

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ РИЗИКІВ РЕКУЛЬТИВОВАНИХ ПОЛІГОНІВ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ПІД ВПЛИВОМ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Хандогіна О.В., Дрозд О.М., Завражний А. О., Хорошилов А.В., Сталінська І.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

вул. Чорноглазівська, 17, 61002, Харків

olga.khandogina@kname.edu.ua, Olena.Drozd@kname.edu.ua,

Anatolii.Zavrazhnyi@kname.edu.ua, Artem.Khoroshylov@kname.edu.ua,

Irina.Stalinska@kname.edu.ua

Рекультивовані полігони побутових відходів залишаються джерелом потенційних небезпек, що мають інерційний і довготривалий характер. У статті розглянуто ймовірність прояву залишкових ризиків, які зберігаються після їх рекультивації. З метою комплексної оцінки цих ризиків застосовано адаптовану методику мультикритеріального аналізу, що включає опис системи, структурний аналіз, мультикритеріальне оцінювання та побудову сценаріїв розвитку. У дослідженні визначено набір індикаторів, які охоплюють внутрішні процеси в тілі полігону (викиди парникових газів, накопичення фільтрату, мікробіологічна активність), вплив на прилеглу територію (забруднення ґрунту та підґрунтових вод, потенційне зниження біорізноманіття на прилеглих ділянках) і зовнішні кліматичні фактори (температура, опади, вітрові режими тощо). Аналіз показав, що кліматичні чинники у різному ступені інтенсифікують прояви залишкових ризиків. Найвпливовішими серед них є динаміка кількості опадів, тоді як найбільш чутливими до зовнішнього впливу є мікробіологічна активність, викиди парникових газів і втрата біорізноманіття. Структурний аналіз дозволив виділити чотири групи ризиків (екологічні, технологічні, економічні, санітарно-біологічні) та визначити індикатори, що мають домінуючий вплив у кожній із груп. На основі кліматичних прогнозів за сценарієм RCP 8.5 для чотирьох міст України було змодельовано інтенсивність прояву ризиків до 2049 року. Отримані результати свідчать про суттєву регіональну диференціацію ризиків, що обумовлена кліматичними трендами. Найбільш значущими залишковими ризиками є зростання мікробіологічної активності та забруднення ґрунтів, особливо за умов підвищення температури і зростання кількості опадів. Запропонований підхід дозволяє кількісно оцінити екологічні ризики, пов'язані з експлуатацією полігонів для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері охорони довкілля. Отримані результати можуть слугувати інструментом для інтеграції в процедури проведення оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, стратегічної екологічної оцінки документів державного планування, реалізації принципів сталого розвитку. *Ключові слова:* полігони побутових відходів, зміна клімату, сталий розвиток, моніторинг, мультикритеріальний аналіз, експертне оцінювання, екологічні оцінки.

Assessment of residual risks of reclaimed landfill sites for household waste under the influence of climate change. Khandogina O., Drozd O., Zavrazhnyi A., Khoroshylov A., Stalinska I.

Reclaimed landfills continue to pose potential hazards that are both persistent and latent. This article examines the likelihood and intensity of residual risks following landfill reclamation. To evaluate these risks comprehensively, a multi-criteria analysis methodology was adapted and applied, encompassing system description, structural analysis, multi-criteria evaluation, and scenario development. A range of indicators was identified, reflecting internal processes within the landfill (e.g., greenhouse gas emissions, leachate accumulation, microbiological activity), the landfill's impact on surrounding environments (e.g., soil and groundwater contamination, potential biodiversity loss in adjacent areas), and external climatic factors (e.g., temperature, precipitation, wind regimes). The analysis demonstrated that climatic conditions amplify the expression of residual risks to varying degrees. Precipitation patterns emerged as the most influential factor, while microbiological activity, greenhouse gas emissions, and biodiversity loss were identified as the most climate-sensitive indicators. Structural analysis allowed the classification of risks into four categories – environmental, technological, economic, and sanitary-biological – and helped determine the dominant contributing indicators within each category. Based on climate projections for four Ukrainian cities under the RCP 8.5 scenario, the study modelled the projected intensification of risks through 2049. The results reveal considerable regional variation, with the most significant residual risks being heightened microbiological activity and soil contamination, particularly under conditions of rising temperatures and increased precipitation. The proposed approach enables the quantitative assessment of environmental risks associated with reclaimed landfills, thereby supporting evidence-based decision-making in environmental management. The findings may be integrated into environmental impact assessments, strategic environmental assessments of policy documents, and the implementation of sustainable development goals at the local and regional levels. *Key words:* landfills, climate change, sustainable development, monitoring, multi-criteria analysis, expert assessment, environmental assessments.

Постановка проблеми. Захоронення побутових відходів (ПВ) на полігонах продовжує залишатись одним із найпоширеніших методів управління відходами, що використовуються в багатьох країнах, незважаючи на низький статус цього методу в ієрархії відходів. Попри стрімкий розвиток технологій перероблення та повторного використання ресур-

сів, значна частина відходів продовжує накопичуватись на спеціально відведених територіях, що призводить до довготривалих екологічних наслідків. Техногенний вплив полігонів побутових відходів проявляється у забрудненні атмосферного повітря, ґрунтів, поверхневих і підземних вод, зміні ландшафтів та формуванні потенційно небезпеч-

них геохімічних процесів. З часом полігони досягають критичних меж заповнення, що вимагає їх закриття та проведення рекультиваційних заходів. Рекультивація таких об'єктів є важливим етапом у відновленні порушених земель, однак навіть після завершення цих заходів існують серйозні екологічні ризики. Залишкові процеси біодеградації органічних компонентів відходів можуть тривати десятки років, супроводжуючись виділенням метану, формуванням фільтрату та міграцією токсичних речовин у навколишнє середовище. Крім того, недостатній контроль за технічним станом рекультивованих полігонів підвищує ймовірність надзвичайних ситуацій.

