

О. О. Дідур¹✉, А. Ф. Кулік¹, Л. В. Доценко²

¹Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
просп. Науки, 72, м. Дніпро, Україна, 49045

²Дніпровський державний аграрно-економічний університет,
вул. Сергія Єфремова, 25, м. Дніпро, Україна, 49600

ОЦІНКА МОРФОМЕТРИЧНИХ ЗМІН ПАРОСТКІВ ГРАВІЛАТУ МІСЬКОГО (*GEUM URBANUM*) ЗА УМОВ МОДЕЛЮВАННЯ ПОПАДАННЯ ПІДВИЩЕНИХ ДОЗ КАДМІЮ В ҐРУНТ УНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ

Висвітлено, що військові дії чинять значний вплив на біосферу на різних екологічних рівнях, істотно змінюючи екосистеми та їхні компоненти, а міра їх впливу залежить від характеру порушень, стійкості біологічних систем і часових рамок конфлікту. Через військову агресію прискореними темпами відбувається деградація земель, що становить серйозну загрозу продовольчій безпеці, знищуються ландшафтні ресурси, дерева, тваринний світ, порушується структура ґрунту, погіршуються умови існування наземної та підземної біоти. Показано, що військова агресія призводить до накопичення потенційно токсичних елементів, таких як кадмій, у ґрунті, рослинах. Пошкодження рослин проявляється у вигляді змін їхнього росту та фізіологічних характеристик, особливо за підвищеної концентрації кадмію, який легко поглинається корінням рослин. Оцінено вплив хімічного забруднення ґрунтів (на прикладі потенційно токсичного кадмію) на індикаторний вид лісової рослини. В умовах вегетаційного дослідження вивчено вплив кадмію на низку основних морфометричних характеристик паростків рослини гравілату міського (*Geum urbanum* L.), який є широко розповсюдженим по всій території України багаторічним трав'янистим лісовим видом. Досліди показали, що після 10 діб впливу кадмію в дозі (відносно гранично допустимої концентрації) 1ГДК, 2ГДК, 4ГДК (3, 6 та 12 мг/кг субстрату) у рослин спостерігається статистичне достовірне гальмування росту їх надземної і підземної частини. З'ясовано, що маса паростків, їх висота та довжина коренів зі збільшенням концентрації токсиканту зменшуються, що підтверджено дисперсійним аналізом та множинним порівнянням середніх значень показників. Моделювання дії кадмію у дозі 5ГДК (15 мг/кг субстрату) також виявило негативний вплив на вказані морфометричні характеристики дослідної рослини. За результатами моделювання побудовано працездатні моделі лінійної регресії з високим ступенем апроксимації, які прогнозують зниження значень досліджених морфометричних характеристик паростків індикаторної рослини порівняно з дозою кадмію 4ГДК (12 мг/кг субстрату). Припускається, що буферна здатність ґрунтів по відношенню до потенційно токсичного кадмію виявляє більший рівень буферної ємності на відміну від піщаного субстрату, а отже, і більшу стійкість до деградації. Результати експериментів свідчать, що досліджений

✉ E-mail: didur@ua.fm

DOI: 10.15421/442406

суглинковий гумусований ґрунт проявляє більш високий рівень буферної здатності до впливу кадмію порівняно з піском, на якому спостерігаються менші середні значення маси паростків модельної рослини, її висоти та довжини підземної частини.

Ключові слова: військові конфлікти, забруднення ґрунту, потенційно токсичні елементи, гранично допустима концентрація, фітотоксичність, буферна здатність ґрунту.

O. O. Didur¹✉, A. F. Kulik¹, L. V. Dotsenko²

¹*Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine*

²*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

ASSESSMENT OF MORPHOMETRIC CHANGES IN *GEUM URBANUM* SEEDLINGS UNDER CONDITIONS OF SIMULATED CADMIUM SOIL CONTAMINATION DUE TO MILITARY ACTIONS

