ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 504.53:574.64 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.365

© О.С. Ковров[1], Ю.Д. Іщенко [1], А.С. Богун[1], В.М. Тур[1], В.В. Федотов[1]
[1] Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВЗДОВЖ ТРАМВАЙНИХ КОЛІЙ М. ДНІПРО МЕТОДОМ БІОТЕСТУВАННЯ

O. Kovrov[1], https://orcid.org/0000-0003-0782-7767
Yu. Ishchenko[1] https://orcid.org/0009-0002-2000-0633
A. Bohun[1] https://orcid.org/0009-0008-0389-3234
V. Tur[1] https://orcid.org/0009-0001-4360-8441
V. Fedotov[1] https://orcid.org/0000-0003-3521-815X
[1] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF SOIL CONTAMINATION ALONG TRAM TRACKS IN THE DNIPRO CITY USING BIOTESTING METHOD

Мета. Екологічне оцінювання ґрунтів уздовж трамвайних колій м. Дніпро методом рослинного біотестування та обґрунтування видів, перспективних для біоіндикації й фіторемедіації транспортно-техногенних територій.

Методика. Досліджено дев'ять зразків поверхневого ґрунту, змішаних із річковим піском у співвідношенні 1:1, а також піщаний і чорноземний контрольні варіанти. Упродовж 28-добового експерименту оцінювали проростання насіння, довжину надземної частини й коренів *Lepidium sativum*, *Brassica napus*, *Festuca pratensis* та *Festuca rubra*. Додатково визначали pH, мінералізацію, електропровідність і окисно-відновний потенціал фільтрату.

Результати. Фільтрати мали нейтральну або слаболужну реакцію з pH 6,78–8,30 та додатний окисно-відновний потенціал 127–267 мВ. Між електропровідністю і мінералізацією встановлено майже функціональний зв'язок (r = 0,9999). Найбільше іонне навантаження виявлено у зразках № 8, 4 і 9. Найвищу схожість продемонстрували *F. pratensis* (85,3 %) і *F. rubra* (82,1 %), нижчу – *L. sativum* (61,1 %), *D. glomerata* (51,9 %) та *B. napus* (35,9 %). *L. sativum* характеризувався найбільш контрастною реакцією росту, а найвиразніше пригнічення зафіксовано у зразку № 4. *B. napus* формував розвинену кореневу систему в окремих субстратах. Обидва види *Festuca* зберігали стабільний ріст і високу толерантність до властивостей досліджуваних ґрунтів.

Наукова новизна. Встановлено особливості взаємозв'язку між фізико-хімічними показниками ґрунтового фільтрату та видоспецифічною ростовою реакцією тест-рослин. Обґрунтовано функціональне поєднання чутливого біоіндикатора, потенційного фітоекстрактора та толерантних багаторічних злаків для інтегрального оцінювання ґрунтів міських трамвайних коридорів.

Практична значимість. Результати дозволяють визначати ділянки з підвищеним іонним навантаженням і попередньо добирати рослини для природоорієнтованого відновлення транспортних територій. *L. sativum* рекомендовано використовувати як індикатор фітотоксичності, *B. napus* – для подальшого оцінювання фітоекстракційного потенціалу, а *F. pratensis* і *F. rubra* – як перспективні види для формування стійкого рослинного покриву та фітостабілізації ґрунту.

Ключові слова: *біотестування, трамвайні колії, техногенні ґрунти, фітотоксичність, фіторемедіація, тест-рослини.*

Вступ. Урбанізовані ґрунти виконують важливі екологічні функції, зокрема забезпечують розвиток міської рослинності, регулюють поверхневий стік, акумулюють вуглець і частково затримують техногенні забруднювачі [1–4]. Водночас у межах транспортних коридорів вони зазнають постійного механічного та хімічного навантаження, що спричиняє ущільнення, зміну кислотності, погіршення водно-повітряного режиму та накопичення потенційно токсичних речовин [5, 6].

Ґрунти вздовж трамвайних ліній є своєрідним акумуляційним середовищем, у якому поєднується вплив рейкового транспорту, автомобільного руху, комунальної інфраструктури та локальних промислових джерел. Накопичення забруднювачів у поверхневому шарі ґрунту може негативно впливати на проростання насіння, розвиток кореневих систем, формування рослинного покриву та стійкість міських фітоценозів. Тому екологічне оцінювання ґрунтів трамвайних коридорів має враховувати не лише потенційні джерела забруднення, а й фактичну біологічну реакцію рослин [7].

Перспективним інструментом такої оцінки є біотестування, яке дає змогу визначити інтегральну фітотоксичність ґрунту з урахуванням сумарної дії забруднювачів, їх біодоступності та властивостей ґрунтового середовища [8, 9]. Використання функціонально різних тест-рослин розширює можливості методу: *Lepidium sativum* може слугувати чутливим індикатором токсичного впливу, *Brassica napus* – характеризувати потенціал поглинання металів, а *Festuca rubra* і *Festuca pratensis* – стійкість багаторічних злаків до техногенних умов [10]. Такий підхід дозволяє поєднати діагностику екологічного стану ґрунтів із попереднім добором рослин для їх фітоекстракції або фітостабілізації. Отримані результати можуть стати науковою основою для розроблення природоорієнтованих екотехнологій відновлення ґрунтів і створення стійкого рослинного покриву вздовж трамвайних колій м. Дніпро.

