

РТУТЬ У НАДЗЕМНИХ ЧАСТИНАХ *TRIFOLIUM REPENS* L. ТА *TRIFOLIUM PRATENSE* L.: НАКОПИЧЕННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ФІТОЕКСТРАКЦІЇ

А.М. Гапоненко¹, А.М. Гнатюк², М.В. Кулик³,
В.І. Бондарь¹, О.Б. Блюм²

¹ Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: andrreygaпоненко@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4215-2216

e-mail: lera_bond@email.ua; ORCID: 0000-0002-8737-3568

² Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України (м. Київ, Україна)
e-mail: gnatiukalla@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5001-971X

e-mail: oleg_blum@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0765-9866

³ ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ» Державне підприємство «Всеукраїнський державний науково-виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів»

e-mail: maksymkulyk@ukr.net; ORCID: 0009-0001-8206-9735

Ртуть (Hg) є одним із найнебезпечніших забруднювачів довкілля через високу токсичність та мобільність. Вона становить значну загрозу для екосистем та здоров'я людини, особливо в районах, що зазнали впливу промислової та техногенної діяльності. Техногенні території, зокрема зони впливу підприємств, несуть значну небезпеку для населення та біорізноманіття. Фіторе mediaція є екологічно безпечною та економічно вигідною технологією для очищення забруднених ґрунтів. У цьому контексті дослідження було спрямовано на оцінку та порівняння фіторе mediaційного потенціалу двох поширених видів місцевої флори — конюшини повзучої (*Trifolium repens* L.) та конюшини лучної (*Trifolium pratense* L.). Дослідження проводили *in situ* на ділянках із різним рівнем техногенного забруднення ґрунтів ртуттю (в діапазоні 0,04–5,26 мг/кг). Концентрацію Hg у зразках ґрунту та висушеній надземній масі рослин визначали методом атомної абсорбції за допомогою аналізатора ртуті DMA-80 evo (Milestone, Італія). Для оцінки здатності рослин до накопичення токсиканта розраховували біо-концентраційний фактор (BF) — співвідношення концентрації ртуті у надземній масі рослин до її концентрації у ґрунті. Встановлено, що вміст Hg у надземній масі обох видів конюшини зростає разом зі ступенем забруднення ґрунту. Максимальні зафіксовані концентрації становили $0,25 \pm 0,01$ мг/кг для *T. repens* та $0,45 \pm 0,01$ мг/кг для *T. pratense*. Важливо, що на ділянці з найменшою концентрацією ртуті (0,04 мг/кг) обидва види продемонстрували $BF > 1$, що вказує на їхній потенціал як гіперакумуляторів у цих умовах. Результати підтверджують, що обидва види конюшини можуть бути ефективно інтегровані в системи фіторе mediaції ртуті. *Trifolium pratense* виявилася перспективнішим видом для фітоекстракції завдяки більшій надземній біомасі та здатності до накопичення більшої кількості цього металу на забруднених ґрунтах. Подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення порогів фітотоксичності, вивчення механізмів біоаккумуляції та розробку безпечних шляхів утилізації забрудненої біомаси.

Ключові слова: фіторе mediaція, важкі метали, Hg, забруднення, коефіцієнт біо-аккумуляції, фітотоксичність, *Fabaceae*, стійкість рослин, забруднення ґрунтів.

ВСТУП

Забруднення довкілля важкими металами, зокрема ртуттю (Hg), є актуальною глобальною екологічною проблемою. Цей

елемент належить до найтоксичніших і не виконує жодних біологічних функцій у рослин. Висока мобільність ртуті в атмосфері сприяє її транспортуванню та випадінню навіть на віддалених від джерел забруднення територіях [1]. За даними Агентства

з охорони навколишнього середовища США (EPA) та Агентства з реєстру токсичних речовин та захворювань (ATSDR), Hg посідає третє місце у пріоритетному списку небезпечних речовин після миш'яку та свинцю [2; 3].

