

УДК 502.573

Veronika Prykhodko, Ph.D. (Geography), Associate Professor, Associate Professor of Ecology and Environmental Protection Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-6693> **e-mail:** vks26@ua.fm

Odesa I.I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine

FEATURES OF USING THE LANDGEM MODEL TO DETERMINE METHANE EMISSIONS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL SITES

***Abstract.** This article focuses on the current scientific and practical area of estimating and forecasting the production of biogas and its components, in particular methane, from municipal solid waste disposal sites. Despite a significant number of scientific studies and developed models for assessing methane generation from waste disposal sites, there are many uncertainties in the tasks of theoretical modelling and assessment of its generation. The results presented reveal the specific features of applying one of the models for calculating methane generation, the Landfill Gas Emission Model, developed by the US Environmental Protection Agency. The aim of the study is to assess the applicability of the model for estimating the generation of methane and other biogas components from landfills and waste disposal sites in Ukraine. The other methane generation models – the National Multi-Component Model based on the third-level detail decay method and the IPCC Waste Model – are also used in the study, as well as methods for the statistical analysis of results. The main results of the study consist in identifying the specific features of applying the Landfill Gas Emission Model to address the task of inventorying emissions of methane and other biogas components from Ukrainian landfills and dumps. The parameters of the calculation model that most closely approximate national conditions have been determined, namely: a methane generation constant of 0.098 year^{-1} , corresponding to conditions of rapid waste decomposition; and a content of biodegradable organic carbon at a level of 0.24 MgC/Mg of waste.*

It is necessary to take into account the landfill conditions (0.729) and the methane burn-off factor (0.8) to ensure the results as accurate as possible; however, applying these conditions does not guarantee complete consistency between results obtained using different methodologies. Thus, the total methane emissions over 50 years from the annual mass of landfilled municipal waste, calculated using the Landfill Gas Emission Model, will be 37% higher than those calculated using the National Model. Further adaptation of the model's results is promising, as is the application of the Landfill Gas Emission Model principles for determining other biogas components within the framework of the National Model. The scientific and practical significance of this study lies in the validation of the components of the Landfill Gas Emission Model for the most accurate application in Ukraine.

Keywords: biogas, calculation model, methane generation, landfills and dumps.

В.Ю. Приходько

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ LANDGEM ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ УТВОРЕННЯ МЕТАНУ ВІД МІСЦЬ ЗАХОРОНЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

***Анотація.** Стаття присвячена актуальному науково-практичному напрямку оцінки і прогнозу утворення біогазу та його складових, зокрема, метану, від місць захоронення твердих побутових відходів. Попри значну кількість наукових досліджень і розроблених моделей щодо оцінки утворення метану від місць захоронення відходів, в задачах теоретичного моделювання та оцінки його генерації є багато невизначеностей. Представлені результати розкривають особливості застосування однієї з моделей обчислення генерації метану Landfill Gas Emission Model, розробленої Американським Агентством з охорони довкілля. Метою дослідження є оцінка можливості застосування моделі для оцінки генерації метану та інших складових біогазу від полігонів і звалищ України. В роботі використані й інші моделі генерації метану – Національна багатокomпонентна модель на основі методу загасання третього рівня деталізації та IPCC Waste Model, а також методи статистичного аналізу результатів. Основні результати дослідження полягають у визначенні особливостей застосування Landfill Gas Emission Model для вирішення завдання інвентаризації викидів метану та інших складових біогазу з українських полігонів і звалищ побутових відходів. Визначені максимально наближені до національних умов параметри розрахункової моделі, а саме: константа генерації метану $0,098 \text{ рік}^{-1}$, що відповідає умовам швидкого розкладання відходів; вміст органічного вуглецю, здатного до біологічного розкладання на рівні $0,24 \text{ тС/т}$ відходів. Для максимально коректної адаптації отриманих результатів необхідно врахувати умови захоронення ($0,729$) та фактор вигорання метану ($0,8$), проте виконання цих умов не забезпечує повну відповідність між результатами, отриманими за різними методиками. Так, сумарна за 50 років емісія метану від річної маси захоронених побутових відходів, розрахована за Landfill Gas Emission Model, буде на 37% вищою, аніж за Національною моделлю. Отже, перспективним є подальша адаптація результатів моделі, а також використання принципів Landfill Gas Emission Model для визначення інших складових біогазу в рамках Національної моделі. Наукове та практичне значення представленого дослідження полягає в обґрунтуванні складових Landfill Gas Emission Model для найбільш коректного використання в Україні.*

