

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет захисту рослин, біотехнологій та екології

ПОГОДЖНО
Декан факультету

захисту рослин, біотехнологій та екології

_____ Коломієць Ю.В.

«__» _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

загальної екології, радіобіології та
безпеки життєдіяльності

_____ Клепко А.В.

«__» _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Фіторе mediaційний потенціал рослин родини Бобові (Fabaceae)
та їх роль у рекультивациі ґрунтів»**

Спеціальність _____ 101 «Екологія»
(код і назва)

Освітня програма _____ «Екологічний контроль та аудит»
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

к. с.-г. наук, доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Ладика М.М.

**Керівник
магістерської кваліфікаційної роботи**

к. с.-г. наук, с.н.с., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Бондарь.В.І.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Гапоненко А.М.
(ПІБ студента)

КИЇВ-2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри
загальної екології, радіобіології
та безпеки життєдіяльності
_____ Клепко А.В.
«___» _____ 2025 р.**

**З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
ЗДОБУВАЧУ**

Гапоненку Андрію Миколайовичу

Спеціальність 101 «Екологія»

Освітня програма «Екологічний контроль та аудит»

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Фіторемедіаційний потенціал рослин родини Бобові (Fabaceae) та їх роль у рекультивації ґрунтів»

затверджена наказом від 05 листопада 2024 р. №1979 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14 листопада 2025 року

Вихідні дані до роботи: законодавчі акти, навчало-наукова література, звіти та оперативні матеріали, статистичні матеріали, дані міжнародної статистики та публікації наукових установ, власні спостереження та дослідження.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Проаналізувати сучасні наукові підходи до фіторемедіації ґрунтів, забруднених Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn та Hg, з акцентом на представників родин Fabaceae (рід *Trifolium*) та Brassicaceae.
2. Охарактеризувати фізико-географічні та ґрунтово-екологічні умови дослідних ділянок НБС ім. М. М. Гришка НАН України та морфолого-біологічні

особливості досліджуваних видів *Trifolium* і сидеральних культур родини Brassicaceae.

3. Визначити вміст Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn та Hg у ґрунті та надземній масі досліджуваних видів і розрахувати біоконцентраційні коефіцієнти (BCF).
4. Здійснити порівняльну оцінку фіторе mediaційного потенціалу представників Fabaceae (рід *Trifolium*) та Brassicaceae та виокремити найбільш перспективні види для використання в рекультивації деградованих і забруднених важкими металами ґрунтів.
5. Розробити практичні рекомендації щодо застосування досліджуваних видів у системах біологічної рекультивації ґрунтів.

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання _____

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Бондарь.В.І.

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Гапоненко А.М.

РЕФЕРАТ

Випускна магістерська робота «Фіторе mediaційний потенціал рослин родини Бобові (*Fabaceae*) та їх роль у рекультивації ґрунтів» викладена на 87 сторінках машинописного тексту, містить 26 рисунків, 94 використані джерела.

Метою даної роботи є оцінка фіторе mediaційного потенціалу представників родини Бобові (рід *Trifolium*) у порівнянні з сидеральними культурами родини Капустяні (*Brassicaceae*) за умов сірого лісового деградованого супіщаного ґрунту Національного ботанічного саду ім. М. М. Гришка НАН України з урахуванням особливостей накопичення важких металів Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn та Hg і значень біоконцентраційного фактора (BCF).

Об'єктом дослідження є рослини родини *Fabaceae* (представники роду *Trifolium*) та рослини родини *Brassicaceae*, вирощені на деградованому супіщаному ґрунті в умовах НБС ім. М. М. Гришка НАН України.

Предмет дослідження – вміст Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn та Hg у ґрунті й надземній біомасі досліджуваних видів, а також біоконцентраційні коефіцієнти (BCF), що характеризують їх фіторе mediaційний потенціал.

За результатами аналітичних та експериментальних досліджень встановлено, що ґрунтовий покрив дослідних ділянок характеризується низько-помірним техногенним навантаженням за вмістом Cd, Co, Cr, Cu, Pb та Zn, без екстремальних перевищень гранично допустимих концентрацій, але з ознаками деградації та зниженим вмістом органічної речовини. Показано, що представники роду *Trifolium* (*T. repens*, *T. pratense*, *T. medium*, *T. rubens*, *T. dubium*) інтенсивніше акумулюють Zn і Cu, тоді як концентрації Cd, Co, Cr і Pb у їхній надземній масі залишаються невисокими; максимальні значення BCF(Zn) і BCF(Cu) виявлено у *Trifolium dubium* та *T. pratense*. Рослини родини *Brassicaceae* (редька олійна 'Кияночка', гірчиця біла 'Сонячна', ріпак озимий 'Горлиця', гірчиця сарептська 'Золотава', суріпиця озима 'Оріана', тифон 'Фітопал') характеризуються вищими концентраціями та значеннями BCF для Cd, Co, Cr і Pb (особливо у редьки олійної 'Кияночка' та

тифону ‘Фітопал’) при низькому накопиченні Cu і Zn. Для Hg встановлено здатність *Trifolium repens* та *Trifolium pratense* витримувати техногенне навантаження та ефективно акумулювати ртуть у надземній біомасі, підтверджуючи свій фіторе mediaційний потенціал.

Отримані результати дозволили сформува ти науково обґрунтовані рекомендації щодо комбінованого використання представників родини *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та представників родини *Brassicaceae* у багатоконпонентних фіторе mediaційних та сидеральних сумішах для рекультивації деградованих ґрунтів лісостепової зони України, забруднених Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn та Hg.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фіторе mediaція, рекультивація ґрунтів, важкі метали, біоконцентраційний фактор (BCF), *Trifolium*, *Brassicaceae*, кадмій (Cd), кобальт (Co), хром (Cr), мідь (Cu), свинець (Pb), цинк (Zn), ртуть (Hg).

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ: МЕХАНІЗМИ, БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА РОЛЬ ПРЕДСТАВНИКІВ РОДИНИ БОБОВІ (<i>FABACEAE</i>)	12
1.1 Механізми фіторемерації: біоконцентрація, транслокація та кореневі взаємодії	12
1.2. Загальна характеристика забруднення ґрунтів важкими металами	16
1.3. Біологічні особливості рослин родини <i>Fabaceae</i> та представників роду <i>Trifolium</i> у контексті фіторемерації	20
1.4. Ртуть у ґрунтового середовищі та фіторемераційний потенціал представників роду <i>Trifolium</i>	23
РОЗДІЛ 2. УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, БІОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ТА ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПРЕДСТАВНИКІВ РОДУ <i>TRIFOLIUM</i>	27
2.1. Фізико-географічні умови та екологічні характеристики території Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України	27
2.2. Об'єкти дослідження та методи польових і лабораторних досліджень	31
2.3. Морфолого-біологічні особливості та особливості вирощування досліджуваних представників родин <i>Fabaceae</i> та <i>Brassicaceae</i>	34
2.3.1. Конюшина повзуча (<i>Trifolium repens</i> L.)	36
2.3.2. Конюшина лучна (<i>Trifolium pratense</i> L.)	38
2.3.3. Конюшина середня (<i>Trifolium medium</i> L.)	39
2.3.4. Конюшина червонувата (<i>Trifolium rubens</i> L.)	40
2.3.5. Конюшина сумнівна (<i>Trifolium dubium</i> Sibth.)	41
2.3.6. Гірчиця сарептська (<i>Brassica juncea</i> (L.) Czern.) 'Золотава'	43
2.3.7. Суріпиця озима (<i>Sinapis arvensis</i> L.) 'Оріана'	44
2.3.8. Гірчиця біла (<i>Sinapis alba</i> L.) 'Сонячна'	45
2.3.9. Ріпак озимий (<i>Brassica napus</i> L.) 'Горлиця'	47
2.3.10. Тифон (<i>Brassica rapa</i> L.) 'Фітопал'	48

2.3.11. Редька олійна (<i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>oleifera</i>) 'Кияночка' ...	49
2.4. Дослідження накопичення ртуті у <i>Trifolium repens</i> та <i>Trifolium pratense</i>	51
РОЗДІЛ 3. НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У НАДЗЕМНИХ ЧАСТИНАХ ДОСЛІДЖУВАНИХ РОСЛИН.....	53
3.1. Вміст важких металів у досліджуваних представників родин <i>Fabaceae</i> та <i>Brassicaceae</i>	53
3.2. Біоконцентраційний фактор (BCF) досліджуваних представників родин <i>Fabaceae</i> та <i>Brassicaceae</i>	60
3.3. Порівняльний аналіз результатів між рослинами родин <i>Fabaceae</i> та <i>Brassicaceae</i>	67
3.4. Особливості накопичення ртуті у представників роду <i>Trifolium</i> родини <i>Fabaceae</i>	70
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	77

ВСТУП

Забруднення ґрунтів важкими металами є однією з ключових екологічних проблем, що зумовлена тривалим техногенним навантаженням, інтенсивним сільськогосподарським використанням земель і наслідками воєнних дій. Надлишок кадмію, свинцю, хрому, кобальту, цинку, міді, ртуті та інших елементів порушує фізико-хімічні й біологічні властивості ґрунту, знижує продуктивність агроecosystem і створює ризики для здоров'я людини. Це становить загрозу для екологічної безпеки та аграрного виробництва. За цих умов зростає потреба у маловитратних, екологічно безпечних технологіях рекультивації, серед яких фітореMediaція посідає провідне місце.

ФітореMediaція – екологічно безпечний метод рекультивації ґрунтів, який базується на здатності рослин поглинати, акумулювати та трансформувати або стабілізувати забруднювачі, одночасно поліпшуючи структуру і родючість ґрунту. Перспективними є види, що поєднують високу екологічну пластичність, розвинену кореневу систему, значну біомасу та здатність впливати на кругообіг елементів. До них належать представники родини Бобові (*Fabaceae* Lindl., рід *Trifolium* L.) та культури родини Капустяні (*Brassicaceae* Burnett), які широко використовуються у системах землеробства, але їх фітореMediaційний потенціал вивчений недостатньо. Додаткової уваги потребують особливості накопичення ртуті (Hg) представниками роду *Trifolium* в умовах техногенного забруднення.

Мета роботи – оцінити фітореMediaційний потенціал представників родини Бобові (*Fabaceae*, рід *Trifolium*) у порівнянні з сидеральними культурами родини Капустяні (*Brassicaceae*) та визначити їхню роль у рекультивації ґрунтів, з урахуванням особливостей накопичення ртуті.

Для досягнення мети поставлено такі **завдання**:

1. Узагальнити теоретичні основи фітореMediaції важких металів, зокрема розкрити значення біоконцентраційного фактора (BCF) як показника ефективності процесу.

2. Проаналізувати сучасний стан забруднення ґрунтів важкими металами та охарактеризувати їхні екотоксикологічні властивості.
3. Охарактеризувати біологічні та агроекологічні особливості досліджуваних видів родин *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та *Brassicaceae*.
4. Описати умови проведення досліджень та обґрунтувати вибір об'єктів на території НБС імені М. М. Гришка НАН України.
5. Визначити вміст Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn у ґрунті та надземній масі досліджуваних видів.
6. Розрахувати біоконцентраційні коефіцієнти (BCF) для зазначених металів та на їх основі оцінити фіторе mediaційний потенціал рослин.
7. Порівняти отримані показники між представниками родин *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та *Brassicaceae* з метою виявлення найперспективніших видів для рекультивації ґрунтів.
8. Дослідити особливості накопичення ртуті (Hg) у *Trifolium repens* та *Trifolium pratense* на техногенно забруднених урбанізованих ґрунтах та оцінити їхній потенціал як фіторе mediaторів і біоіндикаторів.

Об'єкт дослідження – рослини родини *Fabaceae* (рід *Trifolium*: *T. pratense*, *T. repens*, *T. medium*, *T. rubens*, *T. dubium*) та селекційні сорти сидеральних культур родини *Brassicaceae* Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України.

Предмет дослідження – вміст важких металів у надземній масі зазначених видів, значення BCF, особливості накопичення Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn та Hg і можливості використання цих рослин для фітоекстракції та стабілізації забруднених ґрунтів.

У роботі використано теоретичні (аналіз літератури), польові (закладання дослідів, відбір ґрунтових і рослинних зразків), лабораторні (ICP-OES, аналізатор Hg з термічною декомпозицією) та статистичні методи (розрахунок BCF, обробка даних у *Microsoft Excel*).

Наукова новизна полягає у комплексній оцінці фітореMediaційного потенціалу п'яти видів роду *Trifolium* та шести сидеральних сортів *Brassicaceae* за показниками вмісту важких металів і біоконцентраційних коефіцієнтів BCF; з'ясуванні видоспецифічних особливостей акумуляції металів у *Fabaceae* та *Brassicaceae*; встановленні закономірностей накопичення Hg у *T. repens* та *T. pratense* на урбанізованих техногенно забруднених ґрунтах.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів для обґрунтованого добору видів *Fabaceae* та *Brassicaceae* з метою їх застосування у фітореMediaційних і сидеральних посівах на деградованих і забруднених ґрунтах.

РОЗДІЛ 1. ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ: МЕХАНІЗМИ, БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА РОЛЬ ПРЕДСТАВНИКІВ РОДИНИ БОБОВІ (*FABACEAE*)

1.1. Механізми фітореємедіації: біоконцентрація, транслокація та кореневі взаємодії.

У сучасній екологічній біотехнології фітореємедіація розглядається як один з ключових інструментів відновлення порушених територій, оскільки вона поєднує здатність вищих рослин до поглинання та перерозподілу забруднювачів з формуванням сталого рослинного покриву й відновленням ґрунтових функцій. За визначенням, яке поступово стало класичним, фітореємедіація охоплює всі форми використання рослин та асоційованої з ними мікробіоти для стабілізації, вилучення або зниження токсичності контамінантів у ґрунтах і водних середовищах [1; 2].

Фітореємедіація як технологічна стратегія ґрунтується на здатності рослин і їх симбіозів із мікроорганізмами здійснювати поглинання, трансформацію, переміщення або стабілізацію забруднювачів у середовищі. Цей біотехнологічний підхід, що поєднує ботанічні, мікробіологічні та ґрунтознавчі принципи, сьогодні вважається перспективним, особливо в контексті очищення ґрунтів від важких металів [3]. У межах цього процесу рослина функціонує як активний агент, здатний захоплювати іони металів через кореневу систему, після чого відбувається їх транспортування, внутрішньоклітинна секвестрація, поглинання за допомогою металозв'язуючих білків, а також комплексоутворення в клітинах.

Реалізація фітореємедіаційних процесів передбачає кілька послідовних етапів: надходження металу до ґрунтового розчину, його контакт з кореневою поверхнею, проникнення через плазмалему та включення до внутрішньоклітинного метаболізму, подальше перерозподілення між органами й депонування в певних тканинах. На кожному з цих етапів задіяні специфічні транспортні системи, хелатуючі агенти та механізми детоксикації. Поглинання металів коренями

грунтується як на неспецифічних потоках через іонні канали, так і на роботі переносників, що можуть мати високу спорідненість до певних катіонів. У середині клітини іони металів зв'язуються з фітохелатинами, металотіонеїнами або органічними кислотами, після чого часто переміщуються до вакуоль, де їх вільна концентрація знижується до рівня, сумісного з підтриманням життєдіяльності [4; 5].

