Вісник ЛДУБЖД
Bulletin of Lviv State University of Life Safety
https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/Visnuk
ISSN 2078-4643 (print), ISSN 2708-1389 (online)

UDC 628.4.047
DOI: 10.32447/20784643.33.2026.04

This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

В .В. Дочинець[1], К. А. Король[1], Т. В. Бойко[1], Т. І. Шуплат[1], Ю. В. Панімаш[2]
[1]Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна
[2]Національний університет цивільного захисту, м. Черкаси, Україна
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-2119-7382 – В .В. Дочинець
https://orcid.org/0000-0003-4363-6933 – К. А. Король
https://orcid.org/0000-0002-0882-2637 – Т. В. Бойко
https://orcid.org/0000-0003-3497-2636 – Т. І. Шуплат
https://orcid.org/0000-0002-5337-6613 – Ю. В. Панімаш
katikincheshi@gmail.com

ЕКОЛОГІЧНА НЕБЕЗПЕКА СПРИЧИНЕНА ФІЛЬТРАТАМИ ПОЛІГОНІВ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ПАНОНСЬКОГО БАСЕЙНУ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ГІДРОСФЕРУ

Вступ. Закарпатський регіон, як частина Панонського басейну, володіє унікальними, але вразливими запасами підземних вод. Деградація їхнього гідрохімічного стану зумовлена функціонуванням полігонів побутових відходів, що експлуатуються без належного інженерного захисту. Через високу проникність алювіальних відкладів та інтенсивний зв'язок із басейном річки Тиса, міграція токсичних фільтратів створює загрозу транскордонного екологічного характеру в межах Дунайського регіону.

Мета. Провести порівняльну гідрохімічну оцінку ступеня забруднення поверхневих та підземних вод у зонах впливу полігонів побутових відходів міст Ужгород, Мукачево та Берегове для ідентифікації маркерів техногенного навантаження та оцінки ризиків для транскордонних екосистем.

Методи. Використано дані комплексного моніторингу за 2024–2025 рр., що включали відбір проб поверхневих та підземних вод (ISO 5667). Аналітичні дослідження проводилися методами атомно-абсорбційної спектрометрії, спектрофотомерії та титриметрії. Оцінка ступеня трансформації здійснювалася шляхом порівняння з нормативами ДСанПіН 2.2.4-171-10 та Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС.

Результати. Виявлено катастрофічну техногенну трансформацію аквіферів у зонах впливу досліджуваних об'єктів. Встановлено екстремальне органічне забруднення в м. Ужгороді (перманганатна окиснюваність до 5986 мг O_2/дм³), що свідчить про пряме скидання неочищеного фільтрату. У підземних водах Берегівщини зафіксовано “амонійний стрес” (іони амонію - 541 мг/дм³, що у 1082 рази перевищує ГДК), а на Мукачівщині - надвисоку мінералізацію (сухий залишок - 10968 мг/дм³). Доведено, що висока фільтраційна здатність порід (до 50 м/добу) сприяє швидкому поширенню забруднення до транскордонної річки Тиса.

Висновки. Існуючі системи захисту полігонів є неефективними, що призводить до незворотної деградації четвертинного водоносного горизонту. Гідрохімічні аномалії азотного та органічного походження свідчать про критичний стан екологічної безпеки в межах Панонського басейну. Необхідне термінове впровадження регіональної стратегії управління фільтратами, модернізація моніторингової мережі та застосування методів зворотного осмосу для очищення стоків.

Ключові слова: фільтрат полігону, Панонський басейн, іони амонію, перманганатна окиснюваність, підземні води, екологічна безпека, транскордонне забруднення, басейн річки Тиса, четвертинний водоносний горизонт, техногенна трансформація.

V. V. Dochynets[1], K. A. Korol[1], T. V. Boyko[1], T. I. Shuplat[1], Y. V. Panimash[2]
[1]Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine
[2]National University of Civil Defense in Cherkasy, Ukraine

ENVIRONMENTAL HAZARD CAUSED BY FILTRATES OF LANDFILLS OF DOMESTIC WASTE PANNONIAN BASIN AND ITS EFFECTS ON THE HYDROSPHERE

Introduction. The Zakarpattian region, as part of the Pannonian Basin, possesses unique yet vulnerable groundwater reserves. The degradation of their hydrochemical state is caused by the operation of municipal solid waste landfills that lack proper engineering protection. Due to the high permeability of alluvial deposits and the intensive hydraulic connection with the Tisza River basin, the migration of toxic leachates poses a transboundary environmental threat within the Danube region.

Purpose. To conduct a comparative hydrochemical assessment of surface and groundwater pollution levels in the impact zones of solid waste landfills in the cities of Uzhhorod, Mukachevo, and Berehove to identify markers of technogenic pressure and assess risks to transboundary ecosystems.

Methods. The study utilized comprehensive monitoring data from 2024–2025, including surface and groundwater sampling (ISO 5667). Analytical research was performed using atomic absorption spectrometry, spectrophotometry, and titrimetry. The degree of transformation was assessed by comparison with the DSanPiN 2.2.4-171-10 standards and the EU Water Framework Directive 2000/60/EC.

Results. A catastrophic technogenic transformation of aquifers in the impact zones of the studied sites was identified. Extreme organic pollution was recorded in Uzhhorod (permanganate oxidation up to 5,986 mg O_2/dm³), indicating direct discharge of untreated leachate. In the groundwater of the Berehove district, an "ammonium stress" was observed (ammonium ions reached 541 mg/dm³, exceeding the maximum permissible concentration by 1,082 times), while the Mukachevo district showed ultra-high mineralization (dry residue of 10,968 mg/dm³). It was proven that high soil filtration capacity (up to 50 m/day) facilitates the rapid spread of pollutants to the transboundary Tisza River.

Conclusions. Existing landfill protection systems are ineffective, leading to the irreversible degradation of the Quaternary aquifer. Hydrochemical anomalies of nitrogenous and organic origin indicate a critical state of environmental safety within the Pannonian Basin. The findings justify the urgent need for a regional leachate management strategy, modernization of the monitoring network, and the implementation of innovative treatment technologies such as reverse osmosis.