Основними джерелами Hg-контамінації є гірничо-металургійні підприємства, хімічна промисловість, звалища промислових і побутових відходів. Значний внесок у забруднення здійснюють також викиди теплоелектростанцій, що спалюють вугілля, а в минулому — використання ртутних пестицидів у сільському господарстві [4; 5]. Додатковим джерелом надходження ртуті у довкілля є воєнно-техногенні процеси, що супроводжують бойові дії [6].

Вміст ртуті в ґрунтах фонових територій України варіює залежно від природних та антропогенних чинників. Поблизу промислових зон і полігонів відходів концентрація елементу у ґрунтах і рослинних угрупованнях істотно перевищує природний рівень. За даними літератури, підвищений вміст Hg може спостерігатися на відстані до 7 км від джерела забруднення [7]. Гранично допустима концентрація ртуті у ґрунтах України встановлена на рівні 2,1 мг/кг [8].

Одним із найзабрудненіших ртуттю об'єктів в Україні є територія колишнього ВАТ Завод «Радикал» у Києві, який до 1996 р. спеціалізувався на виробництві пінополіуретану, бертолетової солі, гермобутилу та засобів захисту рослин [7]. Ремедіація ґрунтів цієї території та систематичний моніторинг стану довкілля залишаються актуальними завданнями.

Роль рослин у процесах очищення природного середовища є беззаперечною, однак дані щодо впливу Hg на конкретні види, а також механізми накопичення та біоутилізації цього металу залишаються обмеженими.

Для формування ефективних стратегій фіторемердіації важливим є дослідження потенціалу біоаккумуляції ртуті місцевими видами, стійкими до забруднення. Поєднання автохтонних рослин та сучасних агротехнологій може стати перспективним

підходом до відновлення екосистем, забруднених ртуттю.

Метою цього дослідження було визначити рівні накопичення ртуті у надземних органах рослин видів роду *Trifolium* L. (*Fabaceae*), виявлених в зоні антропогенного забруднення, та порівняти їх із показниками контрольних рослин, відібраних на незабруднених територіях, щоб оцінити фіторемердіаційний потенціал цих видів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання забруднення ґрунтів важкими металами, зокрема і ртуттю, та можливості їх ремедіації за допомогою рослин широко висвітлюється у закордонних і вітчизняних публікаціях. За даними, які наводяться у статті В. Ковальчук [7], у забруднених ґрунтах Києва вміст ртуті коливається від 0,5 до 2 мг/кг, однак у локальних ділянках може сягати 10 мг/кг і більше. А. Самчук та ін. [9] зазначають, що найбільша частка важких металів у ґрунтах зосереджена в органічній формі (34–44%, подекуди до 52%), до того ж максимальні концентрації спостерігаються у верхньому гумусовому горизонті. Ртуть здебільшого утворює з гуміновими кислотами розчинні та малорухомі в кислому середовищі комплекси. Е. Tiodar та ін. [10] вказують, що зниження рН ґрунтового розчину сприяє підвищенню мобільності Hg.

Попри високу токсичність, ртуть (Hg) належить до найменш досліджених елементів у контексті фіторемердіації. Це пояснюється її хімічними властивостями та низькою мобільністю в ґрунтовому середовищі. Дані Е. Tiodar та ін. [10] засвідчують, що низка видів рослин здатні ефективно акумулювати або стабілізувати Hg у своїх тканинах, знижуючи її біодоступність для інших організмів. Значні концентрації цього елементу можуть акумулювати деякі сільськогосподарські культури, зокрема бобові, картопля, салат і морква [7].

Ж. Sharma та ін. [11] зазначають, що механізми ремедіації ртуті за участю рослин включають фітоекстракцію (перенесення Hg у надземні органи), фітостабілізацію

(фіксацію Hg у кореневій зоні) та фітоволатилізацію (перетворення Hg на леткі форми). Важливу роль у цих процесах відіграють антиоксидантні ферменти, метал-зв'язуючі білки (фітохелатини, глутатіон) та специфічні транспортні системи.