У контексті важких металів особливої уваги набувають не лише процеси первинного поглинання, а й транслокація – переміщення металів від коренів до надземних органів. Саме поєднання здатності кореневої системи залучати елементи з ґрунтового розчину та подальшої їх акумуляції в певних органах визначає, який саме механізм фітореMediaції буде домінувати: вилучення металу із системи разом із надземною біомасою чи переважна стабілізація в кореневій зоні. При цьому в даній роботі акцент робиться на кількісній оцінці здатності рослин до накопичення металів у тканинах, тобто на показнику біоконцентрації.

Оцінка фітореMediaційної здатності рослини здійснюється шляхом розрахунку показників, які відображають біоконцентрацію металів. Показник біоконцентрації (BCF) являє собою відношення концентрації металу в тканинах рослини до його концентрації в ґрунті, що дає змогу оцінити здатність рослини акумулювати метал з середовища [6; 7]. У науковій літературі BCF розглядають як інтегральний індикатор, що відображає і властивості ґрунту, і особливості виду, і специфіку самого елемента. Значення BCF, більші за одиницю, зазвичай інтерпретують як свідчення ефективного вилучення металу рослиною порівняно з його вмістом у ґрунті, тоді як значення менші за одиницю вказують на переважання процесів, за яких метал залишається у ґрунтовій фазі [8; 9].

Важливо, що BCF не є сталою величиною для певного виду або ґрунту, а залежить від комплексу чинників. На величину цього показника впливають фізико-хімічні параметри ґрунту (рН, вміст органічної речовини, гранулометричний склад, ємність катіонного обміну), форма перебування металу (обмінна, оксидна, органо-мінеральна), рівень забруднення, а також фізіологічний стан рослини, її вікові та

фенологічні особливості. Для одного й того самого виду VCF може істотно відрізнятись на різних ґрунтах, за різних комбінацій елементів чи в різні фази онтогенезу, що потребує обережної інтерпретації результатів і порівняння лише в межах подібних умов [9-11].

Окремого значення набуває те, у яких саме органах оцінюється біоконцентраційний фактор. У дослідженнях, орієнтованих на екологічний ризик для людини, частіше аналізують VCF для їстівних органів сільськогосподарських культур, тоді як у роботах, присвячених фіторемедіації, оцінюють VCF для надземної біомаси та коренів, порівнюючи їх між собою. Такий підхід дозволяє встановити, чи є рослина ефективним акумулятором металу у цілому, і водночас дає змогу зрозуміти, в якій частині біомаси відбувається основне накопичення. У випадку трав'янистих сидеральних культур з розвиненою надземною масою високі значення VCF для пагонів створюють передумови для збільшення виносу металів з території разом із рослинними рештками, тоді як переважання накопичення в коренях свідчить про більшу стабілізуючу роль таких рослин [10; 12].

Важливою частиною механізму є взаємодія рослини з ризосферними мікроорганізмами, зокрема азотфіксуючими бактеріями, мікоризою, мобілізуючими йонів мікроорганізмами, які можуть підвищувати доступність металів, сприяти росту кореневої системи, змінювати локальні умови рН та продукувати хелатуючі сполуки. Наприклад, бобові, що утворюють симбіоз із ризобіями, можуть мати підвищену біомасу коренів, що сприяє більшому об'єму контакту з ґрунтовим середовищем, й таким чином – потенційно більшій здатності до захоплення металів [13]. При цьому продукування мікробіотою препаратів, здатних змінювати хімічну форму металів у ризосфері, дозволяє підвищити мобільність йонів, що своєю чергою позитивно впливає на поглинання рослинами [14].

Ризосфера як безпосередня зона контакту коренів із ґрунтом формується під впливом корневих виділень та метаболічної активності мікроорганізмів. У цьому мікросередовищі концентруються амінокислоти, органічні кислоти, вуглеводи,

фенольні сполуки, які можуть як мобілізувати метали, утворюючи з ними розчинні комплекси, так і, навпаки, сприяти їх фіксації. Бактерії, асоційовані з кореневою системою, здатні продукувати сидерофори, екзополісахариди, регулятори росту та антиоксидантні сполуки, що змінює реакцію рослини на металевий стрес і впливає на інтенсивність поглинання елементів [15-18].

Для представників родини *Fabaceae* особливо важливою є участь бульбочкових бактерій, які поєднують функції азотфіксації та підвищення толерантності до металів. Доведено, що металорезистентні штами ризобій можуть зберігати здатність до утворення бульбочок і фіксації азоту навіть на сильно забруднених ґрунтах, одночасно модифікуючи профіль поглинання металів рослиною та впливаючи на значення BCF для окремих елементів. У представників родини *Fabaceae* із розвиненою кореневою системою та значною кількістю симбіотичних структур формується складний комплекс взаємодій, де мікроорганізми не лише послаблюють токсичну дію металів на рослину, але й опосередковано визначають, які елементи будуть більш доступними для поглинання і в яких тканинах вони переважно накопичуватимуться [19-23].

Попри значний потенціал, фітореMediaція має низку обмежень. Серед них: тривалий час досягнення ефекту, знижена продуктивність при високих концентраціях металів, необхідність подальшої утилізації метал насиченої біомаси, а також змінна ефективність залежно від виду рослини, властивостей ґрунту, кліматичних умов та типу металів [24]. Додатковими стримуючими чинниками є неоднорідність забруднення за профілем ґрунту, обмежена глибина проникнення кореневої системи трав'янистих культур у порівнянні з деревними, а також можливі агротехнічні та економічні обмеження щодо тривалості та площ фітореMediaційних заходів [25; 26].

У наукових дослідженнях пропонуються різні підходи до мінімізації зазначених обмежень. Серед них – добір видів із високими значеннями біоконцентраційного фактора (BCF) за цільовими металами; застосування

органічних та мінеральних добрив для регулювання доступності елементів; інокуляція рослин штамами мікроорганізмів, здатними підвищувати їхню толерантність до металевого стресу; а також використання багатокомпонентних посівів, у яких різні види виконують специфічні функції в процесі ремедіації [27; 28]. У межах такого підходу вибір конкретних видів-фіторемедіаторів набуває стратегічного значення, адже саме їхні біологічні особливості, кореневі взаємодії та рівень VCF визначають ефективність очищення ґрунтів.

Вибір виду фіторемедіатора та розробка відповідної технології для конкретного ґрунту і рівня забруднення є ключовим завданням. У нашій роботі ми аналізуємо забруднення ґрунту та рослин важкими металами, їх елементний профіль, а також розглядаємо представників родин *Fabaceae* та *Brassicaceae* як перспективні об'єкти для оцінки біоконцентраційних показників у деградованих ґрунтах.

1.2. Загальна характеристика забруднення ґрунтів важкими металами.

У сучасній екології ґрунт розглядається як базовий компонент біосфери, що забезпечує стабільне функціонування наземних екосистем, продуктивність агроландшафтів та продовольчу безпеку. Будь-які тривалі зміни його хімічного складу, зокрема накопичення потенційно токсичних елементів, мають кумулятивний характер і проявляються не лише на рівні окремих біоценозів, але й на регіональному та глобальному рівнях. Останні дослідження, виконані на основі великомасштабних баз даних та методів машинного навчання, підтверджують, що токсичні метали в ґрунтах стали характерною ознакою антропогенно трансформованих територій і є одним з маркерів антропоцену [29].

Забруднення ґрунтів важкими металами вважається одним із ключових викликів сучасної екології, оскільки накопичення цих елементів у агроландшафтах порушує природні функціональні процеси, зменшує продуктивність сільськогосподарських культур і підвищує ризики для здоров'я людей. Згідно з

найбільш сучасними оцінками, до 14–17 % світових орних земель відчують вплив токсичних металів – кадмію, свинцю, хрому, міді, нікелю тощо. Цей факт підкреслює глобальний масштаб проблеми та наголошує на необхідності застосування системних підходів до моніторингу та відновлення.

Результати зазначеного метааналізу, виконаного на основі майже 800 тис. зразків ґрунту, засвідчують, що у зонах ризику проживає від 0,9 до 1,4 млрд осіб. Найбільша концентрація проблемних територій спостерігається зокрема в аграрно розвинених регіонах Азії та окремих частинах Європи [29]. Особливе занепокоєння викликає те, що значна частина такого забруднення локалізується саме на орних землях, де формується основна частина продовольчої продукції. Це безпосередньо поєднує стан ґрунтів із питаннями продовольчої безпеки та здоров'я населення.

Метали складають особливу групу забруднювачів, оскільки не зазнають біологічного розкладу й можуть стабільно залишатися в ґрунтовому середовищі протягом тривалого часу. При цьому вони здатні утворювати стійкі хімічні комплекси з частинками ґрунту, мігрувати в доступні форми, долучатися до циклів біогеохімічних процесів і, врешті решт, входити в харчові ланцюги через поглинання рослинами. Таке накопичення металів змінює фізико хімічні властивості ґрунтів: погіршується структура, знижується аерація й водопроникність, зменшується активність ферментативних та мікробіологічних систем, що призводить до зниження екологічної стійкості агроecosystem [30; 31].

Поведінка важких металів у ґрунтовому середовищі визначається поєднанням їхньої хімічної природи та властивостей ґрунту. Ключову роль відіграють реакція середовища, вміст органічної речовини, мінеральний склад, ємність катіонного обміну, наявність оксидів заліза й марганцю та інтенсивність процесів вивітрювання. Показано, що за умов підкислення ґрунту рухомість кадмію, цинку та свинцю істотно зростає, навіть незначне зниження рН може призводити до різкого збільшення їх концентрацій у ґрунтовому розчині [32-35]. Навпаки, підвищений вміст органічної речовини та глинистих мінералів здатний

підсилювати сорбцію металів, однак утворені органо-мінеральні комплекси в певних умовах також можуть переходити в розчинну форму і, таким чином, впливати на довгострокову динаміку їхньої міграції.

Антропогенні джерела формування металевого навантаження домінують над природними в більшості аграрних регіонів. Вони включають металургійну та гірничодобувну промисловість, транспортні викиди, неконтрольовані відходи, а також сільськогосподарське використання мінеральних добрив, пестицидів, стічних вод та осадів. При цьому внесок кожного джерела залежить від регіональних умов: в одних країнах переважає атмосферне осадження, в інших – використання добрив чи стічних вод [36]. Надмірне накопичення металів у ґрунті призводить безпосередньо до зростання їхньої біодоступності, яка залежить від рН, вмісту органічної речовини, гранулометричного складу, ступеня окислення чи відновлення, присутності конкурентних йонів. Ця біодоступність є вирішальною для динаміки поглинання металів рослинами та їх подальшого поширення через екосистему [37].

Узагальнюючі огляди, присвячені важким металам в аграрних ґрунтах, показують, що поряд із промисловими викидами дедалі помітнішу роль відіграють агротехнічні фактори. До ґрунту тривалий час надходять метали разом із фосфорними добривами, органічними добривами тваринного походження, засобами захисту рослин, а також через зрошення стічними водами та внесення осадів стічних вод як добрив [36; 38; 39]. При цьому саме поєднання кількох джерел, а не окремий фактор, найчастіше зумовлює формування стійкого металевого фону в орному шарі, який важко усунути без цілеспрямованих заходів рекультивації.

Серед металів, які найчастіше фіксують у забруднених ґрунтах агроекосистем, особливу увагу привертають кадмій (Cd), свинець (Pb), хром (Cr), мідь (Cu), цинк (Zn), кобальт (Co) та ртуть (Hg). Кадмій і свинець – метали, які не мають фізіологічного значення для рослин чи тварин, тому навіть при невеликих концентраціях проявляють високий токсичний потенціал, тоді як мідь та цинк в

малих кількостях можуть бути життєво необхідними, але при надлишку набувають токсичності [40]. Таким чином, підвищена концентрація цих металів у ґрунтів блокує нормальну роботу ґрунтово-рослинного комплексу і створює передумови для довготривалого екологічного дисбалансу. Отже, виникає потреба в розробці не лише моніторингових систем, але й технологій рекультивації та відновлення функцій ґрунтів, де ключовим елементом може стати застосування фітореMediaції.

Екотоксикологічні дослідження підтверджують, що навіть сублетальні концентрації Cd, Pb та інших металів можуть викликати істотні зміни в ґрунтових мікробних угрупованнях. Спостерігається зниження чисельності таксономічних груп, перебудова ценозів, пригнічення активності ключових ферментів, порушення колообігу вуглецю й азоту, що в підсумку веде до зменшення функціонального різноманіття ґрунтової біоти [41-44]. Для рослин металевий стрес проявляється у порушенні проростання насіння, уповільненні росту коренів, появі хлорозу й некрозів листкової пластинки, зниженні інтенсивності фотосинтезу та посиленні утворення активних форм кисню, що потребує активації антиоксидантних систем [42; 45].

З позиції здоров'я людини систематичне надходження важких металів із харчовими продуктами та питною водою асоціюється з підвищеним ризиком розвитку онкологічних, серцево-судинних, ниркових і неврологічних патологій. Показовим є приклад забруднення кадмієм основних продуктів харчування в низці європейських країн, що демонструє: навіть за формального дотримання регламентів застосування добрив і засобів захисту рослин накопичення токсичних елементів у ґрунті може спричиняти значні медико-соціальні наслідки [46].

Узагальнення наведених даних дозволяє розглядати забруднення ґрунтів важкими металами не як локальну або тимчасову проблему, а як довготривалий фактор трансформації агроecosystem. Оскільки метали не руйнуються й можуть переходити між різними ґрунтовими та біологічними пулів, ефективне зниження екологічних ризиків можливе лише за умови поєднання превентивних заходів із впровадженням технологій рекультивації. На цьому тлі фітореMediaція набуває

особливої актуальності як біологічно орієнтований підхід, здатний поєднати очищення ґрунту з відновленням його структурно-функціональних характеристик.

1.3. Біологічні особливості рослин родини *Fabaceae* та представників роду *Trifolium* у контексті фітореMediaції.

На тлі поширеного забруднення ґрунтів важкими металами особливого значення набуває добір таких груп рослин, які одночасно здатні витримувати дію токсикантів, акумулювати або стабілізувати їх у ґрунтово-рослинній системі та відновлювати базові функції ґрунту, зокрема азотний та вуглецевий обіг. У цьому контексті бобові посідають одне з провідних місць завдяки поєднанню здатності до симбіотичної фіксації атмосферного азоту й толерантності до стресових факторів, включаючи металеве навантаження [47; 48].