Keywords: landfill leachate, Pannonian Basin, ammonium ions, permanganate oxidation, groundwater, environmental safety, transboundary pollution, Tisza River basin, Quaternary aquifer, technogenic transformation.

Постановка проблеми. Забезпечення сталого управління водними ресурсами є одним із пріоритетних завдань екологічної безпеки в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

Закарпатський регіон, що територіально та гідрологічно є невід'ємною частиною Панонського басейну, характеризується наявністю унікальних за генезисом, проте надзвичайно вразливих до зростаючого техногенного впливу запасів підземних вод. Деградація гідрохімічного стану водоносних горизонтів (аквіферів) у регіоні значною мірою зумовлена функціонуванням об'єктів захоронення побутових відходів, більшість із яких експлуатуються без належних систем інженерного захисту [21, 24].

Одним із ключових чинників негативного впливу є формування фільтратів – висококонцентрованих багатокомпонентних розсолів, що виникають внаслідок інфільтрації атмосферних опадів крізь товщу депонованих відходів та наступних біохімічних процесів розкладу органічної фракції. Специфічні гідрогеологічні умови Закарпатської низовини, зокрема високий рівень залягання ґрунтових вод та інтенсивний гідродинамічний зв'язок між поверхневим стоком і четвертинними водоносними горизонтами, сприяють прискореній міграційній активності полютантів [1, 4].

Враховуючи, що гідрографічна мережа регіону включає у себе басейн річки Тиса – головної артерії Панонського регіону – транскордонне перенесення забруднюючих речовин набуває міжнародного екологічного значення в межах басейну ріки Дунай, що охоплює територію 19 країн, включаючи Україну.

Попри численні дослідження локального впливу полігонів побутових відходів та стихійних сміттєзвалищ, системний порівняльний аналіз гідрохімічної трансформації водних об'єктів у зонах впливу найбільших урбанізованих центрів регіону залишається ще недостатньо висвітленим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна парадигма дослідження впливу полігонів побутових відходів базується на розумінні масиву відходів, як свого роду складного біохімічного реактора, що на сталій основі генерує токсичний фільтрат протягом десятиліть після припинення експлуатації. Фундаментальні дослідження Christensen et al. (2001) та Kjeldsen et al. (2002) довели, що хімічний склад фільтрату зазнає суттєвої еволюції залежно від стадій деградації відходів – від аеробного розкладу до фаз активного

ацидогенезу та метаногенезу. У сучасній світовій практиці фільтрат класифікується як висококонцентрований розчин, що містить чотири основні групи забруднювачів: розчинену органічну речовину, макрокомпоненти, іони важких металів та ксенобіотичні органічні сполуки [7].

Особлива увага в міжнародних публікаціях приділяється міграції азотовмісних сполук, зокрема іонів амонію (NH_4), який виступає найбільш стійким і довготривалим маркером забруднення підземних вод (Yusof et al., 2023). На відміну від органічних компонентів, котрі піддаються природному розкладу, амоній характеризується високою міграційною здатністю у відновлювальних умовах підземного середовища [11, 12 13, 14]. Дослідження [2, 6, 23] демонструють, що за відсутності вільного кисню та при низькому редокс-потенціалі процеси нітрифікації блокуються, що спричиняє до формування масштабних шлейфів забруднення, які загрожують якості питної води у алювіальних аквіферах [9, 18].

У контексті Панонського басейну, частиною якого є Закарпатська низовина, питання захищеності підземних вод набуває транскордонного значення. Наукові дослідження угорських та словацьких вчених, зокрема [7], акцентують увагу на високій вразливості четвертинних артезіанських систем регіону через інтенсивний гідравлічний зв'язок із річковою мережею. Встановлено, що алювіальні відклади Панонського басейну мають високу фільтраційну здатність, що сприяє швидкому поширенню полютантів від точкових джерел забруднення до регіональних базисів дренування, таких як річка Тиса [3, 21].

Українська наукова школа також зробила свій вагомий внесок у вивчення цієї проблематики. Були закладені фундаментальні підходи до оцінки захищеності підземних вод у межах великих гідрогеологічних структур [15, 22]. Питання регіонального моніторингу та оцінки екологічних ризиків у зонах впливу полігонів побутових відходів західної України, детально висвітлені у численних грунтовних працях науковців Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Дослідження [15, 16, 19, 26] дозволили систематизувати закономірності техногенної трансформації геологічного середовища та розробити концептуальні моделі поширення забруднюючих речовин від тіла полігонів. Зокрема, у їхніх публікаціях обґрунтовано необхідність використання інтегральних показників забруднення для оцінки кумулятивного ефекту фільтратів на навколишнє природне середовище.

Попри значний масив накопичених знань, досі актуальним залишається дослідження екстремальних гідрохімічних станів, які виникають на полігонах Закарпатської області за умов поєднання надлишкового зволоження та специфічної літологічної будови галечникових відкладів. Більшість існуючих моделей не враховують пікових концентрацій іонів амонію та органіки, котрі зафіксовані під час моніторингових циклів. Це вказує на певний розрив між теоретичними розрахунками та реальними темпами деградації водних ресурсів у Панонському гідрогеологічному вузлі, що і зумовило необхідність проведення цього порівняльного аналізу.

Мета роботи. Порівняльна гідрохімічна оцінка ступеня забруднення поверхневих та підземних вод у зонах впливу полігонів побутових відходів міст Ужгорода, Мукачева та Берегового для ідентифікації маркерів техногенного навантаження та оцінки ризиків для транскордонних екосистем.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження проводилися протягом 2024 –2025 років у межах зон впливу трьох найбільших об'єктів захоронення відходів Закарпатської області: Ужгородського (с. Барвінок), Мукачівського та Берегівського полігонів побутових відходів.

Стратегія екологічного моніторингу базувалася на комплексному підході, що передбачав одночасний відбір проб із двох взаємопов'язаних типів водних об'єктів. До першої групи належали поверхневі води, представлені техногенними водовідвідними каналами та стічними канавами, що безпосередньо дренують територію полігонів. Другу групу становили підземні води, проби яких відбиралися зі спостережних та експлуатаційних свердловин четвертинного водоносного горизонту, розташованих у зоні активної міграції шлейфу забруднення на віддалі від 50 до 500 м від межі захоронення побутових відходів [8, 10].