На сьогоднішній день існує дефіцит системного підходу до моніторингу та управління пострекультиваційними ризиками, що обумовлює необхідність комплексного аналізу техногенного впливу полігонів як у фазі їх функціонування, так і в період після закриття. Відсутність єдиних стандартів екологічної безпеки для рекультивованих територій, обмеженість даних про динаміку деградаційних процесів, а також недосконалість механізмів правового регулювання ускладнюють розробку ефективних заходів із мінімізації довгострокових ризиків.

У зв'язку з цим необхідним є наукове обґрунтування підходів до оцінювання залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ, що дозволить підвищити екологічну безпеку та забезпечити сталий розвиток територій, прилеглих до об'єктів видалення відходів. Це потребує інтеграції підходів екологічного планування, комплексної оцінки ризиків і сприяє досягненню цілей сталого розвитку (ЦСР), зокрема ЦСР 11 (сталий розвиток міст і громад) та ЦСР 12 (раціональне споживання і виробництво) [1].

Актуальність дослідження. В Україні, за оцінками Міністерства розвитку громад і територій, у 2023 році налічувалось понад 5 тис. сміттєзвалищ і полігонів, сумарна площа яких перевищувала 12 тис. га (без урахування відомостей щодо тимчасово окупованих територій, а також більшості східних та південних регіонів України, які через воєнну агресію не мали можливості надати повну інформацію щодо статистичних даних у цій сфері). При цьому за офіційними даними, 161 сміттєзвалище є перевантаженим, 713 – не відповідають нормам екологічної безпеки, 1247 – потребують паспортизації, 325 – рекультивації. Щодо сучасних методів та технологій управління побутовими відходами, лише на 53 полігонах в Україні функціонують системи збирання фільтрату, з яких на 47 об'єктах впроваджено технології його знезараження. Системи вилучення біогазу впроваджено на 16 полігонах, де також експлуатуються когенераційні установки для утилізації та перетворення біогазу на електроенергію і тепло [2].

Рекультивація полігонів після завершення терміну їх експлуатації включає технічний та біологічний етапи. Технічна рекультивація передбачає формування захисного шару з глини та геомемб-

рани, встановлення систем збору фільтрату та газу. Біологічна рекультивація включає насадження рослинності для стабілізації ґрунту та відновлення екосистеми [3, 4].

У межах реформування системи управління відходами в Україні поступово вибудовується нормативна база моніторингу, яка охоплює як об'єкти оброблення, так і місця утворення, зберігання та видалення відходів [5, 6]. Основний акцент цієї системи зроблено на технологічні параметри, зокрема фізико-хімічні характеристики викидів, скидів, стабільність захисних елементів полігонів та екологічну безпеку об'єкта впродовж усього його життєвого циклу. У нових правилах, що регламентують експлуатацію та догляд за полігонами після закриття [4], передбачено обов'язковий лабораторний контроль доквілля, гідрометеорологічний моніторинг, регулярні технічні огляди захисного екрана та геодезичні дослідження для відстеження просідання маси відходів. Такий підхід орієнтований переважно на контроль інженерно-екологічних ризиків і поки що обмежено враховує ширші екосистемні чи кліматичні фактори.

Варто відзначити, що при організації догляду за рекультивованими полігонами обов'язково необхідно враховувати вплив зміни клімату, оскільки полігони, як складні інженерні споруди, можуть бути чутливими до змін температури, режиму опадів, екстремальних погодних явищ та коливань рівня ґрунтових вод. Такі впливи можуть призвести до прискореного зношення конструктивних елементів, порушення герметичності покриття або підвищення ризику інфільтрації та забруднення доквілля. Тому, з метою реалізації основних положень державної кліматичної політики, вважаємо за доцільне враховувати в процесі моніторингу полігонів побутових відходів динаміку кліматичних показників.

Регулятивну функцію щодо організації моніторингу об'єктів видалення відходів виконують екологічні оцінки (оцінка впливу на доквілля, стратегічна екологічна оцінка), оскільки у процесі їх реалізації формуються конкретні вимоги до обсягу, періодичності та параметрів спостережень. Зокрема, можуть бути визначені ключові індикатори стану доквілля, які необхідно відстежувати. Також різні види екологічних оцінок встановлюють часові межі моніторингу, передбачаючи можливість багаторічних спостережень з метою виявлення затяжних або вторинних ефектів. Результати моніторингу рекультивованих полігонів є цінним джерелом емпіричних даних, необхідних для якісного проведення екологічних оцінок. Вони дозволяють виявити довгострокові екологічні наслідки функціонування полігонів, що можуть не проявлятися на ранніх етапах рекультивації. Така інформація є критично важливою для оцінки кумулятивного впливу на доквілля з урахуванням множинних джерел забруднення та взаємодії між компонентами екосистем.

Моніторингові дані є основою для прогнозування потенційних ризиків, пов'язаних із повторним використанням рекультивованих територій (для сільського господарства, будівництва, розвитку “зеленої” інфраструктури тощо). У цьому контексті екологічні оцінки слугують важливим механізмом виявлення обмежень і вимог до цільового використання таких земель на етапі розробки документів державного планування.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Рекультивация полігонів ПВ значно зменшує їх вплив на довкілля, проте не ліквідує його. Дослідження залишкових ризиків, пов'язаних із рекультивованими полігонами ПВ, сприяє досягненню ключових положень державної кліматичної політики та політики в сфері управління відходами, які зазначені в Законі України “Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів” [7]; Національно визначеному внеску України до Паризької угоди [8]; Стратегії низьковуглецевого розвитку України до 2050 року [9]; Законі України “Про управління відходами” [10]; Національній стратегії управління відходами до 2030 року [11]; Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року [12], Законі України “Про основні засади державної кліматичної політики” [13]. Застосування наукових підходів, зокрема системного аналізу, забезпечує сталість та дієвість управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел підтверджує комплексність дослідження впливів полігонів ПВ на навколишнє середовище. Серед основних наслідків – забруднення підземних вод фільтратом, забруднення повітря завислими частинками та біогазами, а також вплив на здоров'я населення, який може мати як канцерогенні, так і неканцерогенні ефекти [14]. Окрему загрозу становить вплив полігонів у довгостроковій перспективі – після завершення їх експлуатації. Більшість компонентів відходів можуть десятиліттями залишатися екологічно активними, утворюючи фільтрат і гази, що потенційно можуть мігрувати через ізоляційні шари або ґрунтову товщу [15].