It has been highlighted that military actions have a significant impact on the biosphere at various ecological levels, substantially altering ecosystems and their components. The extent of their impact depends on the nature of the disturbances, the resilience of biological systems, and the time frames of the conflict. Military aggression accelerates land degradation, posing a serious threat to food security, destroying landscape resources, trees, and wildlife, disrupting soil structure, and deteriorating conditions for terrestrial and underground biota. It has been shown that military aggression leads to the accumulation of potentially toxic elements, such as cadmium, in the soil and plants. Plant damage manifests as changes in their growth and physiological characteristics, especially under increased concentrations of cadmium, which is easily absorbed by plant roots. The impact of soil chemical contamination (specifically potentially toxic cadmium) on an indicator forest plant species was assessed. In vegetation experiments, the effect of cadmium on several key morphometric characteristics of *Geum urbanum* L. seedlings, a widely distributed perennial herbaceous forest species across Ukraine, was studied. Experiments showed that after 10 days of exposure to cadmium at doses (relative to the maximum permissible concentration) of 1MPC, 2MPC, 4MPC (3, 6, and 12 mg/kg of substrate), plants exhibited statistically significant inhibition of growth in both their aboveground and underground parts. It has been found that the mass of seedlings, their height, and root length decrease with increasing concentration of the toxicant, as confirmed by variance analysis and multiple comparisons of mean values. Modeling the action of cadmium at a dose of 5MPC (15 mg/kg of substrate) also revealed a negative impact on the specified morphometric characteristics of the test plant. Based on the modeling results, functional linear regression models with a high degree of approximation have been constructed, predicting the reduction in the values of the studied morphometric characteristics of the indicator plant seedlings compared to the cadmium dose of 4MPC (12 mg/kg of substrate). It is assumed that the buffering capacity of soils with respect to potentially toxic cadmium exhibits a higher level of buffering capacity compared to a sandy substrate, and therefore greater resistance to degradation. The experimental results indicate that the studied loamy humus soil shows a higher

buffering capacity against cadmium compared to sand, where the average values of the seedling mass, height, and root length of the model plant are lower.

Key words: military conflicts, soil contamination, potentially toxic elements, maximum permissible concentration, phytotoxicity, soil buffering capacity.

Вступ

Війни мають значний вплив на біосферу в різних екологічних масштабах. Міра впливу воєнних дій на екосистему та її складові популяції повністю залежить від характеру порушень, чутливості та стійкості біологічної системи та часових рамок впливу. Отже, воєнний конфлікт може мати широкий спектр впливів на біорізноманіття та структуру і функції екосистем [17]. За даними Упсальської програми даних щодо конфліктів, світ переживає численні війни. Тільки у 2021 році у світі відбулося 54 конфлікти на державному рівні [18]. Діяльність, пов'язана з проведенням збройного конфлікту, має суттєвий драматичний вплив на соціальні та економічні аспекти життя окремої людини і суспільства в цілому, а також негативний на природні системи [13]. Аналіз таких впливів на навколишнє середовище свідчить, що військова агресія завдає суттєвої шкоди ландшафтним ресурсам. Зокрема, в результаті повітряного бомбардування знищуються дерева, порушуються ґрунтові ландшафти та здоров'я ґрунтів. Крім того, війна знищує тваринний світ та екологічні ніші тварин, сприяє забрудненню атмосфери і води [18]. Отже, такий вплив охоплює як підземну, так і наземну біоту.

Наслідки воєнних конфліктів для властивостей ґрунтів у багатьох випадках є значними, особливо в час, коли зброя стає все більш руйнівною. Загальноприйнятим результатом воєнних дій для довкілля є руйнування наземних [8] і водних екосистем [24]. Можливість загоєння екологічних (і соціальних) ран значною мірою залежить від впливу воєнних дій на якість ґрунтів. Такий вплив, зазвичай негативний, варіює від короточасного зниження родючості до повної її втрати ґрунтом, а інколи до знищення самого ґрунту [8].

Постраждали від воєнних дій території є осередками накопичення неорганічних забруднювальних речовин (здебільшого такі потенційно токсичні елементи, як As, Cd, Cu, Hg, Mn, Pb, Sb і Zn) [20, 22], що відбувається внаслідок вивітрювання боєприпасів. На подібних територіях можуть бути виявлені органічні забруднювачі, отримані через розливання мазуту, похідні вибухових речовин і ракетного пального, бойові отруйні речовини тощо [22, 26]. Серед форм фізичної деградації та руйнування ґрунту – будівництво оборонних споруд, риття траншей або тунелів, ущільнення ґрунту в результаті пересування військової техніки та військ, а також утворення кратерів через вибухи бомб [14, 20], що завдає шкоду властивостям ґрунту, порушує кругообіг поживних речовин, призводить у цілому до зміни ландшафту, фізичної структури ґрунту. Так, Vonchkovskyi et al. [7] показали, що ґрунтовий покрив орних земель Київської територіальної громади (Чернігівська область), в межах якої бойові дії велися тільки місяць, нараховує 2912 воронко діаметром від 0,5 до 13,8 м. Виходячи із морфометричних параметрів воронко ці дослідники розрахували об'єм переміщеного ґрунту, який становить 3136 м³. У зоні бомбтурбації ґрунт зазнав перевідкладення, переміщення, ущільнення, деформації і сильного забруднення.