Серед рослин, що демонструють потенціал фітоекстракції ртуті, найчастіше згадуються *Brassica juncea* (L.) Czern., *Helianthus annuus* L., *Pennisetum purpureum* Schumach. та *Typha latifolia* L. [10; 12; 13]. А. Monroy-Licht та ін., вказують, що водяний гіацинт (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) також характеризується здатністю інтенсивно акумулювати Hg у кореневій системі, що робить його перспективним видом для очищення водойм [14]. Е. Siwik та ін. зазначають, що серед деревних рослин, адаптованих до техногенних умов, ефективними акумуляторами Hg є *Salix* spp. та *Populus* spp. [15].

Дослідження J. Ssenku та ін. [16] в Уганді засвідчили підвищений вміст Hg у більшості представників культурної та дикорослої флори на забруднених територіях, водночас листки виявляли вищі рівні акумуляції, ніж підземні органи. Подібну закономірність було відмічено й у лікарських рослинах на території Польщі М. Ordak та ін. [17].

Фіторе mediaція ртуті вимагає використання видів, які можуть витримувати токсичний вплив протягом тривалого періоду та видаляти забруднювач із субстрату до рівня безпечних концентрацій. У своїй публікації С. Kalinhoff та N. Calderon до Hg-стійких культур відносять *Lactuca sativa* L. (*Asteraceae*), *Bidens pilosa* L., *Taraxacum officinale* (L.) Weber ex F.H.Wigg. (*Asteraceae*), *Heliocarpus americanus* L. (*Malvaceae*) та ін. [18].

Перспективним для фіторе mediaції ґрунтів є використання бобово-ризобійних асоціацій, пов'язаних із місцевими видами рослин, властивих забрудненим територіям [10]. Асоційовані з бобовими ризобії виявляють стійкість до ртуті, підтримують ріст рослин і підвищують їх толерантність до стресу. Дослідження, проведені F. Nonnoi та ін. у шахтарських районах Іспанії, за-

бруднених Hg, показали, що місцеві рослини *Trifolium* spp. і *Medicago* spp. утворюють специфічні симбіози з *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* та *Sinorhizobium* (Ensifer) *medicae* відповідно на ґрунтах із високим рівнем забруднення (37,6–273,0 мг/кг Hg) [19]. Багато дослідників, зокрема Е. Snyder, D. Hofer, M. Rigoletto ін. [20–22] відзначають, що бобові культури є важливим інструментом підвищення родючості ґрунтів та поліпшення їх структури, стабільності врожайності лук під час посухи, що робить їх важливими у рекультивації порушених земель.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктами дослідження були два види конюшини:

Конюшина повзуча (*Trifolium repens* L.) — багаторічна трав'яниста рослина зі сланкими пагонами, що здатні укорінюватися. Має висхідні стебла заввишки 10–30 см, трійчасті листки та білі (іноді рожеваті або жовтуваті) квітки у головчастих суцвіттях. Вид поширений в помірній кліматичній зоні Євразії. Використовується як кормова, сидеральна та ґрунтопокривна культура, характеризується високою адаптивністю до різних ґрунтових умов, зокрема техногенно порушених. У Києві звичайна рослина, зростає на відкритих ділянках, уздовж доріг, у парках і скверах (рис. 1, а).

Конюшина лучна (*Trifolium pratense* L.) — багаторічна трав'яниста рослина з прямостоячими або висхідними стеблами заввишки 30–80 см. Листки трійчасті, суцвіття головчасті, пурпурово-рожеві. Вид поширений у природних і агрокультурних екосистемах Європи та Азії, натуралізований на інших континентах. Завдяки глибокій кореневій системі відзначається посухостійкістю і здатністю до відновлення після покосу, що робить його стійким у міських умовах. Застосовується як кормова й лікарська культура. У флорі України та м. Києва звичайна рослина, зростає на луках, пасовищах, узбіччях, у парках і на газонах (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Досліджувані види конюшини: а — *Trifolium repens* L.; б — *Trifolium pratense* L.

Дослідження проведено в межах м. Київ у зоні екологічного ризику: навколо колишнього підприємства хімічної промисловості ВАТ Завод «Радикал», який працював до 2000 р. та на території Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка Національної академії наук України (рис. 2).