У цьому контексті надзвичайно актуальною стає тема рекультивации полігонів, що розглядається як ключова складова управління територіями після виведення полігонів з експлуатації. Згідно з сучасними практиками, рекультивация повинна враховувати принципи ієрархії управління відходами, сприяти відновленню ландшафту та подальшому безпечному використанню територій. Особливе значення у післяексплуатаційний період має система екологічного моніторингу. За чинними вимогами, полігони підлягають обов'язковому моніторингу щонайменше протягом 30 років після закриття, проте сучасні дослідження акцентують на доцільності зміни формального терміну [16]. Основними індикаторами для оцінки безпечності полігону

є склад і об'єм фільтрату, рівень утворення біогазу, а також вплив на поверхневі й підземні води, повітря та ризики вторинної міграції забруднюючих речовин. Такий підхід дозволяє адаптувати інтенсивність та тривалість моніторингу залежно від фактичного стану об'єкта [16].

У 2019 році Агентство з охорони навколишнього середовища США опублікувало оціночний звіт [17] який визначає ризики, пов'язані із викидами небезпечних забруднювальних речовин в атмосферне повітря. Основними оцінюваними показниками є канцерогенні та неканцерогенні ризики для населення внаслідок інгаляційного впливу, а також оцінка фонових рівнів викидів і потенціалу накопичення забруднювачів у приземному шарі атмосфери. Інші шляхи впливу, такі як забруднення ґрунту, води чи ланцюгів живлення, не розглядаються.

Важливим напрямом дослідження є вивчення взаємозв'язку між зміною клімату та функціонуванням полігонів побутових відходів. Зміна клімату суттєво впливає на інфраструктуру полігонів. Попри те, що розрахунковий термін експлуатації такої інфраструктури становить близько 100 років, посилення проявів зміни клімату можуть істотно впливати на тривалість експлуатаційного періоду та надійність конструкцій [18].

Значну кількість досліджень присвячено оцінці впливу полігонів побутових відходів на зміну клімату, зокрема в контексті викидів парникових газів (метану, вуглекислого газу), що утворюються на етапі захоронення та після його завершення [19–21]. Проте важливо звернути увагу й на зворотний зв'язок – вплив зміни клімату на умови існування старих та рекультивованих полігонів [22–23]. Підвищення температури повітря, збільшення інтенсивності опадів, коливання рівня ґрунтових вод і частота екстремальних погодних явищ здатні порушити стабільність рекультивованих об'єктів, змінити динаміку дегазації, поведінку фільтрату та ефективність інженерного захисту. Така взаємозалежність потребує інтегрованого підходу до планування, оцінки ризиків та довгострокового моніторингу полігонів з урахуванням кліматичних сценаріїв.

Попри активне впровадження інженерних рішень та природоохоронних заходів при рекультивации полігонів побутових відходів, у науковій та прикладній площині залишається низка нерозв'язаних проблем, пов'язаних із післяпроектною оцінкою їх екологічної безпеки особливо в умовах поточної зміни клімату. Залишкові ризики рекультивованих полігонів побутових відходів в умовах зміни клімату є малодослідженим питанням і потребують подальшого вивчення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наразі недостатньо розробленими є підходи до інтегральної оцінки потенційних ризиків, що зберігаються або можуть виникнути на рекультивованих

полігонах у середньо- та довгостроковій перспективі. У більшості випадків оцінювання екологічного стану таких об'єктів здійснюється на основі обмеженої кількості показників – переважно фокусуючись на контролі за витоками фільтрату або концентрацією біогазу. Відсутність системного підходу до ризик-орієнтованого управління обмежує можливості адаптації заходів поводження з рекультивованими полігонами до конкретних умов, зокрема в контексті впливу зміни клімату, яка може суттєво модифікувати гідрологічні та геохімічні характеристики полігонів. Особливої уваги заслуговує інтеграція методів багатокритеріального аналізу у систему підтримки прийняття рішень щодо оцінювання ризиків на рекультивованих полігонах. Незважаючи на потенціал цих методів у врахуванні взаємодії багатьох факторів, їх використання у сфері післяпроектного екологічного аналізу залишається фрагментарним. На сьогодні не існує узгоджених методичних підходів до побудови критеріїв, вагових коефіцієнтів та процедур нормалізації даних для об'єктів, що перебувають на різних стадіях постексплуатаційного моніторингу.

Новизна. Вперше застосовано метод мультикритеріального аналізу для оцінки залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ з урахуванням впливу зміни клімату.

Методологічне або загальнонаукове значення. Проведене дослідження поглиблює розуміння системної взаємодії природних, техногенних та соціальних складових при дослідженні складних техногенних систем, пропонуючи структуровану оцінку впливів і ефектів, що є необхідним для інтеграції оцінок впливу зміни клімату у планування розвитку територій на локальному рівні.

Викладення основного матеріалу. Залишкові ризики рекультивованих полігонів побутових відходів – це сукупність потенційних негативних впливів на довкілля, здоров'я населення та інженерну інфраструктуру, які зберігаються або можуть проявитися після завершення технічного та біологіч-

ного етапів рекультивації полігону, незважаючи на вжиті заходи з його стабілізації, ізоляції та моніторингу. Ризики можуть включати: екологічні (викиди парникових газів, фільтратні витіки, забруднення ґрунту та підземних вод); технологічні (обрушення схилів, деградація захисних шарів); санітарно-біологічні (зростання мікробіологічної активності, біоаерозольні викиди); соціальні та економічні (втрата рекреаційної чи господарської цінності території, підвищення витрат на повторне втручання). Залишкові ризики є неповністю контрольованими, мають інерційний характер і можуть проявлятися протягом тривалого періоду (іноді десятиліттями).