***Ключові слова:** біогаз, розрахункова модель, генерація метану, полігони та звалища побутових відходів.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.60-71>

Вступ

Постановка завдання. Проблема захоронення побутових відходів (ПВ) та її екологічні наслідки є однією з ключових екологічних проблем сучасного світу. Очевидно, що кількість ПВ буде зростати: так, за прогнозами (Global Waste Management Outlook, Statista), очікується зростання маси утворених відходів на 56-75% з 2020 по 2050 рр., пов'язане із зростанням кількості населення та

рівнем добробуту найбільш густонаселених країн світу. По-друге, основним методом управління ПВ залишатиметься захоронення: станом на 2020 р., в світі захоронювалося приблизно 69% утворених відходів, з них більше половини – стихійно. За прогнозом, така тенденція може зберегтися і до 2050 р. Третій фактор посилення «смітцевої» кризи – несталі моделі споживання та, як наслідок, значна кількість компонентів у морфологічному складі, що ускладнює сортування потоку ПВ. За даними «Звіту про стан сфери управління побутовими відходами в Україні на 2024 рік» [1], 89,94% утворених ПВ було захоронено на 5631 полігонах і сміттєзвалищах загальною площею понад 8,4 тис. га. Значна перевага захоронення над іншими методами поводження з ПВ визначає необхідність досліджень екологічних наслідків функціонування полігонів ПВ. Одним із напрямків негативного впливу на довкілля є утворення біогазу в процесі анаеробної деструкції органічної речовини. Біогаз складається, в основному, з метану (50-60%) і вуглекислого газу (30-40%), що робить його цінною енергетичною сировиною. Але ці компоненти біогазу є парниковими газами (ПГ), тому відсутність системи збору і утилізації біогазу перетворює полігони ПВ на джерела ПГ. Зазначимо, що, попри законодавчі вимоги щодо наявності системи збору і утилізації біогазу, економічно вигідно видобувати біогаз з великих полігонів ПВ, де на значних площах створюються анаеробні умови деструкції відходів. Фактично, в Україні з 2003 р. починається видобуток біогазу з полігонів ПВ, а у 2023 р. налічувалася 31 система збору біогазу, що дало змогу відновити 41,14 тис. т метану (а це приблизно 13% від загальної емісії від місць захоронення). Попри це, захоронення лишається основним джерелом ПГ (59%) в секторі «Відходи», а сам сектор «продукує» 6,4% загального викиду ПГ в Україні [2]. Тому розробка моделей оцінки емісії біогазу(метану) від місць захоронення ПВ є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі найбільш використовуваними в світі моделями для оцінки емісії біогазу та/або його компонентів від місць захоронення ПВ є такі:

1) модель, запропонована Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (МГЕЗК, ІРСС) [3];

2) модель емісії біогазу (Landfill Emission Gas Model – LandGEM) [4], розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США.

В Україні оцінка емісії метану від місць захоронення ПВ проводиться за Національною багатокомпонентною моделлю на основі методу загасання першого порядку третього рівня деталізації (далі – Національна модель), яка розроблена в Інституті технічної теплофізики НАН України. Дана модель використовується в розрахунках викидів метану при складанні Національного кадастру [2].

В статті авторів [5] проведений детальний аналіз вищезначених моделей у версіях станом на 2017 рік. Огляд розрахункових моделей наведений у Керівництві [6]. Загалом зазначено, що Національна модель [3] успішно використовується для задач інвентаризації викидів, проте може бути використана й для визначених умов полігону. Зручні застосунки у вигляді електронних таблиць Excel для моделей LandGEM (різні версії) та ІРСС-моделі дозволяють зручно та швидко вирішувати цільові завдання, пов'язані з інвентаризацією викидів від полігонів ПВ. Проте зазначимо, що програмне забезпечення розроблене, перш за все, для умов полігонів ПВ США,