Аналіз попередніх досліджень. Розвиток міського рейкового транспорту традиційно розглядається як один із напрямів зниження транспортного навантаження на урбанізовані території, оскільки електричний трамвай не утворює безпосередніх вихлопних газів уздовж маршруту [1, 2]. Унаслідок цього утворюються дрібнодисперсні частинки, збагачені Fe, Cu, Zn, Mn, Cr та іншими потенційно токсичними елементами, які можуть осідати на поверхні ґрунту поблизу колій [3, 4]. Дослідження механізмів зношування трамвайних коліс підтверджують одночасний розвиток контактно-втомного, адгезійного та абразивного зношування, що створює постійне джерело металовмісних частинок [5]. Дослідження аерозолів у трамваях також виявляли підвищені концентрації Fe і Mn, пов’язані зі стиранням рейок, тоді як Cu і Zn можуть надходити внаслідок зношування елементів контактної мережі [6].

Найдетальніше закономірності забруднення ґрунтів досліджено для магістральних залізниць, однак ці результати є методологічно важливими і для міських трамвайних ліній. Wiłkomirski et al. [1] показали значне накопичення Pb, Zn, Cu, Hg, Fe, Cd та інших елементів, а також поліциклічних ароматичних вуглеводнів у ґрунтах залізничного вузла. Джерелами металів автори визначили

стирання конструкцій рухомого складу, роботу контактної мережі, експлуатаційні матеріали та інші транспортні процеси. Malawska і Wiłkomirski [2] також встановили зменшення вмісту важких металів зі збільшенням відстані від залізничної колії. У дослідженні Brtnický et al. [3] ґрунти поблизу інтенсивно експлуатованої залізниці характеризувалися помірним або сильним забрудненням Cu, Ni, Pb і Zn; концентрації Cu, Ni та Zn істотно зменшувалися з віддаленням від колії. Подібну просторову залежність для Ni, Cd, Pb і Zn підтверджено й у роботі Safadoust et al. [4], де найбільше накопичення металів було характерним для поверхневого шару ґрунту безпосередньо поблизу колії.

Одним із перспективних тест-об'єктів для швидкого оцінювання фітотоксичності є *Lepidium sativum* L. Рослина характеризується швидким проростанням, коротким періодом формування проростків та вираженою реакцією кореневої системи на токсичні компоненти середовища [8, 9].

Інший функціональний тип рослин у запропонованій системі представлений *Brassica napus* L. На відміну від *L. sativum*, цей вид становить інтерес не тільки як тест-культура, але й як потенційний компонент для фітоекстракції [10, 11].

Для довготривалої екологічної реабілітації транспортних коридорів особливий інтерес становлять багаторічні злаки, здатні формувати розвинену мичкувату кореневу систему, щільний рослинний покрив та функціонувати за умов хронічного техногенного навантаження. На відміну від культур, орієнтованих на фітоекстракцію, для багатьох представників *Poaceae* більш характерною є фітостабілізація – утримання металів переважно в кореневій зоні та зменшення їх міграції, пиління і ерозійного перенесення [12, 13]. Зокрема, *Festuca pratensis* та *Festuca rubra* можуть відновлювати рослинний покрив на сильно забруднених металами ґрунтах після зниження біодоступності забруднювачів, накопичувати Zn і Cd, а також Cu, Ni і Cr [13, 14]. Загалом огляди щодо використання злаків у фіторемедіації показують, що їхні переваги включають швидке формування покриву, значну кореневу біомасу, толерантність до несприятливих ґрунтових умов та можливість швидкого відростання [16, 17].

Таким чином, аналіз літературних даних дає підстави розглядати ґрунти вздовж міських трамвайних колій як специфічні техногенні екотопи, де забруднення формується внаслідок поєднання абразивного зношування рейково-колісної системи. Водночас безпосередніх досліджень фітотоксичності саме ґрунтів уздовж міських трамвайних ліній значно менше, ніж досліджень магістральних залізниць, що формує чітку дослідницьку нішу. Використання чотирьох функціонально контрастних рослин дає змогу розширити традиційну схему біотестування: *L. sativum* може виконувати роль чутливого індикатора фітотоксичності, *B. napus* – культури з потенціалом фітоекстракції металів, а *F. rubra* та *F. pratensis* – толерантних багаторічних злаків із потенціалом фітостабілізації. Такий підхід дає змогу не лише оцінити екологічний стан ґрунтів трамвайних коридорів м. Дніпро, але й перейти від діагностики забруднення до попереднього обґрунтування екотехнології їх фіторемедіації.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Незважаючи на накопичені дані про забруднення ґрунтів у зоні впливу залізничного транспорту,

фітотоксичність ґрунтів безпосередньо вздовж міських трамвайних колій досліджена недостатньо. Залишається невирішеним питання інтегрального оцінювання їх екологічного стану з урахуванням сумарної дії та біодоступності забруднювачів, оскільки результати хімічного аналізу не завжди відображають реальну реакцію живих організмів. Водночас бракує порівняльних досліджень, які дали б змогу за єдиною системою біотестових показників розмежувати чутливі рослини-індикатори та стійкі види, придатні для фітоекстракції або фітостабілізації техногенно змінених ґрунтів трамвайних коридорів.

Метою дослідження є екологічне оцінювання забруднення ґрунтів уздовж трамвайних колій м. Дніпро методом рослинного біотестування та обґрунтування найбільш перспективних видів для екотехнології їх фіторемедіації. Для досягнення мети передбачено порівняти реакції *Lepidium sativum*, *Brassica napus*, *Festuca rubra* і *Festuca pratensis* за показниками проростання насіння та росту проростків, визначити відносну фітотоксичність досліджуваних ґрунтів, оцінити чутливість і толерантність тест-культур та встановити рослини, найбільш придатні для біоіндикації, фітоекстракції чи фітостабілізації забруднених ділянок уздовж трамвайних колій.