Родина *Fabaceae*, що налічує понад 18 000 видів і характеризується високою екологічною адаптивністю, займає провідне місце серед рослинних груп, які можуть бути використані для відновлення деградованих або забруднених земель. Ця адаптивність у поєднанні зі здатністю утворювати симбіоз із азотфіксуючими ризобіями надає представникам цієї родини конкурентної переваги в екстремальних умовах росту, таких як техногенно забруднені ґрунти. Завдяки значній кореневій системі та розвиненій ризосфері бобові забезпечують активну взаємодію з ґрунтовим середовищем, що сприяє поглинанню, фіксації ймовірно токсичних іонів [49].

Сучасні філогенетичні та екологічні дослідження підкреслюють, що *Fabaceae* є однією з ключових родин у глобальних наземних екосистемах, оскільки здатність до симбіозу з *Rhizobium* та спорідненими родами бактерій забезпечує їм перевагу на малородючих, збіднених азотом і деградованих ґрунтах. Саме біологічна фіксація азоту дозволяє бобовим підтримувати високий рівень продуктивності без значних доз мінеральних добрив, водночас збагачуючи ґрунт органічною речовиною та поліпшуючи його структуру [48; 50; 51]. Для техногенно трансформованих територій це означає, що представники *Fabaceae* можуть діяти не

тільки як елементи фітореMediaційних схем, але й як агенти ґрунтової меліорації, які сприяють відновленню порушених біогеохімічних циклів.

Інтерес до використання бобових у фітореMediaції зростає, зокрема через здатність окремих видів поглинати важкі метали, а також через взаємодію з мікроорганізмами, що підвищує ефективність очищення ґрунту. Саме бобові здатні не тільки акумулювати метали, але й використовувати ризобіальний симбіоз для підвищення стресостійкості та мобільності металів [23; 52].

У дослідженнях, присвячених реакції *Fabaceae* на металевий стрес, відзначається, що металорезистентні штами бульбочкових бактерій здатні підтримувати утворення бульбочок і фіксацію азоту на забруднених ґрунтах, зменшувати прояв токсичності та модифікувати розподіл металів між коренями й надземними органами, що відображається на значеннях біоконцентраційного фактора для окремих елементів [47; 51; 53]. Показано, що в системі «бобова рослина – ризосферна мікробіота» формується стабільний комплекс взаємодій, у якому мікроорганізми беруть участь у зміні окисно-відновних умов, продукції органічних кислот та хелатуючих сполук, а також у регуляції експресії генів, залучених до транспорту й детоксикації металів. За таких умов оцінка VCF для бобових культур відображає не лише їх власні фізіолого-біохімічні особливості, але й сукупний ефект симбіотичних асоціацій у ризосфері [48; 53].

Рід *Trifolium*, представники якого включають *T. pratense*, *T. repens* та інші види, має низку властивостей, які роблять їх перспективними для використання в рекультиваційних програмах. Ці рослини характеризуються швидким ростом, здатністю покривати ґрунт, адаптацією до різних агроекологічних умов і відносною простотою вирощування, що сприяє їх залученню як частини сумішей при відновленні занедбаних або забруднених земель. Хоча вони не належать до «гіперакумуляторів» металів, їхня роль як стабілізаторів шкідливих речовин і компонентів багатофункціональних фітореMediaційних систем визнається в наукових дослідженнях [54].

Численні роботи, виконані на багатокomпонентно забруднених ґрунтах, показують, що *Trifolium repens* та *T. pratense* здатні успішно проростати й формувати біомасу за умов підвищених концентрацій Pb, Zn, Cd, Cu та Ni, при цьому в тканинах рослин фіксується помітне накопичення цих елементів, яке корелює з рівнем забруднення ґрунту [55-57]. За даними окремих досліджень, для конюшини повзучої (*T. repens*) отримано значення BCF більше за одиницю щодо Zn та низки інших металів, що свідчить про потенційну здатність цієї культури до їх ефективного залучення з ґрунтового розчину, тоді як для більшості елементів значення BCF залишаються нижчими, підкреслюючи скоріше стабілізуючу, ніж класично фітоекстракційну роль [57; 58].

Для представників *Trifolium* характерне поєднання поверхневого та глибшого коренеутворення, що забезпечує контакт із різними шарами орного горизонту й підвищує загальну площу поглинання. Наявність щільного дернинного покриву зменшує ризик ерозії та вимивання забруднювачів, а також сприяє накопиченню органічних решток, які згодом трансформуються в гумусові сполуки й покращують буферні властивості ґрунту щодо металів. Дослідження польових фітоценозів за участі *Trifolium repens* демонструють, що багаторічне вирощування конюшини на забруднених ділянках може знижувати вміст доступних форм деяких металів у верхньому шарі ґрунту, що пов'язують як із поступовою фітоекстракцією, так і зі зміною гранулометричної структури та органо-мінерального комплексу ґрунту [55; 59].

Незважаючи на позитивні перспективи, використання *Trifolium* у фіторе mediaції потребує подальшого ґрунтового вивчення. Необхідно визначити конкретні коефіцієнти біоконцентрації для різних металів, оцінити адаптованість рослин до специфічних ґрунтово-екологічних умов, дослідити можливості утилізації біомаси після накопичення металів, а також проаналізувати взаємодію з ризобіями та іншою мікрофлорою в умовах металевого стресу. Саме ці аспекти становлять предмет нашої роботи, спрямованої на визначення фіторе mediaційного потенціалу рослин родини *Fabaceae* та їхньої ролі у рекультивації ґрунтів.

У розвиток окреслених положень доцільно врахувати, що в сучасній практиці рекультивациі часто поєднують бобові культури з іншими групами рослин, які мають виражені фітоекстракційні властивості щодо окремих металів. Особливе місце серед таких груп посідають представники родини *Brassicaceae*, відомої високим різноманіттям видів, здатних до накопичення кадмію, цинку, нікелю та інших металів у надземній масі.

Для видів роду *Brassica*, *Sinapis*, *Raphanus* показано суттєве підвищення вмісту металів у біомасі за умов забруднення, що поєднується з відносно коротким вегетаційним періодом і значною продуктивністю, а отже – з потенційною ефективністю їх застосування в короткочасних фітореMediaційних сівоЗмінах [60; 61].

Наявність глюкозинолатів та продуктів їх гідролізу, зокрема ізотіоціанатів, у *Brassicaceae* впливає на склад і функціонування ризосферної мікробіоти, змінює умови в ґрунті, зокрема щодо патогенів і шкідників, і побічно може модифікувати доступність металів та їхній перерозподіл між ґрунтом і рослинами [62; 63].

З огляду на це, в межах нашого дослідження, порівняння фітореMediaційного потенціалу представників *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та *Brassicaceae* на одному типі ґрунту й за однотипного металевого навантаження дозволяє не лише кількісно оцінити значення біоконцентраційного фактора для кожної групи, але й встановити, які саме біологічні й екологічні особливості визначають їхню ефективність у процесах рекультивациі.

1.4. Ртуть у ґрунтовому середовищі та фітореMediaційний потенціал представників роду *Trifolium*.

Серед важких металів, що забруднюють ґрунтове середовище, ртуть (Hg) вирізняється поєднанням високої токсичності, здатності до біоаккумуляціі та участю в глобальних біогеохімічних циклах. Вона не виконує життєво необхідних функцій у рослин і тварин, проте виявляє виражену нейротоксичність і може

накопичуватися в трофічних ланцюгах [64; 65]. За даними екологічних і токсикологічних агентств, ртуть належить до групи пріоритетних небезпечних забруднювачів довкілля нарівні з миш'яком та свинцем [65; 66].

Основні джерела надходження ртуті у навколишнє середовище пов'язані з діяльністю гірничо-металургійних, хімічних і паливно-енергетичних підприємств, а також із накопиченням промислових і побутових відходів. Значну роль відіграє спалювання вугілля на теплоелектростанціях, історичне застосування ртутьмісних пестицидів і фунгіцидів у сільському господарстві, а також аварійні викиди та руйнування промислових об'єктів, зокрема внаслідок воєнних дій [67-69].

У ґрунтах ртуть представлена комплексом форм – від малорозчинних сполук, зв'язаних із гумусовими та мінеральними фракціями, до більш рухомих комплексів, що обумовлюють її біодоступність [70]. За результатами ґрунтово-геохімічних досліджень встановлено, що підвищені концентрації Hg можуть фіксуватися на значній відстані від джерела викидів, зокрема у межах великих міських агломерацій [71]. В Україні гранично допустима концентрація ртуті в ґрунті становить 2,1 мг/кг [72], однак на техногенних майданчиках можливі істотні локальні перевищення цього нормативу.

Показовим прикладом є території хімічних підприємств, де внаслідок тривалої експлуатації ртутьмісних технологій у ґрунтовому профілі сформувалися осередки забруднення із вмістом Hg, що може перевищувати фоновий рівень на один–два порядки [71]. Такі ділянки потребують довготривалого моніторингу та впровадження спеціалізованих технологій рекультивації, зокрема фітореMediaційних.

ФітореMediaція ртуті є одним з найскладніших напрямів використання рослинних технологій, що пов'язано з низькою рухомістю Hg у більшості ґрунтових умов, складною хімією елемента та відносно невеликою кількістю стійких до ртуті видів [73; 74]. Серед механізмів рослинної реMediaції ртуті розглядають фітоекстракцію (перенесення Hg у надземні органи), фітостабілізацію (фіксацію

металу переважно в кореневій зоні) та фітоволатилізацію (перетворення неорганічної ртуті на леткі форми, які вивільняються в атмосферу) [37; 73]. Значну роль у цих процесах відіграють антиоксидантні системи, металозв'язувальні сполуки (глутатіон, фітохелатини), транспортні білки та особливості корневих ексудатів [37].

Найчастіше в літературі як перспективні фіторемедіатори Hg згадуються види родів *Brassica*, *Helianthus*, *Pennisetum*, *Typha*, а також низка гідрофітів, здатних акумулювати значні кількості ртуті у водних екосистемах [73; 75; 76]. Деякі деревні рослини (*Salix*, *Populus*) можуть накопичувати Hg у деревині та річних кільцях, що дозволяє оцінювати ретроспективну динаміку забруднення [77].

Бобові культури становлять окремий інтерес як потенційні фіторемедіатори ртуті завдяки поєднанню здатності до симбіотичної азотфіксації, формування значної біомаси й відносно високої стійкості до важких металів. Показано, що місцеві популяції *Trifolium* spp. та *Medicago* spp. у шахтарських регіонах здатні утворювати асоціації з метал-резистентними ризобіями на ґрунтах із підвищеним вмістом Hg (до 37,6–273,0 мг/кг), зберігаючи життєздатність і продуктивність за екстремальних умов [78]. Це відкриває перспективи використання бобово-ризобійних систем як елементів комплексних фіторемедіаційних технологій [73; 74; 78].

На урбанізованих територіях, зокрема в межах м. Києва, *Trifolium repens* та *T. pratense* є звичайними компонентами газонних та лугових угруповань. Дослідження їх елементного складу свідчать про здатність цих видів накопичувати ртуть у надземній масі при концентраціях у ґрунті, що перевищують фонові значення та встановлені нормативи [71; 74; 79; 80]. У поєднанні з високою адаптивністю до порушених ґрунтів це дозволяє розглядати *Trifolium* spp. як перспективний компонент фіторемедіаційних схем, орієнтованих на відновлення техногенно забруднених територій та паралельне поліпшення показників родючості ґрунту.

Одним із найбільш забруднених ртуттю об'єктів в Україні є територія колишнього Заводу «Радикал» у Києві, який до 1996 р. спеціалізувався на

виробництві пінополіуретану, бертолетової солі, гермобутилу та засобів захисту рослин. Ґрунти, будівельні конструкції та залишки виробничих приміщень містять значні концентрації токсичного металу, що призводить до постійного виділення небезпечних парів у навколишнє середовище. За даними 2011 року, концентрація Hg у ґрунтах цієї ділянки коливалася від 0,5 до 2 мг/кг, місцями сягала 10 мг/кг і більше [71]. Ремедіація ґрунтів цієї території та систематичний моніторинг стану довкілля залишаються актуальними завданнями.

РОЗДІЛ 2. УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, БІОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБ'ЄКТІВ ТА ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ПРЕДСТАВНИКІВ РОДУ *TRIFOLIUM*

2.1. Фізико-географічні умови та екологічні характеристики території Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України.

Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН України (НБС) розташований у центральній частині м. Києва, у південно-східному секторі Печерського району, на схилах Київського плато в межах урочища Звіринець.

Територія саду приурочена до невисоких Печерських пагорбів, що відповідають географічним координатам приблизно $50^{\circ}22'$ північної широти та $30^{\circ}33'$ східної довготи. Простягання НБС уздовж дніпровської долини має витягнутий характер: з півночі на південь сад займає близько 1,8 км, а із заходу на схід – орієнтовно 0,9 км, що формує компактний, але рельєфно різноманітний масив зелених насаджень у межах великого міста (Рис. 2.1.).



Рис. 2.1. Схема розташування Національного ботанічного саду

імені М.М.Гришка на карті м. Києва

Місцем виконання досліджень у межах даної магістерської роботи були дослідні ділянки Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України. Згідно з фізико-географічним районуванням, територія НБС належить до Київської височинної області Дністровсько-Дніпровської провінції Лісостепової зони Східноєвропейської рівнинної країни і є частиною правобережного плато, відомого як Наддніпровська височина. Таке положення зумовлює поєднання рис платоподібного рельєфу з виразно розвинутою яружно-балковою мережею та крутими схилами дніпровського правобережжя.

Рельєф території саду є складним і значно розчленованим. Площа НБС перетинається системою ярів, балок і малих долин, що формують глибоко врізані форми мікрорельєфу. На схід, у бік долини Дніпра, плато переходить у круті схили, місцями зі схильністю до зсувних процесів. Із західного боку територія також обмежена крутими схилами, що спускаються до балки, яка далі переходить у долину р. Либідь; по цій балці проходить вулиця Садово-Ботанічна. Яри та балки дніпровського схилу відзначаються значною глибиною та уривистістю, їх схили переважно круті, місцями більш пологі, вкриті деревно-чагарниковими угрупованнями або задерновані трав'янистою рослинністю. Такий характер рельєфу сприяє розвитку ерозійних процесів, передусім площинного змиву, що на низці ділянок призводить до істотного зменшення потужності акумулятивного горизонту ґрунту та посилення проявів деградації [81].