Процедура відбору проб здійснювалася у суворій відповідності до вимог міжнародних та національних стандартів ДСТУ ISO 5667-2:2003 та ДСТУ ISO 5667-3:2001. Для забезпечення достовірності результатів аналізу на вміст металів проводилася консервація проб шляхом додавання азотної кислоти (HNO_3) до досягнення показника pH < 2. Транспортування та зберігання зразків здійснювалося у спеціалізованих термоізольованих контейнерах за стабільної температури +2...+8°C. Весь комплекс аналітичних досліджень виконувався на базі установ, акредитованих за міжнародним стандартом ISO/IEC 17025: Випробувального центру Закарпатської регіональної державної

лабораторії Держпродспоживслужби та Ужгородської прикордонної державної контрольно-токсикологічної лабораторії [5, 17].

Комплексна оцінка гідрохімічного стану водних об'єктів включала визначення широкого спектру показників за валідованими методиками. Показник водневого потенціалу (pH) визначався потенціометричним методом згідно з ДСТУ 4077-2001 (МВВ 081/12-0317-06). Визначення концентрацій іонів важких металів, зокрема свинцю (Pb), цинку (Zn), кадмію (Cd), міді (Cu) та марганцю (Mn), проводилося методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії у режимі полум'яної атомізації за методиками ПВ 7.2-12 та ПВ 7.2-10. Рівень органічного забруднення оцінювався через показник перманганатної окиснюваності титриметричним методом за МВВ 081/12-0016-01. Дослідження азотовмісних сполук, включаючи іони амонію (NH_4) та нітрати (NO_3), здійснювалося спектрофотометричним методом згідно з ДСТУ ISO 7150-1:2003 та МВВ 7.2-15/23268.9-2022. Загальна мінералізація оцінювалася за масою сухого залишку гравіметричним методом, тоді як вміст хлоридів та сульфатів визначався титриметричним та гравіметричним методами відповідно (МВВ 081/12-0653-09 та МВВ 081/12-0177-05) [23].

Статистична обробка та інтерпретація отриманих результатів, виконувалася методами варіаційної статистики із використанням ліцензійного програмного забезпечення Microsoft Excel 365. Для визначення ступеня техногенної трансформації гідросфери, отримані дані порівнювалися з гігієнічними вимогами ДСанПіН 2.2.4-171-10, критеріями екологічної якості Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС (EU WFD), рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я, а також із фоновими показниками аналогічних об'єктів регіону, що не перебувають під безпосереднім впливом полігонів побутових відходів. Такий багатосторонній аналіз дозволив ідентифікувати Панонський басейн як зону підвищеного екологічного ризику.

Результати дослідження. Закарпатська низовина, що є орографічним продовженням Панонського серединного масиву, становить собою специфічну морфоструктурну одиницю на межі Східних Альп та Карпат. У тектонічному плані район досліджень приурочений до Закарпатського внутрішнього прогину – епігерцинської структури, формування якої пов'язане з неогеновою активізацією альпійської складчастості. Прогин відокремлений від мегантиклінорію Складчастих Карпат потужною рельєфоутворюючою зоною Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма, що виконує роль регіонального вододілу та гідродинамічного бар'єру.

Геологічний фундамент даного прогину представлений інтенсивно дислокованими мезозойськими та частково палеогеновими відкладами (вапняками, мергелями, пісковиками), котрі залягають на доволі значних глибинах. Поверх них залягає потужний (до 2000–3000 м) неогеновий чохол, складений моласовими формаціями міоцену та пліоцену. Літологічно ці відклади представлені соленосними глинами, туфами, мергелями та піщано-глинистими породами сарматського та панонського ярусів. Наявність потужних глинистих екранів у неогеновому розрізі створює сприятливі умови для формування напірних артезіанських горизонтів, які здебільшого ізольовані від поверхневого антропогенного впливу [26].

Найбільше значення для оцінки екологічної безпеки мають четвертинні алювіальні відклади, що перекривають неогеновий фундамент суцільним чохлом. Поверхневий шар представлений генетично пов'язаними акумулятивними терасами ряду річок: Уж, Латориця та Тиса. Літологічний склад четвертинних відкладів характеризується значною неоднорідністю: від грубоуламкових фацій у руслових частинах, до супіщано-суглинкових відкладів на заплавних терасах [25, 26].

Саме висока проникність цих верхніх горизонтів у поєднанні із невеликою потужністю зони аерації, визначає високий ступінь вразливості підземних вод до інфільтрації фільтратів полігонів побутових відходів. Таким чином, Закарпатський внутрішній прогин виступає як гігантський природний резервуар, де через відсутність витриманих водотривких покрівель, відбувається швидке гідрохімічне змішування поверхневих техногенних стоків із природними водними системами Панонського басейну. Топографічна карта регіону представлена нижче (рис. 1).