Методологія дослідження. Методологія дослідження передбачала поєднання рослинного біотестування та контролю фізико-хімічних характеристик фільтрату, що утворювався під час зволоження ґрунтових субстратів. Такий підхід дає змогу оцінити не лише інтегральну фітотоксичність ґрунтів уздовж трамвайних колій, а й потенційну рухливість водорозчинних компонентів забруднення. Експериментальна схема охоплювала відбір зразків, підготовку модельних субстратів, пророщування насіння, вирощування рослин упродовж 28 діб, щотижневий аналіз фільтрату та кінцеве визначення морфометричних показників рослин. Основні етапи експерименту наведено на рис. 1.

Для дослідження використано дев’ять зразків поверхневого ґрунту, відібраних уздовж трамвайних ліній м. Дніпро. Кожний зразок змішували з чистим річковим піском у співвідношенні 1:1, що забезпечувало однорідніщу структуру субстрату, достатню аерацію та стабільне проходження поливної води. Додатково сформовано два контрольні варіанти: чистий річковий пісок як інертний мінеральний субстрат і чорнозем як умовно сприятливе ґрунтове середовище. Експериментальні комірки складалися з двох здвоєних конічних поліпропіленових пробірок типу Falcon місткістю 50 мл, зібраних за принципом «пробірка в пробірці». Верхню пробірку заповнювали субстратом, а нижню використовували для накопичення фільтрату. У донній частині верхньої пробірки виконували отвір діаметром 1 мм для відведення надлишкової вологи та міграції розчинених речовин.

Для біотестування обрано чотири функціонально контрастні види рослин. Їх поєднання дало змогу зіставити реакцію чутливої індикаторної культури, рослини з потенціалом фітоекстракції та двох багаторічних злаків, перспективних для формування стійкого покриву й фітостабілізації ґрунтів трамвайних коридорів.



Рис. 1. Послідовність проведення біотестового експерименту з ґрунтами трамвайних коридорів м. Дніпро: *а* – ділянка трамвайної лінії маршруту № 1; *б* – експериментальний стенд зі здвоєних пробірок Falcon 50 мл та підготовленим ґрунтовим субстратом; *в* – біотестування насіння на ефективність пророщування; *г* – біотестовий експеримент станом на 15-ту добу.

Костриця червона повзуча (*Festuca rubra rubra*) – багаторічний довгокореневищний низовий злак родини тонконогових. Завдяки розгалуженій мичкуватій кореневій системі рослина утворює щільну дернину, закріплює поверхневий шар ґрунту та зменшує його ерозійне руйнування і пиління. Толерантність до помірно сухих умов, затінення та механічного навантаження робить цей вид перспективним для оцінювання фітостабілізаційного потенціалу на транспортно-техногенних територіях [12–14, 16].

Костриця лучна (*Festuca pratensis*) – багаторічний нещільнокущовий злак із добре розвиненою мичкуватою кореневою системою. Вид характеризується стійкістю до холода, періодичного перезволоження та інших несприятливих умов, хоча може бути чутливішим до дефіциту вологи. Його включення до біотесту забезпечує порівняльне оцінювання толерантності багаторічних злаків та їх придатності до довготривалої стабілізації забрудненого ґрунту [15, 16].

Хріниця сійна, або крес-салат (*Lepidium sativum*) – швидкорosла рослина родини капустяних, яка характеризується коротким періодом проростання та вираженою реакцією кореневої системи на токсичні компоненти середовища. Висока чутливість схожості насіння і початкового росту проростків дає змогу використовувати цей вид як ранній індикатор інтегральної фітотоксичності досліджуваних субстратів [8, 9].

Ріпак (*Brassica napus oleifera*) – трав'яниста рослина родини капустяних зі стрижневою кореневою системою та здатністю швидко формувати значну біомасу. Поєднання продуктивності й здатності поглинати потенційно токсичні елементи визначає перспективність ріпаку для попереднього оцінювання фітоекстракційного потенціалу. Водночас його реакція на дефіцит вологи дає змогу враховувати вплив водного режиму на результати біотестування [10, 11].

У кожну пробірку рівномірно висівали 10–12 насінин відповідної тест-рослини. Упродовж 28-добового експерименту всі дослідні та контрольні варіанти щодоби поливали 3 мл деіонізованої води. На 15-ту добу виконували проміжну фотофіксацію стану рослин. Один раз на тиждень із нижньої пробірки відбирали накопичений фільтрат і визначали pH, мінералізацію (мг/л), електропровідність (мкСм/см) та окисно-відновний потенціал (мВ). Сукупність цих показників використовували для характеристики зміни іонного складу розчину та потенційної міграції водорозчинних компонентів із ґрунтового субстрату.

На 28-му добу визначали кількість пророслого насіння, після чого рослини обережно вилучали із субстрату та окремо вимірювали довжину надземної частини і кореня, а також масу надземної та кореневої біомаси. Для кожного дослідного й контрольного варіанта розраховували середні значення морфометричних показників. Такий набір параметрів характеризує як ранню реакцію насіння на якість субстрату, так і подальшу здатність рослин підтримувати ріст та формування біомаси за техногенного навантаження.

Кількісну оцінку реакції тест-рослин проводили за схожістю насіння $G = (n_g/n_0) \times 100$ %, індексом толерантності $TI = (X_t/X_c) \times 100$ % та фітотоксичним ефектом $PE = [1 - (X_t/X_c)] \times 100$ %, де $n_(g)$ – кількість пророслих насінин; n_0 – кількість висіяних насінин; X_t – значення відповідного ростового або біометричного показника в дослідному варіанті; X_c – його значення у відповідному контролі. Розрахунки виконували окремо відносно піщаного та чорноземного контролів. Додатне значення *PE* характеризувало пригнічення росту, тоді як від'ємне вказувало на стимулювальний ефект субстрату.