Розташування НБС у центральній частині мегаполіса зумовлює значний антропогенний вплив на його садово-паркові ландшафти. Територія саду оточена щільною забудовою, транспортною інфраструктурою та низкою промислових об'єктів. У безпосередній близькості до НБС розміщено чотири підприємства, викиди яких істотно формують структуру техногенного навантаження на повітряне середовище (ТЕЦ-5, завод «Аверс», асфальтобетонний завод, комбінат будівельних матеріалів). Особливо вагомим є внесок ТЕЦ-5 АЕК «Київенерго», що розташована

приблизно за 800 м від меж НБС: лише у 2010 р. обсяги її викидів забруднюючих речовин становили 11 427 т, тобто близько 33 % сумарних викидів від стаціонарних джерел м. Києва [82]. До складу цих викидів входять сполуки металів, неметанові леткі органічні сполуки, суспендовані тверді частинки, оксиди азоту, діоксид сірки та інші сірковмісні сполуки, а також оксид вуглецю. Зафіксовано тенденцію до суттєвого зростання сумарних викидів, що пов'язують, зокрема, зі збільшенням частки мазуту в структурі палива замість природного газу, у тому числі й на ТЕЦ-5 [82].

Протягом останніх 10–15 років структура джерел забруднення атмосферного повітря у м. Києві зазнала відчутних змін. На тлі зменшення викидів від частини промислових підприємств істотно зросла роль автотранспорту, який нині є домінуючим джерелом шкідливих речовин у повітряному басейні міста. Середньорічні сумарні викиди в атмосферу в межах Києва становлять близько 230 тис. т, при цьому провідна частка припадає саме на транспортні засоби. Найбільший внесок мають оксид вуглецю (до 200 тис. т), леткі органічні сполуки (до 30 тис. т) та оксиди азоту (до 20 тис. т) [83]. Таким чином, навіть відносно ізольовані зелені масиви, зокрема територія НБС, перебувають під впливом як промислових, так і транспортних викидів, що формують складний техногенний фон.

Ґрунтовий покрив НБС представлений переважно темно-сірими опідзоленими ґрунтами, які внаслідок сильної пересіченості рельєфу та тривалого антропогенного навантаження значною мірою деградовані й характеризуються зниженою потужністю гумусового горизонту та невисоким вмістом органічної речовини. У зоні розміщення дослідних ділянок, задіяних у даній роботі, ґрунти відносяться до групи сірих лісових деградованих супіщаних та суглинистих ґрунтів, що є типовими для правобережних наддніпровських схилів. За механічним складом ґрунти в точках відбору зразків відповідають середньому та важкому суглинку, а ґрунтові води залягають на значній глибині й безпосереднього впливу на ґрунтоутворні процеси не чинять. Реакція ґрунтового середовища в межах НБС

варіює від кислого (рН близько 4,2 на ботаніко-географічній ділянці «Українські Карпати») до слабокислого (рН 5,3–6,3) і нейтрального на інших експозиціях [84].

За вмістом важких металів у ґрунті на території НБС загалом фіксується помірний рівень забруднення з локальними осередками перевищення гранично допустимих концентрацій. Перевищення нормативів встановлено лише для окремих ділянок: на території експозиції «Гірський сад» вміст міді досягає 2,7 ГДК, що свідчить про істотне локальне техногенне навантаження, тоді як на ділянці «Голонасінні» відзначено перевищення ГДК за вмістом свинцю до рівня 1,0 ГДК [84]. Для інших елементів за більшістю експозицій перевищення ГДК не зафіксовано. Такі особливості просторового розподілу важких металів створюють умови для дослідження реакції фіторе mediaційних культур у межах одного садово-паркового комплексу з різним ступенем техногенного навантаження.

Кліматичні умови Києва й території НБС належать до помірно континентальних із м'якою зимою та теплим літом, що формує сприятливі передумови для інтродукції та культивування широкого спектра видів. Середньомісячна температура січня становить близько $-3,5$ °С, липня – близько $+20,5$ °С. Середньорічна сума опадів досягає 649 мм, причому максимум кількості опадів припадає на липень (приблизно 88 мм), а мінімум – на жовтень (приблизно 35 мм). У зимовий період формується сніговий покрив, середня висота якого в лютому становить близько 20 см, за окремими роками може досягати 80 см і більше; водночас періодично спостерігаються майже безсніжні зими [85]. Сукупність цих кліматичних параметрів визначає тривалий вегетаційний період, достатнє зволоження та можливість вирощування як аборигенних, так і інтродукованих видів родин *Fabaceae* та *Brassicaceae*.

Дослідження проводили із використанням колекційних фондів корисних рослин відділу культурної флори Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка. Відділ культурної флори на сьогодні є одним із провідних науково-практичних центрів з інтродукції, акліматизації та селекції рослин, де сформовано

цінний колекційний фонд енергетичних, пряносмакових, лікарських, ефіроолійних, сидеральних, медоносних та інших груп рослин, що налічує понад 2000 зразків [86]. Саме на базі цих колекцій сформовано дослідні посіви представників родин *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та *Brassicaceae*, які використовуються в даній магістерській роботі як об'єкти для оцінки елементного профілю та біоконцентраційних характеристик на сірому лісовому деградованому супіщаному ґрунті.

2.2. Об'єкти дослідження та методи польових і лабораторних досліджень.

Польові дослідження, спрямовані на оцінку фітореMediaційного потенціалу рослин-сидератів, проводили на дослідних ділянках Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України у 2023–2025 роках. У межах попереднього етапу роботи як модельні об'єкти були використані представники родини Капустяні (*Brassicaceae*). У 2024-2025 роках як сидеральні культури на дослідному полі досліджувались представники родини Бобові (рід *Trifolium*). Основу ґрунтового покриву дослідної ділянки становили сірі опідзолені ґрунти, профіль яких слабо диференційований на гумусово-елювіальний горизонт із порохувато-грудкуватою структурою та помірною щільністю. Ґрунтоутворююча порода представлена лесом палевого відтінку, відносно пухким, із високою водопроникністю. За гранулометричним складом ґрунти варіювали від супіщаних до легкосуглинкових. Унаслідок тривалого сільськогосподарського використання дослідна ділянка характеризується ознаками деградації, зокрема малогумусністю та реакцією ґрунтового розчину поблизу нейтральної (рН 6,5–7,0).

Площа дослідного поля була поділена на стандартизовані облікові ділянки площею 25 м² з чотирикратною повторністю, що забезпечувало можливість статистично коректної оцінки варіації показників. Рослини вирощували впродовж 56 діб, тобто до настання осінніх приморозків. На момент проведення відбору всі дослідні рослини перебували у віргінільному стані онтогенезу, що є принципово важливим для зіставлення елементного складу надземної маси. Відбір надземних

органів для аналізу здійснювали випадковим точковим методом «конверта» уздовж діагоналі (трансекти) кожної облікової ділянки окремо, після чого з індивідуальних рослин формували узагальнену пробу для кожного сорту чи сортозразка. Такий підхід дозволяв згладити локальну просторову неоднорідність та отримати репрезентативний середній зразок.

Упродовж періоду вегетації проводили морфологічні спостереження за розвитком рослин у ключові фенологічні фази: проростання насіння, поява сходів, формування першої та наступних пар листків, осіння вегетація.

Відбір ґрунтових проб здійснювали відповідно до вимог ДСТУ 428:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб» [ДСТУ 4287:2004]. Зразки орного шару ґрунту для формування узагальненої проби відбирали на контрольній ділянці, вільній від дослідних рослин і протягом вегетаційного періоду утримуваний «під паром». Точкові проби брали з глибини до 10 см, після чого з них готували пробу масою до 0,2 кг, яка характеризувала середній вміст елементів у ґрунтовому горизонті, де розташовувалася основна маса кореневої системи сидератів.

Визначення вмісту найбільш поширених важких металів – Cd, Cr, Cu, Co, Pb, Zn – у рослинному матеріалі та ґрунті здійснювали в Центрі колективного користування науковими приладами/обладнанням «Спектрометричний центр елементного аналізу (СЦЕА)» при Національному ботанічному саду імені М. М. Гришка НАН України.

Кількісний аналіз виконували методом оптичної емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES) на спектрометрі iCAP 6300 Duo (Thermo Fisher Scientific, США). Калібрування приладу, підбір діапазонів вимірювань і процедури контролю якості здійснювали відповідно до затверджених методик роботи з оптико-емісійними спектрометрами та технічної документації виробника. Методика аналізу ґрунтувалася на попередньому руйнуванні органічної матриці методом мокрого озолення із використанням реактивів аналітичної чистоти.

Визначення хімічних елементів у рослинних та ґрунтових зразках здійснювали відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 11885:2019 «Якість води. Визначення вибраних елементів методом оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES) (EN ISO 11885:2009, IDT; ISO 11885:2007, IDT)». Пробопідготовку виконували згідно з ДСТУ 7670:2014 «Сировина і продукти харчові. Готування проб. Мінералізація для визначання вмісту токсичних елементів», адаптуючи її до рослинних та ґрунтових матриць.

Із підготовленої узагальненої проби кожного зразка відважували наважки масою (500 ± 50) мг, у яких екстрагували кислоторозчинні форми металів. Розкладання здійснювали методом мокрого озолення з використанням 30 % азотної кислоти (HNO_3 марки ОСЧ) у спеціальній системі високого тиску в мікрохвильовій печі MWS-2 (Berghof, Німеччина). Після охолодження отриманий мінералізаційний розчин доводили бідистильованою водою (одержаною в апараті з боросилікатного скла) до необхідного об'єму та використовували для спектроскопічного аналізу. Вміст алюмінію (мг/кг) визначали у сирих зразках, після чого результати перераховували на абсолютно суху масу аналізованого матеріалу.

Межі відносної невизначеності результатів вимірювань масових часток хімічних елементів (U) не перевищували 20 % (при $k = 2$, $P = 0,95$), що відповідає прийнятним вимогам до подібних вимірювань. Внутрішньолабораторний контроль точності здійснювали із використанням сертифікованого стандартного зразка моху M2 (Moss Reference Material M2, *Pleurozium schreberi* – The Finnish Forest Research Institute), застосовуючи критерій сумісності отриманих результатів із атестованими значеннями.

Можливість накопичення металу у тканинах рослин оцінювали за допомогою біоконцентраційного фактора (далі BCF) [87], який визначали як відношення концентрації металу в рослинному матеріалі (K_p) до його концентрації в ґрунті (K_{gp}):

$$BCF = \frac{K_p}{K_{gp}}$$

BCF розглядають як важливий індикатор для скринінгу гіперакумуляторів і добору видів-кандидатів для фітореMediaційних цілей. Вважається, що рослини з $BCF > 1$ можуть ефективно застосовуватися для фітоекстракції, тоді як для класичних гіперакумуляторів значення BCF нерідко перевищують 1 у десятки разів, іноді досягаючи 50–100 [88]. У даній роботі розрахунок BCF є базовим підходом для кількісної оцінки фітореMediaційного потенціалу досліджуваних сидератів на сірому лісовому деградованому супіщаному ґрунті.

Графічне подання результатів, а також розрахунок основних статистичних показників виконували із використанням комп'ютерної програми Microsoft Excel 2016. Обробка експериментальних даних передбачала визначення середніх значень, стандартних відхилень i , за необхідності, побудову діаграм для наочної інтерпретації розподілу показників між варіантами досліду. Фотоілюстрації об'єктів дослідження та польових умов одержували за допомогою цифрової фотокамери Canon EOS 400D, що дозволило документально зафіксувати морфологічні особливості рослин та стан дослідних ділянок.

2.3. Морфолого-біологічна характеристика та умови вирощування досліджуваних представників родин *Fabaceae* та *Brassicaceae*.

У сучасних умовах зростаючого техногенного навантаження на агроландшафти особливого значення набуває добір видів, здатних одночасно формувати значну біомасу, поліпшувати агрофізичні властивості ґрунту та проявляти фітореMediaційний потенціал щодо важких металів. Перспективними у цьому контексті є як культури родини Капустяні (*Brassicaceae*), так і представники родини Бобові (*Fabaceae*), зокрема види роду *Trifolium*, які поєднують здатність до біологічної фіксації азоту з розвиненою кореневою системою та активною ризосферною мікробіотою.

Багаторічні дослідження в НБС імені М. М. Гришка НАН України засвідчили високу пластичність, продуктивність та виражені сидеральні властивості проміжних культур із родини *Brassicaceae*, а також їх позитивну післядію на ріст, розвиток і продуктивність наступних культур у сівозміні, на родючість ґрунту, пригнічення фітопатогенної мікрофлори й сегетальної рослинності. Для таких культур, як редька олійна, суріпиця, ріпак (озимий і ярий), гірчиця біла та сарептська, тифон, розроблено біолого-екологічні підходи до підвищення ефективності продукційного процесу в агроекосистемах; доведено їх роль у зменшенні проявів алелопатичної ґрунтовтоми та відновленні родючості ґрунтів. Сидерація за участю цих культур у сучасних еколого-економічних умовах розглядається як один із небагатьох доступних засобів масового та цілеспрямованого підвищення урожайності культурних рослин, оздоровлення ґрунтів та зменшення тиску шкідливої флори і фауни [89].

Родина *Brassicaceae* включає низку метал-акумуляуючих видів, які можуть бути залучені до систем фітоекстракції й фітостабілізації. Представники роду *Гірчиця* розглядаються як цінні фітомеліоранти, здатні на забруднених важкими металами ґрунтах шляхом фізичної адсорбції акумулювати кадмій, свинець, цинк та синтезувати фітинову кислоту [90]. Це визначає доцільність їх включення до порівняльних досліджень із визначенням біоконцентраційного фактора (BCF) для різних елементів.

У межах даної магістерської роботи як об'єкти дослідження обрано види роду *Trifolium* (*Fabaceae*): *T. pratense*, *T. repens*, *T. medium*, *T. rubens*, *T. dubium* та рослини родини *Brassicaceae* селекції НБС імені М. М. Гришка НАН України: *Brassica juncea* 'Золотава', *Sinapis arvensis* 'Оріана', *Sinapis alba* 'Сонячна', *Brassica napus* 'Горлиця', *Typhonodium* 'Фітопал', *Raphanus sativus* var. *oleiformis* 'Кияночка' (Рис. 2.2.).



Рис. 2.2. Загальний вигляд дослідних ділянок

У наступних підрозділах подано морфолого-біологічні характеристики досліджуваних культур та ключові елементи технології їх вирощування на сірому лісовому деградованому супіщаному ґрунті НБС, що слугує підґрунтям для подальшої інтерпретації результатів, викладених у Розділі 3.

2.3.1. Конюшина повзуча (*Trifolium repens* L.)

Загальна характеристика.

Конюшина повзуча – багаторічна трав'яниста рослина ярого/напіввічнозеленого типу, яка формує щільний дернинний покрив завдяки стеблам-столонам, що стеляться поверхнею ґрунту та укорінюються у вузлах. Вид широко застосовується як кормова, сидеральна та покривна культура, що сприяє підвищенню родючості ґрунту через фіксацію атмосферного азоту. В

агроландшафтах помірного клімату *T. repens* здатна формувати значну біомасу навіть на відносно бідних ґрунтах [91].



Рис. 2.3. Насіння (А) та рослини (Б) Конюшини повзучої

Морфобіологічні особливості.