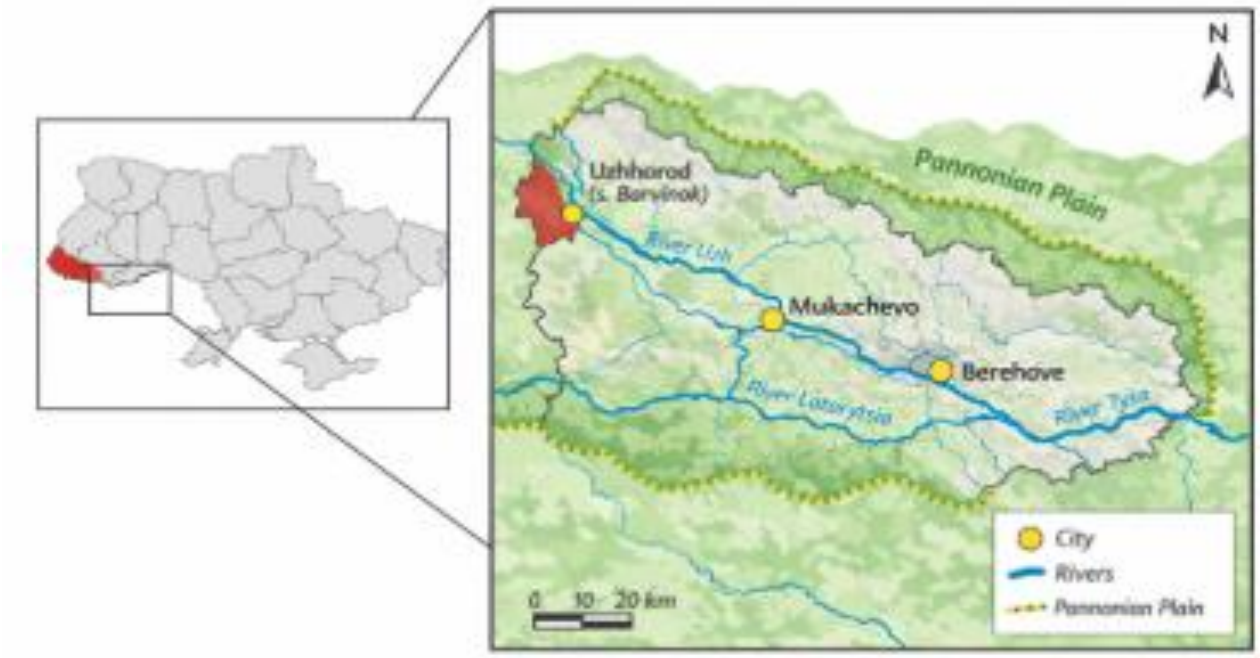

Рисунок 1 – Картосхема району моніторингових досліджень

Основний ресурсний потенціал підземних та господарських вод Закарпатського регіону зосереджений у четвертинному водоносному комплексі (Quaternary aquifer), який виступає головним джерелом питного водопостачання для більшості населених пунктів низинної частини області. Висока соціально-екологічна значущість моніторингу якості цього водоносного горизонту, обумовлена його інтенсивним використанням та специфікою літологічного складу водовмісних порід. Ці структурні породи представлені переважно алювіальними відкладами, зокрема гранітно-децитовим галечником із піщано-гравійним заповнювачем, що визначає надзвичайно високу водопровідність та фільтраційну здатність.

Згідно з результатами польових досліджень, коефіцієнт фільтрації (K_f) у межах досліджуваних локацій варіює у діапазоні від 15 до 50 м/добу, що створює передумови для активного перенесення забруднюючих полютантів на значні віддалі від точкових джерел емісії.

Природна вразливість підземних вод до техногенного впливу полігонів побутових відходів у регіоні зумовлена поєднанням декількох критичних факторів. Перш за все, спостерігається висока гідравлічна відкритість системи, спричинена відсутністю у водоносному горизонті витриманого водотривкого шару або глинистих екранів, які могли б виконувати роль природного геохімічного бар'єру. За відсутності таких ізолюючих пластів у зоні аерації відбувається практично безперешкодна вертикальна інфільтрація токсичних фільтратів безпосередньо у дзеркало підземних вод.

Ситуація ускладнюється критично малою глибиною залягання статичного рівня підземних вод, який у межах Закарпатської низовини коливається у діапазоні від 0,5 до 4,0 м від поверхні. У періоди інтенсивних опадів та сезонних паводків, характерних для Панонського басейну, дзеркало підземних вод може підніматися до позначки 0,1–0,2 м, що призводить до прямого гідравлічного контакту основи масиву побутових відходів із підземними водами. У такі моменти механізм забруднення трансформується з інфільтраційного у пряму дифузію та конвекцію продуктів біохімічного розкладу відходів. В результаті, відбувається масове вимивання іонів амонію та розчинених органічних сполук безпосередньо у водоносний горизонт, що є науковим обґрунтуванням виявлених під час моніторингу екстремальних рівнів забруднення (рис. 2).

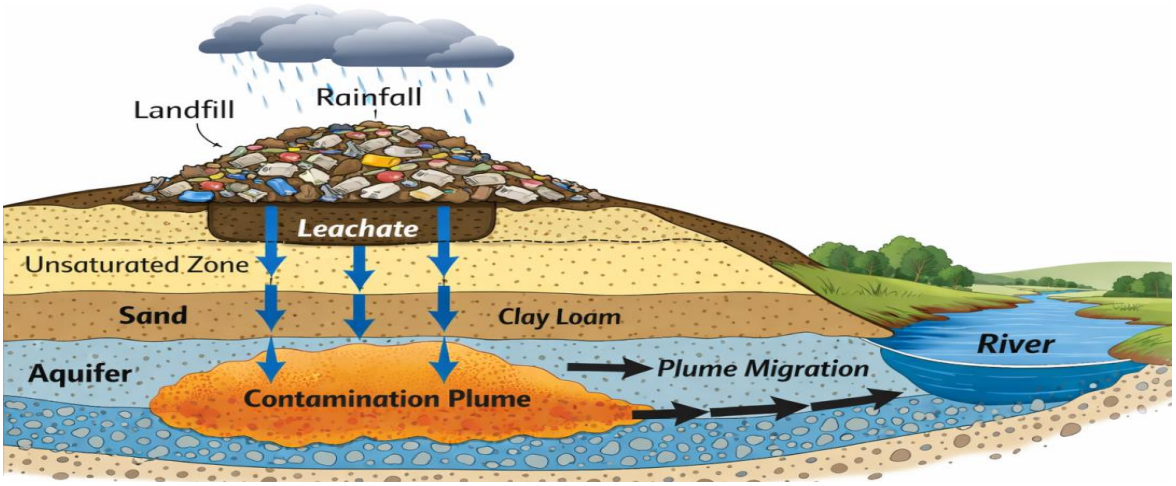

Рисунок 2 – Концептуальна гідрогеологічна модель забруднення

Як видно із даної комплексної схеми, існує тісна ланцюгова взаємодія поміж атмосферними процесами, різним періодом розкладання побутових відходів та літосферними горизонтами. Результатом чого є речовинно-енергетичні міграційно-накопичувальні ланцюги, які і обумовлюють зростаючу екологічну небезпеку для компонентів довкілля та населення.