На кожній досліджуваній ділянці збирали надземні частини *T. repens* L. та *T. pratense* L. з усіх виявлених особин, відбираючи матеріал у рівних частках від кожної рослини. Потім зібрані зразки подрібнювали та об'єднували в змішані проби, окремо для кожної ділянки та кожного виду. Зразки

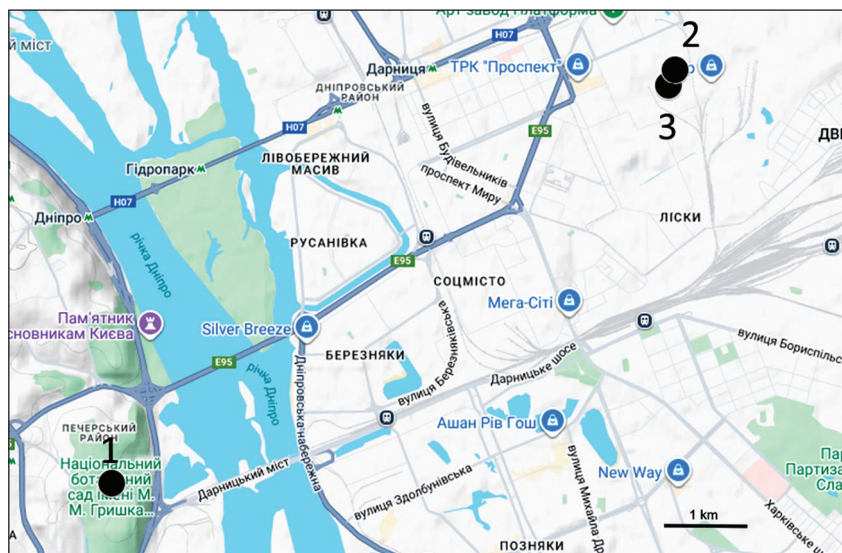


Рис. 2. Карта-схема розташування ділянок, з яких взяті зразки для аналізу

Примітки: 1 — Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України; 2, 3 — територія колишнього ВАТ Завод «Радикал».

грунту відбирали з верхньої частини гумусового горизонту (0–10 см) методом конверта та у місцях зростання конюшини згідно з ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб» з кожної точки. Для формування узагальненої проби вагою до 0,2 кг з кожної ділянки окремо зібраний ґрунт ретельно перемішували.

Відібрані зразки рослин та ґрунту висушували до постійної маси (абсолютно сухого стану за температури $102 \pm 2^\circ\text{C}$) та просіювали через лабораторне сито з отворами 2 мм. На аналітичних вагах Sartorius BP 210 S (Німеччина) з точністю 0,0001 г для аналізу формували наважку вагою 100 мг для рослин та 80 мг для ґрунту.

Аналіз відібраних зразків рослин та ґрунту проводили за допомогою аналізатора ртуті DMA-80 evo (Milestone, Італія), який допомагає вимірювати в них вміст загальної ртуті (органічної та неорганічної) методом прямого визначення Hg шляхом термічного розкладання зразка з подальшим атомно-абсорбційним аналізом. Всі аналізи виконувалися відповідно з методиками Агентства з охорони навколишнього середовища США (US EPA Method 7473 та ASTM D-6722 Method).

Якості вимірювань загального вмісту ртуті була забезпечена завдяки сертифікованому еталонному матеріалу ASTM D6722 (кам'яне вугілля). Межа виявлення ртуті у парах становила до 0,0015 нг Hg. Межі відносної невизначеності результатів вимірювань (U) масових часток Hg у зразках не перевищували 20% (за $k=2$, $P=0,95$).

Можливість накопичення металу у тканинах рослин оцінювали за допомогою біоконцентраційного фактора (BF), визначеного як:

$$BF = K_p / K_{gr},$$

де K_p — концентрація металу в рослині; K_{gr} — концентрація металу в ґрунті [22].