Інтегральне оцінювання ґрунтів здійснювали шляхом зіставлення показників фільтрату зі схожістю, ростом і накопиченням біомаси чотирьох видів. Види з вираженим пригніченням проростання або росту розглядали як чутливі біоіндикатори, тоді як рослини з високим індексом толерантності та стабільним формуванням кореневої і надземної біомаси – як кандидати для подальших досліджень із фітостабілізації або фітоекстракції. Отже, запропонована методика забезпечує одночасне оцінювання екологічного стану ґрунтів трамвайних коридорів і попередній добір рослин для розроблення екотехнології їх фіторемедіації.

Результати. Перші результати було отримано у вегетаційному тесті зі схожості насіння обраних рослин. Додатково в цьому тесті на пророщування було використано насіння грястиці звичайної (*Dactylis glomerata*) як альтернативної для фіторемедіації багаторічної рослини (табл. 1).

Таблиця 1

Результати тесту на пророщування насіння

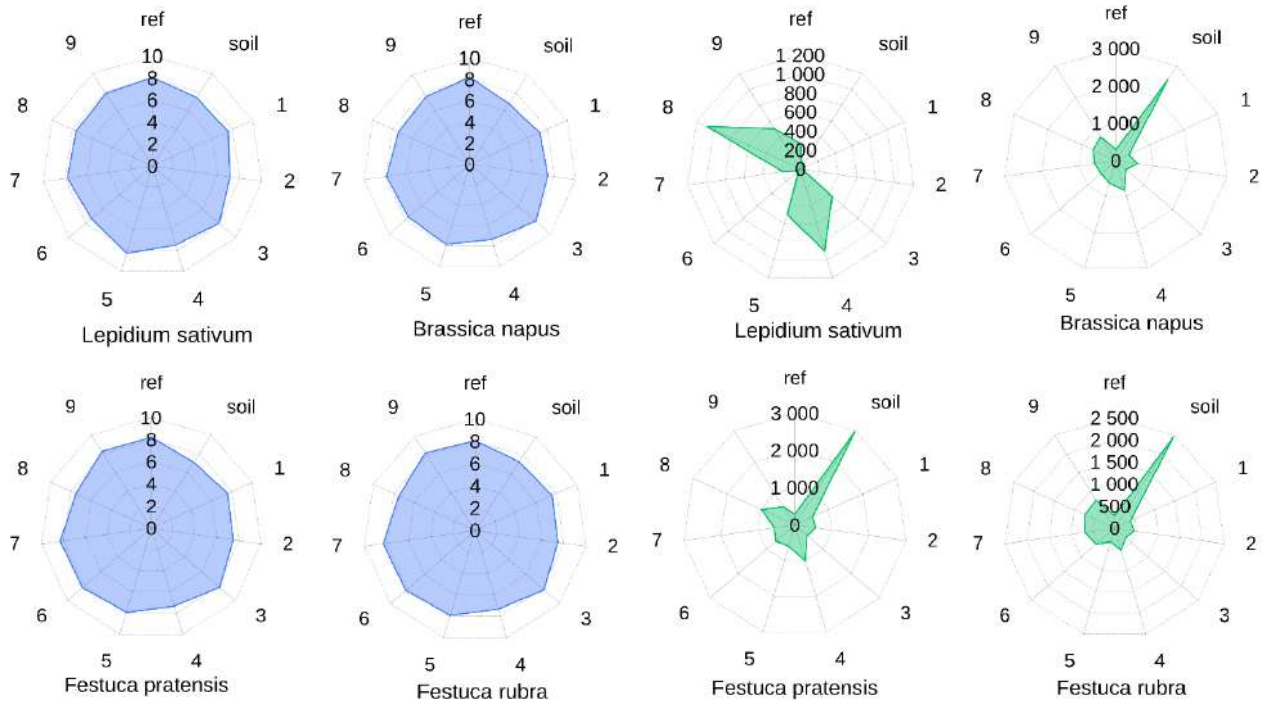
Вид рослини	Проростання, %
Festuca pratensis	85,3%
Festuca rubra	82,1%
Lepidium sativum	61,1%
Dactylis glomerata	51,9%
Brassica napus	35,9%

Результати тесту свідчать, що *F. pratensis* та *F. rubra* продемонстрували найкраще початкове проростання і є пріоритетними для подальшого оцінювання толерантності, росту та формування біомаси. Для *L. sativum* як чутливої індикаторної культури тест показав помірне проростання. *D. glomerata* та *B. napus* показали слабшу здатність до початкового росту та укорінення за умов проведеного тесту, що можливо пов’язано не лише з умовами субстрату, а й зі станом насіннєвого матеріалу.

Через 7 діб вегетаційного експерименту фільтрат усіх варіантів характеризувався нейтральною або слаболужною реакцією (pH 6,78–8,30; рис. 2, *а*). У контролі з піщаним субстратом (ref.) значення pH були стабільно слаболужними (8,05–8,21), тоді як у контролі з чистим ґрунтом (soil) вони змінювалися від 6,78 до 7,40. Серед дев’яти дослідних ґрунтів найнижчі середні за чотирма тест-рослинами значення встановлено для зразків 2 і 4 (відповідно 7,35 і 7,38); зразки 1 і 8 мали близькі проміжні значення (7,46–7,48), а для зразків 3, 5, 6, 7 і 9 характерною була більш виражена лужна реакція (7,84–8,12). Отже, підкислення фільтрату в досліджуваних ґрунтах не зафіксовано; водночас відмінності pH можуть впливати на рухливість та біодоступність металів і мають ураховуватися під час інтерпретації фітотоксичності.