Оцінювання залишкових ризиків проводили для потенційно рекультивованих полігонів ПВ на території України із застосуванням окремих мультикритеріального аналізу, що дозволяє одночасно враховувати кілька (часто суперечливих) критеріїв для оцінки альтернатив, варіантів розвитку чи управлінських рішень. Цей підхід особливо корисний у складних системах, де вплив на об'єкт або ситуацію здійснюється через взаємодію екологічних, соціальних, економічних, технічних та інших чинників.

Використаний у даному дослідженні підхід є варіацією багатокритеріального аналізу, яка запропонована Р. Стівенсом [23]. Методичний підхід складався з трьох основних етапів: опис системи (System sketch), структурний аналіз (System Analysis), мультикритеріальне оцінювання (MCE) та розробка сценаріїв розвитку системи. Він дозволяє визначати відносну важливість (вагу) різних факторів через експертну або кількісну оцінку; порівнювати сценарії чи варіанти за сукупністю показників та забезпечує прозорість і обґрунтованість вибору найбільш доцільного рішення в умовах невизначеності та обмежених ресурсів.

У контексті оцінки рекультивованих полігонів ПВ, мультикритеріальний аналіз дозволяє поєднати дані про впливи на довкілля, технологічні ризики та соціальні аспекти, що сприяє комплексному

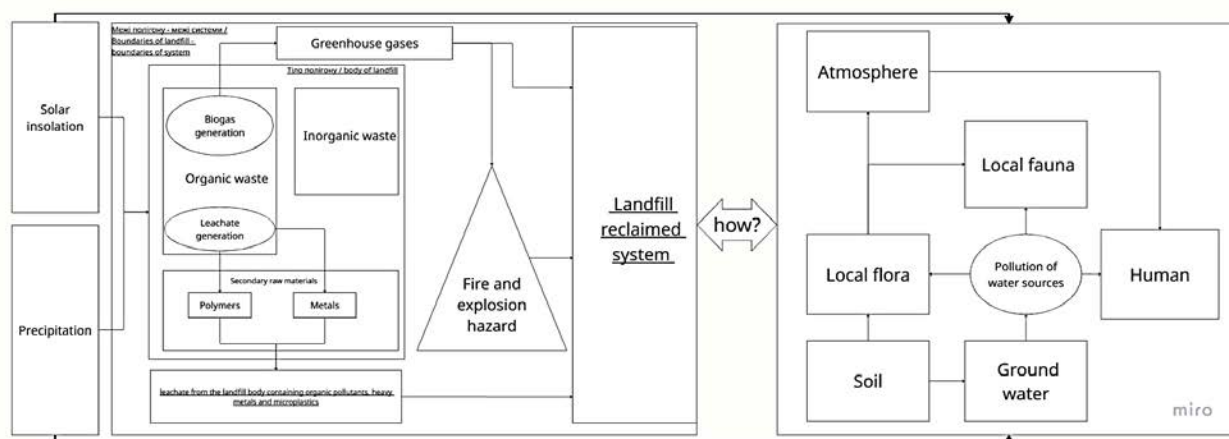


Рис. 1. Взаємозв'язки в досліджуваній системі

розумінню залишкових ризиків і підтримці сталого управління територіями.

Опис системи (System sketch) – це процес визначення характеристик системи з точки зору взаємодій її складових. Досліджувана система – вплив зміни клімату на інтенсивність процесів в тілі полігону після його рекультивації та можливі ризики для компонентів довкілля прилеглої території (рис. 1).

Із залученням експертів різних груп (науковці і професіонали-практики у сферах управління відходами, оцінки впливу зміни клімату на компоненти довкілля) було визначено низку індикаторів, які дозволяють системно оцінити інтенсивність внутрішніх процесів у тілі полігону та ризики, які вони можуть становити для довкілля прилеглих територій. Після завершення рекультиваційних заходів полігон перестає бути виключно місцем захоронення відходів – він трансформується у складну техногенну екосистему, в якій продовжують відбуватися біогеохімічні, фізико-механічні та мікробіологічні процеси. Інтенсивність цих процесів, своєю чергою, значною мірою залежить від зовнішніх кліматичних умов (температура повітря, кількість опадів, тривалість морозного періоду, напрямки і швидкість вітру, інсоляція тощо).

У ході дослідження були визначені дві основні групи індикаторів. Перша – описує внутрішню динаміку полігону після рекультивації, зокрема: викиди парникових газів (метан, діоксид вуглецю), вибухота пожежонебезпечність, ймовірність обвалення схилів, обсяги фільтрату, що утворюються, активність мікроорганізмів у товщі відходів, а також вплив на прилеглу територію, зокрема: забруднення ґрунту та підґрунтових вод, потенційне зниження біорізноманіття на прилеглих ділянках. Друга – включає кліматичні показники, які визначають умови перебігу вказаних процесів: середньорічна температура, кількість опадів, вітрові режими, тривалість морозного періоду, інтенсивність сонячного випромінювання, а також зміни локальних кліматичних трендів, які свідчать про поступове потепління або зміну режиму зволоження.

Кліматичні чинники виступають своєрідними моделюючими змінними, які не лише впливають на характер процесів, але й суттєво змінюють їхню швидкість, спрямованість і наслідки для довкілля. Наприклад, підвищення середньорічної температури може активізувати мікробіологічні процеси деградації органічних решток, що сприяє зростанню викидів метану. У свою чергу, зростання кількості опадів підвищує ризик накопичення фільтрату та просочування токсичних речовин у підземні води. Водночас, зміна температурно-вологісного балансу може призвести до зміни щільності складення ґрунтів та обвалів на схилах полігону, особливо у разі незадовільної інженерної стабілізації. Визначення індикаторів дозволяє будувати прогнозні сценарії зміни стану полігону за різних кліматичних умов, що є основою для ефективної екологічної оцінки ризиків та розробки систем адаптаційного управління.

