14,71 млн. т., тоді як у 2026 році прогнозне значення досягне 14,65 млн. т. Така тенденція може бути пояснена зміною структури промисловості, скороченням виробництва у період воєнного стану та зростанням технологічних можливостей щодо утилізації та переробки відходів.

Загальна картина демонструє поступове вирівнювання ряду з орієнтацією на стабілізацію та можливий перехід до більш сталих підходів управління відходами.

Аналіз відносних відхилень (рис. 10) дозволяє оцінити, наскільки річні обсяги накопичених відходів відхилялися від середнього рівня протягом фактичного та прогнозного періодів.

Найбільше негативне відхилення спостерігалось у 2014 році (близько – 11,2%), що відображає різке падіння виробництва внаслідок кризових подій. Найбільше позитивне відхилення фіксується у 2020 році (+13,8%), що відповідає піковому рівню накопичених відходів за весь період. В середньому абсолютні

відхилення за 2010–2020 рр. становили близько 8–9%, що свідчить про наявність виражених флуктуацій у накопиченні відходів.

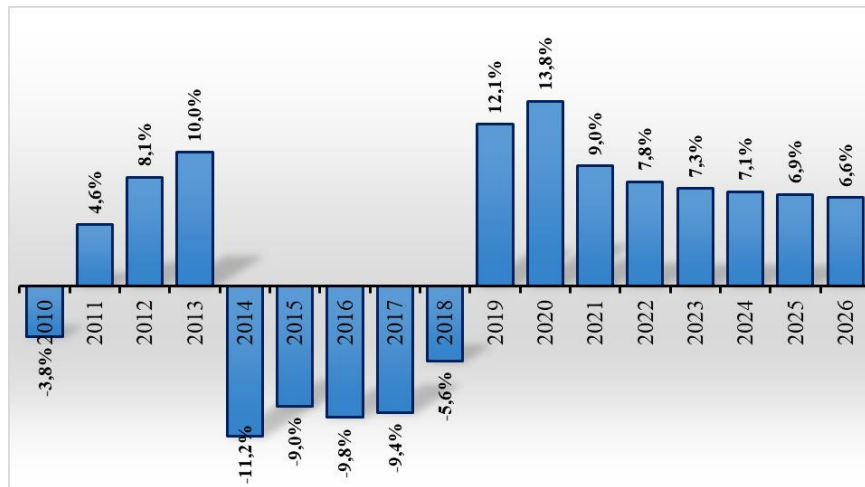


Рисунок 10. Динаміка відносних відхилень річних загальних обсягів відходів, накопичених протягом експлуатації, у спеціально відведених місцях та об’єктах від середнього значення за 2010–2026 роки, % [розробка автора]

Прогнозні значення відхилень на 2021–2026 рр. демонструють тенденцію до поступового зменшення амплітуди коливань: річні показники наближаються до середнього значення ряду та формують тенденцію без різких піків і спадів. Така поведінка характерна для систем, що переходять у режим стабілізації після періодів структурних змін.

Упродовж 2010–2026 рр. в Україні спостерігається суттєва динаміка змін у структурі фінансових витрат, пов’язаних із поводженням з відходами (за винятком високорадіоактивних). Аналіз охоплює два ключові показники: поточні витрати (рис. 11) та капітальні інвестиції (рис. 12), які є індикаторами як операційного, так і стратегічного забезпечення системи управління відходами.

Поточні витрати демонструють стійку, практично лінійну тенденцію до зростання протягом усього періоду. Мінімальне значення зафіксовано у 2010 р. (2 599 623,3 тис. грн), тоді як максимальний рівень припадає на 2026 р. (13 379 047,9 тис. грн), тобто зростання становить понад п’ятикратний рівень.

Середнє значення показника за весь період оцінюється на рівні близько 8,1 млрд грн.