Електропровідність і мінералізація змінювалися практично синхронно (коефіцієнт кореляції між усіма парними значеннями $r = 0{,}9999$), що підтверджує їх спільну інформативність як показників загального вмісту розчинених іонів (рис. 2, *б*, *в*). Для контроля з піщаним субстратом (ref.) одержано вузькі діапазони електропровідності 528–572 мкСм/см і мінералізації 265–287 мг/л. У контролі з чистим грунтом (soil) для *Brassica napus*, *Festuca pratensis* і *Festuca rubra* ці показники були значно вищими, а саме 4910–5920 мкСм/см та 2450–2980 мг/л відповідно. Тому чорноземний контроль не можна розглядати як «нульовий» за сольовим навантаженням: він відображає природний, потенційно багатший на водорозчинні сполуки ґрунтовий субстрат.

а) pH, безрозм. б) мінералізація, мг/л



в) електропроводність, мкСм/см г) окисно-відновний потенціал, мВ

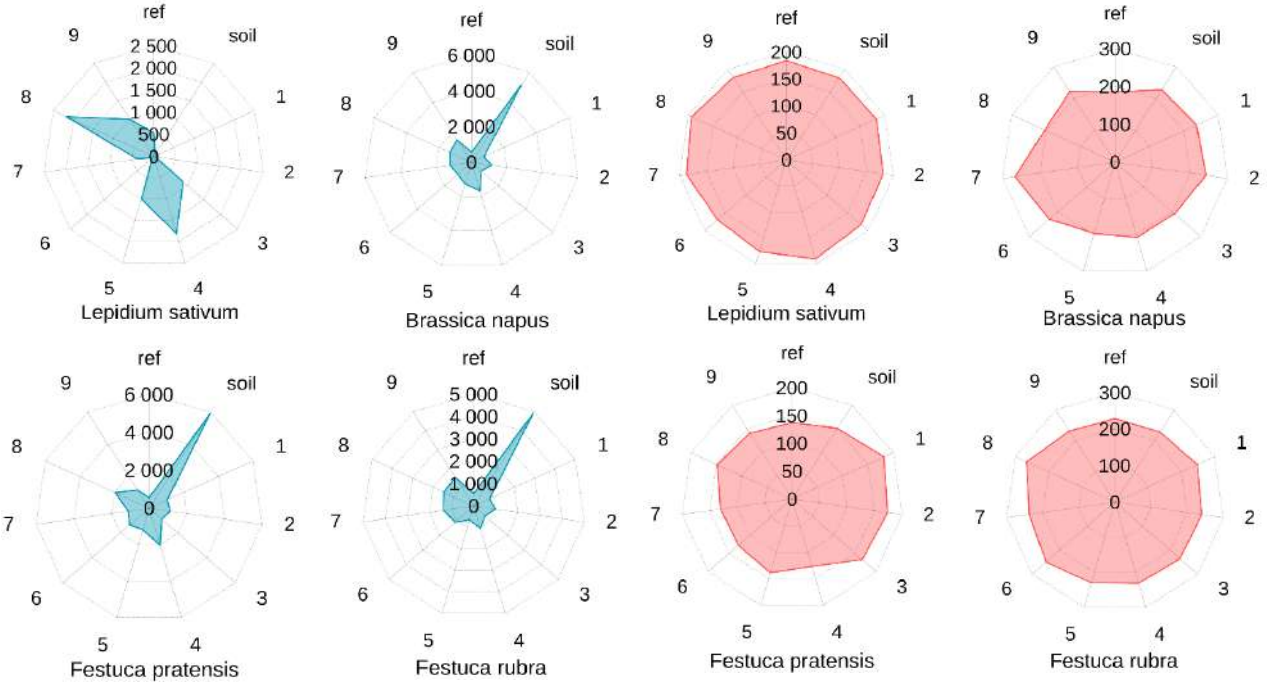


Рис. 2. Результати вимірювання хімічних показників фільтрату:
а – pH; *б* – мінералізація; *в* – електропроводність; *г* – окисно-відновний потенціал

Серед дев'яти дослідних ґрунтів найбільше середнє іонне навантаження встановлено для зразків 8 (1731 мкСм/см; 865,5 мг/л) і 4 (1632 мкСм/см; 815,3 мг/л), після яких ранжувався зразок 9 (1289 мкСм/см; 647,8 мг/л). Зразки 5 і 7 формували проміжну групу з електропровідністю близько 1013–1020 мкСм/см

і мінералізацією 498,5–511,3 мг/л. Нижчі середні значення одержано для зразків 6 (876 мкСм/см; 444,5 мг/л), 2 (826 мкСм/см; 401,0 мг/л), 3 (792 мкСм/см; 394,8 мг/л) та 1 (673 мкСм/см; 334,8 мг/л). Підвищення обох показників у зразках 4 і 8 простежувалося для більшості тест-рослин, тому ці точки доцільно вважати пріоритетними для подальшого визначення водорозчинних форм металів і сольового складу.

Водночас між видами виявлено суттєву варіабельність. У варіантах із *Lepidium sativum* для зразків 1, 2 і 6 електропровідність становила лише 37–95 мкСм/см, а мінералізація – 19–47 мг/л, тоді як для інших трьох видів у тих самих ґрунтах ці діапазони дорівнювали відповідно 767–1337 мкСм/см та 379–670 мг/л. Нетипово низькі значення для *L. sativum* зафіксовано також у контролі з чистим ґрунтом (62 мкСм/см і 30 мг/л). Такий контраст може бути пов'язаний із видоспецифічною зміною складу ризосферного розчину та раннім поглинанням іонів, проте за наявними одиничними вимірюваннями його не слід однозначно трактувати як ефект фітоекстракції; необхідні повторні визначення, контроль об'єму фільтрату та статистична перевірка.