Кліматичні умови регіону дослідження характеризуються стійким надлишковим зволоженням, що виступає визначальним фактором у процесах формування та міграції техногенних стоків на об'єктах захоронення відходів. Середньорічна кількість атмосферних опадів у межах низинної частини області варіює у діапазоні 750–950 мм/рік, що зумовлює формування стабільно позитивного водного балансу території. Для полігонів побутових відходів, котрі тут функціонують, такий гідрологічний режим є критичним чинником екологічного ризику. За умов відсутності або технічної деградації ізоляційних екранів у структурі досліджуваних полігонів, значні обсяги опадів ініціюють інтенсивну вертикальну інфільтрацію вологи крізь товщу депонованого масиву відходів [20].

У результаті впливу процесу інфільтрації опадів через гетерогенну масу відходів відбувається екстракція широкого спектра токсичних компонентів, що призводить до постійного генерування висококонцентрованого фільтрату. За розрахунковими оцінками водно-балансових показників, близько 30–40% від загального обсягу річних атмосферних опадів на досліджуваних локаціях трансформується у рідку фазу забруднення. Ця агресивна фаза, насичена продуктами біохімічної деструкції, безперешкодно мігрує у навколишнє середовище, створюючи постійне гідрохімічне навантаження на підземні аквіфери та прилеглі поверхневі водотоки Панонського басейну. Таким чином, кліматичний фактор виступає основним рушієм вимивання полютантів із тіла полігонів, визначаючи сталий характер забруднення гідросфери регіону незалежно від сезонних коливань (рис. 3).

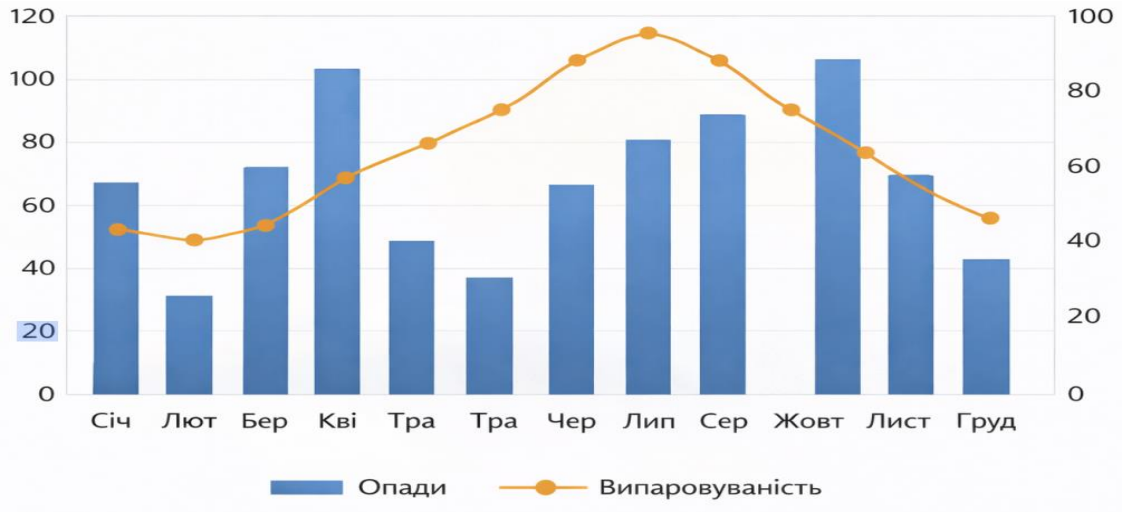

Рисунок 3 – Кліматична діаграма регіону досліджень

Для проведення репрезентативного порівняльного аналізу в межах Закарпатського регіону було обрано три стратегічні об’єкти захоронення відходів, які відображають різні фази техногенного впливу на гідросферу. Перший досліджуваний об’єкт – Ужгородський полігон побутових відходів (географічні координати 48.572° N, 22.355° E), який функціонує із 1998 року і розташований на надзаплавній терасі, що характеризується специфічною будовою літологічного субстрату (рис. 4).

Рисунок 4 – Панорама Ужгородського полігону побутових відходів

Підстилаючі породи в районі цього об’єкта мають високу природну тріщинуватість, що виступає визначальним фактором для пришвидшеної радіальної та латеральної міграції полютантів. Саме така геологічна будова пояснює зафіксовану аномально високу органічну складову у прилеглих стічних водах, де отримані в результаті досліджень, показники перманганатної окиснюваності свідчать про інтенсивне вимивання продуктів незавершеної деструкції органічної фракції відходів.

Другий об’єкт дослідження – Мукачівський полігон побутових відходів (географічні координати 48.421° N, 22.730° E), який розташований у безпосередній зоні впливу річки Латориці, що створює ризики масштабного транскордонного перенесення забруднюючих речовин (рис. 5).

Рисунок 5 – Панорама Мукачівського полігону побутових відходів

Гідрохімічний профіль цієї локації вирізняється високим вмістом мінеральних солей та нітратів, що у сукупності вказує на змішаний генезис забруднення та тривалий термін експлуатації об’єкта. Наявність значних концентрацій нітратних сполук свідчить про глибокі процеси біохімічної стабілізації відходів та активну фазу нітрифікації, що є характерною для полігонів з великим стажем депонування мас побутових відходів [27].

Найбільш вразливою локацією за комплексом гідрогеологічних показників визначено Берегівський полігон побутових відходів (географічні координати 48.188° N, 22.615° E) (рис. 6).

Рисунок 6 – Панорама Берегівського полігону побутових відходів

Критичність екологічної ситуації тут зумовлена специфічним низинним рельєфом та близькістю до магістрального водного каналу Верке, який протікає через місто Берегово. Саме на даному об'єкті було зафіксовано явище "амонійного стресу" з концентрацією іонів амонію на рівні 541 мг/л. Такий аномальний рівень забруднення зумовлений застійним гідродинамічним режимом підземних вод та вираженим дефіцитом розчиненого кисню у водоносному горизонті. Дефіцит кисню блокує процеси природного окиснення амонію до нітратів, що призводить до накопичення токсичних азотистих сполук у відновлювальних умовах підземного середовища та створює безпрецедентне навантаження на регіональну екосистему.