Структурний аналіз (System Analysis) передбачав попарні оцінки між індикаторами за шкалою

від нуля до чотирьох, де 0 – це відсутність зв'язку, 1 – слабкий зв'язок, 2 – середній зв'язок, 3 – сильний зв'язок та 4 – критичний зв'язок. Залучені експерти оцінювали інтенсивність впливу кожного індикатора відносно всіх інших окремо, а середні значення експертного оцінювання визначали математично. Окремо розраховували сумарний ефект і сумарний вплив за кожним досліджуваним індикатором. Проведений аналіз показав, що індикатором, який має найбільший вплив на всі інші, є зміни середньорічної кількості й інтенсивності опадів. У свою чергу найбільш чутливими індикаторами за сумарним ефектом є збільшення мікробіологічної активності, викиди парникових газів та втрата біорізноманіття (рис. 2).

Температура повітря та параметри вітрових потоків не завжди безпосередньо формують потужні наслідки, але істотно модулюють інші процеси, зокрема динаміку газоутворення, зміну стану схилів тощо. Їхній вплив є латентним, але системно важливим. Інсоляція та морозні дні, які на етапі початкового оцінювання були визнані як малозначущі в контексті коротко- та середньострокового впливу на систему, з огляду на потенційну зміну кліматичних трендів можуть набувати більшої ваги у довгостроковій перспективі.

Викиди парникових газів, забруднення підземних вод, забруднення ґрунтів, втрата біорізноманіття, вибух- і пожежонебезпечність, обвалення схилів є наслідками змін у системі й потребують моніторингу як потенційні прояви ризиків. Їх можна вважати “вразливими точками” або кінцевими індикаторами деградації, що дозволяють фіксувати наближення до порогових значень стабільності екосистеми.

Проведене оцінювання системних драйверів за критерієм “вплив – ефект” дозволило диференціювати індикатори першої групи на чотири групи ризиків – економічні, екологічні, технологічні, санітарно-біологічні. У кожній групі обрано один визначальний індикатор, який має найбільшу кількість зв'язків з іншими індикаторами.

Таким чином було визначено, що викиди парникових газів мають визначальний вплив в групі екологічних ризиків, забруднення ґрунтів – в групі економічних ризиків, зростання мікробіологічної активності – в групі санітарно-біологічних ризиків, обвалення схилів полігону – в групі технологічних ризиків. Наступним кроком було визначення “ваг” ризиків шляхом порівняльного аналізу критеріїв, де 1–2 – відносна рівність, 3–4 – перевага, 5–6 – істотна перевага, 7–8 – абсолютна перевага одного критерію над іншим (табл. 1) Цей підхід можна розглядати як основу подальшого оцінювання сценаріїв проявів інтенсивності ризиків рекультивованих полігонів і прикладною складовою для стратегічного планування, екологічного моніторингу та адаптаційної політики на рівні як окремих полігонів, так і територіальних громад у цілому.

Для врахування впливу другої групи індикаторів на інтенсивність проявів ризику проведено оцінку тенденцій зміни клімату на території України на основі аналізу даних порталу Open Meteo [24],

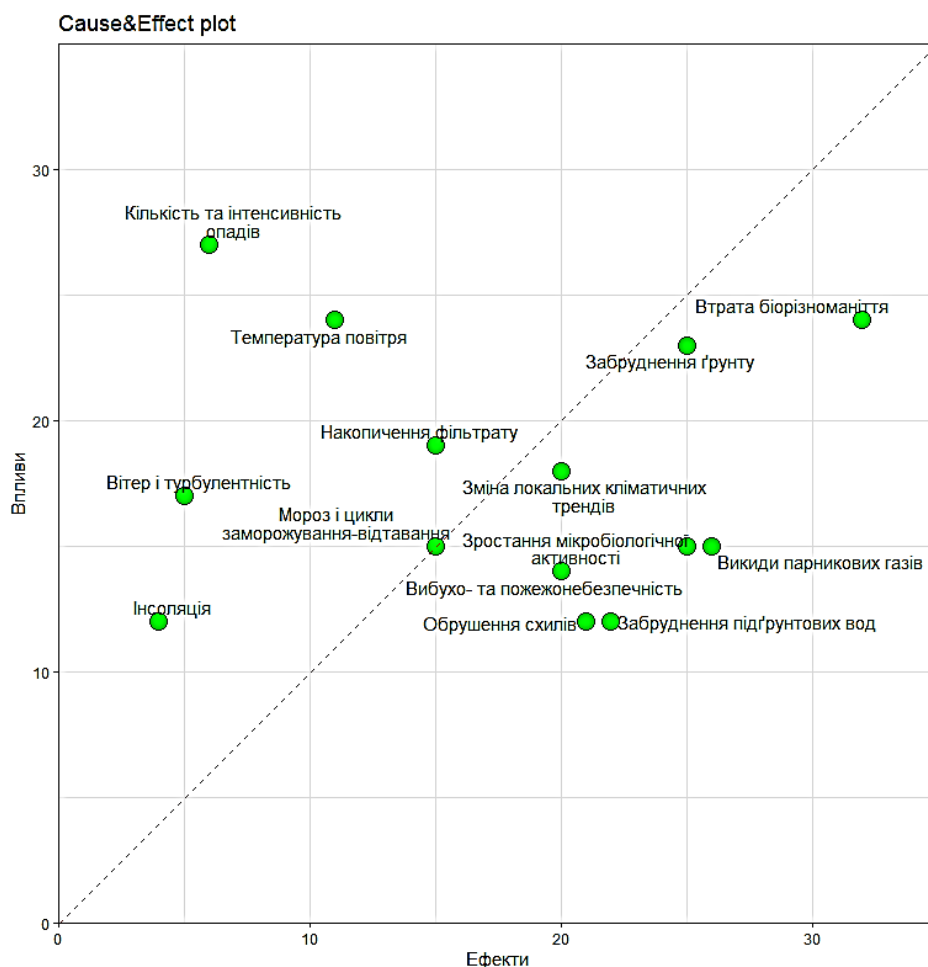


Рис. 2. Взаємодія “вплив-ефект” початкового оцінювання системних драйверів

з використанням моделі ECMWF за сценарієм RCP 8.5. Зокрема оцінено динаміку показників середньорічної температури повітря та річної кількості опадів для чотирьох міст України (Луцьк, Ужгород, Вінниця, Кривий Ріг). Прогнозні зміни до 2049 року розраховано відносно базового 1950 року. Згідно з результатами оцінки, для обраних міст прогнозовані зміни середньорічної температури коливаються від -10% до $+16,7\%$, а річні зміни опадів – від -21% до $+70\%$.