враховуючи в параметрах моделі місцеві умови розкладання органічної речовини [4, 6]. Тим не менш, модель популярна для застосування в інших країнах. Так, в публікації [7] показано застосування моделі LandGEM для оцінки біогазового та енергетичного потенціалу, а також карбонового сліду найбільшого полігону Mohammedia-Benslimane у Марокко. В розрахунках автори спиралися на специфічні для полігону Mohammedia-Benslimane умови розкладання органічної речовини за допомогою параметрів моделі, що визначаються кліматичними характеристиками території та складом відходів. Порівняльний аналіз різних моделей розрахунку біогазу та його компонентів в умовах конкретного полігону ПВ є предметом багатьох досліджень: апробації різних моделей (IPCC, LandGEM CDM - механізм чистого розвитку) для умов полігону на півдні Бразилії присвячена стаття [8]; моделювання емісії метану з полігону ПВ Міраш (Косово) представлено у статті [9] і т.д. Загалом, автори підкреслюють відмінності в отриманих результатах розрахунків за різними моделями, надаючи перевагу національним або IPCC моделям. Оптимізації параметрів моделі LandGEM на основі верифікації моделі з використанням кліматичних даних присвячена стаття [10], автори якої наголошують про суттєву неточність параметра моделі, який визначає швидкість розкладання органічної речовини у визначених природних умовах. Інші дослідники вказують на інший суттєвий недолік LandGEM – параметри моделі (а саме константа розкладання та метановий потенціал відходів) є фіксованими протягом усього терміну експлуатації звалища [11] і пропонують модифікацію моделі за принципом поповнення «банку біогазу» з кожною наступною масою захоронених відходів.

Метою дослідження є оцінка можливості застосування нової версії моделі LandGEM 3.1 [12] для оцінки генерації метану та інших складових біогазу від полігонів і звалищ України.

Теоретичні основи визначення утворення метану з місць захоронення побутових відходів

Модель для розрахунку емісії метану та інших компонентів біогазу LandGEM, розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA), базується на рівнянні розкладання першого порядку для кількісного визначення викидів речовин, що утворюються внаслідок розкладання відходів на звалищах ПВ [4, 6, 12]. Ця модель широко використовується в наукових та практичних задачах, попри певну невизначеність окремих параметрів, які неможливо емпірично оцінити. В основу моделі LandGEM покладений розрахунок утворення метану від маси відходів, що були захоронені у певному році. Модель використовує коефіцієнти, які визначають утворення метану протягом наступних років. Цей принцип також застосовується для IPCC моделі (2006) та Національної моделі, в основі яких закладена кінетична модель генерації метану першого порядку. До речі, продукція біогазу відбуватиметься протягом тривалого періоду часу – за останніми оцінками, це 80 років.

Для моделей IPCC та LandGEM розроблено автоматизовані інструменти на основі електронних таблиць MS Excel, що дають змогу здійснювати розрахунки та створювати графічні матеріали.

Національна та IPCC моделі обмежені визначенням метану. А перевагою моделі LandGEM є те, що вона дозволяє оцінювати рівні викидів як біогазу, так і його складових – метану (CH₄), вуглекислого газу (CO₂), неметанових летких органічних сполук (НЛОС) та інших речовин, що надходять до атмосферного повітря від полігонів ПВ.

У січні 2025 року з'явилася нова версія LandGEM 3.1, яка вперше дає змогу провести розрахунки для визначення національних величин викидів, в той час як попередні версії, зокрема, LandGEM 3.02, розроблялися для застосування для визначених полігонів, а набір параметрів моделі враховував умови США, проте це не стало на заваді використанню моделі й для інших полігонів в різних країнах світу (див. [7-9]). Тривалий час існували припущення, що попередні (до 2024 р.) Правила звітності щодо ПГ і основні параметри моделі версії LandGEM 3.02 не відображали реальну ситуацію, що спонукало до перегляду цих Правил. Основною метою оновленого модуля LandGEM 3.1 є відображення змін, що відбулися в підході, визначеному в AP-42, «Збірнику коефіцієнтів викидів забруднюючих речовин у повітря зі стаціонарних джерел» Агентства з охорони навколишнього середовища США. Методологія оцінки утворення метану на звалищах тепер посиляється на рівняння 1 з 40 CFR 98 НН (відоме як «Правила звітності щодо парникових газів») [13]. При роботі в «режимі інвентаризації викидів AP-42» нова версія LandGEM (3.1), випущена в січні 2025 року, тепер присвоює значення k і L_0 на основі нових правил звітності про ПГ.

Отже, версія LandGEM 3.1 має два модуля: 1) модуль NSPS Applicability, орієнтований на полігони ПВ, що базується на нових вимогах до емісії речовин з полігонів, що містяться у Федеральному Законі «Про чисте повітря» (Clean Air Act) та у Нових стандартах роботи джерел (New Source Performance Standards – NSPS); 2) модуль Emissions Inventory з інвентаризації викидів, що базується на стандартних значеннях коефіцієнтів викидів і застосовується для інвентаризації викидів в межах штату або для окремого об'єкта, коли відсутні дані спостережень [12].