Результати проведеного комплексного гідрохімічного аналізу свідчать про глибоку техногенну трансформацію природного складу підземних та поверхневих вод у зонах впливу досліджуваних полігонів побутових відходів. Зафіксовані концентрації більшості ідентифікованих полютантів суттєво перевищують встановлені гранично допустимі концентрації згідно з національними стандартами та Директивою 2000/60/ЄС, що вказує на формування стійких ареалів забруднення. Для систематизації отриманих даних було сформовано зведену таблицю порівняльних показників, яка відображає специфіку гідрохімічного профілю кожної із досліджуваних локацій (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика гідрохімічних показників у зонах впливу досліджуваних полігонів побутових відходів Закарпатського регіону
(пікові значення за період 2024–2025 рр.)

Показник	Одиниці вимірю-вання	Ужгород (стік)	Мукачево (аквіфер)	Берегове (аквіфер)	ГДК (UA/EU)
Перманганатна окиснюваність	мг O_2/дм³	5986,0	636,0	42,36	5,0
Іони амонію (NH_4^+)	мг/дм³	н/д	50,0	541,0	0,5
Нітрати (NO_3^-)	мг/дм³	87,1	109,6	30,17	50,0
Сухий залишок	мг/дм³	н/д	10968,0	582,0	1000
Марганець (Mn)	мг/дм³	н/д	н/д	2,0	0,05
Свинець (Pb)	мг/дм³	0,178	< 0,15	< 0,15	0,01

Аналіз отриманих результатів дозволяє виділити декілька ключових аномалій. Найбільш вражаючим показником у зоні впливу Ужгородського полігону є екстремально високий рівень перманганатної окиснюваності (5986 мг O_2/дм³), що майже у 1200 разів перевищує фонові значення для поверхневих вод. Таке аномальне органічне навантаження свідчить про домінування у стоках розчинених органічних сполук на стадії активного ацидогенезу, що призводить до повної деоксигенації водного середовища. Одночасно зафіксований вміст свинцю (0,178 мг/дм³) підтверджує наявність у фільтраті іонів важких металів, що мігрують внаслідок поступового розкладання компонентів побутових відходів.

Гідрохімічний стан підземних вод у районі Берегівського полігону побутових відходів характеризується явищем, яке можна класифікувати як "амонійний стрес". Концентрація іонів амонію на рівні 541 мг/дм³, що є явним індикатором анаеробної деструкції відходів у стадії метаногенезу. Через застійний гідродинамічний режим, наявний у Панонському

басейні та низький редокс-потенціал підземного середовища, процеси нітрифікації (окиснення амонію до нітратів) є заблокованими, що призводить до накопичення амонію у токсичних концентраціях. Виявлений супутній вміст марганцю (2,0 мг/дм³) пояснюється відновлювальними умовами, що сприяють вилуговуванню цього елемента з водовміщуючих порід під дією агресивного фільтрату.

У районі Мукачівського досліджуваного об'єкта, домінує процес вторинного засолення та нітратного забруднення. Сухий залишок, встановлений на рівні 10968 мг/дм³, свідчить про трансформацію підземних вод у техногенні розсоли. На відміну від Берегівського полігону побутових відходів, високий вміст нітратів (109,6 мг/дм³) вказує на більш інтенсивну аерацію або значний вік масиву відходів, де процеси мінералізації азотистих сполук досягли стадії завершеного окиснення. Таке поєднання високої мінералізації та нітратного навантаження, створює ризики незворотної деградації четвертинного водоносного горизонту, як джерела питного водопостачання.

Узагальнюючи отримані дані, слід зазначити, що міграція виявлених полютантів відбувається у напрямку регіонального базису дренування – річки Тиси. Враховуючи високу фільтраційну здатність галечникових відкладів (K_f = 15–50 м/добу), виявлені ареали забруднення мають тенденцію до поступового розширення, що створює загрозу не лише локального масштабу, а й впливає на транскордонну екологічну безпеку в межах Дунайського басейну. А це потребує суттєвого перегляду стратегії управління полігонами побутових відходів у Закарпатській області.

Висновки. На основі проведеного комплексного гідрохімічного моніторингу та порівняльного аналізу впливу полігонів побутових відходів міст Ужгород, Мукачево та Берегове на водні ресурси Закарпатського регіону, зроблено наступні комплексні висновки.

По-перше, встановлено критичний ступінь техногенної трансформації підземних та поверхневих вод у зонах впливу досліджуваних об'єктів. Виявлені концентрації забруднюючих речовин, суттєво перевищують гранично допустимі нормативи, що свідчить про неефективність існуючих систем інженерного захисту полігонів побутових відходів та відсутність належного управління фільтратами.

Ідентифіковано специфічні гідрохімічні маркери забруднення для кожного із досліджуваних об'єктів, що корелюють із фазами розкладу відходів та літологічною будовою субстрату. Екстремальне органічне навантаження в Ужгороді (перманганатна окиснюваність 5986 мг O_2/дм³) вказує на інтенсивну фазу ацидогенезу, тоді як "амонійний стрес" у Береговому – 541 мг/дм³ та висока мінералізація у Мукачеві – 10968 мг/дм³, свідчать про поступовий перехід процесів деструкції у стабільну анаеробну стадію, що супроводжується формуванням висококонцентрованих техногенних розсолів.

Доведено високу природну вразливість четвертинного водоносного горизонту, зумовлену значними фільтраційними властивостями порід (до 50 м/добу) та мінімальною потужністю зони аерації. Гідравлічний зв'язок між забрудненими водоносними горизонтами (аквіферами) та поверхневою мережею басейну річки Тиса, перетворює локальні зони забруднення на загрозу транскордонного масштабу в межах Панонського басейну.

Результати дослідження обґрунтовують необхідність термінової модернізації регіональної системи моніторингу та впровадження інноваційних технологій очищення фільтратів (зокрема методів зворотного осмосу та біохімічної стабілізації). Виконання даних заходів є обов'язковою умовою для виконання вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу та збереження ресурсного потенціалу підземних вод регіону для майбутніх поколінь, відповідно до цілей сталого розвитку ООН.