BF важливий показник для скринінгу рослин гіперакумуляторів, якщо оцінювати потенціал певного виду як перспективного кандидата для фіторе mediaції. Гіперакумулятори мають BF більше 1, іноді досягаючи 50–100 [23]. Вважається, що види рослин, у яких BF більше 1, можуть успішно ви-

користовуватися для фітоекстракції. Для графічного представлення результатів досліджень та розрахунку статистичних показників використали Microsoft Excel 2016.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Ділянка 1 (див. рис. 2) — знаходиться на території Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України. Рослини обох видів конюшини зібрані на ділянці «Рідкісні рослини флори України». Тут вони є компонентом сталого фітоценозу, який сформувався в умовах помірного догляду на території, що періодично 1–2 рази скошується у складі різнотрав'я на терасованому схилі на малогумусному ґрунті супіщаного гранулометричного складу. На прилеглих територіях колишнього Заводу «Радикал» було виявлено два представники роду *Trifolium*: *T. repens* L. та *T. pratense* L. лише у двох локаціях. В обох локаціях рослини виглядали здоровими, без явних ознак пригнічення росту чи ушкоджень. Зразки рослин були відібрані у фазі початку плодоношення (з поодинокими квітками та чисельними плодами на генеративних пагонах), яка відповідає максимальному розвитку біомаси надземних органів.

На ділянці 2 рослини конюшини зростали на насипному малогумусному ґрунті легкого суглинистого гранулометричного складу з включенням дрібного щебню. Вочевидь цю територію вирівнювали під будівництво виробничих приміщень 2–3 роки тому, шляхом насипання. Трав'яний покрив зріджений, 60–70% переважає зі самосівом тополі чорної, поряд із *T. repens* L. та *T. pratense* L. були виявлені також інші представники родини *Fabaceae*: *Melilotus albus* Medik., *Medicago sativa* L. та *M. falcata* L.

Ділянка 3 представлена штучним злаковим газоном низької якості під берегами, що висаджені під парканом уздовж асфальтної дороги. По всій площі *T. repens* L. та *T. pratense* L. трапляються розсіяно. Ґрунт тут також насипний, супіщаного гранулометричного складу з невеликим 1–2 см

шаром компосту чи чорнозему, який був насипаний перед посівом газонної трави.

На усіх досліджуваних ділянках рН ґрунтового розчину був у межах 6,7–7. Аналіз умісту ртуті на ділянках встановив істотні відмінності: $0,82 \pm 0,16$ мг/кг та $5,26 \pm 1,05$ мг/кг на другій та третій ділянці відповідно, на третій ділянці він значно перевищує ГДК (2,1 мг/кг). На ділянці 1 вміст ртуті виявився значно меншим і склав $0,04 \pm 0,01$ мг/кг. Окрім того, масова частка ртуті на найменш забрудненому ґрунті ділянки 1 у надземних органах обох видів конюшини була майже однаковою і обидва види за показником *BF* були гіпернакопичувачами в цих умовах ($1 < BF$). У той самий час більше забруднення ґрунту спричинило гальмування процесів накопичення та зменшення значень *BF* (рис. 3, 4). За вмісту в ґрунті ртуті 0,82 мг/кг конюшина повзуча накопичила її майже вдвічі більше за конюшину лучну, проте в умовах значного забруднення конюшина лучна зберегла здатність до накопичення і майже втричі перевищила конюшину повзучу за вмістом цього елемента.

Конюшина повзуча може успішно розвиватися на ґрунтах, забруднених важкими металами, та стати домінантним видом у

таких умовах [24]. *T. repens* L. демонструвала здатність до накопичення багатьох важких металів, зокрема ртуті (Hg), переважно в кореневій системі, що свідчить про потенціал цього виду для використання його в біоочищенні забруднених ґрунтів. На цьому виді досліджувався вплив хелатних агентів на фітоекстракцію Hg [25].

T. repens L. надзвичайно ефективно поглинала ртуть зі 100% розчину Хогланда та накопичувала її. За вирощування *T. repens* L. у розчині Хоагланда з додаванням 10 мкг/л ртуті, рослини у своїй надземній частині (стебла та листки) накопичили Hg у концентрації $0,038 \pm 0,002$ мг/л [26]. Ці дані цілком зіставні з отриманими у наших дослідженнях: на ґрунті із концентрацією 0,04 мг/кг вміст ртуті у надземній частині сягав $0,05 \pm 0,001$ мг/кг.