З прийняттям нових Правил звітності щодо ПГ у 2024 р., утворення метану від місць захоронення ПВ в межах певної території вперше визначається за загальноприйнятою світовою практикою на основі моделі затухання. Отже, емісія G_{CH_4} описується рівнянням [12, 13]:

$$G_{CH_4} = \left[\sum_{x=S}^{E-1} \left\{ W_x \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} (e^{-k(T-x-1)} - e^{-k(T-x)}) \right\} \right], \quad (1)$$

де x – рік, у якому відбулося захоронення відходів; S – початковий рік розрахунку; T – звітний рік, за який розраховуються викиди; W_x – кількість вологих відходів, захоронених на полігоні у році x , т; MCF – корегуючий коефіцієнт метаноутворення, що залежить від можливостей анаеробного розкладання відходів в місцях захоронення (за замовчуванням 1); DOC – вміст органічного вуглецю, здатного до біологічного розкладання, тС/т відходів; DOC_F – частка DOC , що розкладається (за замовчуванням, $DOC_F = 0,5$); F – вміст метану в біогазі (за замовчуванням, $F = 0,5$); k – коефіцієнт генерації метану (константа швидкості генерації метану), рік⁻¹.

Рівняння (1) є принципово відмінним від рівняння (2), що описує емісію метану в версії LandGEM 3.02 та у модулі NSPS Applicability версії LandGEM 3.1 [4]:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}, \quad (2)$$

де n – період часу, за який розраховується емісія метану; k – коефіцієнт генерації метану, рік⁻¹; L_0 – потенціал утворення метану в рік i , тСН4/тППВ; M_i – маса ТПВ, захоронених у році i , т/рік; t_{ij} – вік j -ої частини маси відходів M_i , захороненої у році i .

В рамках програми U.S. EPA's Landfill Methane Outreach Program модель LandGEM була адаптована до українських умов (Ukraine LFG Model) [6, 14] (одна з так званих LMOP's Models). Рівняння (2) для розрахунку емісії біогазу (Q_{LFG}), адаптоване для України (Ukraine LFG Model), виглядає наступним чином [14]:

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}} \cdot MCF \cdot F, \quad (3)$$

де MCF – корегуючий коефіцієнт метаноутворення, що залежить від можливостей анаеробного розкладання відходів в місцях захоронення; F – корегуючий коефіцієнт для загорання.

Результати дослідження

Аналіз параметрів моделі, які залежать від складу відходів. Очевидно, що значення генерації метану визначаються параметрами k та L_0 , що залежать, перш за все, від категорії відходів. Так, параметр k , який також має назву «константа швидкості генерації метану», визначає швидкість розкладання відходу на полігоні та, відповідно, генерації метану. Він залежить від вмісту поживних речовин та вологи у відходах, а також від температури навколишнього середовища. На відміну від базової моделі, в українському варіанті [14] також опрацьовані значення параметра k , в залежності від кліматичних особливостей території та категорії відходів, проте розподіл значень здійснювався з прив'язкою до адміністративних районів, а не на основі кліматичного районування. Що стосується нової моделі LandGEM, то значення параметра k визначаються роком захоронення відходів (до або після 2010 року) та поділені на три категорії за умовами розкладання на полігоні в залежності від вмісту вологи. В табл. 1 наведені дані щодо константи швидкості генерації метану за різними моделями. Оскільки за моделлю LandGEM виділено 4 категорії відходів за швидкістю розкладання, то нами виконаний розрахунок відповідних значень за Національною моделлю [2] та IPCC моделлю [3], використовуючи дані про вміст основних категорій відходів з Національного Кадастру [2]. Середнє для України значення k знайдене з урахуванням зонування території країни за значеннями k для чотирьох категорій відходів, що відрізняються швидкістю розкладання [14], результат

опублікований в [5]. В другому випадку, на основі значень k з [12], обчислене середнє для України значення з урахуванням вмісту біорозкладаних відходів в загальній масі ПВ.

Оскільки однією із задач моделювання за допомогою застосунку LandGEM 3.1 є визначення емісії ПГ з певної території, то важливим є розрахунок усереднених параметрів моделі як обґрунтування вибору найбільш відповідних із запропонованого переліку.

Потенціал утворення метану L_0 характеризує максимально можливу кількість метану, що може бути згенерована з відходів, залежить від вмісту біодоступного вуглецю. Значення параметра L_0 також залежать від розрахункової моделі (табл. 2).