Серед інших негативних біологічних наслідків військових конфліктів відзначають трансформацію рослинності та його покриву, знищення природних та урбофітоценозів. За повідомленням Lapan, McBride [16], в Європі руйнування під час Першої світової війни майже не торкнулися великих міст. Саме в ході Другої світової війни руйнування міст та їхніх міських дерев, парків і зелених насаджень досягло рівня, небаченого за багато століть. А японські міста були або спалені через повітряні бомбардування (Токіо), або «розпилені» (Хіросіма і Нагасаки). Так, до кінця війни популяція вуличних дерев, наприклад, у Токіо скоротилася зі 105 тис. до приблизно 42 тис. У наступні роки після війни популяція вуличних дерев у Токіо скоротилася до 35 тис. через подальшу загибель дерев і вирубку дерев на дрова [9].

Порушення природного середовища внаслідок бойових дій призвело до суттєвої трансформації рослинності. За аналітичним оглядом Fedenko [12] з посиланням на дослідження Poberezhna, Stanetsky [21], активні бойові дії (з 2014 р.) на деяких заповідних територіях сходу України призвели до практично повного знищення рослинності, у тому числі ендемічних і занесених до Червоної книги України видів; той самий автор із посиланням на Zibtsev et al. [29] акцентував аспект значних пошкоджень лісових екосистем, які потрапили до зони бойових дій. Особливістю трансформації рослинного покриву, що зазнали воєнних дій, є посилення рудералізації, адвентивізації, експансії інвазійних видів рослин, що створює загрози для біорізноманіття [27].

Отже, в зоні воєнних дій ґрунт зазнає серед іншого сильного токсичного хімічного впливу. Концентрація кадмію, як одного з небезпечних хімічних токсикантів [19], може значно збільшитись у ґрунті внаслідок військових дій. Це відбувається через руйнування інфраструктури, використання боєприпасів, техніки, які містять речовини, що включають важкі метали. Природні концентрації кадмію в ґрунтах коливаються від 0,1 до 1,5 мг/кг [4, 25]. Як показали Alloway, Steinnes [5], уміст кадмію в поверхневому шарі ґрунту поблизу металургійних підприємств та місць видобутку кольорових металів може перевищувати 750 мг/кг. Точні дані відносно кількості кадмію, що надходить у ґрунт у результаті військового конфлікту, варіюють залежно від його інтенсивності та тривалості, а також від типу матеріалів, що використовуються.

У рослини кадмій може потрапляти через кореневу систему. Було виявлено кілька ферментів-транспортів (ZIP-подібні білки), які можуть відігравати потенційну роль у поглинанні, кальцієві канали або члени родини Nramp, які є транспортерами кадмію, що зазвичай відповідають за поглинання Zn^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} або Mn^{2+} [15]. Через високу мобільність Cd у системі ґрунт-рослина [5] він легко поглинається рослинами як сільськогосподарськими, в які транспортується до пагона і потрапляє в зерно, що призводить до згубного впливу на рослину і забруднення зібраної продукції [10, 28], так і лісоутворювальними рослинами, які використовують у фіторе mediaції. Наприклад, трансгенні лінії тополі, що здатні до збільшеного потоку кадмію в тканини рослини та демонструють помірну чутливість рослини до вказаного токсиканту [23]. Обмеження навколишнього середовища впливає на всю рослину, стосується всіх її органів та викликає зміну фізіологічних показників та характеристик росту.

Об'єктом дослідження є гумусований шар ґрунту, що випробовує на собі різне за інтенсивністю хімічне навантаження (кадмієм), а як предмет дослідження – морфометричні та фізіологічні характеристики паростків гравілату міського (*Geum urbanum* L.), який є широко розповсюдженим по всій території України багаторічним трав'янистим лісовим видом рослин. Мета дослідження – в умовах моделювання високого рівня хімічного навантаження дослідити характер і темпи росту гравілату міського як природного структурного елемента флори і рослинності лісових фітоценозів.