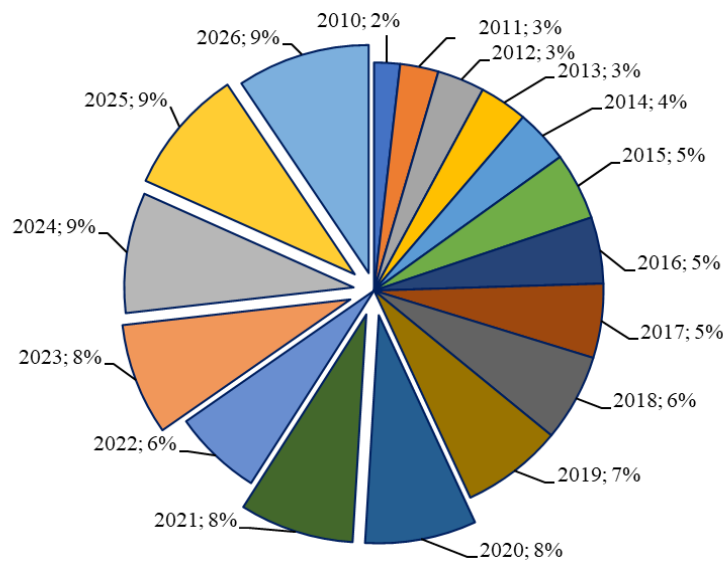


Рисунок 11. Динаміка зміни поточних витрат на поводження з відходами за 2010–2026 роки [розробка автора]

Таке монотонне зростання поточних витрат свідчить про:

- розширення масштабів операційної діяльності у сфері поводження з відходами;
- підвищення вартості експлуатаційних послуг, модернізацію об'єктів та інфраструктури;
- підвищення вимог до екологічної безпеки, що формують необхідність збільшеного фінансування моніторингових, логістичних та переробних операцій;
- інфляційний вплив, який також суттєво позначається на поточних бюджетах місцевих та приватних операторів.

Загалом, тренд поточних витрат може характеризуватися як стійкий, інерційний та системно зростаючий, що відповідає світовим тенденціям переходу від полігонного захоронення до більш складних та технологічно містких систем управління відходами.

На відміну від поточних витрат, капітальні інвестиції мають виражену хвилеподібну, циклічну динаміку, що свідчить про залежність від державних програм, інвестиційних циклів та економічної кон'юнктури.

Мінімальні інвестиції зафіксовані у 2010 р. (475 584,3 тис. грн.), тоді як максимальний рівень припадає на 2019 р. (5 754 260,9 тис. грн.). У середньому інвестиції становили близько 2,35 млрд. грн.

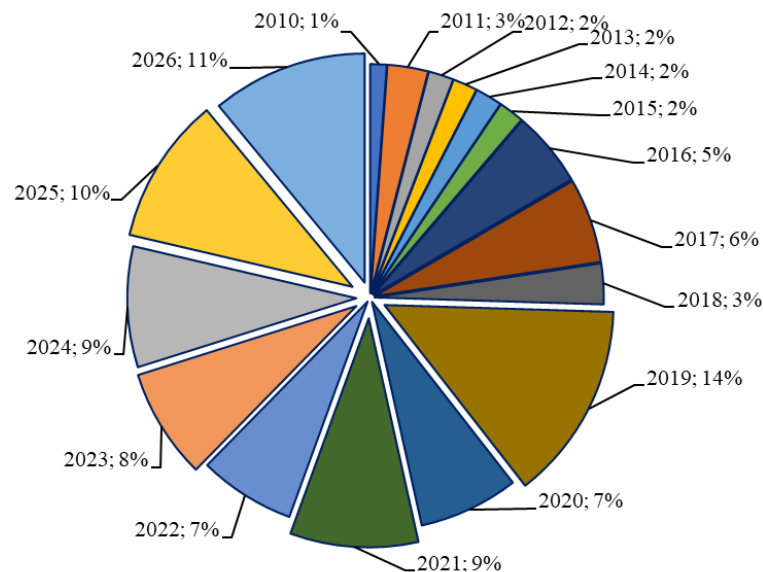


Рисунок 12. Динаміка зміни інвестицій на поводження з відходами за 2010–2026 роки [розробка автора]

У динаміці (рис. 12) можна виділити три характерні періоди:

Період I. Помірне зростання (2010–2014 рр.). У ці роки відбувалося поступове збільшення інвестицій з акцентом на модернізацію окремих полігонів, розширення технічного забезпечення та часткове оновлення обладнання. Середні річні інвестиції залишалися відносно низькими (0,5–0,8 млрд. грн.).