Табл. 1. Значення константи швидкості генерації метану k за різними моделями (визначені для умов України)

Категорія відходів	LandGEM		Національна модель	IPCC
	[5]	[12]		
Дуже швидко розкладаються (харчові відходи)	0,135	0,098	0,110	0,185
Швидко розкладаються (садово-паркові відходи)	0,068	0,067	0,070	0,1
Помірно швидко розкладаються (папір і картон, текстиль)	0,027		0,0048	0,06
Повільно розкладаються (деревина, шкіра тощо)	0,0135	0,033	0,024	0,03
Середнє для України [5]	0,0948	0,0809	0,0829	0,1127

Табл. 2. Значення потенціалу утворення метану L_0 (м³/т) за різними моделями (визначені для умов України)

Категорія відходів	LandGEM (NSPS Applicability)	Національна модель *
Дуже швидко розкладаються (харчові відходи)	69	48,8
Швидко розкладаються (садово-паркові відходи)	126	65,1
Помірно швидко розкладаються (папір і картон, текстиль)	214	118,7
Повільно розкладаються (деревина, шкіра тощо)	201	114,6
Середнє для України [5]	112,3	66,72

* перераховані з урахуванням щільності метану

Модуль Emissions Inventory LandGEM 3.1 не використовує значення потенціалу утворення метану L_0 , натомість оперує значеннями DOC , аналогічними до визначених моделлю IPCC. Модель IPCC взагалі не оперує показником потенціалу утворення метану L_0 , проте використовує схожий

показник генерації метану, що залежить від маси розкладеного біодоступного вуглецю. Обчислене за даними морфологічного складу ПВ середнє значення DOC для України склало 0,237 тС/тПВ.

Як бачимо з табл. 1 та 2, найпоширеніші моделі обчислення утворення метану при анаеробній деструкції відходів, що містять біодоступний вуглець, мають певні розбіжності у параметрах. Аналогічний принцип визначення потенціалу утворення метану L_0 в Національній моделі, однак, на відміну від LandGEM, одразу враховує фактор корекції метану MCF [2]:

$$L_{0i,j} = DOC_j \cdot DOC_F \cdot F \cdot 16/12 \cdot MCF_i . \quad (4)$$

Наприклад, якщо не враховувати цей показник, то середнє значення потенціалу за Національною моделлю склале 91,9 м³/т.

У підсумку зауважимо, що значення параметрів однієї моделі не можуть бути використані без відповідного аналізу і корекції в іншій розрахунковій моделі, проте, як показує аналіз, у випадку фіксованих значень можливо обирати найбільш оптимальний варіант з урахуванням даних інших моделей. Автори [9] відзначають, що до недоліків LandGEM відноситься те, що параметри k та L_0 мають змінюватися у часі, але в моделі є фіксованими значеннями.

Результати моделювання утворення метану від місць захоронення відходів. Для отримання результатів оцінки емісії метану та інших компонентів біогазу, який утворюється на полігонах і звалищах ПВ в Україні, нами взяті такі вихідні умови:

- 1) розрахунок виконаний від річної маси ПВ, захоронених у 2024 р. – 7796888,2918 т [1];
- 2) морфологічний склад ПВ прийнятий за даними Кадастру [2], відповідно до якого визначене середнє для маси ПВ значення $DOC = 0,237$ тС/тПВ;
- 3) значення параметрів LandGEM 3.1 прийняті максимально наближеними до визначених для національних умов (табл. 1, 2). Отримані результати скоректували з урахуванням того, що MCF для українських полігонів становить 0,729. Окрім цього, врахували коефіцієнт вигорання 0,8 для консервативної оцінки біогазового потенціалу українських полігонів відповідно до методичних рекомендацій з адаптації моделі LandGEM [14].

Для порівняльного аналізу, аналогічні розрахунки утворення метану були проведені за Національною та IPCC моделями. Для моделювання емісії метану скористалися автоматизованим інструментом на основі MS Excel (https://www.ipccn-ggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/IPCC_Waste_Model.xls) [3], а оптимізацію обчислень за Національною моделлю автором зроблено за допомогою MS Excel. Результати представлені на рис. 1.