Матеріали та методи дослідження

Польовий матеріал відібрано протягом 2023–2024 рр. на території лісопаркової території Ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (м. Дніпро). Для проведення експерименту відбирали зразки верхнього середньосуглинкового гумусованого шару урбанозему з глибини 0–10 см. Ґрунт підсушували до повітряно-сухого стану, потім до нього вносили токсичну речовину шляхом рівномірного обприскування ґрунту. Як безбуферний субстрат застосовували промитий прожарений пісок. Токсикант додавали в ґрунт і пісок у вигляді розчину солі $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ у лінійці збільшення його концентрації і виражали в дозах гранично допустимої концентрації (ГДК) кадмію для ґрунтів – 1ГДК, 2ГДК, 4ГДК. Також задіяно варіанти досліду з ґрунтом і піском без внесення в них токсиканту. У паростків рослин гравілату на 11-ту добу визначали їх масу, довжину їх надземної і підземної частини. Враховували, що нормативною гранично допустимою концентрацією кадмію для його валового вмісту в ґрунтах є величина 3 мг/кг ґрунту з урахуванням фону (кларка). Висаджували по 30 насінин гравілату у пластикові ємності однакового розміру, відповідно заповнені ґрунтом та безбуферним субстратом (пісок). Для проростання насінин рослин проводили зволоження субстратів дистильованою водою однаковою кількістю кожен третю добу. Схожість насінин гравілату становила від 93 до 98 %. У дослідженнях проведено біотестування зразків едафотопу з різною кількістю солі кадмію, що моделює надходження до ґрунту високих доз токсиканту. Експеримент здійснювали в умовах лабораторії за температури (24 ± 2) °С.

У ході статистичного опрацювання даних використовували методи описової статистики (середнє значення, стандартне відхилення), дисперсійний аналіз, тест Фішера, метод множинного порівняння (тест Тьюкі), регресійний аналіз. Різницю середніх вважали статистично значущою за $P < 0,05$.

Результати проведення досліджень та обговорення

Відомо, що маса рослин – це показник, який у цілому характеризує її стан і здоров'я (ріст і розвиток, продуктивність, стійкість до стресів, здатність до накопичення поживних речовин тощо). З'ясовано, що маса паростків гравілату за дії 4ГДК в ґрунті знижується у 2,7 рази порівняно з ґрунтом у контролі (табл. 1).

Двофакторний дисперсійний аналіз виявив вплив типу субстрату та дози внесення кадмію на зміну фітомаси (рис. 1). З'ясовано, що зі збільшенням дози токсиканту в усіх випадках маса паростків гравілату істотно зменшується, що підтверджується низьким рівнем значущості. Крім того, ґрунт проявляє свої буферні властивості порівняно з піском, на якому спостерігаються менші значення маси паростків модельної рослини.

Таблиця 1

Маса паростка ($\bar{x} \pm SD$, $n = 30$) гравілату міського за дії кадмію на різних за буферними властивостями субстратах, г

Доза внесення кадмію	Безбуферний субстрат (пісок)	Ґрунт
Контроль	0,132 \pm 0,022 ^a	0,147 \pm 0,014 ^a
1 ГДК	0,050 \pm 0,015 ^b	0,118 \pm 0,019 ^b
2 ГДК	0,039 \pm 0,005 ^{bc}	0,107 \pm 0,007 ^b
4 ГДК	0,027 \pm 0,006 ^c	0,054 \pm 0,025 ^c

Примітка. Різні літери у стовпчику вказують на статистично достовірну різницю середніх (за критерієм Тьюкі, $P < 0,05$).

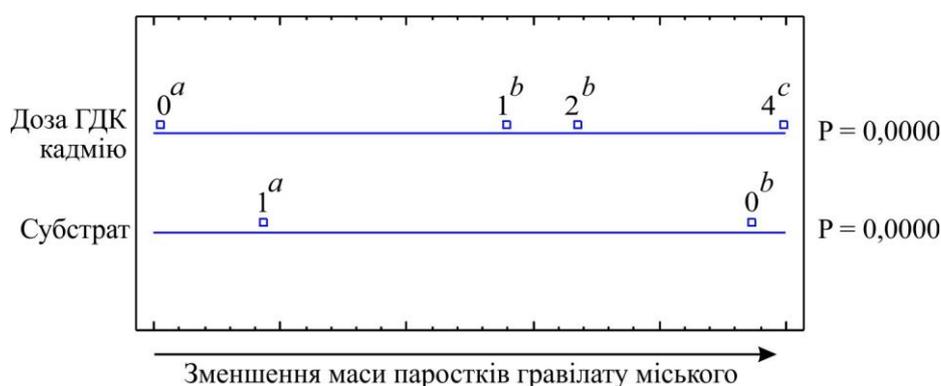


Рис. 1. Графічне зображення результатів двофакторного дисперсійного аналізу мінливості маси паростків гравілату міського в умовах різного ґрунтового субстрату та під впливом різних концентрацій кадмію: доза ГДК: 0 – контроль (дистильована вода), 1 – нормативна доза, 2 – подвійна доза, 4 – чотирикратна доза; субстрат: 0 – безбуферний субстрат (пісок), 1 – гумусований ґрунт. Різні літери у рядку вказують на статистично достовірну різницю середніх (за критерієм Тьюкі, $P < 0,05$)

Якщо провести екстраполяцію отриманих даних за лінійною апроксимацією ($y = 0,1463 - 0,0226x$; $R^2 = 98,5 \%$), то маса паростків на гумусованому шарі ґрунту за дії кадмію у дозі 5 ГДК ще більше знизиться і буде становити 0,033 г.