Список літератури:

1. Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y., & Al-Rekabi, W. S. (2009). Review of landfill leachate treatment. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 672–684.
URL: https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.672.684

2. Adamenko, O. (2022). Periodicity of earth development for forecasting the next manifestations of disaster floods. *Екологічна безпека та природокористування,* 2(42).
URL: https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.5-22

3. Benaddi, R., et al. (2022). Impact of landfill leachate on groundwater quality: A comparison between three different landfills in Morocco. *Journal of Ecological Engineering*, 23(11), 89–94. URL: https://doi.org/10.12911/22998993/153006

4. Blight, G. E., et al. (1999). The effect of waste composition on leachate and gas quality: A study in South Africa. *Waste Management & Research*, 17(2), 124–140.
URL: https://doi.org/10.1177/0734242X9901700208

5. Boels, D., & Fleming, G. (1993). Chemical time bombs from landfills: Appraisal and modelling. *Land Degradation & Development*, 4(4), 399–405.
URL: https://doi.org/10.1002/LDR.3400040425

6. Buss, S. R., et al. (2004). A review of ammonium attenuation in soil and groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37(4), 347–359.

URL: https://doi.org/10.1144/1470-9236/04-005

7. Christensen, T. H., et al. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry,* 16(7–8), 659–718. URL: https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2

8. European Parliament and Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities,* L 327, 1–73. URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj

9. F. Horváth, B. Musitz, A. Balázs, A. Végh, A. Uhrin, A. Nádor, B. Koroknai, N. Pap, T. Tóth, G. W órum. Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. 2014. Geothermics**.** P. 328-352. URL: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.009

10. Han, D., et al. (2016). Deep challenges for China's war on water pollution. *Environmental Pollution,* 218, 1222–1233. URL: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.078

11. Hók J., Kováč M., Pelech O., Pešková I., Vojtko R., Králiková S.The Alpine tectonic evolution of the Danube Basin and its northern periphery (southwestern Slovakia). 2016. Geologica Carpathica, 67, 5, P. 495–505.
URL: https://doi.org/10.1515/geoca-2016-0031

12 Irén Varsányi, Lajos Ó. Kovács & András Bálint. Hydraulic conclusions from chemical considerations: groundwater in sedimentary environments in the central part of the Panonian Basin, Hungary. *Hydrogeol J* 23, 423–435 (2015).
URL: https://doi.org/10.1007/s10040-014-1222-1

13. Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. Critical Reviews in *Environmental Science and Technology,* 32(4), 297–336.
URL: https://doi.org/10.1080/10643380290813462

14. Kjeldsen, P., & Christophersen, M. Composition of leachate from old landfills in Denmark. *Waste Management & Research,* 2001 19(3), 249–256.
URL: https://doi.org/10.1177/0734242X0101900306

15. Korol, K., Bojko, T., Kobko, Y., Tymchyshyn, A., Ruban, A., Popovych, V., Ilkiv, B., & Shuplat, T. Evaluation of the ecological state and phytomeliorative efficiency of vegetation at landfills. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2024. 26(2), 239–251.
URL: https://doi.org/10.12912/27197050/196621

16. Korol, K., Boyko, T., Kobko, Y., Nitsevych, O., Freiuk, D., & Lisovska, V. Landfills as sources of environmental and biological risk. 2025. URL:https://doi.org/10.32447/bcct.2025.13

17. Liu, B., et al. (2013). Removal of ammonia nitrogen from landfill leachate by ultrasound/ultraviolet process. *Applied Mechanics and Materials,* 448–453, 536–539.
URL:https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.536

18. Mádlné Szonyi, Judit and Müller, Imre and Nyúl, Katalin and Pogácsás, György and Simon, Szilvia and Tóth, József and Viszkok, János and Zsemle, Ferenc. Felszínalatti vízáramlások hatása a Pannon-medence közép-dunavölgyi régiójában tanulmányozható aktuogeológiai folyamatokra = Groundwater as a geological agent. Study of groundwater flow related actuogeological processes in the Kiskunság sector of the Danube valley. Project Report. OTKA. 2008. URL: http://real.mtak.hu/id/eprint/1710

19. Popovych, V. V. Environmental safety of soil genetic horizons in the impact zone of Lviv city landfill (Ukraine). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 1254, 012117, 2023. URL: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012117

20. Porowska, D. Impact of municipal landfill on groundwater in post-operational phase. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego,* 2019. 475, 183–190. URL: doi: 10.7306/bpig.22

21. Przydatek, G., Ciuła, J., Bârsan, N., Mirila, D. C., & Moșneguțu, E. (2025). Groundwater quality analysis: Assessing the impact of a closed landfill. *Applied Sciences,* 15(15), 8223.
URL: https://doi.org/10.3390/app15158223

22. Skrobala, V., Skyba, T. K., & Popovych, V. Ecological features of landfill vegetation formation in Lviv region. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu,* 2024, P. 86–93. URL: https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/086

23. Slack, R. J., et al. Household hazardous waste in municipal landfills: Contaminants in leachate. *Science of the Total Environment,* 2005. 337(1–3), P. 119–137.
URL:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.07.002

24. Vaverková, M. D. Landfill impacts on the environment-Review. *Geosciences,* 2019. 9(10), 431.
URL: https://doi.org/10.3390/geosciences9100431

25. Zhao, L., et al. Evaluation of groundwater quality and health risk assessment during the dry season. *Water*, 2025. 17(16), 2412.
URL: https://doi.org/10.3390/w17162412

26. Король, К. А., Попович, В. В., Шуплат, Т. І. Еколого-техногенна небезпека сміттєзвалищ Львівської області. Львів: ЛДУ БЖД, 2025URL: https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/17113

27. Снітинський, В. В., Зеліско, О., Хірівський, П. Р., Мазурак, О., Кректун, Б. В., & Корінець, Ю. Екологічний моніторинг антропогенно-порушених земель львівського полігону побутових відходів. *Agronomy,* 2022. 26, С. 27–30.
URL: https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.0

References:

1. Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y., & Al-Rekabi, W. S. (2009). Review of landfill leachate treatment. *American Journal of Applied Sciences*, 6(4), 672–684.
URL: https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.672.684

2. Adamenko, O. (2022). Periodicity of earth development for forecasting the next manifestations of disaster floods. *Environmental Safety and Natural Resource Management*, 2(42).
URL: https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.5-22