Як бачимо, Національна та IPCC моделі дають близькі результати. Натомість результати розрахунку утворення метану за допомогою модуля Emissions Inventory LandGEM 3.1 є дещо відмінними від двох інших моделей. Так, на перший рік захоронення утворення метану за моделлю LandGEM було на 53% вище за отримане значення за Національною моделлю. Через 25 років ця різниця склале приблизно 1%. Через 40 років утворення метану,

розраховане за моделлю LandGEM, буде на 44% нижчим за отримане за Національною моделлю. Аналогічні результати отримані в роботі [5] для умов Одеської області, але для версії LandGEM 3.02. Це свідчить про певні обмеження у застосуванні модуля Emissions Inventory LandGEM 3.1 для оцінки утворення метану та інших компонентів біогазу з полігонів і звалищ України, а також про необхідність детального аналізу і розробки корегуючих коефіцієнтів для кращої інтерпретації результатів. Аналіз кореляційного зв'язку між отриманими значеннями утворення метану за Національною моделлю та Emissions Inventory LandGEM 3.1 на рівні 0,89 дозволяє зробити висновок про наявність тісного зв'язку між отриманими значеннями генерації метану.

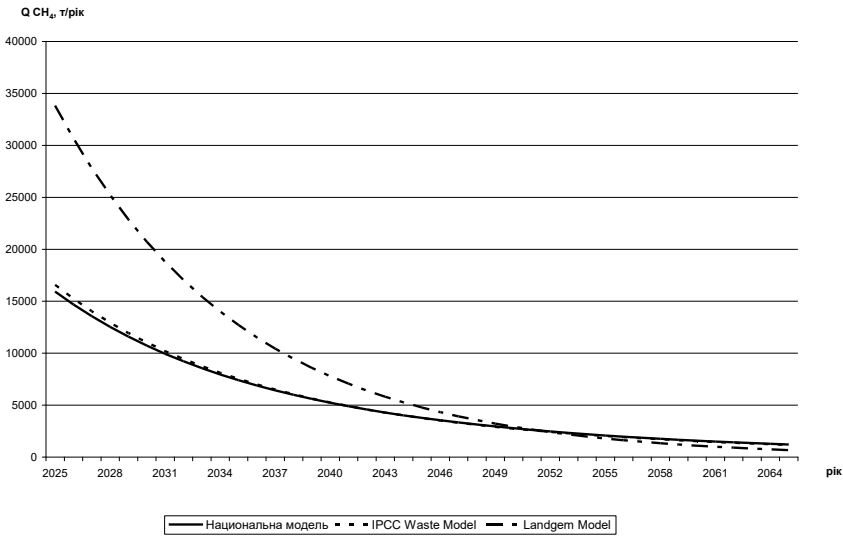


Рис. 1. Результати розрахунку утворення метану (на 40 років) від річної маси ПВ, утворених і захоронених у 2024 р. на полігонах і звалищах України, за різними моделями

В табл. 3 наведені результати розрахунку загального утворення метану від маси ПВ, що була захоронена на полігонах і звалищах України у 2024 р., за трьома моделями – Національною, IPCC та LandGEM 3.1.

Табл. 3. Маса метану (т), що утвориться від маси ПВ, захоронених на полігонах і звалищах України у 2024 р. (7796888,2918 т), протягом 50 років

Національна модель	IPCC модель	LandGEM 3.1
225859,5	228728	359828,8
В тому числі за перші 8 років, % до загальної маси		
43	44	55

Серед факторів, що впливають на відмінність результатів розрахунків утворення метану за моделлю LandGEM 3.1, можна назвати відсутність врахування морфологічного складу відходів та відповідних кожній категорії значень *k* та *DOC*. Американська модель передбачає можливість обрати єдині значення для всієї маси захоронених ПВ, проте це значно впливає на

результат (рис. 2). Як видно з рис. 2, вибір параметрів для сукупної маси відходів (без врахування морфологічного складу) суттєво змінює результати. Так, наприклад, залежність (1) описує утворення метану від річної маси ПВ з вибором найбільш близьких до визначених для українських умов середніх значень k та DOC . Крива (2) розрахована для умов повільного розкладання та вмісту біодеградабельного вуглецю для змішаних відходів. Крива (3) ілюструє утворення метану за умов швидкого розкладання змішаної маси ПВ, тобто на основі вибору показників без врахування отриманих осереднених для українських умов значень k та DOC (Національна та IPCC моделі).

Серед переваг модуля Emissions Inventory LandGEM 3.1 є можливість розрахувати не тільки утворення метану, а й біогазу та його складових – двоокису вуглецю та 48 забруднюючих речовин та НЛОС. При застосуванні модуля можливо додати інші речовини або скоректувати концентрації [12]. Наприклад, розрахуємо утворення НЛОС, діхлордифторметану та тетрахлоретилену (рис. 3). Так, у 2025 р. маса ПВ, захоронена у попередньому році, зproduкує 240,8 т НЛОС, 9,8 т діхлордифторметану та 3,1 т тетрахлоретилену. Можливість автоматизації розрахунків інших компонентів біогазу є перевагою моделі LandGEM, що є, на нашу думку, необхідним елементом удосконалення Національної моделі.