Період II. Вибухове зростання та пік інвестицій (2015–2019 рр.) У 2016–2019 рр. відзначається різке зростання: 2016 р. – 2,21 млрд. грн; 2017 р. – 2,47 млрд. грн.; 2019 р. – 5,75 млрд. грн. (історичний максимум).

Цей період, очевидно, пов'язаний із: реалізацією декількох великих державних та регіональних програм; посиленням вимог екологічної безпеки та

необхідністю технічної модернізації полігонів; впровадженням інфраструктурних проєктів, які вимагали значних одночасних інвестицій.

Період III. Стабілізація після піку (2020–2026 рр.) Після рекордного 2019 року інвестиції зменшуються, але зберігаються на підвищеному рівні 2,8–4,5 млрд. грн. Такі значення свідчать про перехід до планомірної, стабілізованої моделі інвестування, характерної для етапу підтримки та поступового розширення інфраструктури.

Порівняння двох показників дозволяє оцінити структуру фінансування галузі: поточні витрати мають стійку зростаючу тенденцію та відображають сталу операційну діяльність.

Капітальні інвестиції є індикатором технологічних змін, оскільки їх різкі піки пов'язані з модернізаційними хвилями.

Пік інвестицій у 2019 році мав значний вплив на подальші роки. Модернізована інфраструктура потребує більшого обсягу експлуатаційного фінансування, що зумовлює збільшення поточних витрат у 2020–2026 рр.

Рівень інвестицій після 2020 року хоча й нижчий за рекордний, однак залишається вищим за довгостроковий середній, що є позитивним сигналом про стабілізацію інвестиційної активності.

Узагальнення співвідношення між капітальними інвестиціями та поточними витратами дає змогу оцінити структуру фінансування галузі, інтенсивність оновлення інфраструктури та рівень інвестиційної активності у системі поводження з відходами. Частка інвестицій, обчислена як відсоток від поточних витрат, демонструє виражені хвилеподібні коливання, що відображають періоди активного та згасаючого інвестування (рис. 13).

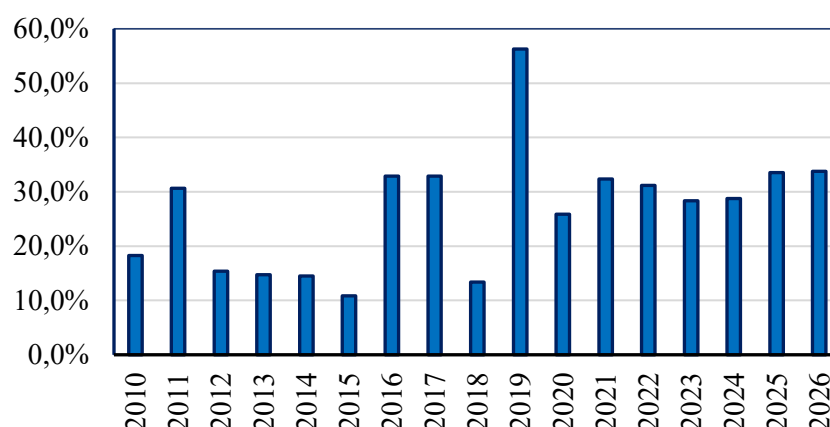


Рисунок 13. Відсоткова частка інвестицій до витрат на поводження з відходами за 2010–2026 роки [розробка автора]

У 2010–2026 рр. частка капітальних інвестицій у витратах перебувала в діапазоні 10,8–56,3%, що свідчить про істотну мінливість інвестиційного навантаження на галузь. Така мінливість є типовою для систем, де технічна модернізація відбувається нерівномірними хвилями, залежно від етапів реалізації інфраструктурних проєктів, державних програм, економічних умов та обсягів зовнішнього фінансування.