Висота паростків рослин є важливою характеристикою їхнього росту та розвитку. Вона відображає темпи зростання і здоров'я рослини, її якість насіння і генетичний потенціал, а також вплив на неї зовнішніх чинників. Установлено, що висота паростків гравілату за дії 4ГДК в ґрунті знижується у 2,7 разу порівняно з ґрунтом у контролі (табл. 2).

У ході дисперсійного аналізу визначено вплив субстрату з різними буферними властивостями та дози внесення кадмію на зміну висоти надземної частини гравілату (рис. 2). З'ясовано, що зі збільшенням дози внесення кадмію висота паростків цієї рослини статистично достовірно зменшується. Ґрунт проявляє більш високий рівень буферної здатності порівняно з піском, на якому спостерігаються менші значення маси паростків модельної рослини.

Таблиця 2

Висота паростка ($\bar{x} \pm SD, n = 30$) гравілату міського за дії кадмію на різних за буферними властивостями субстратах, см

Доза внесення кадмію	Безбуферний субстрат (пісок)	Ґрунт
Контроль	$7,60 \pm 1,38^a$	$8,77 \pm 1,30^a$
1 ГДК	$6,05 \pm 0,92^b$	$6,86 \pm 1,01^b$
2 ГДК	$5,31 \pm 0,99^c$	$6,17 \pm 0,95^b$
4 ГДК	$2,80 \pm 0,82^d$	$3,20 \pm 0,89^c$

Примітка. Різні літери у стовпчику вказують на статистично достовірну різницю середніх (за критерієм Тьюкі, $P < 0,05$).

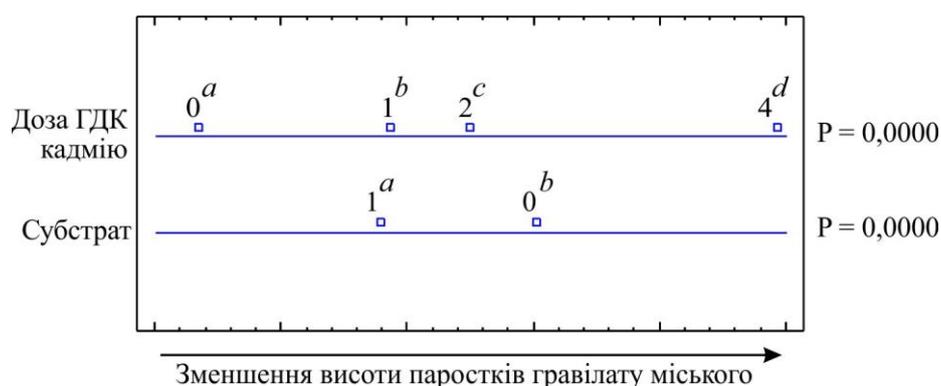


Рис. 2. Графічне зображення результатів двофакторного дисперсійного аналізу мінливості висоти паростків гравілату міського під впливом різних концентрацій кадмію та за різного ґрунтового субстрату: доза ГДК: 0 – контроль (дистильована вода), 1 – нормативна доза, 2 – подвійна доза, 4 – чотирикратна доза; субстрат: 0 – безбуферний субстрат (пісок), 1 – гумусований ґрунт.

Різні літери у рядку вказують на статистично достовірну різницю середніх (за критерієм Тьюкі, $P < 0,05$).

Якщо провести екстраполяцію отриманих даних за лінійною регресією ($y = 8,602 - 1,344x$; $R^2 = 98,4\%$), то висота паростків на гумусованому шарі ґрунту за впливу кадмію у дозі 5ГДК знизиться порівняно з дозою 4ГДК і буде дорівнювати лише 1,88 см.

Довжину коренів можна розглядати як індикатор здоров'я, стійкості та адаптаційних можливостей рослин. Вона обумовлює певною мірою здатність до поглинання води та поживних речовин, стійкість до стресових факторів (посухи, зокрема), ефективність закріплення в ґрунті, успішність конкуренції за ресурси, ріст і розвиток рослини в цілому. Довжина коренів паростків гравілату за дії 4ГДК в ґрунті знижується у 2,2 разу порівняно з ґрунтом у контролі (табл. 2).