Оцінювання масової концентрації ртуті у рослинах конюшини, у зв'язку із її концентрацією у ґрунтах (рис. 5), виявило різні тенденції щодо її накопичення і максимальних рівнів у рослинах цих двох видів, що може свідчити про дещо різні механізми захисту рослин від надмірних концентрацій Hg.

Аналіз залежності концентрації ртуті у рослинах *T. repens* L. від її концентрації

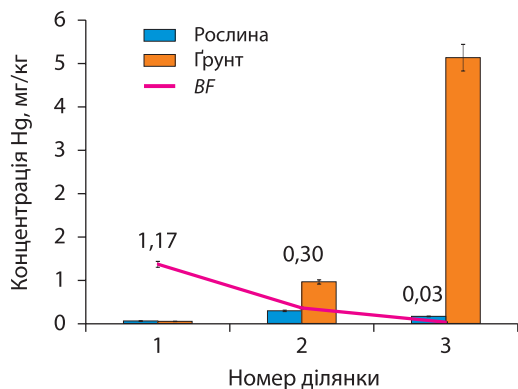


Рис. 3. Масова концентрація ртуті (мг/кг) у надземній частині *Trifolium repens* L. на різних ділянках та значення біоконцентраційного чинника (*BF*)

Примітки: 1 — Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України; 2, 3 — територія колишнього БАТ Завод «Радикал».

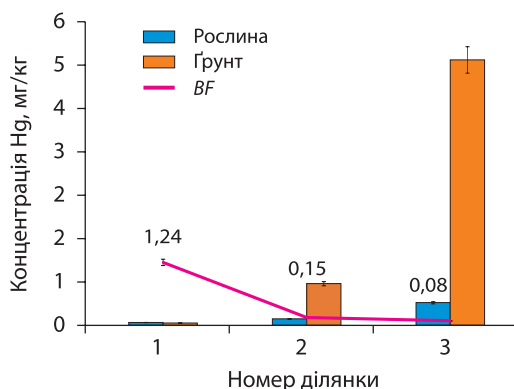


Рис. 4. Масова концентрація ртуті (мг/кг) у надземній частині *Trifolium pratense* L. на різних ділянках та значення біоконцентраційного чинника (*BF*)

Примітки: 1 — Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України; 2, 3 — територія колишнього БАТ Завод «Радикал».

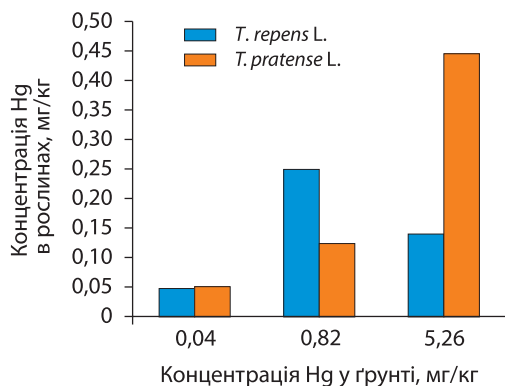


Рис. 5. Масова концентрація ртуті у рослинах конюшини залежно від її концентрації у ґрунтах (мг/кг)

у ґрунтах демонструє нелінійну залежність: на низьких рівнях Hg (ймовірно до ~2,5 мг/кг) рослина активно накопичує ртуть, а після пікового вмісту (~2,5 мг/кг) спостерігається зниження концентрації Hg у рослині. Рослини *T. repens* L. показали специфічну у реакцію на зміну рівня забруднення, що робить цей вид потенційно більш стійким.

Trifolium pratense L. також проявляє здатність до акумуляції інших важких металів, зокрема кадмію (Cd), свинцю (Pb) та цинку (Zn), переважно в надземних органах, що дає можливість розглядати цю рослину як потенційний фітоекстрактор [27]. *T. pratense* L. може бути ефективним компонентом мультифункціональних фітореMediaційних систем. Дані накопичення Hg цим видом, що свідчать про стабільне, пропорційне накопичення ртуті з підвищенням її концентрації в ґрунті. Отже, *T. pratense* L. може бути хорошим біогеохімічним індикаторним видом для моніторингу забруднення ґрунту ртуттю та його ремедіації.