Окисно-відновний потенціал у всіх варіантах залишався додатним і становив 127–267 мВ (див. рис. 2, *г*), що вказує на переважання окисних умов у фільтраті. Найбільші значення зафіксовано у зразку 7 з *Brassica napus* (267 мВ) та у зразку 8 з *Festuca rubra* (266 мВ), а найменше – у зразку 4 з *Festuca pratensis* (127 мВ). Загалом фільтрати з *F. rubra* характеризувалися найвищими й відносно стабільними значеннями ОВП (229–266 мВ), тоді як для *F. pratensis* вони були нижчими (127–182 мВ). Це свідчить про можливий вплив виду рослини та сформованого ним ризосферного середовища на перебіг окисно-відновних процесів, але причинний механізм потребує окремого експериментального підтвердження.

Узагальнення результатів першого тижня показує, що за сукупністю показників фільтрату найбільш контрастними серед трамвайних ґрунтів є зразки 4, 8 і 9. Проте електропровідність і мінералізація відображають сумарну кількість розчинених солей, а не безпосередній вміст важких металів чи рівень токсичності. Слаболужна реакція може зменшувати рухливість частини катіонних металів унаслідок сорбції та осадження, але фактична біодоступність визначається також формою сполук, органічною речовиною і взаємодією компонентів. Тому результати фільтрату слід розглядати як скринінгову фізико-хімічну характеристику й інтерпретувати разом із показниками проростання, росту та накопичення біомаси.

За результатами 28-добового вегетаційного тесту встановлено виражену видоспецифічну реакцію рослин на властивості досліджуваних ґрунтів (табл. 2).

Загалом чорноземний контроль К (г) забезпечував кращий розвиток рослин порівняно з піщаним К (п), однак для окремих зразків ґрунту спостерігалося стимулювання росту кореневої системи.

Lepidium sativum характеризувався найбільш контрастною реакцією, що підтверджує його придатність як чутливого індикатора фітотоксичності. Середня довжина стебла у зразках № 1–9 змінювалася від 1,1 до 6,3 см, а кореня – від 1,0 до 4,8 см. Найсприятливішими для розвитку надземної частини були зразки № 5,

2 і 6, тоді як максимальну довжину кореня зафіксовано у зразку № 2. Найсильніше пригнічення відзначено у зразку № 4, де довжина стебла і кореня становила відповідно лише 1,1 та 1,0 см. Низькі показники також отримано у зразках № 7 і 8. Коренева система крес-салату в усіх досліджуваних ґрунтах була істотно менш розвиненою, ніж у чорноземному контролі, що може свідчити про її високу чутливість до комплексу ґрунтових чинників.

Таблиця 2

Результати вегетаційного тесту з досліджуваними рослинами

Lepidium sativum							*Brassica napus*						
№ зразка	Стебло (см)			Корінь (см)			№ зразка	Стебло (см)			Корінь (см)		
	макс	мін	сер	макс	мін	сер		макс	мін	сер	макс	мін	сер
К (п)	3,5	2,3	2,9	4,5	3,0	3,8	К (п)	6,0	2,5	4,3	3,0	1,0	2,0
К (г)	8,5	4,5	6,5	14,0	7,0	10,5	К (г)	12,0	8,5	10,3	10,5	3,0	6,8
1	6,0	2,0	4,0	7,5	1,5	4,5	1	6,5	4,0	5,3	7,0	3,0	5,0
2	6,5	5,0	5,8	6,0	3,5	4,8	2	8,0	5,0	6,5	12,5	6,0	9,3
3	6,5	4,5	5,5	4,5	2,5	3,5	3	9,0	5,0	7,0	11,0	4,0	7,5
4	1,5	0,7	1,1	1,5	0,5	1,0	4	7,5	6,0	6,8	5,0	2,5	3,8
5	8,5	4,0	6,3	4,5	2,5	3,5	5	7,5	4,5	6,0	7,0	2,5	4,8
6	7,0	4,5	5,8	2,5	1,5	2,0	6	8,0	4,5	6,3	4,5	2,5	3,5
7	3,2	1,5	2,4	3,0	1,0	2,0	7	11,0	6,0	8,5	7,0	3,0	5,0
8	2,5	1,5	2,0	2,5	1,0	1,8	8	11,0	6,0	8,5	7,5	3,0	5,3
9	5,5	2,5	4,0	4,0	2,0	3,0	9	9,0	5,0	7,0	10,0	4,5	7,3
Festuca pratensis							*Festuca rubra*						
№ зразка	Стебло (см)			Корінь (см)			№ зразка	Стебло (см)			Корінь (см)		
	макс	мін	сер	макс	мін	сер		макс	мін	сер	макс	мін	сер
К (п)	14,5	10,9	12,7	8,1	7,2	7,7	К (п)	11,2	8,8	10,0	5,4	3,6	4,5
К (г)	18,6	14,0	16,3	15,5	9,9	12,7	К (г)	15,3	11,9	13,6	12,8	6,3	9,6
1	11,6	9,2	10,4	13,1	10,1	11,6	1	8,3	7,1	7,7	10,4	6,5	8,5
2	13,6	10,5	12,1	17,6	13,0	15,3	2	10,3	8,4	9,4	14,9	9,4	12,2
3	15,4	10,3	12,9	17,4	11,5	14,5	3	12,1	8,2	10,2	14,7	7,9	11,3
4	12,2	11,1	11,7	11,0	9,1	10,1	4	9,0	8,9	9,0	8,3	5,5	6,9
5	12,4	9,6	11,0	12,9	9,2	11,1	5	9,1	7,5	8,3	10,2	5,6	7,9
6	14,9	9,3	12,1	10,2	9,5	9,9	6	11,6	7,2	9,4	7,5	5,9	6,7
7	17,8	11,1	14,5	12,8	9,8	11,3	7	14,5	9,0	11,8	10,1	6,2	8,2
8	18,1	11,2	14,7	13,5	10,0	11,8	8	14,8	9,1	12,0	10,8	6,4	8,6
9	15,3	10,8	13,1	16,1	10,8	13,5	9	12,0	8,7	10,4	13,4	7,2	10,3