У ході дисперсійного аналізу визначено вплив типу субстрату та дози внесення кадмію на зміну довжини коренів паростків гравілату (рис. 3). З'ясовано, що зі збільшенням дози внесення кадмію довжина коренів паростків цієї рослини статистично достовірно зменшується. Ґрунт проявляє свої буферні

властивості порівняно з піском, на якому спостерігаються менші значення довжини коренів паростків модельної рослини.

Таблиця 3

Довжина коренів паростка ($\bar{x} \pm SD$, $n = 30$) гравілату міського за дії кадмію на різних за буферними властивостями субстратах, см

Доза внесення кадмію	Безбуферний субстрат (пісок)	Ґрунт
Контроль	$7,40 \pm 0,57^a$	$9,56 \pm 1,45^a$
1 ГДК	$6,60 \pm 0,93^b$	$7,27 \pm 1,11^b$
2 ГДК	$5,56 \pm 0,66^c$	$6,48 \pm 0,63^b$
4 ГДК	$3,11 \pm 0,61^d$	$4,25 \pm 0,71^c$

Примітка. Різні літери у стовпчику вказують на статистично достовірну різницю середніх (за критерієм Тьюкі, $P < 0,05$).

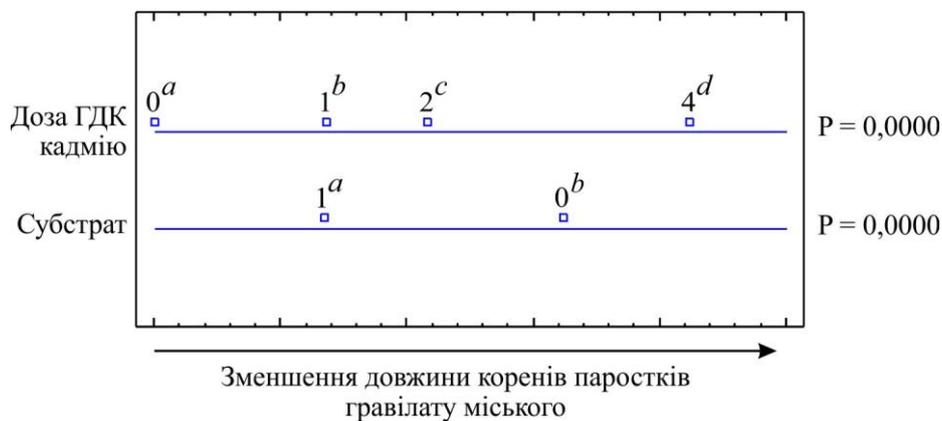


Рис. 3. Графічне зображення результатів двофакторного дисперсійного аналізу мінливості довжини коренів паростків гравілату міського під впливом різних концентрацій кадмію та за різного ґрунтового субстрату: доза ГДК: 0 – контроль (дистильована вода), 1 – нормативна доза, 2 – подвійна доза, 4 – чотирикратна доза; субстрат: 0 – безбуферний субстрат (пісок), 1 – гумусований ґрунт. Різні літери у рядку вказують на статистично достовірну різницю середніх (за критерієм Тьюкі, $P < 0,05$).

Результати моделювання довжини коренів паростків гравілату за лінійною регресією ($y = 9,091 - 1,257x$; $R^2 = 95,9\%$) показують, що в ході збільшення дози ГДК кадмію до п'ятикратної довжина коренів цієї рослини на гумусованому шарі ґрунту зменшиться порівняно з дозою 4ГДК на 39,3 % і буде становити 2,81 см.

Стосовно вмісту валових форм важких металів у ґрунтах, що зазнали впливу бойових дій, то, як показано в дослідженні Зайцева та ін. [2], валовий вміст кадмію в місцях відбору ґрунтів у зоні бойових дій (Сумська обл.) змінювався від 0,22 до 1,76 мг/кг ґрунту, поза зоною бойових дій (фонове значення) – від 0,15 до 0,87 мг/кг ґрунту. Як зазначають ці науковці,

перевищення фонового рівня відмічено у восьми з десяти проб ґрунту. Середній вміст кадмію на забруднених територіях у 1,4 разу перевищував фонове значення. Градович та ін. [1] у ході вивчення впливу бойових дій на ґрунтову екосистему Миколаївщини з'ясували, що порівняно з контролем (ґрунтосуміш) морфометричні ознаки тест-рослини (крес-салату) були пригнічені та відображали погіршення стану досліджених ґрунтів, що узгоджується з одержаними нами результатами.

Зазначимо, що в контексті відтворення й оптимізації екологічних властивостей ґрунту екосистем індикаторною їх характеристикою може слугувати буферна здатність ґрунту [6, 11], яка визначає здатність ґрунту чинити опір зовнішнім впливам [3] і, отже, потенційно створювати оптимальні умови для існування рослин у ґрунті. Отримані нами результати фітотестування виявили достатньо високий рівень буферної здатності досліджених ґрунтів до потенційно токсичного елемента – кадмію порівняно з піском, що знаходить підтвердження порівняння середніх значень морфометричних ознак.