3. Benaddi, R., et al. (2022). Impact of landfill leachate on groundwater quality: A comparison between three different landfills in Morocco. *Journal of Ecological Engineering*, 23(11), 89–94. URL: https://doi.org/10.12911/22998993/153006

4. Blight, G. E., et al. (1999). The effect of waste composition on leachate and gas quality: A study in South Africa. *Waste Management & Research*, 17(2), 124–140.
URL: https://doi.org/10.1177/0734242X9901700208

5. Boels, D., & Fleming, G. (1993). Chemical time bombs from landfills: Appraisal and modelling. *Land Degradation & Development*, 4(4), 399–405. URL: https://doi.org/ 10.1002/ LDR.3400040425

6. Buss, S. R., et al. (2004). A review of ammonium attenuation in soil and groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 37(4), 347–359.
URL: https://doi.org/10.1144/1470-9236/04-005

7. Christensen, T. H., et al. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16(7–8), 659–718.
URL: https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2

8. European Parliament and Council of the European Union. (2000). Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327, 1–73.
URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj

9. F. Horváth, B. Musitz, A. Balázs, A. Végh, A. Uhrin, A. Nádor, B. Koroknai, N. Pap, T. Tóth, G. Wó rum. Evolution of the Pannonian basin and its geothermal resources. 2014. Geothermics**.** P. 328-352.
URL: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.009

10. Han, D., et al. (2016). Deep challenges for China's war on water pollution. *Environmental Pollution*, 218, 1222–1233.
URL: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.078

11. Hók J., Kováč M., Pelech O., Pešková I., Vojtko R., Králiková S.The Alpine tectonic evolution of the Danube Basin and its northern periphery (southwestern Slovakia). 2016. Geologica Carpathica, 67, 5, P. 495–505.
URL: doi: 10.1515/geoca-2016-0031

12. Irén Varsányi, Lajos Ó. Kovács & András Bálint. Hydraulic conclusions from chemical considerations: groundwater in sedimentary environments in the central part of the Panonian Basin, Hungary. *Hydrogeol J* 23, 423–435 (2015).
URL: https://doi.org/10.1007/s10040-014-1222-1

13. Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297–336.
URL: https://doi.org/10.1080/10643380290813462

14. Kjeldsen, P., & Christophersen, M. (2001). Composition of leachate from old landfills in Denmark. *Waste Management & Research*, 19(3), 249–256. URL: https://doi.org/ 10.1177/ 0734242X0101900306

15. Korol, K., Bojko, T., Kobko, Y., Tymchyshyn, A., Ruban, A., Popovych, V., Ilkiv, B., & Shuplat, T. (2024). Evaluation of the ecological state and phytomeliorative efficiency of vegetation at landfills. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 26(2), 239–251.
URL: https://doi.org/10.12912/27197050/196621

16. Korol, K., Boyko, T., Kobko, Y., Nitsevych, O., Freiuk, D., & Lisovska, V. (2025). Landfills as sources of environmental and biological risk. URL: https://doi.org/10.32447/ bcct. 2025.13

17. Liu, B., et al. (2013). Removal of ammonia nitrogen from landfill leachate by ultrasound/ultraviolet process. *Applied Mechanics and Materials*, 448–453, 536–539.
URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.448-453.536

18. Mádlné Szonyi, Judit and Müller, Imre and Nyúl, Katalin and Pogácsás, György and Simon, Szilvia and Tóth, József and Viszkok, János and Zsemle, Ferenc **(**2008). Felszínalatti vízáramlások hatása a Pannon-medence közép-dunavölgyi régiójában tanulmányozható aktuogeológiai folyamatokra = Groundwater as a geological agent. Study of groundwater flow related actuogeological processes in the Kiskunság sector of the Danube valley. Project Report. OTKA.
URL: http://real.mtak.hu/id/eprint/1710

19. Popovych, V. V. (2023). Environmental safety of soil genetic horizons in the impact zone of Lviv city landfill (Ukraine). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254, 012117.
URL: https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012117

20. Porowska, D. (2019). Impact of municipal landfill on groundwater in post-operational phase. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego*, 475, 183–190. URL: doi: 10.7306/bpig.22

21. Przydatek, G., Ciuła, J., Bârsan, N., Mirila, D. C., & Moșneguțu, E. (2025). Groundwater quality analysis: Assessing the impact of a closed landfill. *Applied Sciences,* 15(15), 8223.
URL: https://doi.org/10.3390/app15158223

22. Skrobala, V., Skyba, T. K., & Popovych, V. (2024). Ecological features of landfill vegetation formation in Lviv region. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 86–93.
URL: https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/086

23. Slack, R. J., et al. (2005). Household hazardous waste in municipal landfills: Contaminants in leachate. *Science of the Total Environment,* 337 (1–3), 119–137.
URL:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.07.002

24. Vaverková, M. D. (2019). Landfill impacts on the environment-Review. *Geosciences,* 9(10), 431.
URL: https://doi.org/10.3390/geosciences9100431

25. Zhao, L., et al. (2025). Evaluation of groundwater quality and health risk assessment during the dry season. *Water,* 17(16), 2412.
URL: https://doi.org/10.3390/w17162412

26. Korol, K. A., Popovych, V. V., Shuplat, T. I. (2025). Ekoloho-tekhnohenna nebezpeka smittiezvalyshch Lvivskoi oblasti. [Environmental and technogenic hazards of landfills in the Lviv region] Lviv: LDU BZhD.
URL:https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/17113 [in Ukrainian].

27. Snitynskyi, V. V., Zelisko, O., Khirivskyi, P. R., Mazurak, O., Krektun, B. V., & Korinets, Yu. (2022). Ekolohichnyi monitorynh antropohenno-porushenykh zemel lvivskoho polihonu pobutovykh vidkhodiv [Ecological monitoring of anthropogenically disturbed lands of the Lviv municipal waste landfill] *Agronomy,* 26, S. 27–30.
URL: https://doi.org/10.31734/agronomy2022.26.0

© В. В. Дочинець, К. А. Король, Т. В. Бойко, Т. І. Шуплат, Ю. В. Панімаш, 2026.
Науково-методична стаття.
Надійшла до редакції 27.03.2026.
Прийнята до друку 29.04.2026.
Опублікована 25.05.2026.