Наші дослідження свідчать про успішне зростання та розвиток обох видів конюшини в умовах забруднення ґрунту ртуттю на рівні $5,26 \pm 1,05$ мг/кг. За таких умов обидва види здатні до росту та багаторічного розвитку, утворення квітів, плодів, насіння та самостійного поширення. Аналіз отрима-

них даних виявив у обох видів тенденцію до зменшення здатності до накопичення ртуті у надземних органах рослин за збільшення її концентрації у ґрунті за показником *BF*. Це може свідчити про розвинені механізми, які забезпечують стійкість рослин на забруднених територіях. У наших дослідженнях максимальний вміст ртуті у *T. repens* L. становив $0,25 \pm 0,01$ мг/кг на ділянці із середнім рівнем забруднення ґрунту, а у *T. pratense* L. — $0,45 \pm 0,01$ мг/кг — із максимальним вмістом Hg, що загалом нижче за максимальні значення ГДК для харчових продуктів і кормів для тварин [28; 29].

Для встановлення порогових концентрацій фітотоксичності ртуті для кожного з видів конюшини за інших концентрацій у ґрунтах потрібні додаткові дослідження.

ВИСНОВКИ

Завдяки поєднанню екологічної пластичності, швидкого формування біомаси та здатності до симбіотичної азотфіксації, конюшина є перспективним об'єктом для досліджень у сфері фітореMediaції важких металів, зокрема ртуті. Обидва досліджені види конюшини *T. repens* L. та *T. pratense* L. накопичують ртуть у своїх надземних органах, що необхідно враховувати за вирощування цих рослин як кормових, харчових культур або для збору лікарської сировини, щоб уникнути накопичення токсиканта в харчовому ланцюгу.

Конюшина лучна виявила здатність до накопичення більшої кількості ртуті на забруднених ґрунтах. Зважаючи на її більшу надземну масу, використання *T. pratense* L. для фітоекстракції Hg може бути успішним. Дослідження динаміки накопичення, встановлення порогових рівнів фітотоксичності ртуті для різних видів конюшини, механізмів біоакумуляції Hg та можливостей утилізації забруднених рослинних решток дасть можливість підібрати оптимальні рішення для розробки технологій очищення та покращання якості забруднених ґрунтів.