Висновки

Ґрунти Дніпропетровщини зазнають бойових дій та перебувають під їх загрозою, що може призвести до катастрофічних екологічних (і соціальних) наслідків. Інтенсифікація бойових дій призведе до збільшення рівня забруднення ґрунтів токсикантами та погіршення їх якості. Такий стан створить потенційну загрозу для здоров'я населення, для екосистем та їх компонентів (рослин, тварин тощо). У дослідженнях проведено біотестування різних зразків едафотопу, результати якого показали, що після 10 діб впливу кадмію в дозах 1ГДК, 2ГДК, 4ГДК (3, 6 та 12 мг/кг субстрату) у індикаторної рослини гравілату міського спостерігається значне гальмування росту. З'ясовано, що зі збільшенням концентрації токсиканту зменшуються маса проростків, їх висота та довжина коренів. Моделювання впливу кадмію у дозі 5ГДК (15 мг/кг субстрату) також підтвердило негативний вплив на ці характеристики. Виявлено позитивний ефект буферних властивостей гумусованого середньосуглинкового ґрунту порівняно з піщаним субстратом.

Бібліографічні посилання

1. [Градович Н., Малиновська О., & Параняк Р. \(2024\). Вплив бойових дій на ґрунтову екосистему Миколаївщини. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького. Серія: Сільськогосподарські науки, 26\(100\), 150–156.](#)
2. [Зайцев Ю. О., Грищенко О. М., Романова С. А., & Зайцева І. О. \(2022\). Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського р-нів Сумської обл. Agroecological journal, 3, 136–149.](#)
3. [Трускавецький Р. С. \(2003\). Буферна здатність ґрунтів та їх основні функції. Нове слово, Харків.](#)
4. [Цветкова Н. М., Пахомов О. Є., Сердюк С. М., & Якуба М. С. \(2016\). Біологічне різноманіття України. Дніпропетровська область. Ґрунти. Метали у ґрунтах. За заг. ред. проф. О. Є. Пахомова. Ліра, Дніпро.](#)
5. [Alloway, B. J., & Steinnes, E. \(1999\). Anthropogenic Additions of Cadmium to Soils. In: McLaughlin, M. J., Singh, B. R. \(eds\), Cadmium in Soils and Plants. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 85. Springer, Dordrecht.](#)

6. [Bartmiński, P., Plak, A., & Debicki, R. \(2012\). Buffer capacity of soil as indicator of urban forest soil resistance to degradation. Polish journal of soil science, 45\(2\), 129–136.](#)
7. [Bonchkovskiy, O. S., Ostapenko, P. O., Shvaiko, V. M., & Bonchkovskiy, A. S. \(2023\). Remote sensing as a key tool for assessing war-induced damage to soil cover in Ukraine \(the case study of Kyivska territorial hromada\). Journal of Geology, Geography and Geoecology, 32\(3\), 474–487 \(in Ukrainian\).](#)
8. [Certini, G., Scalenghe, R., & Woods, W. I. \(2013\). The impact of warfare on the soil environment. Earth-Science Reviews, 127, 1–15.](#)
9. [Cheng, S., & McBride, J. R. \(2006\). Restoration of the urban forests of Tokyo and Hiroshima following World War II. Urban Forestry & Urban Greening, 5\(4\), 155–168.](#)
10. [Danso, O. P., Acheampong, A., Zhang, Z., Song, J., Wang, Z., Dai, J., Zhi, T., Yin, X., & Zhu, R. \(2023\). The management of Cd in rice with biochar and selenium: effects, efficiency, and practices. Carbon Research, 2, 41.](#)
11. [Didur, O., Kulbachko, Y., Ovchynnykova, Y., Pokhilenko, A., & Lykholat, T. \(2019\). Zoogenic mechanisms of ecological rehabilitation of urban soils of the park zone of megapolis: earthworms and soil buffer capacity. Journal of Environmental Research, Engineering and Management, 75\(1\), 24–33.](#)
12. [Fedenko, V. S. \(2023\). Transformatsiia roslynnosti za umov vplyvu voiennykh dii na pryrodne seredovyshche v Ukraini \(ohliad literatury\) \[Transformation of vegetation under the conditions of the impact of military actions on the natural environment in Ukraine: A review\]. Ecology and Noospherology, 34\(2\), 101–107 \(in Ukrainian\).](#)
13. [Hanson, T. \(2018\). Biodiversity conservation and armed conflict: a warfare ecology perspective. Annals of the New York Academy of Sciences, 1429\(1\), 50–65.](#)
14. [Hupy, J. P., & Schaetzl, R. J. \(2006\). Introducing “bombturbation”, a singular type of soil disturbance and mixing. Soil Science, 171\(11\), 823–836.](#)
15. [Kieffer, P., Schröder, P., Dommès, J., Hoffmann, L., Renaut, J., & Hausman, J.-F. \(2009\). Proteomic and enzymatic response of poplar to cadmium stress. Journal of Proteomics, 72\(3\), 379–396.](#)
16. [Lacan, I., & McBride, J. R. \(2009\). War and trees: The destruction and replanting of the urban and peri-urban forest of Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. Urban Forestry & Urban Greening, 8\(3\), 133–148.](#)
17. [Lawrence, M. J., Stemberger, H., Zolderdo, A. J., Struthers, D. P., & Cooke, S. J. \(2015\). The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment. Environmental Reviews, 23\(4\), 443–460.](#)
18. [Meaza, H., Ghebreyohannes, T., Nyssen, J., Tesfamariam, Z., Demissie, B., Poesen, J., Gebrehiwot, M., Weldemichel, T. G., Deckers, S., Giday, D. G., & Vanmaercke, M. \(2024\). Managing the environmental impacts of war: What can be learned from conflict-vulnerable communities? The Science of the total environment, 927, 171974.](#)
19. [Nawrot, T. S., Martens, D. S., Hara, A., Plusquin, M., Vangronsveld, J., Roels, H. A., & Staessen, J. A. \(2015\). Association of total cancer and lung cancer with environmental exposure to cadmium: the meta-analytical evidence. Cancer causes & control: CCC, 26\(9\), 1281–1288.](#)