Стебла столонного типу ростуть горизонтально, досягаючи 10–30 см завдовжки, укорінюються у вузлах і формують суцільний рослинний покрив. Листки трійчасті, нерідко зі світлою плямою або півмісяцеподібним маркуванням на листочках. Суцвіття являють собою кулясті головки білого чи злегка рожевуватого відтінку, утворені десятками дрібних квіток; плоди – невеликі боби, насіння яких досягає протягом кількох тижнів після цвітіння. Вид вирізняється високою екологічною пластичністю щодо умов освітлення, родючості та вологості ґрунту (Рис. 2.3.).

Особливості вирощування.

Завдяки швидкому вегетативному розмноженню через столони та здатності формувати значну надземну масу *T. repens* активно використовують у сівозмінах і як компонент травосумішей. За оптимальних умов (добра аерація, помірне

зволоження, рН 6–7) рослини формують щільний покрив, сприяють поліпшенню структури ґрунту, зменшенню ерозійних процесів та збагаченню ґрунту азотом [92].

2.3.2. Конюшина лучна (*Trifolium pratense* L.)

Загальна характеристика.

Конюшина лучна – багаторічна трав'яниста рослина, яка за сприятливих умов досягає 20–80 (іноді до 100) см заввишки. Вид широко використовують як кормову культуру, сидерат, компонент лугових трав'яних сумішей, а також як засіб підвищення вмісту азоту в ґрунті завдяки симбіозу з бульбочковими бактеріями.



Рис. 2.4. Насіння (А) та рослини (Б) Конюшини лучної

Морфобіологічні особливості.

Стебла прямостоячі або висхідні. Листки трійчасті, листочки яйцеподібні, завдовжки 15–30 мм і завширшки 8–15 мм. Суцвіття – кулясті головки рожево-фіолетового забарвлення, які інтенсивно відвідуються комахами-запилювачами. Коренева система більш розвинена, ніж у багатьох інших видів роду, що зумовлює

вищу стійкість до посухи. Вид має високу агроекологічну цінність, хоча його потенціал щодо накопичення важких металів досліджений менш повно (Рис. 2.4.).

Особливості вирощування.

Trifolium pratense вирощують як у чистих посівах, так і в сумішах. Культура віддає перевагу ґрунтам середнього та високого рівня родючості. Рекомендовані строки сівби – весна або початок літа; агротехніка включає контроль бур'янового компоненту та раціональне укосне використання з урахуванням сівозмін. Висока продуктивність зеленої маси та здатність до фіксації азоту роблять вид цінним компонентом стабілізаційних і рекультиваційних посівів на порушених ґрунтах [93].

2.3.3. Конюшина середня (*Trifolium medium* L.)

Загальна характеристика.

Конюшина середня – багаторічний трав'янистий вид із висхідним або напівпрямостоячим типом росту, менш широко представлений у сільськогосподарських системах порівняно з *T. repens* та *T. pratense*. Відзначається пристосованістю до помірно затінених, лучних чи частково порушених ділянок із середнім рівнем родючості ґрунту [94].



А



Б

Рис. 2.5. Насіння (А) та рослини (Б) Конюшини середньої

Морфобіологічні особливості.

Стебла сягають 30–70 см заввишки, часто мають зигзагоподібну форму (що зумовило англomовну назву “zig zag clover”). Листки трійчасті, листочки вузькі, зазвичай без білого маркування, добре адаптовані до різних умов освітлення. Суцвіття – кулясті головки рожево-червоного або червонуватого забарвлення. Коренева система добре розгалужена, що сприяє закріпленню рослин на різних типах ґрунтів, однак загальний рівень продуктивності дещо нижчий, ніж у високопродуктивних кормових видів (Рис. 2.5.).

Особливості вирощування.

Попри порівняно менший рівень поширення у кормовому виробництві, *T. medium* має потенціал для включення до рекультиваційних сумішей завдяки адаптивності до слабородючих, напівзатінених або вторинних ландшафтів. У контексті фітореMediaції це відкриває можливості застосування виду на ділянках із помірним рівнем забруднення, де інші види можуть виявляти меншу стійкість [93].

2.3.4. Конюшина червонувата (*Trifolium rubens* L.)

Загальна характеристика.

Конюшина червонувата – багаторічна трав'яниста рослина, яка поєднує кормове та декоративне значення. Характеризується виразними рожево-червоними суцвіттями та розглядається як елемент лучних сумішей, декоративного озеленення, а також як потенційний сидерат чи компонент фітореMediaційних посівів.



Рис. 2.6. Насіння (А) та рослини (Б) Конюшини червонуватої

Морфобіологічні особливості.

Стебла прямостоячі або висхідні; листки трійчасті, листочки середнього розміру. Суцвіття – компактні головки рожево-червоного забарвлення, що зумовлює декоративний ефект. Коренева система середньої глибини, розгалужена, достатня для включення виду до покривних сумішей (Рис. 2.6.).

Особливості вирощування.

Рекомендованим є використання *T. rubens* у сумішах зі злаковими або іншими травами на реконструйованих ділянках, де поєднуються декоративна функція та екологічна роль рослинного покриву. У системах фітореMediaції вид може бути ефективним як складова багатовидових посівів, що включають бобові й злакові компоненти, забезпечуючи стабілізацію ґрунту та додаткове залучення азоту.

2.3.5. Конюшина сумнівна (*Trifolium dubium* Sibth.)

Загальна характеристика.

Конюшина сумнівна – низькоросла (10–30 см) трав'яниста рослина з відносно коротким життєвим циклом, яка формує щільний покрив і часто трапляється у

змішаних лучних угрупованнях, на узбіччях та полях із невисоким родючим потенціалом. У сільському господарстві використовується менш широко, однак у рекультиваційних схемах цінна як компонент покривних посівів.



Рис. 2.7. Насіння (А) та рослини (Б) Конюшини сумнівної

Морфобіологічні особливості.

Листки трійчасті з дрібними листочками; стебла тонкі, повзучі або напівпрямостоячі. Суцвіття – невеликі головки жовто-зеленого або кремового забарвлення. Коренева система відносно поверхнева, але забезпечує ефективне освоєння бідних ґрунтів і формування суцільного травостою (Рис. 2.7.).

Особливості вирощування.

Завдяки компактному габітусу та невибагливості до ґрунтових умов *T. dubium* може інтегруватися у посівні суміші, призначені для стабілізації та відновлення ґрунтів, зокрема на ділянках із низькою продуктивністю. Вид доцільно використовувати як фоновий компонент у багатокомпонентних фіторе mediaційних системах, де він сприяє формуванню щільної дернини та зменшенню ерозійних процесів.

2.3.6. Гірчиця сарептська (*Brassica juncea* (L.) Czern.) 'Золотава'

Загальна характеристика.

Гірчиця сарептська сорту 'Золотава' – однорічна трав'яниста культура ярого типу, що використовується як технічна, кормова та сидеральна рослина, а також у проміжних післяукісних і післяжнивних посівах. Вона характеризується високою врожайністю фітомаси (приблизно 30–35 т/га) і насіння (1,5–2,5 т/га), а в надземній масі міститься 2,5–3,3 % протеїну, 4,7–5,5 % безазотистих екстрактивних речовин та 2,0–2,4 % золи [89].

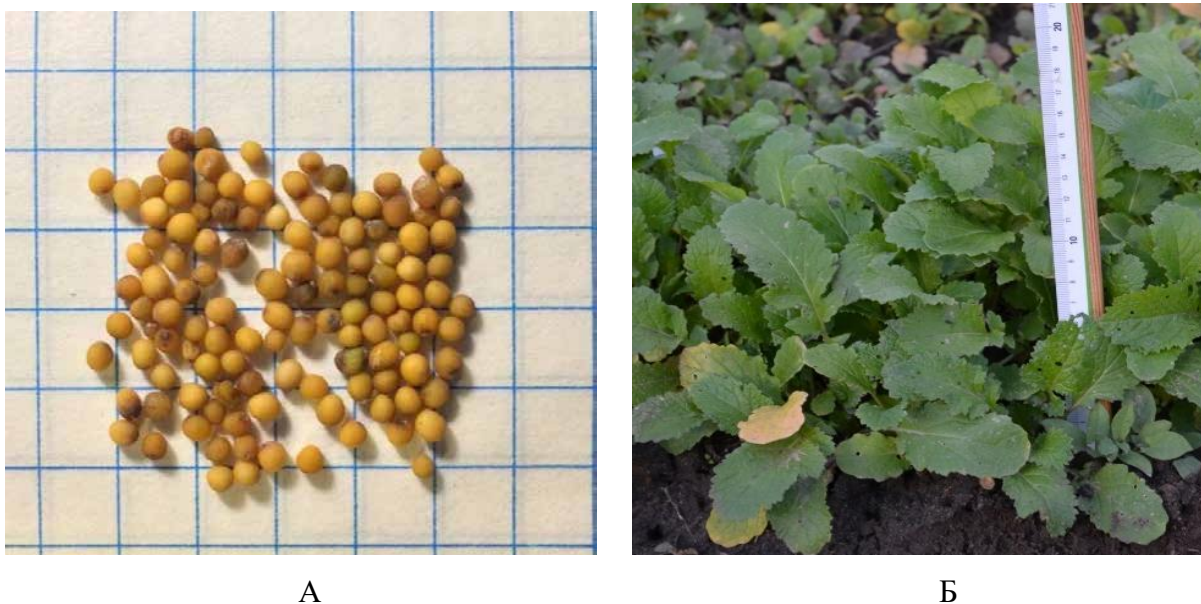


Рис. 2.8. Насіння (А) та рослини (Б) гірчиці сарептської, сортозразок 'Золотава'

Морфобіологічні особливості.

У виробничих умовах України рослини *B. juncea* 'Золотава' досягають 90–120 (іноді до 140) см заввишки. Стебло пряме, розгалужене, з восковим нальотом. Нижні листки – черешкові, ліроподібно перисторозсічені, верхні – видовжені, цілокраї. Суцвіття – багатоквіткова китиця з дрібними жовтими квітками. Плід – короткий стручок (2,5–5,0 см), який легко розтріскується при достиганні. Насіння світло-жовтого кольору, маса 1000 насінин – 5–6 г. (Рис. 2.8.). Коренева система стрижнева, проникає на глибину до 2 м, що зумовлює високу посухо- і холодостійкість [89].

Особливості вирощування.

Гірчиця сарептська характеризується високою адаптивністю до різних типів ґрунтів і може вирощуватися як основна або проміжна сидеральна культура в короткоротаційних сівозмінах. Вона добре переносить тимчасову посуху, швидко нарощує надземну масу й ефективно пригнічує бур'янний компонент. З огляду на здатність акумулювати кадмій, свинець та цинк, цей вид розглядається як перспективний компонент фітореMediaційних сумішей на забруднених ділянках, де поєднує функції зеленого добрива і фітоекстрактора [89].

2.3.7. Суріпиця озима (*Sinapis arvensis* L.) 'Оріана'

Загальна характеристика.

Суріпиця озима сорту 'Оріана' розглядається як високопродуктивна озима олійна та сидеральна культура, що використовується в основних і, особливо, у повторних післяукісних і післяжнивних посівах. Рослина має технічне, біоенергетичне, кормове, медоносне та сидеральне значення. Урожайність насіння може досягати 2,0–3,0 т/га, вихід ліпідів – до 1000 кг/га; за потенціалом зеленої маси культура дещо поступається ріпаку озимому й тифону, але відзначається високою зимостійкістю [89].



А



Б

Рис. 2.9. Насіння (А) та рослини (Б) суріпиці озимої, сорт 'Оріана'

Морфобіологічні особливості.

У польових умовах України рослини 'Оріана' досягають 145–160 см заввишки. Стебло прямостояче, розгалужене; листки світло-зелені, ліроподібні, з глибоко серцеподібною основою, що охоплює стебло. Суцвіття – видовжена китиця, квітки жовто-золотистого кольору. Плід – стручок, у якому формується 20–30 дрібних червонувато-коричневих насінин; маса 1000 насінин становить 2,1–2,5 г. (Рис. 2.9.). Вегетаційний період на фітомасу – 225–230 діб, на насіння – 270–280 діб. Рослини витримують зниження температури до $-25\dots-30$ °С за наявності снігового покриву; сходи не пошкоджуються приморозками до -6 °С [89].

Особливості вирощування.

Суріпицю озиму вирощують як озиму сидеральну й олійну культуру, яку доцільно розміщувати після ранніх зернових та бобово-злакових сумішей. Вона формує потужну листову розетку восени й розвинену кореневу систему, що сприяє закріпленню ґрунту та зменшенню ерозійних процесів. Біомаса суріпиці, зароблена в ґрунт, підвищує вміст органічної речовини й поживних елементів, а здатність рослин засвоювати важкі метали робить сорт 'Оріана' важливим елементом рекультиваційних посівів [89].

2.3.8. Гірчиця біла (*Sinapis alba* L.) 'Сонячна'

Загальна характеристика.

Гірчиця біла сорту 'Сонячна' – однорічна трав'яниста культура, широко застосовувана як сидерат, а також у кормових та технічних цілях. Видовий епітет «біла» пов'язаний із забарвленням насіння. Культура швидко проростає, інтенсивно нарощує зелену масу та збагачує ґрунт органічними речовинами, фосфором і сіркою, що робить її придатною для висіву у вільні періоди між основними культурами [89].



Рис. 2.10. Насіння (А) та рослини (Б) гірчиці білої, сортозразок 'Сонячна'

Морфобіологічні особливості.

Рослини *S. alba* досягають 25–100 см заввишки. Стебла жорстковолосисті або майже голі, прямостоячі, у верхній частині розгалужені. Нижні листки – ліроподібні, з широкоовальною верхньою лопаттю та 2–3 парами бічних лопатей; верхні – менші, з більш гостроконтурними лопатями. Квітки блідо-жовті або білі, зібрані у багатоквіткові китицеподібні суцвіття. Плід – стручок із дрібним, округлим, світло-жовтим насінням; стручки прямі або злегка зігнуті, горбкуваті, часто вкриті жорсткими відстовбурченими волосками (Рис. 2.10.).

Особливості вирощування.

Гірчиця біла вирощується як швидкоросла сидеральна культура, яку доцільно висівати в зайняті та післяжнивні пари, а також у проміжні посіви між основними культурами. Вона маловимоглива до ґрунтових умов, але найкращі результати дає на добре аерованих, не перезволожених ґрунтах. Завдяки короткому вегетаційному періоду формує значну надземну біомасу, що легко мінералізується після зоробки в

грунт, збагачуючи його органічною речовиною, сіркою та фосфором і сприяючи зниженню забруднення важкими металами [89].

2.3.9. Ріпак озимий (*Brassica napus* L.) 'Горлиця'

Загальна характеристика.

Ріпак озимий сорту 'Горлиця' – озима олійна культура, що використовується як технічна, біоенергетична, кормова, сидеральна та медоносна. На фітомасу його вирощують переважно за весняних і ранньолітніх строків сівби. Надземна маса характеризується цінним хімічним складом: містить 2,8–3,9 % протеїну, 0,5–0,8 % ліпідів, 1,3–3,7 % клітковини та 1,4–2,7 % золи [89].