На основі експертної оцінки, враховуючи прогнозовані тенденції зміни клімату, для кожного з міст був визначений ступінь інтенсивності прояву ризиків. У вихідній методиці це показник “корисності” (“utility”), який в методологічному плані означає дослідження стандартизованих залежностей між компонентами, що впливають на ситуацію, еволюцію події всередині системи та стан системи. “Корисність” є змінною впливу параметра відносно самого себе. Значення коливається від нуля до одиниці. Конкретна форма зв’язку між інтенсивністю прояву процесу та кожним параметром – лінійна, логарифмічна чи інша – визначається на основі реальних даних або обґрунтованих припущень та експертних оцінок щодо того, як діапазон кожного параметра впливає на стан досліджуваної системи

[23, 25]. Показник “корисності” розраховується за допомогою наступного рівняння:

$$\text{Total utility} = \sum w_i \cdot u_i \quad (1)$$

де w_i – відносна вага кожного параметра;
 u_i – значення корисності, визначене для кожного сценарію.

Отримана результуюча використовується для ранжування різних сценаріїв з точки зору їх ефективності.

На відміну від класичного мультикритеріального аналізу, де “корисність” означає числову оцінку переваги або цінності певної альтернативи, в нашому випадку оцінювалась потенційна шкода при настанні того чи іншого ризику, тому показник “корисності” трансформовано в «інтенсивність прояву ризику». Значення для кожного параметра «інтенсивності прояву ризику» визначали на основі оцінок зв’язку між діапазоном цього параметра та його впливом на систему. Цей процес супроводжувався побудовою графіків інтенсивності прояву для кожного ризику окремо (рис. 3).

Оцінку ефектів для кожного з факторів було помножено на відносну вагу відповідного критерію (табл. 1).

Таблиця 1
Результати оцінки інтенсивності прояву ризиків

Індикатори	Ужгород	Вінниця	Кривий Ріг	Луцьк
	W x U1	W x U2	W x U3	W x U4
Зростання мікробіологічної активності	12,69	8,46	2,82	14,1
Забруднення ґрунту	5,92	3,95	1,32	6,58
Викиди парникових газів	2,75	0,31	0,092	1,53
Обрушення схилів полігону	1,16	0,46	0	0,93

Результати оцінювання вказують на регіональну диференціацію ризиків залежно від специфіки прояву зміни клімату у конкретних містах. Незважаючи на відмінності у проявах зміни клімату в обраних містах, переважною спільною небезпекою є зростання мікробіологічної активності. У контексті зміни клімату істотне збільшення залишкових факторів ризику очікується за одночасного зростання середньорічної температури повітря та річної кількості опадів. Якщо температура зростає, а кіль-

кість опадів зменшується, інтенсивність процесів зростання мікробіологічної активності може дещо сповільнитися, тоді як інтенсивність викидів парникових газів очікувано зростатиме. За умов незначних проявів зміни клімату очікується зниження інтенсивності всіх досліджуваних процесів, проте зростання мікробіологічної активності та забруднення ґрунту залишатимуться найважливішими факторами. Зі зниженням середньорічної температури та за одночасного зростання кількості опадів можна очікувати уповільнення біохімічних реакцій в тілі полігонів та активізацію природних процесів самоочищення прилеглої території. Таким чином було виявлено, що ступінь інтенсивності прояву ризику зменшується в ряду: зростання мікробіологічної активності – забруднення ґрунту, викиди парникових газів – обрушення схилів полігону. Отримані безрозмірні значення були відображені в діапазоні від 0 до 100% (рис. 4).

Отримані результати вказують на суттєвий вплив кліматичних факторів на екологічну стабільність полігонів ПВ після їх рекультиватії. Така інформація є критично важливою для розробки ефективних стратегій адаптації до зміни клімату, впровадження інтегрованих систем моніторингу стану полігонів, а також для врахування в довгостроковому плану-