20. [Petrushka, K., Malovanyy, M., Skrzypczak, D., Chojnacka, K., & Warchol, J. \(2024\). Risks of soil pollution with toxic elements during military actions in Lviv. Journal of Ecological Engineering, 25\(1\), 195–208.](#)
21. [Poberezhna, L., & Stanetsky, A. \(2017\). Otsinka potentsiinykh ekolohichnykh ryzykiv vnaslidok provedennia antyterrorystychnoi operatsii \[Assesment of potential environmental risks from the antiterrorist operation\]. Technogenic and Ecological Safety, 2, 45–52 \(in Ukrainian\).](#)
22. [Rodríguez-Seijo, A., Fernández-Calviño, D., Arias-Estévez, M., & Arenas-Lago, D. \(2024\). Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: an ecotoxicological review. Biology and Fertility of Soils, 60, 813–844.](#)
23. [Shan, O., Guan, J., Yang, Y., Chai, T., Gong, S., Wang, J., & Qiao, K. \(2024\). Cadmium-induced protein AS8: A protein to improve Cd accumulation and transport via Cd uptake in poplar. Plant physiology and biochemistry, 216, 109199.](#)
24. [Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A., & Gleick, P. \(2023\). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. Nature Sustainability, 6, 578–586.](#)
25. [Smolders, E., & Mertens, J. \(2013\). Cadmium, in: Alloway, B. J. \(Ed.\), Heavy Metals in Soils. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 283–311.](#)
26. [Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. \(2024\). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. Land, 13, 1614.](#)
27. [Zavialova, L. V., Protopopova, V. V., Panchenko, S. M., Smagol, V. O., Kolomiichuk, V. P., Kucher, O. O., & Shevera, M. V. \(2022\). Synantropizatsiia roslynnoho pokryvu Ukrainy vnaslidok voiennykh dii \[The synantropization of vegetation cover of Ukraine as impact of military actions\]. In: M. S. Malovanyy, O. V. Stepova \(Eds.\), Overcoming ecological risks and threats to the environment in emergency situations – 2022 \(pp. 31–52\). Serednyak T.K., Dnipro \(in Ukrainian\).](#)
28. [Zhao, F. J., & Wang, P. \(2020\). Arsenic and cadmium accumulation in rice and mitigation strategies. Plant and Soil, 446, 1–21.](#)
29. [Zibtsev, S. V., Soshensky, O. M., Goldammer, Y. G., Myronyuk, V. V., Borsuk, O. A., Humenyuk, V. V., Meshkova, V. L., Vasylyuk, O. V., & Buksha, I. F. \(2022\). Lisoupravlinnya na terytoriyakh, zabrudnenykh vybukhonebezpechnymy predmetamy \[Forest management in territories contaminated by explosive objects\]. Kyiv \(in Ukrainian\).](#)

Надійшла до редколегії 12.10.2024 р.