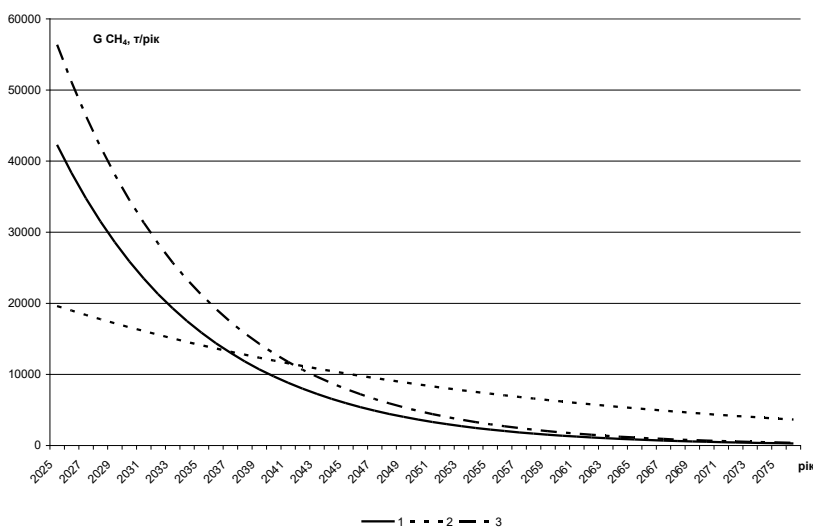


Рис. 2. Результати визначення утворення метану від річної маси захоронених у 2024 р. ПВ на полігонах і звалищах України з урахуванням різних параметрів моделі:

1 – $k = 0,098 \text{ рік}^{-1}$ та $DOC = 0,24 \text{ тС/тПВ}$ (найбільш наближені до умов України);
 2 – $k = 0,033 \text{ рік}^{-1}$ та $DOC = 0,32 \text{ тС/тПВ}$ (результати розрахунку наближені до отриманих за іншими моделями);
 3 – $k = 0,098 \text{ рік}^{-1}$ та $DOC = 0,32 \text{ тС/тПВ}$ (обрані за описом як найбільш характерні для українських умов)

Висновки та перспективи подальших досліджень

Модель LandGEM версії 3.1 вперше дозволяє реалізувати розрахунки утворення біогазу та його компонентів для сукупності місць захоронення відходів в межах певної території, що реалізовано у вигляді автоматизованого інструменту на основі електронних таблиць Excel – модуль Emissions

Inventory. Серед переваг модуля – можливість розрахунку метану та двоокису вуглецю, а також 48 інших речовин. Проте, як показало дослідження, застосування даного модуля до українських полігонів має певні обмеження. Попри спільну основу для розрахунку емісії метану – рівняння розкладання органічної речовини першого порядку – модель LandGEM дає більш високі результати емісії метану у порівнянні з Національною та IPCC моделями. В основному, це пов'язане з відсутністю врахування морфологічного складу захоронених відходів та, відповідно, швидкості розкладання і вмісту органічного вуглецю в окремих фракціях.

Наукова новизна представленого дослідження полягає в апробації нової версії моделі LandGEM з метою визначення емісії метану та інших складових біогазу від полігонів та звалищ ПВ України. Наукове та практичне значення представленого дослідження полягає в обґрунтуванні складових моделі для найбільш коректного використання в Україні. Попри виявлені недоліки, перевагою є можливість визначення інших складових біогазу, що може розглядатися як перспективний напрямок удосконалення Національної моделі. З іншого боку, модель LandGEM потребує розробки певних коефіцієнтів, що дозволили б максимально адаптувати її для використання в інших країнах.