Помірна інвестиційна активність (2010–2015 рр.). У ці роки частка інвестицій становила лише 10–30%, з тенденцією до зниження після 2011 року: максимум періоду – 30,6% у 2011 р.; мінімум – 10,8% у 2015 р. Це свідчить про зосередження ресурсів переважно на поточних витратах (логістика, експлуатація, утримання полігонів), тоді як капітальні вкладення обмежувалися окремими модернізаційними заходами.

Інвестиційний стрибок та модернізаційна хвиля (2016–2019 рр.). У 2016–2017 рр. частка інвестицій різко зростає до 32,9%, що відображає першу хвилю значних інфраструктурних вкладень. В 2019 році частка інвестицій досягла 56,3%, тобто капітальні вкладення перевищили половину загальні операційні витрати. Це вказує на реалізацію масштабних проєктів: будівництво або реконструкцію полігонів, впровадження нових систем сортування, закупівлю техніки, модернізацію об'єктів переробки.

Стабілізація та підтримка інвестиційного рівня (2020–2026 рр.). Після піку 2019 року у 2020–2026 рр. частка інвестицій стабілізується в межах 25–34%, що характеризує: завершення великих проєктів і перехід до планового інвестування; підтримку модернізованої інфраструктури; збереження необхідного рівня інвестицій для відповідності екологічним стандартам ЄС; вплив воєнного стану після 2022 р., але без критичного зменшення інвестиційної активності (інвестиції не падають нижче 28%).

Особливої уваги заслуговує тенденція 2024–2026 рр., де частка зростає до 33,8%, що може бути індикатором відновлення проєктної діяльності в умовах реконструкції країни.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки:

1. Структура фінансування є циклічною та чутливою до економічної та інституційної політики.

2. Періоди високих інвестицій (2016–2019) відповідають системним модернізаційним заходам у сфері поводження з відходами.

3. Періоди низьких інвестицій (2013–2015) збіглися з економічними кризами та запуском меншої кількості інфраструктурних проєктів.

4. Після піку 2019 року сформувався режим стабільної інвестиційної підтримки, що є позитивним сигналом для галузі, оскільки дозволяє підтримувати оновлену інфраструктуру у працездатному стані.

5. Високі значення частки інвестицій у витратах означають, що система переходить від моделі «утримання полігонів» до моделі технологічного оновлення, що відповідає євроінтеграційному курсу України.

Динаміка показників демонструє посилення ролі державної політики у сфері поводження з відходами та структурний перехід системи до більш технологічно оснащених і витратних моделей управління, що відповідає європейським підходам до циркулярної економіки.

Для виявлення можливих взаємозв'язків між факторними змінними та загальними обсягами накопичених відходів було проведено кореляційний аналіз, результати якого узагальнено в таблиці 1. За значеннями коефіцієнтів кореляції

встановлено, що зв'язок між результативною змінною $y(x)$ та факторною змінною x_3 є дуже слабким, оскільки коефіцієнт кореляції становить $k_{\text{кор}} = -0,161$, що за загальноприйнятою статистичною шкалою відповідає слабкій зворотній кореляції. Аналогічно, слабкі кореляційні зв'язки спостерігаються і між самими факторними змінними, зокрема між: x_1 і x_3 ($k_{\text{кор}} = -0,173$), x_2 і x_3 ($k_{\text{кор}} = -0,134$), x_4 і x_3 ($k_{\text{кор}} = -0,194$), p_1 і x_3 ($k_{\text{кор}} = -0,176$), p_2 і x_3 ($k_{\text{кор}} = -0,117$). Такі значення свідчать про відсутність вираженого впливу змінної x_3 на інші фактори та результативну ознаку, а також про відсутність істотних статистичних взаємозалежностей між цією змінною та іншими параметрами моделі. Слабкі зворотні кореляційні зв'язки означають, що змінна x_3 не є значущим предиктором для пояснення варіацій загального обсягу накопичених відходів. Це також вказує на те, що включення x_3 у регресійну модель не покращуватиме її прогностичну здатність.