Рис. 2.11. Насіння (А) та рослини(Б) ріпаку озимого, сортозразок 'Горлиця'

Морфобіологічні особливості.

Рослини *B. napus* 'Горлиця' досягають 140–185 см заввишки. Стебло пряmostояче, із формами з різним ступенем розгалуження бічних пагонів. Листки сизо-зелені, з вираженим восковим нальотом, ланцетоподібні. Суцвіття – нещільні китиці зі світло-жовтими квітками. Плід – стручок, що містить 20–28 дрібних

темно-коричневих насінин; маса 1000 насінин становить 2,5–3,5 г. (Рис. 2.11.). Урожайність зеленої маси – 35–45 т/га, насіння – 3,5–4,5 т/га [89].

Особливості вирощування.

Озимий ріпак сорту 'Горлиця' використовується як універсальна олійна та сидеральна культура, яку вводять у сівозміни після зернових та інших непов'язаних капустяних культур. Рослини потребують родючих, добре окультурених ґрунтів і достатнього зволоження, чутливі до надмірної кислотності. При належній агротехніці формують щільний травостій і велику кількість біомаси, яку можна використовувати як зелене добриво. У системах фітореMediaції озимий ріпак доцільно застосовувати для поступового вилучення важких металів із орного шару ґрунту [89].

2.3.10. Тифон (*Brassica rapa* L.) 'Фітопал'

Загальна характеристика.

Тифон сорту 'Фітопал' – озима культура, яка використовується як технічна, біоенергетична, сидеральна, кормова й медоносна. Має важливе значення для основних і повторних післяукісних та післяжнивних посівів. Урожайність надземної маси в основних посівах становить 37–48 т/га, насіння – 2,5–3,5 т/га; облісненість рослин сягає 50–60 % [89].



А



Б

Рис. 2.12. Насіння (А) та рослини (Б) тифону, сорту 'Фітопал'
Морфобіологічні особливості.

Генеративні особини тифону досягають 130–145 см заввишки. Стебло пряме; листки ліроподібно-перисті, добре розвинені, формують значну асиміляційну поверхню. Суцвіття – китиці зі світло-жовтими квітками (50–60 квіток), зібраними у видовжене китицеподібне суцвіття. Плід – стручок, у якому налічується 25–30 коричневих насінин (Рис. 2.12.); маса 1000 насінин становить 3,5–4,0 г [89]. Насіння проростає за +1...+3 °С, сходи витримують приморозки до –6 °С; за наявності снігового покриву рослини переносять значні морози (Рис. 2.12.).

Особливості вирощування.

Тифон є гібридною культурою озимого типу, яку використовують як високопродуктивний сидерат та кормову рослину. Його доцільно висівати в повторних і післяжнивних посівах на добре дренованих, структурних ґрунтах. Сорт 'Фітопал' швидко формує значний обсяг зеленої маси та глибоко проникаючу кореневу систему, що покращує фізичний стан ґрунту й сприяє мобілізації та подальшому вилученню окремих важких металів. Використання тифону в сумішах з бобовими культурами підвищує ефективність фіторе mediaційних заходів і стійкість агроecosystem [89].

2.3.11. Редька олійна (*Raphanus sativus* L. var. *oleifera*) 'Кияночка'

Загальна характеристика.

Редька олійна сорту 'Кияночка' – однорічна рослина ярого типу, що використовується як технічна, біоенергетична, кормово-сидеральна та медоносна культура. За пізніх строків сівби формує коренеплоди з високими кормовими й харчовими властивостями. У початковій фазі генеративного розвитку вміст протеїну в надземній масі досягає 26–30 %, білки містять значну кількість незамінних амінокислот і характеризуються високою перетравністю (до 85 %). У зеленій масі міститься 2,0–3,5 % кальцію, 0,5–1,2 % фосфору, значні кількості вітамінів, зокрема

аскорбінової кислоти (до 1000 мг% у фазі бутонізації) та каротину (50–65 мг% до фази цвітіння). Урожайність фітомаси залежно від строків і способів сівби, а також фази розвитку становить 20–50 т/га, інколи до 80 т/га [89].



Рис. 2.13. Насіння (А) та рослини (Б) редьки олійної, сорт 'Кияночка'

Морфобіологічні особливості.

В умовах України рослини редьки олійної сягають 140–160 см заввишки. Стебло порожнисте, пряме, багатогранне, у фазі досягання насіння набуває сіруватого або яскраво-коричневого кольору, опушене. Листки ліроподібні: у нижній частині стебла – перистонадрізані, у середній – перистороздільні, у верхній – лопатеві; нижня поверхня листкових пластинок опушена. Квітки дрібні, зібрані в китицю; забарвлення варіює від білого до кремового, рожевого та фіолетового. Плід – циліндричний, роздутий стручок без перетяжок, із товстими губчастими стінками, який не розтріскується при досягнанні; довжина 6–8 см, діаметр 0,8–1,6 см. У стручку міститься 5–12 неправильно кулястих насінин яскраво-коричневого кольору, розміром 3–4 мм (Рис. 2.13.); маса 1000 насінин – 8–12 г. Корінь стрижневий, розгалужений, у

верхній частині потовщений (2,0–4,5 см у діаметрі), проникає на глибину до 70–90 см, при цьому основна маса коренів зосереджена в орному шарі [89].

Особливості вирощування.

Редьку олійну вирощують переважно як проміжну сидеральну та кормову культуру, придатну для включення у сівозміну після основних просапних і зернових культур. Вона добре росте на легких і середніх за гранулометричним складом, достатньо зволжених ґрунтах із реакцією від слабкокислої до нейтральної. Завдяки швидкому наростанню зеленої маси та інтенсивному розвитку кореневої системи, редька ефективно пригнічує бур'яни, покращує структуру ґрунту та може використовуватися для фітореMediaції ділянок із підвищеним вмістом важких металів [89].

2.4. Дослідження накопичення ртуті у *Trifolium repens* та *Trifolium pratense*.

Для поглибленої характеристики фітореMediaційного потенціалу представників роду *Trifolium* щодо ртуті у структуру експериментальної частини роботи включено додатковий *in situ* етап, виконаний на техногенно забруднених ділянках у межах м. Києва. Завданням цього етапу було порівняння вмісту Hg у надземних органах *T. repens* та *T. pratense* за умов градієнта ґрунтового забруднення й розрахунок біоконцентраційного фактора (BCF) для ртуті.

Об'єктами дослідження обрано два види – конюшину повзучу (*Trifolium repens* L.) та конюшину лучну (*Trifolium pratense* L.), які є звичайними елементами міської флори, характеризуються високою екологічною пластичністю, здатністю формувати значну надземну біомасу та тісним симбіозом із азотфіксуючими бактеріями. Це зумовлює їхню стійкість до антропогенного навантаження та робить доцільним залучення до фітореMediaційних схем.

Моніторингові ділянки розміщувалися на прилеглих територіях колишнього Заводу «Радикал», а також у межах території Національного ботанічного саду імені

М. М. Гришка НАН України. Ділянки відрізнялися рівнем забруднення ґрунтів ртуттю: від фонових умов ($0,04 \pm 0,01$ мг/кг) до помірно забруднених ($0,82 \pm 0,16$ мг/кг) і сильно забруднених супіщаних та легкосуглинкових субстратів ($5,26 \pm 1,05$ мг/кг). На всіх ділянках популяції обох видів конюшини зберігали життєздатність і завершували повний онтогенетичний цикл.

Для аналізу відбирали рослини у фазі початку плодоношення, що відповідає максимальному розвитку надземної біомаси. Надземні органи (листки і стебла) зрізали з усіх виявлених особин кожного виду на ділянці, подрібнювали та об'єднували у змішані зразки. Зразки ґрунту відбирали з верхнього шару (0–10 см) методом конверта у місцях росту рослин з подальшим формуванням інтегрованої проби масою близько 0,2 кг для кожної ділянки згідно з вимогами чинних стандартів відбору ґрунту.

Проби рослин і ґрунту висушували до повітряно-сухого, а далі до абсолютно сухого стану при 102 ± 2 °С, подрібнювали та просіювали через сито з розміром отворів 2 мм. Наважки рослинного матеріалу масою 100 мг і ґрунтового матеріалу масою 80 мг зважували на аналітичних вагах *Sartorius BP 210 S*. Загальний вміст ртуті (сума органічних і неорганічних форм) визначали на аналізаторі ртуті *DMA-80 evo* (Milestone, Італія), що працює на принципі термічного розкладання зразка, амальгамації Hg та атомно-абсорбційної детекції згідно з методиками US EPA 7473 та ASTM D6722.

Точність вимірювань контролювали із застосуванням сертифікованого еталонного матеріалу ASTM D6722 (кам'яне вугілля). Межа виявлення Hg становила 0,0015 нг, а відносна невизначеність результатів не перевищувала 20 % при $k = 2$ та $P = 0,95$.

Біоконцентраційний фактор (BCF) для ртуті розраховували як відношення масової частки Hg у надземній біомасі рослин до її концентрації в ґрунті [87]. Значення $BCF > 1$ розглядали як індикатор підвищеної здатності виду до акумуляції ртуті та критерій перспективності для фітоекстракції. Статистичну обробку

результатів і побудову графічних залежностей здійснювали із використанням програмного забезпечення *Microsoft Excel 2016*.

РОЗДІЛ 3. НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У НАДЗЕМНИХ ЧАСТИНАХ ДОСЛІДЖУВАНИХ РОСЛИН

3.1. Вміст важких металів у досліджуваних представників родин *Fabaceae* та *Brassicaceae*.

У межах дослідження оцінено вміст шести важких металів – кадмію (Cd), кобальту (Co), хрому (Cr), міді (Cu), свинцю (Pb) та цинку (Zn) – у надземній масі представників роду *Trifolium* (*T. repens*, *T. pratense*, *T. medium*, *T. rubens*, *T. dubium*) та культур родини *Brassicaceae* (редька олійна 'Кияночка', гірчиця біла 'Сонячна', ріпак озимий 'Горлиця', гірчиця сарептська 'Золотава', суріпиця озима 'Оріана', тифон 'Фітопал'), а також у ґрунті відповідних дослідних ділянок. Концентрації визначено в перерахунку на абсолютно суху речовину.

Кадмій (Cd)

Кадмій належить до високотоксичних елементів, не виконує життєво необхідних функцій у рослинах і тварин та легко включається у трофічні ланцюги. У рослин Cd пригнічує ріст коренів, порушує фотосинтез, викликає окисний стрес і може зменшувати продуктивність посівів навіть за порівняно невисоких концентрацій у ґрунті. У ґрунті на ділянці з *Trifolium* вміст Cd становив 0,1721 мг/кг, тоді як у надземних органах видів роду *Trifolium* зафіксовано 0,0207–0,0412 мг/кг. Найнижчу концентрацію кадмію відмічено у *T. rubens* (0,0207 мг/кг), а найвищу – у *T. dubium* (0,0412 мг/кг), при цьому значення для *T. repens* і *T. pratense* були однаковими (0,0252 мг/кг). На ділянці сидеральних культур *Brassicaceae* ґрунтовий вміст Cd становив 0,6793 мг/кг. У надземній масі редьки олійної 'Кияночка' виявлено 0,3630 мг/кг Cd, у гірчиці білої 'Сонячна' – 0,2011 мг/кг, у ріпаку озимого 'Горлиця' – 0,1035 мг/кг, у гірчиці сарептській 'Золотава' – 0,1756 мг/кг, у суріпиці озимої 'Оріана' – 0,1767 мг/кг, у тифону 'Фітопал' – 0,1049 мг/кг. Отже, для кадмію

спостерігається чітка видоспецифічна варіабельність як серед конюшин, так і серед представників *Brassicaceae* (Рис. 3.1.).

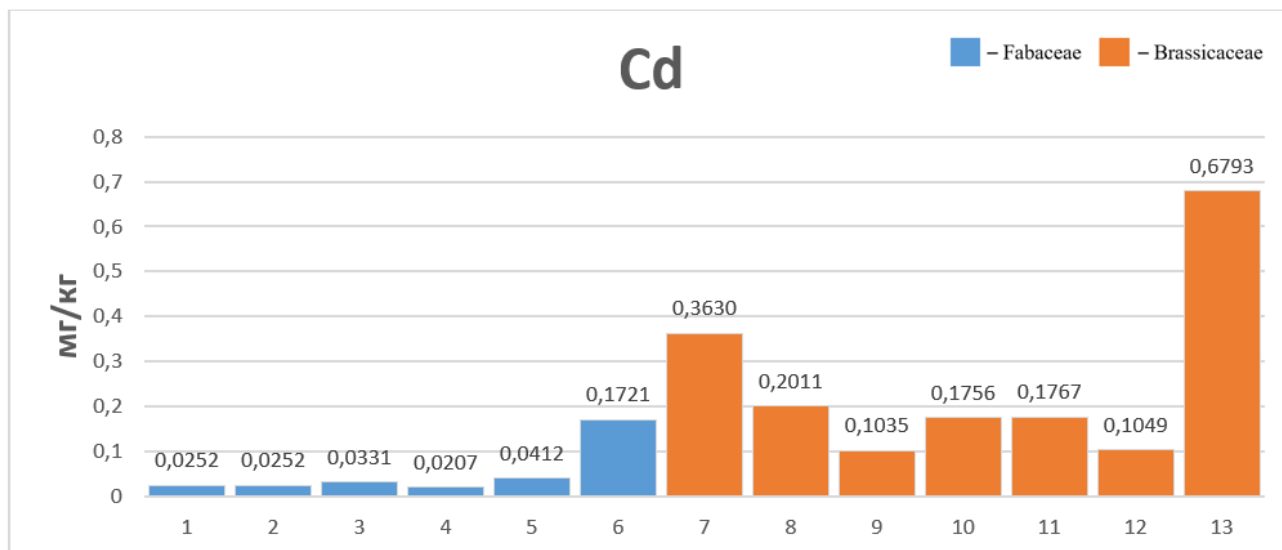


Рис.3.1. Вміст кадмію (мг/кг) у досліджуваних зразках рослин та ґрунтів (1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – ґрунт (Бобові), 7 – Редька олійна, 8 – Гірчиця біла, 9 – Ріпак озимий, 10 – Гірчиця сарептська, 11 – Суріпиця озима, 12 – Тифон, 13 – ґрунт (Капустяні)) у абсолютно сухій речовині.