Brassica napus продемонстрував більш стабільний розвиток. Середня довжина стебла варіювала від 5,3 до 8,5 см, кореня – від 3,5 до 9,3 см. Найбільшу довжину надземної частини встановлено у зразках № 7 і 8, а максимальний розвиток коренів – у зразку № 2, де їх довжина перевищувала показник чорноземного контролю. Сприятливими для ризогенезу також були зразки № 3 і 9. Найменшу довжину кореня зафіксовано у зразку № 6, а відносно слабкий розвиток кореневої системи – у зразку № 4. Отримані результати свідчать про достатню толерантність ріпаку та підтверджують перспективність подальшого оцінювання його фітоекстракційного потенціалу.

Festuca pratensis характеризувалася високою ростовою стійкістю: довжина стебла становила 10,4–14,7 см, а кореня – 9,9–15,3 см. Максимальний розвиток надземної частини спостерігався у зразках № 8 і 7, тоді як найінтенсивніше коренеутворення – у зразках № 2, 3 і 9. У зразках № 2 і 3 довжина коренів перевищувала обидва контрольні варіанти. Навіть мінімальні значення, отримані для зразків № 1 і 6, залишалися порівняно високими, що вказує на значну адаптивність цього виду до властивостей техногенно змінених ґрунтів.

Для *Festuca rubra* довжина стебла змінювалася від 7,7 до 12,0 см, а кореня – від 6,7 до 12,2 см. Найкращий розвиток надземної частини встановлено у зразках № 8 і 7, кореневої системи – у зразках № 2, 3 і 9. Найнижчі показники відзначено для стебла у зразку № 1 та для кореня у зразку № 6. Водночас довжина коренів у всіх досліджуваних ґрунтах перевищувала піщаний контроль, що свідчить про достатню стійкість виду. Отже, обидва види *Festuca* продемонстрували найстабільніший розвиток і можуть розглядатися як перспективні компоненти екотехнології фітостабілізації ґрунтів уздовж трамвайних колій, тоді як зразок № 4 виявив найбільш виражений фітотоксичний вплив, особливо на *L. sativum*.

Висновки. Поєднання аналізу фізико-хімічних показників фільтрату з рослинним біотестуванням дало змогу комплексно оцінити дев’ять зразків ґрунту, відібраних уздовж трамвайних колій м. Дніпро. Фільтрати характеризувалися нейтральною або слаболужною реакцією (pH 6,78–8,30) та переважно окисними умовами. Між електропровідністю і мінералізацією встановлено тісний зв’язок (r = 0,9999). Найбільше іонне навантаження виявлено у зразках № 8, 4 і 9, які потребують подальшого визначення сольового складу та водорозчинних форм потенційно токсичних елементів.

Результати вегетаційного тесту засвідчили видоспецифічну реакцію рослин. Найвищу схожість продемонстрували *Festuca pratensis* (85,3 %) і *Festuca rubra* (82,1 %), тоді як для *Lepidium sativum*, *Dactylis glomerata* та *Brassica napus* вона становила відповідно 61,1; 51,9 і 35,9 %. Найбільш чутливим видом виявився *L. sativum*, особливо виражене пригнічення якого зафіксовано у зразку № 4. *B. napus* характеризувався стабільнішим розвитком, а інтенсивне формування кореневої системи в окремих зразках підтверджує доцільність подальшого оцінювання його фітоекстракційного потенціалу.

Найвищу загальну толерантність продемонстрували *F. pratensis* і *F. rubra*, які зберігали стабільний ріст і формували розвинену кореневу систему. Обидва види можна рекомендувати як перспективні компоненти екотехнології фітостабілізації ґрунтів трамвайних коридорів, тоді як *L. sativum* – як чутливий

біоіндикатор їх фітотоксичності. Подальші дослідження мають передбачати визначення вмісту та рухомих форм важких металів у ґрунті, аналіз їх накопичення в рослинній біомасі й польову апробацію відібраних видів.