Отримані результати обґрунтовують доцільність або виключення x_3 з багатофакторної моделі, або поглибленого аналізу її змісту та природи, оскільки слабкий кореляційний зв'язок може свідчити про необхідність уточнення даних або нелінійного характеру залежності.

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції між утвореними x_1 , утилізованими x_2 , спаленими x_3 , видаленими x_4 відходами, поточними витратами p_1 та капітальними інвестиціями p_2 та накопиченими у відходами за 2010-2026 роки

	x_1	x_2	x_3	x_4	p_1	p_2	y
x_1	1	0,7013	-0,1960	0,8744	0,4582	0,7853	0,8863
x_2		1	-0,1309	0,7576	0,6581	0,5368	0,4488
x_3			1	-0,1901	0,5783	-0,2351	-0,1001
x_4				1	0,6541	0,7154	0,6954
p_1					1	0,4954	0,7761
p_2						1	0,4834
y							1

У зв'язку з цим, факторну змінну x_3 було виключено із розрахунків і отримано нові коефіцієнти кореляції (табл. 2).

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції між утвореними x_1 , утилізованими x_2 , видаленими x_4 відходами, поточними витратами p_1 та капітальними інвестиціями p_2 та накопиченими y відходами за 2010-2026 роки

	x_1	x_2	x_4	p_1	p_2	y
x_1	1	0,7013	0,8744	0,4582	0,7853	0,8863
x_2		1	0,7576	0,6581	0,5368	0,4488
x_4			1	0,6541	0,7154	0,6954
p_1				1	0,4954	0,7761
p_2					1	0,4834
y						1

Аналіз кореляційної матриці (табл. 2) показує наявність сильної лінійної залежності між результативною змінною y та факторною змінною x_1 , що підтверджується високим значенням коефіцієнта кореляції $k_{\text{кор.}}=0,8863$. Це свідчить про суттєвий вплив показника x_1 на формування загального обсягу накопичених відходів.

Водночас встановлено сильний кореляційний зв'язок між факторними змінними x_1 та x_4 $k_{\text{кор.}}=0,8844$, що вказує на наявність мультиколінеарності. Незважаючи на це, змінну x_1 не було вилучено з моделі, оскільки її коефіцієнт кореляції лише на 21% перевищує рекомендоване в статистичному аналізі порогове значення $k_{\text{кор.}}=0,7$. Таким чином, ступінь мультиколінеарності не є критичним і не спотворює оцінку параметрів регресійної моделі.

Отримане значення нормованого коефіцієнта детермінації $R=0,8162$ свідчить, що результативна змінна y на 81,6% пояснюються варіацією факторів x_1 , x_2 , x_4 , p_1 , p_2 , що підтверджує адекватність і пояснювальну здатність побудованої моделі.

Значення коефіцієнта детермінації $R^2=0,8736$ перевищує пороговий рівень 0,85, який у літературі вважається достатнім для визнання моделі такою, що добре описує реальні дані. Це вказує на задовільну апроксимацію та відповідність моделі закономірностям процесу накопичення відходів.

З огляду на наведені результати, рівняння множинної лінійної регресії шляхом вилучення факторної змінної, яка не чинить статистично значущого впливу на результативний показник набуло вигляду:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot p_1 + a_6 \cdot p_2, \text{ тис. т.} \quad (1)$$

де x_1 – маса утворених відходів, x_2 – маса утилізованих, x_4 – маса видалених відходів у спеціально відведені місця, p_1 – поточні витрати, p_2 – капітальні інвестиції.