Кобальт (Co)

Кобальт є мікроелементом, який не вважається обов'язковим для більшості вищих рослин, але відіграє важливу роль у функціонуванні азотфіксуючих мікроорганізмів і входить до складу вітаміну В₁₂. У малих дозах він може опосередковано підтримувати процеси азотфіксації, тоді як у підвищених концентраціях спричиняє токсичний стрес та порушення метаболізму. У ґрунті на ділянці *Trifolium* концентрація Co дорівнювала 2,117 мг/кг. У надземній масі *T. repens* вміст кобальту становив 0,0539 мг/кг, *T. pratense* – 0,0822 мг/кг, *T. medium* – 0,0871 мг/кг, *T. rubens* – 0,0642 мг/кг, *T. dubium* – 0,0967 мг/кг. На ділянці *Brassicaceae* вміст Co у ґрунті становив 1,925 мг/кг, тоді як у надземних частинах редьки олійної 'Кияночка' виявлено 1,2804 мг/кг, гірчиці білої 'Сонячна' – 1,1533

мг/кг, ріпаку озимого 'Горлиця' – 0,7867 мг/кг, гірчиці сарептської 'Золотава' – 1,0016 мг/кг, суріпиці озимої 'Оріана' – 0,8050 мг/кг, тифону 'Фітопал' – 0,9796 мг/кг. Таким чином, кобальт в надземних органах конюшин зафіксований на рівні десятих і сотих часток міліграма, тоді як у більшості досліджених капустияних культур його концентрації наближаються до ґрунтового фону (Рис. 3.2.).

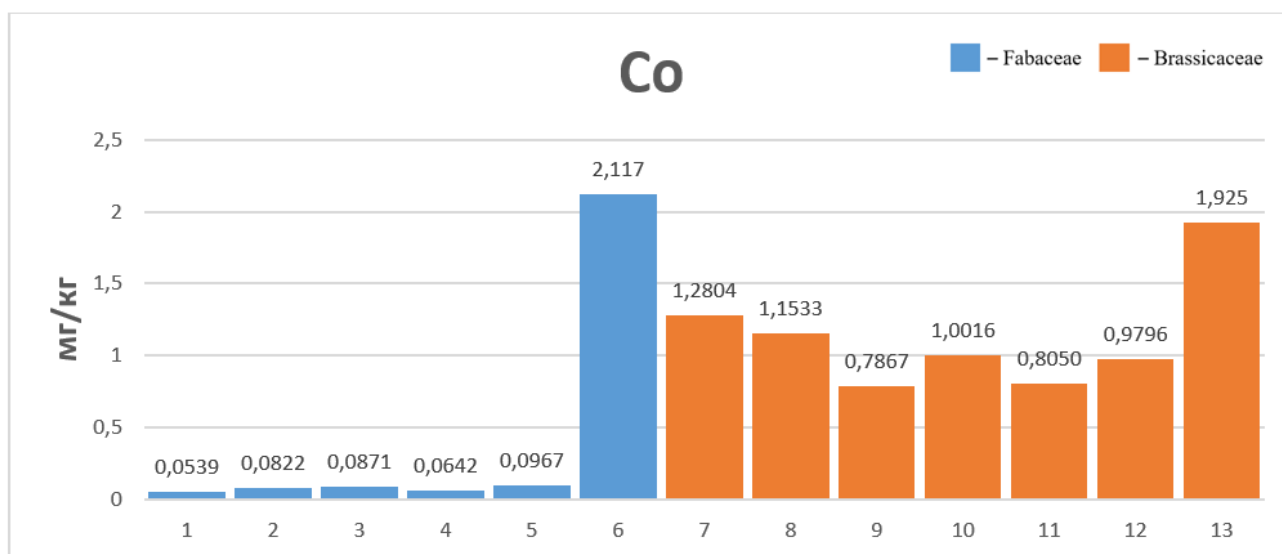


Рис.3.2. Вміст кобальту (мг/кг) у досліджуваних зразках рослин та ґрунтів (1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – ґрунт (Бобові), 7 – Редька олійна, 8 – Гірчиця біла, 9 – Ріпак озимий, 10 – Гірчиця сарептська, 11 – Суріпиця озима, 12 – Тифон, 13 – ґрунт (Капустияні)) у абсолютно сухій речовині.

Хром (Cr)

Хром належить до елементів, присутніх у ґрунті переважно в нестабільних валентних формах; для рослин есенціальність Cr залишається дискусійною. Шестивалентний хром відзначається високою токсичністю, тоді як тривалентні форми менш рухливі, але при надмірному надходженні також можуть порушувати фізіологічні процеси. На ділянці *Trifolium* ґрунтовий вміст Cr становив 8,854 мг/кг. У надземній масі *T. repens* зафіксовано 0,6766 мг/кг, *T. pratense* – 1,405 мг/кг, *T. medium* – 3,354 мг/кг, *T. rubens* – 0,9801 мг/кг, *T. dubium* – 2,142 мг/кг. Отже, *T.*

medium та *T. dubium* характеризуються відносно вищими значеннями Cr порівняно з іншими видами роду. На ділянці *Brassicaceae* ґрунт містив 7,506 мг/кг хрому, тоді як у надземній масі редьки олійної 'Кияночка' концентрація Cr досягала 14,337 мг/кг, у гірчиці білої 'Сонячна' – 6,0850 мг/кг, у ріпаку озимого 'Горлиця' – 3,2834 мг/кг, у гірчиці сарептській 'Золотава' – 5,7178 мг/кг, у суріпиці озимої 'Оріана' – 4,1018 мг/кг, у тифону 'Фітопал' – 7,4871 мг/кг (Рис. 3.3.).

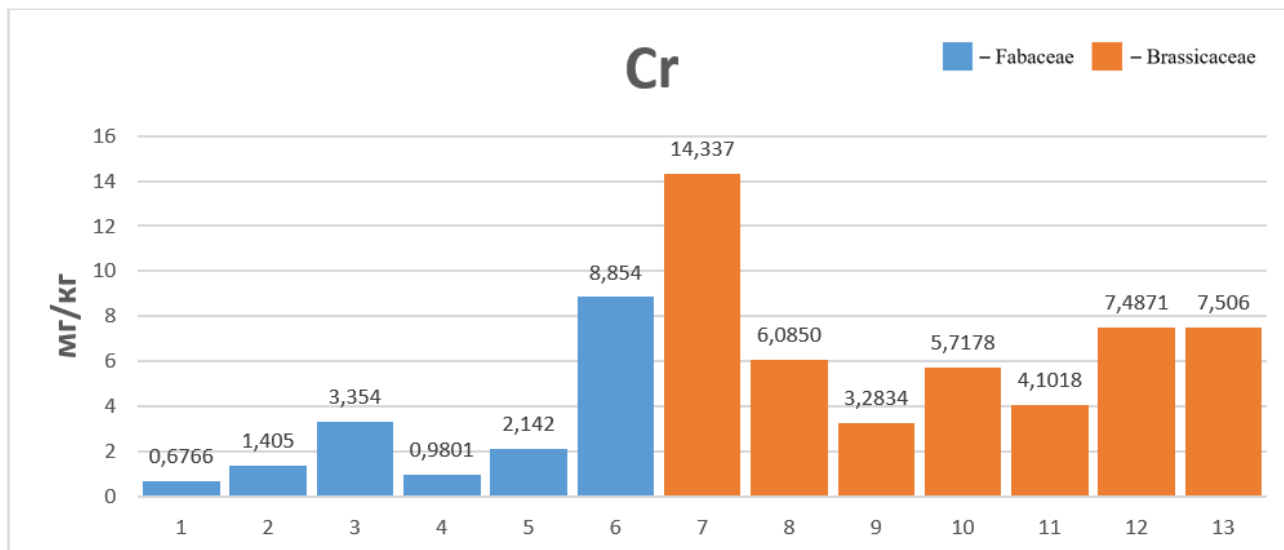


Рис.3.3. Вміст хрому (мг/кг) у досліджуваних зразках рослин та ґрунтів (1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – ґрунт (Бобові), 7 – Редька олійна, 8 – Гірчиця біла, 9 – Ріпак озимий, 10 – Гірчиця сарептська, 11 – Суріпиця озима, 12 – Тифон, 13 – ґрунт (Капустяні)) у абсолютно сухій речовині.

Мідь (Cu)

Мідь є життєво необхідним мікроелементом для рослин, входить до складу численних окисно-відновних ферментів, бере участь у фотосинтезі, диханні, лігніфікації клітинних стінок. Однак при підвищених концентраціях Cu стає токсичною, спричиняючи порушення мембранного транспорту та посилення утворення активних форм кисню. У ґрунті під посівами *Trifolium* вміст міді становив 16,63 мг/кг. У надземних органах *T. repens* виявлено 2,871 мг/кг Cu, *T.*

pratense – 6,675 мг/кг, *T. medium* – 4,873 мг/кг, *T. rubens* – 6,105 мг/кг, *T. dubium* – 6,463 мг/кг. Таким чином, *T. pratense*, *T. rubens* та *T. dubium* характеризуються близькими і відносно високими значеннями вмісту міді, тоді як у *T. repens* цей показник є нижчим. На ділянці *Brassicaceae* ґрунтовий вміст Cu дорівнював 14,10 мг/кг. У надземній масі редьки олійної 'Кияночка' встановлено 0,1434 мг/кг Cu, тоді як для гірчиці білої, ріпаку озимого, гірчиці сарептської, суріпиці озимої та тифону вміст міді перебував на рівні межі визначення або нижче неї, що відображено як значення, менші за поріг кількісного вимірювання (Рис. 3.4.).

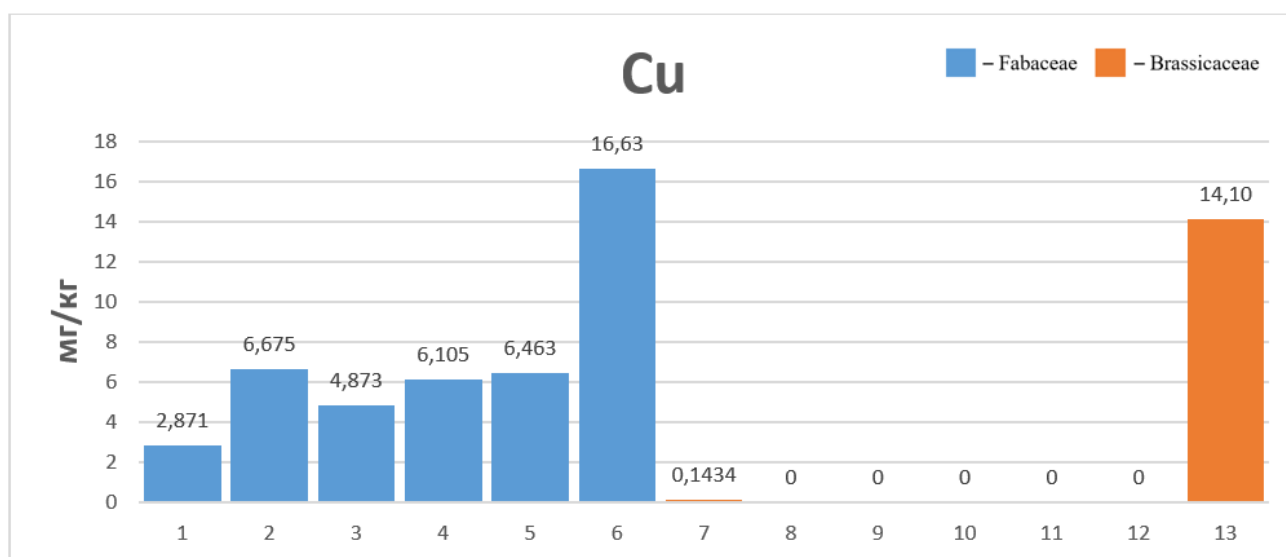


Рис.3.4. Вміст міді (мг/кг) у досліджуваних зразках рослин та ґрунтів (1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – ґрунт (Бобові), 7 – Редька олійна, 8 – Гірчиця біла, 9 – Ріпак озимий, 10 – Гірчиця сарептська, 11 – Суріпиця озима, 12 – Тифон, 13 – ґрунт (Капустяні)) у абсолютно сухій речовині.

Свинець (Pb)

Свинець є токсичним елементом, що не бере участі в обміні речовин рослин та тварин, але здатний накопичуватися в коренях і надземних органах, порушуючи транспорт макро- і мікроелементів, фотосинтетичні процеси та ростові реакції. У

ґрунті на ділянці *Trifolium* вміст Pb становив 9,449 мг/кг. У надземній масі *T. repens* його концентрація дорівнювала 0,929 мг/кг, у *T. pratense* – 2,545 мг/кг, у *T. medium* – 2,123 мг/кг, у *T. rubens* – 1,769 мг/кг, у *T. dubium* – 2,408 мг/кг. На ділянці *Brassicaceae* ґрунтовий вміст свинцю становив 11,50 мг/кг. У надземній масі редьки олійної 'Кияночка' виявлено 9,1155 мг/кг Pb, у гірчиці білої 'Сонячна' – 4,0102 мг/кг, у ріпаку озимого 'Горлиця' – 5,2273 мг/кг, у гірчиці сарептській 'Золотава' – 6,1643 мг/кг, у суріпиці озимої 'Оріана' – 4,7769 мг/кг, у тифону 'Фітопал' – 4,6579 мг/кг (Рис. 3.5.).

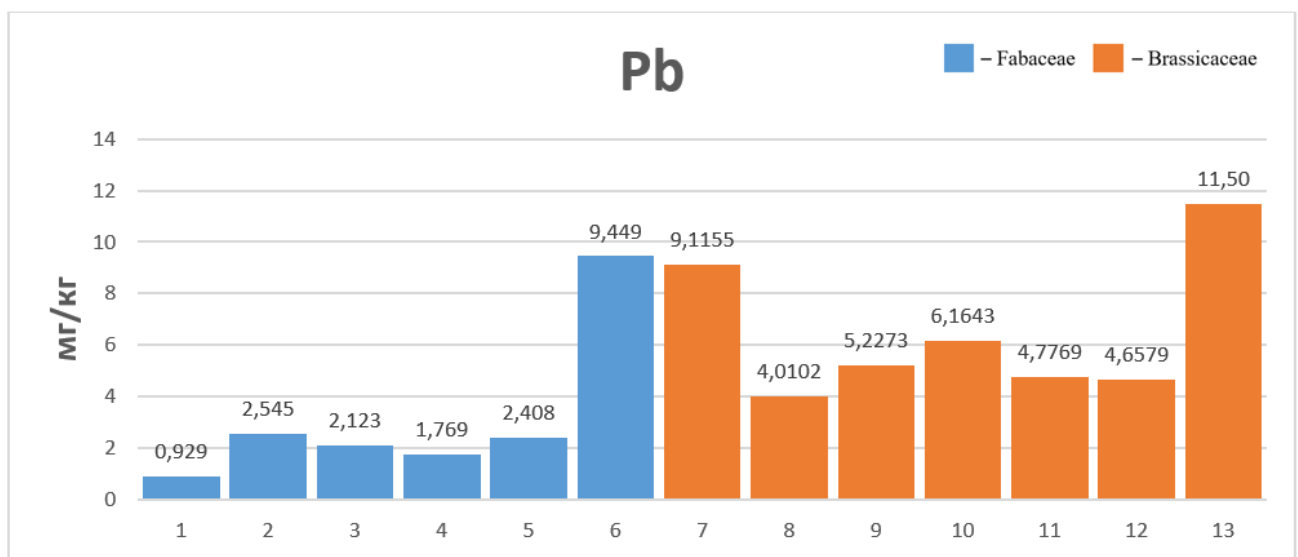


Рис.3.5. Вміст свинцю (мг/кг) у досліджуваних зразках рослин та ґрунтів (1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – ґрунт (Бобові), 7 – Редька олійна, 8 – Гірчиця біла, 9 – Ріпак озимий, 10 – Гірчиця сарептська, 11 – Суріпиця озима, 12 – Тифон, 13 – ґрунт (Капустяні)) у абсолютно сухій речовині.