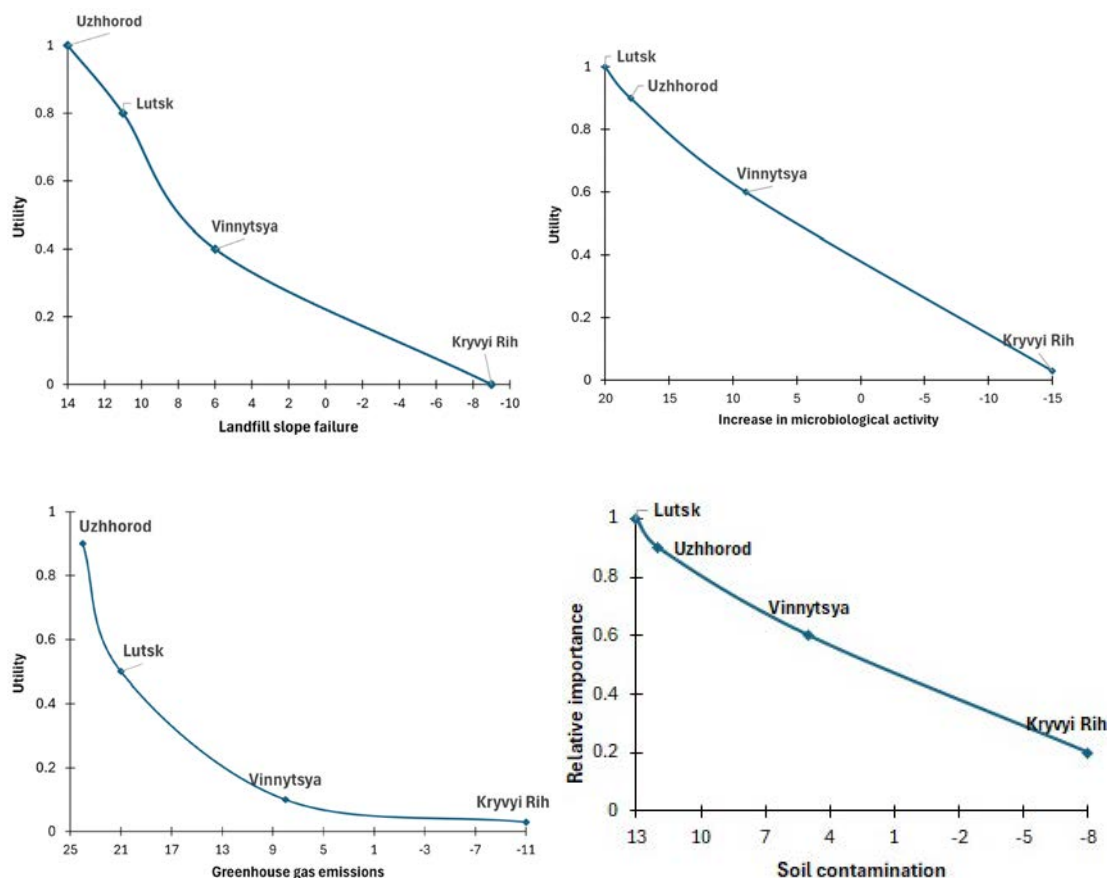


Рис. 3. Сценарії інтенсивності прояву залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ в умовах зміни клімату

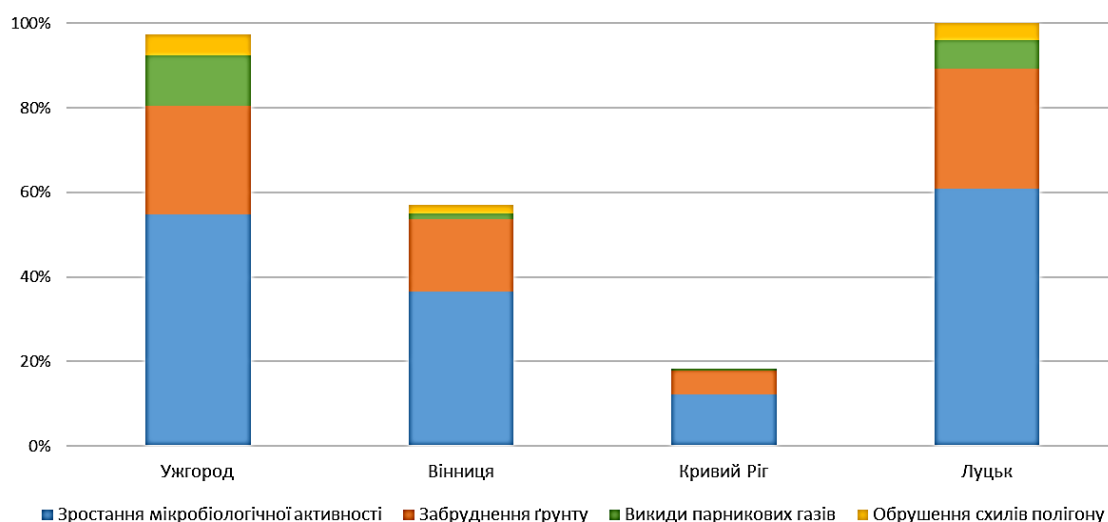


Рис. 4. Сценарії інтенсивності прояву залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ в умовах зміни клімату

ванні соціально-економічного розвитку територій з урахуванням потенційних екологічних ризиків. Водночас важливо зазначити, що отримані оцінки мають експертний характер, тобто базуються на думках кваліфікованих фахівців у межах структурованої процедури оцінювання, а не на статистичній моделі з верифікованими емпіричними даними. Тому результати можуть відрізнятися залежно від складу експертної групи, її досвіду, контексту оцінювання та рівня деталізації вхідних даних. Крім того, варто враховувати, що кінцева оцінка ризиків залежатиме від обраного кліматичного сценарію та моделі кліматичного прогнозування, яка застосовується в аналізі. Саме тому зазначені цифри слід розглядати як орієнтовні в рамках одного конкретного сценарного варіанту, а не як універсальні прогнози для всіх можливих варіантів майбутнього розвитку кліматичної системи. Загалом, наведене дослідження демонструє практичне застосування мультикритеріальної методики у виявленні територіальної вразливості до зміни клімату та підвищених ризиків, що виникають після рекультивації полігонів ПВ. Такий підхід є корисним не лише для екологічного планування, але й для розробки стратегій соціально-економічного розвитку громад і моніторингу досягнення цілей сталого розвитку.

Висновки. Інтеграція біофізичних та кліматичних індикаторів у модельну систему оцінки впливу зміни клімату на рекультивовані полігони ПВ під час проведення екологічних оцінок або розробки програм і стратегій сталого соціально-економічного розвитку територій дозволяє комплексно оцінити їх екологічну стійкість, спрогнозувати ризики та розробити відповідні адаптаційні заходи для зменшення негативного впливу на довкілля та здоров'я насе-

лення. Такий підхід відповідає сучасним європейським стандартам стратегічної екологічної оцінки та сталого управління техногенними екосистемами в умовах зміни клімату.

Застосування мультикритеріального підходу у цьому дослідженні демонструє його практичну цінність для оцінювання територіальної вразливості до зміни клімату. Незважаючи на відмінності проявів зміни клімату в обраних містах, переважаючим спільним ризиком для рекультивованих полігонів ПВ є зростання мікробіологічної активності в тілі полігону. Зростання інтенсивності прояву залишкових ризиків очікується при одночасному зростанні середньорічної температури повітря та річної кількості опадів. За умов незначних проявів зміни клімату очікується зниження інтенсивності всіх досліджуваних процесів. Найнижчі залишкові ризики очікуються за умов зниження середньорічної температури при збільшенні річної кількості опадів.