ЛІТЕРАТУРА

- Kumari, S., Jamwal, R., Mishra, N., & Singh, D. K. (2020). Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 13, 100283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100283>.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2024, November 12). Substance priority list. Centers for Disease Control and Prevention. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/programs/substance-priority-list.html>.
- Clemens, S. (2013). Mercury in plants. In *Encyclopedia of metalloproteins* (pp. 1352–1356). Springer, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1533-6_313.
- Смоляр, В. І., & Петрашенко, Г. І. (2008). Ртуть в харчових продуктах і раціонах та її токсичність. *Проблеми харчування*, 3–4(18), 23–31. URL: http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/nutrition/2008/3-4_08/str23.pdf.
- Дмитруха, Т. І. (2014). Забруднення довкілля ртуттю — найгостріша екологічна проблема сучасності. *Екологічна безпека та природокористування*, (15), 46–52.
- Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., & Сорокіна, Л. (2023). Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. *ГО Центр екологічних ініціатив «Екодія»*. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii.pdf>.
- Ковальчук, В. (2011). Ртуть в ґрунтах та фітоценозах Київщини, механізм накопичення та форми поширення. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія*, (59), 43–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_geograf_2011_59_14.
- Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин. Постанова Кабінету Міністрів України № 898 (2024). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-2024-%D0%BF>.
- Самчук, А. І., Вовк, К. В., & Акімова, О. Р. (2015). Форми знаходження важких металів у ґрунтах зон екологічного ризику м. Київ. *Геохімія та рудотворення*, (35), 63–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/gof.2015.35.063>.
- Tiodar, E. D., Văcar, C. L., & Podar, D. (2021). Phytoremediation and microorganisms-assisted phytoremediation of mercury-contaminated soils: challenges and perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(5), 2435. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18052435>.
- Sharma, J. K., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1076876. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>.
- Feng, X., & Wang, J. (2018). Phytoextraction of Mercury-Contaminated Soil. In *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China* (pp. 499–507). Singapore: Springer Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-6029-8_30.
- dos Santos Soares, C., Santos Lopes, V. J., de Freitas, F., Córdova, M. O., Cavalheiro, L., Battirola, L. D., & de Andrade, R. L. T. (2025). Characterizing pioneer plants for phytoremediation of mercury-contaminated urban soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-024-06303-2>.
- Monroy-Licht, A., Méndez-Cuadro, D., & Olivero-Verbel, J. (2023). Elemental mercury accumulation in *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 9898–9913. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22521-y>.
- Siwik, E. I., Campbell, L. M., & Mierle, G. (2010). Distribution and trends of mercury in deciduous tree cores. *Environmental Pollution*, 158(6), 2067–2073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.03.002>.
- Ssenku, J. E., Naziriwo, B., Kutesakwe, J., Mustafa, A. S., Kayeera, D., & Tebandeke, E. (2023). Mercury accumulation in food crops and phytoremediation potential of wild plants thriving in artisanal and small-scale gold mining areas in Uganda. *Pollutants*, 3(2), 181–196. DOI: <https://doi.org/10.3390/pollutants3020014>.
- Ordak, M., Wesolowski, M., Radecka, I., Muszynska, E., & Bujalska-Zazdrozny, M. (2016). Seasonal variations of mercury levels in selected medicinal plants originating from Poland. *Biological trace element research*, 173(2), 514–524. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-016-0645-z>.
- Kalinhoff, C., & Calderón, N. T. (2022). Mercury phytotoxicity and tolerance in three wild plants during germination and seedling development. *Plants*, 11(15), 2046. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11152046>.
- Nonnoi, F., Chinnaswamy, A., de la Torre, V. S. G., de la Peña, T. C., Lucas, M. M., & Pueyo, J. J. (2012). Metal tolerance of rhizobial strains isolated from nodules of herbaceous legumes (*Medicago* spp. and *Trifolium* spp.) growing in mercury-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 61, 49–59. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.06.004>.
- Snyder, E. M., Karsten, H. D., Curran, W. S., Malcolm, G. M., & Hyde, J. A. (2016). Green manure comparison between winter wheat and corn: weeds, yields, and economics. *Agronomy Journal*, 108(5), 2015–2025. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0084>.
- Hofer, D., Suter, M., Buchmann, N., & Lüscher, A. (2017). Nitrogen status of functionally different forage species explains resistance to severe drought and post-drought overcompensation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 312–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.022>.

22. Rigoletto, M., Calza, P., Gaggero, E., Malandrino, M., & Fabbri, D. (2020). Bioremediation methods for the recovery of lead-contaminated soils: a review. *Applied Sciences*, 10(10), 3528. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10103528>.
23. Козак, Н. (2024). Продуктивність травостою коношини лучної залежно від системи удобрення у короткоротаційній сівоzmіні. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*, 76(1), 26–35. DOI: [https://doi.org/10.32636/01308521.2024-\(76\)-1-3](https://doi.org/10.32636/01308521.2024-(76)-1-3).
24. Liu, Z., Chen, B., Wang, L. A., Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123138>.
25. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>.
26. Liu, Z., & Wang, L. A. (2014). A plant species (*Trifolium repens*) with strong enrichment ability for mercury. *Ecological Engineering*, 70, 349–350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.06.029>.
27. Malizia, D., Giuliano, A., Ortaggi, G., & Masotti, A. (2012). Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*, 6(2), S6. DOI: <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S2-S6>.
28. Про затвердження Державних гігієнічних правил і норм «Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах». Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 368. (2013). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0774-13>.
29. Про затвердження Переліку речовин, наявність яких у кормах є обмеженою або забороненою. Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України. № 708 (2012). (Україна). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2091-12>.

Стаття надійшла до редакції журналу 17.10.2025