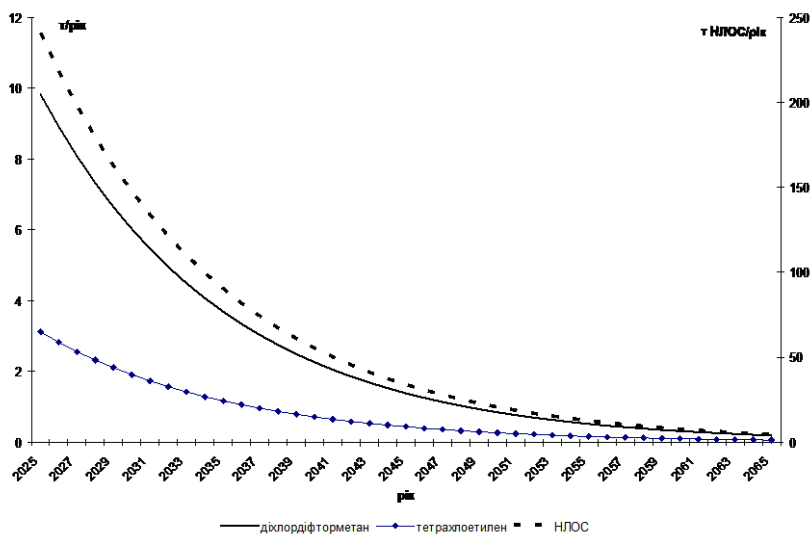


Рис. 3. Динаміка утворення інших складових біогазу від річної маси захоронених у 2024 р. ПВ на полігонах і звалищах України

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. (2024). *Report on the state of municipal solid waste management in Ukraine in 2024* [Звіт про стан сфери управління побутовими відходами в Україні за 2024 рік]. <https://mindev.gov.ua/diialnist/napiamy/sfera-komunalnykh-posluh/upravlinnia-pobutovymy-vidkhodamy>
2. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2025). *Ukraine's greenhouse gas inventory report 1990–2023* (587 p.). https://app.climatepolicyradar.org/document/ukraine-national-inventory-report-nir-2025_641b

3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 5: Waste)*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>
4. U.S. Environmental Protection Agency. (2005). *Landfill gas emission model (LandGEM) version 3.02: User's guide* (48 p.). <https://www3.epa.gov/ttnatcat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>
5. Safranov, T. A., Prykhodko, V. Yu., & Shanina, T. P. (2017). Estimation of greenhouse gas emissions from municipal solid waste disposal sites: A critical analysis of methods and adaptation to the conditions of the Odessa region. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, (21), 5–14. (in Ukrainian) [Сафранов, Т.А., Приходько, В.Ю., Шанина, Т.П. (2017). Оцінка емісії парникових газів від місць захоронення ТПВ: критичний аналіз методик та адаптація до умов Одеської області. *Вісник ОДЕКУ*, 21, 5–14].
6. U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *International best practices guide for landfill gas energy projects* (139 p.). https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_ibpgcomplete.pdf
7. Idrissi Oukili, A., Mouloudi, M., & Chhiba, M. (2022). LandGEM biogas estimation, energy potential and carbon footprint assessments of a controlled landfill site: Case of the controlled landfill of Mohammedia-Benslimane, Morocco. *Journal of Ecological Engineering*, 23(3), 116–129. <https://doi.org/10.12911/22998993/145410>
8. Fernandes da Silva, N., et al. (2020). First-order models to estimate methane generation in landfill: A case study in South Brazil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104053>
9. Dimishkovska, B., Berisha, A., & Lisichkov, K. (2019). Estimation of methane emissions from Mirash municipal solid waste sanitary landfill: Differences between IPCC 2006 and LandGEM method. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 19–41. <https://doi.org/10.12911/22998993/105332>
10. Saeedi, M., et al. (2025). LandGEM model parameters using a machine learning method to improve the accuracy of landfill methane gas generation estimates in the United States. *Journal of Environmental Management*, 373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124029>
11. Dillah, D. D., et al. (2015). *New and improved implementation of the first-order model for landfill gas generation or collection*. SCS Engineers. https://scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Dillah-Panesar-Gornto-Dieleman_New_and_Improved_Implementation_of_First_Order_Model_for_LFG_Generation_or_Collection.pdf
12. Krause, M., & Thorneloe, S. (2024). *Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.1 user manual and tool*. U.S. EPA Office of Research and Development (EPA/600/B-24/160).
13. U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *Greenhouse gas reporting rule (GHGRP) (40 CFR Part 98)*. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-98/subpart-HH>
14. Ganguli, S. (Ed.), & Stege, G. A. (Ed.). (2009). *Ukraine landfill gas model version 1.0: User's manual* (28 p.). U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program. https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf

Стаття надійшла до редакції 15.01.2026, надійшла після рецензування 12.03.2026, прийнята 04.04.2026

The article was received 15.01.2026, received after revision 12.03.2026, accepted 04.04.2026

Приходько Вероніка Юрївна

к.геогр.н., доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Адреса робоча: вул. Львівська, 15, 65016 м. Одеса, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-6693> **e-mail:** vks26@ua.fm