Дане дослідження є прикладом застосування мультикритеріального аналізу, результати якого можуть слугувати основою для формування ефективних управлінських рішень. Водночас, слід зауважити, що в кожному конкретному випадку кінцевий результат буде залежати від складу залучених експертів, вибраної кліматичної моделі та сценарію зміни клімату, в межах яких проводиться дослідження.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження можуть слугувати основою розробки системи індикаторів моніторингу об'єктів видалення побутових відходів з урахуванням впливу зміни клімату, індикаторів моніторингу реалізації положень документів державного планування при проведенні стратегічної екологічної оцінки та інших видів екологічних оцінок.

Література

1. Про цілі сталого розвитку України на період до 2023 року: Указ Президента України від 30 вер. 2019 р. № 722/2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>
2. Управління побутовими відходами / Міністерство розвитку громад та територій України. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-posluh/upravlinnia-pobutovomu-vidkhodam> (дата звернення: 20.05.2025).
3. ДБН В.2.4-2-2005. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. Київ: Держбуд України, 2005. 100 с. (Державні будівельні норми України)
4. Правила технічної експлуатації полігонів, припинення експлуатації, рекультивації та догляду за полігонами після припинення їх експлуатації: Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 10 лют. 2025 р. № 263. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0405-25#Text> (дата звернення: 22.05.2025).
5. Порядок проведення моніторингу об'єкта оброблення відходів: Постанова КМУ від 7 листоп. 2023 р. № 1166. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1166-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 22.05.2025).
6. Порядок здійснення моніторингу місць утворення, зберігання та видалення відходів : Постанова КМУ від 13 травн. 2025 р. № 551. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/551-2025-%D0%BF#Text>. (дата звернення: 21.05.2025).
7. Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: Закон України від 12 грудн. 2019 р. № 377-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20#Text> (дата звернення: 21.05.2025).
8. Updated Nationally Determined Contribution of Ukraine to the Paris Agreement. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Ukraine%20NDC_July%2031.pdf (дата звернення: 20.05.2025)
9. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf дата звернення: 17.05.2025)
10. Про управління відходами : Закон України від 20 черв. 2022 р. № 2320-IX. URL: zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20 (дата звернення: 19.05.2025).<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p>
11. Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024-2026 роках : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травн. 2024 р. № 483-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2024-r#Text> (дата звернення: 20.05.2025)
12. Про основні засади державної кліматичної політики : Закон України від 30 жовт. 2024 р. № 3991-IX. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text> (дата звернення: 15.05.2025)
13. Siddiqua A., Hahladakis J. N., Al-Attia W. A. K. A. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental science and pollution research international*. 2022. Vol. 29(39). P. 58514–58536. DOI: 10.1007/s11356-022-21578-z
14. Lee G. F., Jones-Lee A. Overview of Landfill Post-Closure Issues. *Waste Advantage Magazine*. 2014. Vol. 5(12) P. 24–26. URL: https://www.gfredlee.com/Landfills/Landfill_Postclosure_Issues_Overview.pdf (Last accessed: 21.05.2025).
15. Barlaz M. A., Rooker A. P., Kjeldsen P., Gabr M. A., Borden R.C. Critical Evaluation of Factors Required To Terminate the Postclosure Monitoring Period at Solid Waste Landfills. *Environmental Science & Technology*. 2002. Vol. 36 (16). P. 3457-3464. URL: DOI: 10.1021/es011245u
16. Residual Risk Assessment for the Municipal Solid Waste Landfills Source Category in Support of the 2019 Risk and Technology Review Proposed Rule. Regulations.gov : website. URL: <https://surl.li/hpihux> (Last accessed: 21.05.2025).
17. Fei X., Fang M., Wang, Y. Climate change affects land-disposed waste. *Nat. Clim. Chang*. 2021. Vol. 11. P. 1004–1005. DOI: 10.1038/s41558-021-01220-5
18. Zhang C., Xu T., Feng H., & Chen S. Greenhouse Gas Emissions from Landfills: A Review and Bibliometric Analysis. 2019. *Sustainability*. Vol.11(8). P. 2282. DOI: 10.3390/su11082282
19. Zhang C., Guo Y., Wang X., Chen S. Temporal and spatial variation of greenhouse gas emissions from a limited-controlled landfill site. *Environment International*. 2019. Vol. 127. P. 387-394 DOI: 10.1016/j.envint.2019.03.052
20. Manheim D.C., Yeşiller N., Hanson, J.L. Gas Emissions from Municipal Solid Waste Landfills: A comprehensive review and analysis of global data. *J Indian Inst Sci*. 2021. Vol. 101. P. 625–657. DOI: 10.1007/s41745-021-00234-4
21. Brand J. H., Spencer K. L. Potential pollution risks of historic landfills in England: Further analysis of climate change impacts. *WIREs Water*. 2024. Vol. 11(3). P. 1706. DOI: 10.1002/wat2.1706
22. Nicholls R.J., Beaven R.P., Stringfellow A., Monfort D., Le Cozannet G., Wahl T., Gebert J., Wadey M., Arns A., Spencer K. L., Reinhart D., Heimovaara T., Santos V. M., Enriquez A. R. Cope S. Coastal Landfills and Rising Sea Levels: A Challenge for the 21st Century. *Front. Mar. Sci*. 2021. Vol. 8. P. 710342. DOI: 10.3389/fmars.2021.710342
23. Platform for development of multi-national projects in education and research : website. URL: <https://kermitcooperation.wixsite.com/platform> (Last accessed: 17.05.2025).
24. Open-meteo : website. URL: <https://open-meteo.com/> (Last accessed: 13.05.2025).
25. Radomska M., Zeltina M. Design thinking to avoid maladaptation in building climate change resilience of urban areas. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2024. Vol. 15(2). P. 36-46. DOI: 10.69628/esbur/2.2024.36