Перелік посилань

1. Wiłkomirski, B., Sudnik-Wójcikowska, B., Galera, H., Wierzbicka, M., & Malawska, M. (2011). Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution. *Water, Air, & Soil Pollution, 218*, 333–345. https://doi.org/10.1007/s11270-010-0645-0.
2. Malawska, M., & Wiłkomirski, B. (2000). Soil and plant contamination with heavy metals in the area of the old railway junction Tarnowskie Góry and near two main railway routes. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny, 51*(3), 259–267.
3. Brtnický, M., Pecina, V., Juřička, D., Kowal, P., Vašinová Galiová, M., Baltazár, T., & Radziemska, M. (2022). Can rail transport-related contamination affect railway vegetation? A case study of a busy railway corridor in Poland. *Chemosphere, 293*, 133521. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133521.
4. Safadoust, A., Khaleghi, S., & Kolahchi, Z. (2025). Environmental risks of heavy metals in railway soils: Challenges to ecosystem management. *Science of the Total Environment, 974*, 179217. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179217.
5. Wojciechowski, Ł., Gapiński, B., Firlik, B., & Mathia, T. G. (2020). Characteristics of tram wheel wear: Focus on mechanism identification and surface topography. *Tribology International, 150*, 106365. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106365.
6. Papp, E., Angyal, A., Furu, E., Szoboszlai, Z., Török, Z., & Kertész, Z. (2022). Case studies of aerosol pollution in different public transport vehicles in Hungarian cities. *Atmosphere, 13*(5), 692. https://doi.org/10.3390/atmos13050692.
7. Hagner, M., Romantschuk, M., Penttinen, O.-P., Egfors, A., Marchand, C., & Augustsson, A. (2018). Assessing toxicity of metal contaminated soil from glassworks sites with a battery of biotests. *Science of the Total Environment, 613–614*, 30–38. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.121.
8. Schulz, V. M., Scherr, C., Baumgartner, S., & Tournier, A. (2025). A versatile *Lepidium sativum* bioassay for use in ecotoxicological studies. *Scientific Reports, 15*, 32653. https://doi.org/10.1038/s41598-025-17215-7.
9. Abdel-Aty, A. M., Elsayed, A. M., Gad, A. A. M., Barakat, A. Z., & Mohamed, S. A. (2023). Antioxidant system of garden cress sprouts for using in bio-monitor of cadmium and lead contamination. *Scientific Reports, 13*, 10445. https://doi.org/10.1038/s41598-023-37430-4.
10. Grispen, V. M. J., Nelissen, H. J. M., & Verkleij, J. A. C. (2006). Phytoextraction with *Brassica napus* L.: A tool for sustainable management of heavy metal contaminated soils. *Environmental Pollution, 144*(1), 77–83. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.007.
11. Kniuipytė, I., Dikšaitytė, A., Praspaliauskas, M., Pedišius, N., & Žaltauskaitė, J. (2023). Oilseed rape (*Brassica napus* L.) potential to remediate Cd contaminated soil under different soil water content. *Journal of Environmental Management, 325*, 116627. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116627.
12. Gray, C. W., Dunham, S. J., Dennis, P. G., Zhao, F. J., & McGrath, S. P. (2006). Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud. *Environmental Pollution, 142*(3), 530–539. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.017.
13. Gajić, G., Djurdjević, L., Kostić, O., Jarić, S., Mitrović, M., Stevanović, B., & Pavlović, P. (2016). Assessment of the phytoremediation potential and an adaptive response of *Festuca rubra* L. sown on fly ash deposits: Native grass has a pivotal role in ecorestoration management. *Ecological Engineering, 93*, 250–261. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.021.
14. Pusz, A., Wiśniewska, M., & Rogalski, D. (2021). Assessment of the accumulation ability of *Festuca rubra* L. and *Alyssum saxatile* L. tested on soils contaminated with Zn, Cd, Ni, Pb, Cr, and Cu. *Resources, 10*(5), 46. https://doi.org/10.3390/resources10050046.
15. Korzeniowska, J., & Stanislawska-Glubiak, E. (2024). The suitability of several grasses for the remediation of hotspots affected by cadmium contamination. *Agriculture, 14*(7), 1127. https://doi.org/10.3390/agriculture14071127.

16. Rabêlo, F. H. S., Vangronsveld, J., Baker, A. J. M., van der Ent, A., & Alleoni, L. R. F. (2021). Are grasses really useful for the phytoremediation of potentially toxic trace elements? A review. *Frontiers in Plant Science, 12*, 778275. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.778275.
17. Furu, E., Katona-Szabó, I., Angyal, A., Szoboszlai, Z., Török, Z., & Kertész, Z. (2015). The effect of the tramway track construction on the aerosol pollution in Debrecen, Hungary. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 363*, 124–130. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.08.014.

ABSTRACT

Purpose. To assess the environmental condition of soils along tram tracks in the city of Dnipro using plant biotesting and to identify species suitable for bioindication and phytoremediation of transport-affected urban areas.

The methods. Nine surface soil samples mixed with river sand at a ratio of 1:1 were investigated together with sand and chernozem reference treatments. During a 28-day experiment, seed germination and the lengths of shoots and roots of *Lepidium sativum*, *Brassica napus*, *Festuca pratensis*, and *Festuca rubra* were evaluated. The pH, total dissolved solids, electrical conductivity, and oxidation-reduction potential of the filtrate were additionally determined.

Findings. The filtrates had a neutral to slightly alkaline reaction, with pH values of 6.78–8.30, and positive oxidation-reduction potentials of 127–267 mV. An almost perfect correlation was found between electrical conductivity and total dissolved solids (r = 0.9999). The highest ionic loads were recorded in samples No. 8, 4, and 9. The greatest germination rates were observed for *F. pratensis* (85.3%) and *F. rubra* (82.1%), followed by *L. sativum* (61.1%), *D. glomerata* (51.9%), and *B. napus* (35.9%). *L. sativum* showed the most contrasting growth response, with the strongest inhibition recorded in sample No. 4. *B. napus* developed an extensive root system in selected substrates. Both *Festuca* species maintained stable growth and high tolerance to the properties of the investigated soils.

The originality. Relationships between the physicochemical characteristics of soil filtrates and the species-specific growth responses of the test plants were established. A functional combination of a sensitive bioindicator, a potential phytoextractor, and tolerant perennial grasses was substantiated for the integrated assessment of soils within urban tram corridors.

Practical implementation. The results allow areas with elevated ionic loads to be identified and plants to be preliminarily selected for the nature-based restoration of transport-affected sites. *L. sativum* is recommended as an indicator of phytotoxicity, *B. napus* for further assessment of phytoextraction potential, and *F. pratensis* and *F. rubra* as promising species for establishing a stable vegetation cover and phytostabilizing the soil.

Keywords: *biotesting, tram tracks, technogenic soils, phytotoxicity, phytoremediation, test plants.*

дата першого надходження статті до видання	17.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	25.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. O. Kovrov, Yu. Ishchenko, A. Bohun, V. Tur, V. Fedotov
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.