Проведення регресійного аналізу дозволило знайти коефіцієнти регресії: $a_0 = 5074199$, $a_1 = 22,326$, $a_2 = 0,041$, $a_4 = -3,659$, $a_5 = 0,091$, $a_6 = 0,029$.

Додаткову оцінку якості регресійної моделі здійснено шляхом аналізу ймовірностей значущості коефіцієнтів регресії (P -value). Отримані значення для кожного з коефіцієнтів становлять відповідно: 0,0089; 0,0034; 0,0151; 0,0517; 0,0021; 0,0134. Більшість отриманих P -значень є меншими за критичний рівень значущості 0,05, що свідчить про статистично значущий вплив відповідних факторних змінних на результативну змінну y .

Щодо коефіцієнта з P -value=0,0517, його значення лише незначно перевищує порогове, залишаючись у межах, прийнятних для практичного аналізу екологічних даних, що часто характеризуються варіабельністю та похибками вимірювань. Такий результат дає підстави вважати цей коефіцієнт умовно значущим, а його внесок таким, що може бути врахований у загальній моделі.

Таким чином, аналіз P -значень підтверджує, що побудована регресійна модель є статистично обґрунтованою, а включені факторні ознаки мають реальний вплив на формування обсягів накопичених відходів.

На основі побудованої регресійної моделі (1) були визначені розрахункові значення результативної змінної $y_{\text{розрах.}}$, після чого здійснено оцінку точності моделі шляхом обчислення відносної похибки між розрахунковими та фактичними даними. Результати показали, що середнє значення відносної похибки становить 6,32%, а максимальне відхилення не перевищує 11,23 %.

Такі значення похибок свідчать про високу точність моделі, оскільки в екологічних та техногенних системах відхилення до 10% вважаються прийнятними для аналітичних і прогностичних розрахунків. Отже, можна стверджувати, що запропонована математична регресійна модель (1) з точністю близько 94% відтворює вихідні емпіричні дані. Це підтверджує її добру адекватність, а також можливість застосування моделі для прогнозування загальних обсягів накопичених відходів та оцінки впливу факторних змінних.

Основні висновки. Запропонована регресійна математична модель дає змогу прогнозувати динаміку накопичення відходів в Україні, враховуючи комплекс факторів, що визначають формування їх обсягів. До моделі включені ключові змінні: обсяги утворених, утилізованих, видалених у спеціально відведених місцях відходів, а також величини капітальних інвестицій і поточних витрат на поводження з відходами.

У результаті проведених статистичних досліджень встановлено таке:

1. Виконано оцінку тенденцій зміни обсягів утворених, утилізованих, спалених, видалених та накопичених відходів, а також динаміки капітальних інвестицій і поточних витрат на охорону довкілля, пов'язаних із поводженням з відходами, за період 2010–2026 рр. На основі описової статистики визначено ключові закономірності та характерні коливання цих показників.

2. Проведено кореляційний аналіз, який дав змогу визначити ступінь взаємозв'язку між факторними показниками та результативною змінною – загальними обсягами накопичених відходів. Оцінка колінеарності факторів дозволила ідентифікувати найбільш впливові змінні та встановити щільність статистичних залежностей.

3. Побудовано регресійну математичну модель на основі регресійно-дисперсійного аналізу та перевірено її адекватність. Середнє відносне відхилення між розрахунковими та фактичними значеннями становить 6,32%, а максимальна похибка не перевищує 11,23%, що свідчить про високу точність моделі.

Розроблена регресійна модель може бути використана для оцінювання потреби в інвестиційних ресурсах, а також для прогнозування необхідних обсягів поточних витрат з метою регулювання динаміки накопичених відходів. Це створює підґрунтя для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень, спрямованих на підвищення ефективності системи поводження з відходами та мінімізацію негативного впливу на довкілля.