Цинк (Zn)

Цинк – один із ключових есенціальних мікроелементів рослин, необхідний для функціонування значної кількості ферментів і транскрипційних факторів, а також для стабілізації мембран і регуляції росту. При надлишку Zn здатний проявляти фітотоксичність, однак рослини часто мають ефективні механізми його внутрішньої

регуляції. У ґрунті на ділянці *Trifolium* вміст Zn становив 38,62 мг/кг. У надземній масі *T. repens* зафіксовано 20,35 мг/кг, *T. pratense* – 32,04 мг/кг, *T. medium* – 29,40 мг/кг, *T. rubens* – 27,00 мг/кг, *T. dubium* – 38,47 мг/кг. Таким чином, для більшості видів роду *Trifolium* концентрації цинку у надземних органах наближаються до ґрунтових значень, а у *T. dubium* практично збігаються з ними. На ділянці *Brassicaceae* ґрунтовий вміст Zn становив 39,10 мг/кг. У надземній масі редьки олійної 'Кияночка' виявлено 4,2806 мг/кг цинку, гірчиці білої 'Сонячна' – 10,362 мг/кг, гірчиці сарептської 'Золотава' – 7,7596 мг/кг, суріпиці озимої 'Оріана' – 1,5063 мг/кг; для ріпаку озимого 'Горлиця' та тифону 'Фітопал' значення Zn були близькими до межі кількісного визначення і залишалися істотно нижчими, ніж у ґрунті (Рис. 3.6.).

Таким чином, отримані дані щодо фактичного вмісту Cd, Co, Cr, Cu, Pb і Zn у ґрунті та надземній біомасі досліджуваних видів дозволяють охарактеризувати їх елементний профіль і слугують базою для подальшого кількісного аналізу здатності рослин акумулювати метали відносно ґрунтового фону.

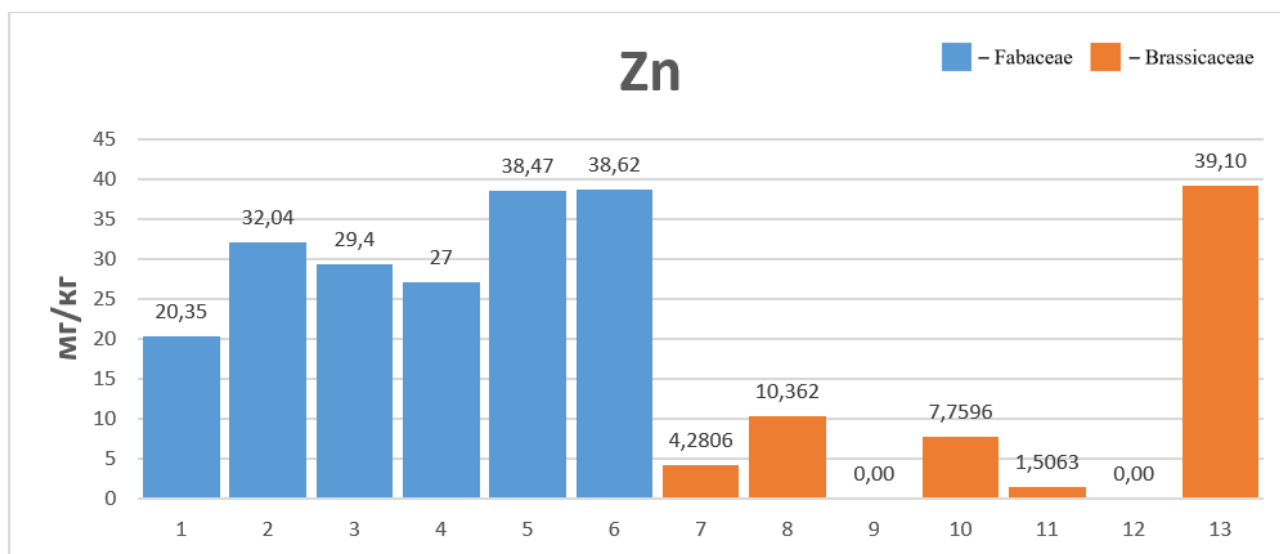


Рис.3.6. Вміст цинку (мг/кг) у досліджуваних зразках рослин та ґрунтів (1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – ґрунт (Бобові), 7 – Редька олійна, 8 –

Гірчиця біла, 9 – Ріпак озимий, 10 – Гірчиця сарептська, 11 – Суріпиця озима, 12 – Тифон, 13 – ґрунт (Капустяні)) у абсолютно сухій речовині.

3.2. Біоконцентраційний фактор (BCF) досліджуваних представників родин *Fabaceae* та *Brassicaceae*.

Біоконцентраційний фактор (BCF) використано як узагальнений показник здатності рослин накопичувати хімічні елементи порівняно з їхнім вмістом у ґрунті. Для кожного виду та кожного металу BCF обчислювали як відношення концентрації елемента в надземній масі рослини до його концентрації в ґрунтовому шарі, з якого цей елемент надходив. Значення коефіцієнта, менше одиниці, свідчить про те, що рослина не здатна повністю відобразити ґрунтовий рівень елемента у надземній частині; значення, близькі до 1, відповідають поведінці «індикаторних» видів; значення, що істотно перевищують 1, характерні для активних акумуляторів. Використання BCF є доцільним у даному дослідженні, оскільки дозволяє стандартизувати порівняння між двома групами культур – представниками родини *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та сидеральними видами родини *Brassicaceae* – за умов дещо відмінного, але близького за рівнем забруднення ґрунту. На ділянці *Trifolium* фонові концентрації Cd, Co, Cr, Cu, Pb і Zn становили відповідно 0,1721; 2,117; 8,854; 16,63; 9,449 і 38,62 мг/кг, тоді як на ділянці *Brassicaceae* – 0,6793; 1,925; 7,506; 14,10; 11,50 і 39,10 мг/кг. Отримані значення BCF дають змогу оцінити не абсолютні вмісти металів, а відносну інтенсивність їх включення в надземну біомасу.

У середньому для роду *Trifolium* біоконцентраційні коефіцієнти становили близько 0,17 для Cd, 0,04 для Co, 0,19 для Cr, 0,32 для Cu, 0,21 для Pb і 0,76 для Zn. Це вказує на помірне накопичення більшості потенційно токсичних металів (BCF < 0,5) при одночасно інтенсивному залученні цинку, коефіцієнт для якого в окремих видів майже досягає одиниці. Для сидеральних культур *Brassicaceae* середні значення BCF становили близько 0,28 для Cd, 0,52 для Co, 0,91 для Cr, менше 0,01 для Cu, 0,49 для Pb і близько 0,10 для Zn. Таким чином, ця група видів загалом

характеризується підвищеними коефіцієнтами для Cd, Co, Cr і Pb та дуже низькими – для Cu і Zn.

Для кадмію у представників роду *Trifolium* біоконцентраційні коефіцієнти коливалися від близько 0,12 у *T. rubens* до 0,24 у *T. dubium*. Значення для *T. repens* і *T. pratense* були однаковими (приблизно 0,15), а *T. medium* займала проміжне положення (близько 0,19). Усі ці значення істотно менші за одиницю, що свідчить про чітко виражену тенденцію до обмеження надходження Cd у надземні органи. Для сидеральних культур *Brassicaceae* BCF Cd змінювався в інтервалі приблизно 0,15–0,53. Найвищий коефіцієнт зафіксовано для редьки олійної сорту 'Кияночка' (понад 0,5), у гірчиці білої 'Сонячна', гірчиці сарептської 'Золотава' та суріпиці озимої 'Оріана' значення наближалися до 0,26–0,30, тоді як у ріпаку озимого 'Горлиця' та тифону 'Фітопал' вони були нижчими (близько 0,15). За таких значень *Brassicaceae* виявляють суттєво вищу відносну здатність акумулювати кадмій, ніж *Trifolium*, хоча жоден із досліджених видів не демонструє властивостей гіперакумулятора (Рис. 3.7.).

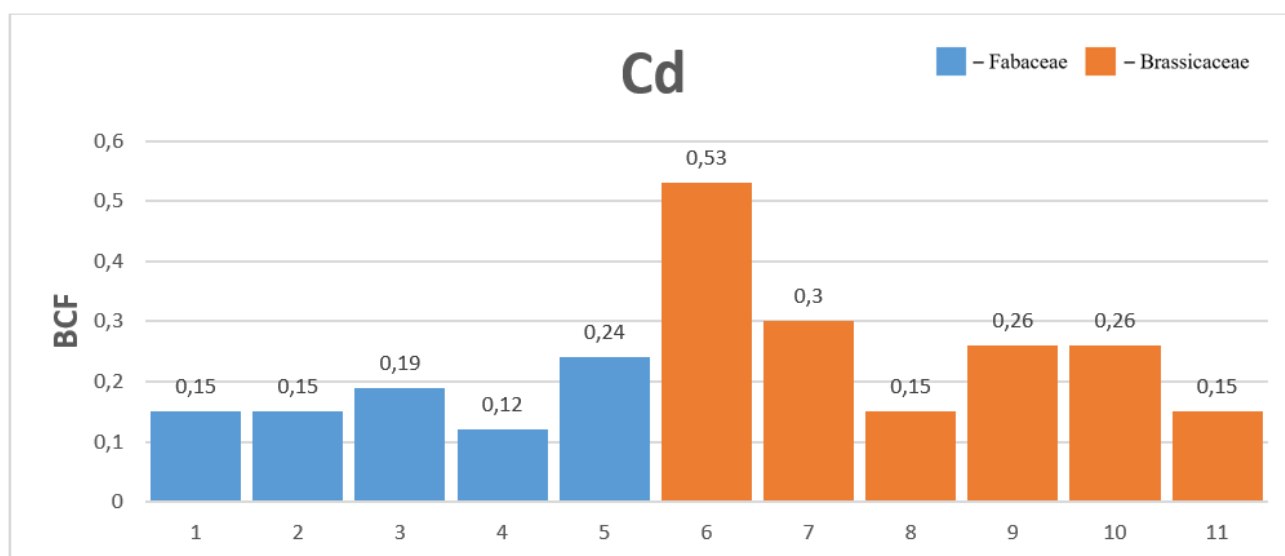


Рис.3.7. Значення біоконцентраційного фактору (BCF) для рослин: 1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина

червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – Редька олійна, 7 – Гірчиця біла, 8 – Ріпак озимий 9 – Гірчиця сарептська, 10 – Суріпиця озима, 11 – Тифон.

Для кобальту біоконцентраційні коефіцієнти у конюшин були дуже низькими. Вони варіювали в межах приблизно 0,025–0,046, тобто лише кілька відсотків від ґрунтового рівня елемента переходило у надземну біомасу. Найнижче значення BCF Co характерне для *T. repens*, тоді як *T. dubium* та *T. medium* мали дещо вищі коефіцієнти, але все ще залишалися у межах 0,04–0,05. На противагу цьому, у *Brassicaceae* BCF Co перебував у діапазоні 0,41–0,67. Максимальні значення виявлено у редьки олійної 'Кияночка' (понад 0,66) та гірчиці білої 'Сонячна' (приблизно 0,60), де концентрації кобальту в надземній масі наближалися до ґрунтових. Ріпак озимий 'Горлиця', суріпиця озима 'Оріана' та тифон 'Фітопал' мали коефіцієнти BCF Co у межах 0,41–0,51, що також свідчить про інтенсивне включення цього елемента в надземні органи (Рис. 3.8.).

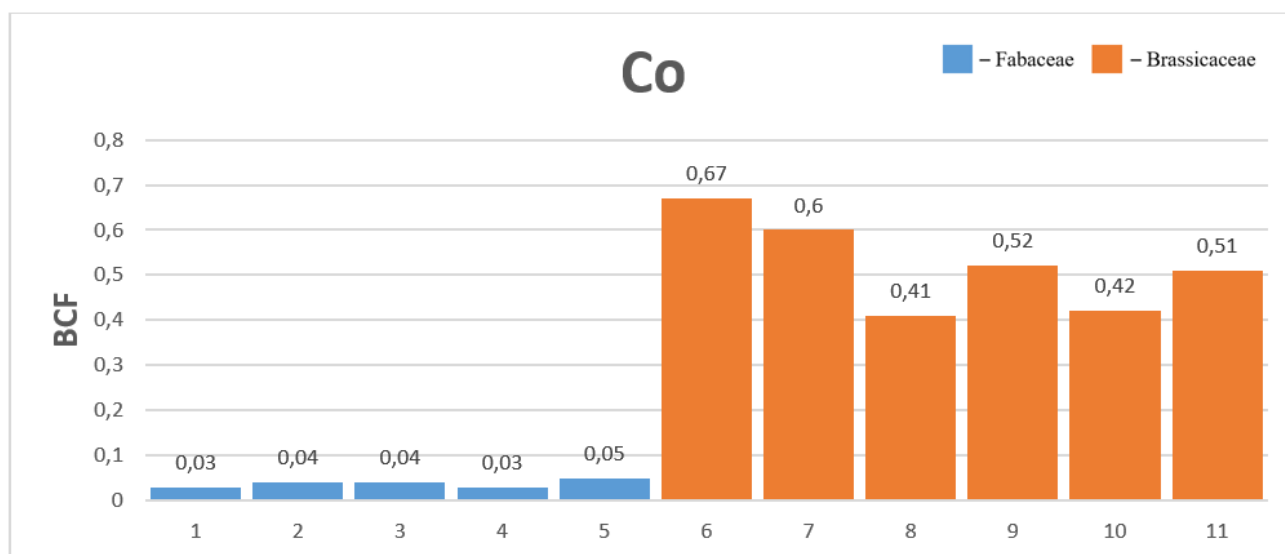


Рис.3.8. Значення біоконцентраційного фактору (BCF) для рослин: 1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – Редька олійна, 7 – Гірчиця біла, 8 – Ріпак озимий 9 – Гірчиця сарептська, 10 – Суріпиця озима, 11 – Тифон.

Біоконцентрація хрому характеризується найбільшою варіабельністю між видами, особливо в межах родини *Brassicaceae*. Для *Trifolium* BCF Cr змінювався від близько 0,08 у *T. repens* до 0,38 у *T. medium*. *T. dubium* демонструвала коефіцієнт на рівні приблизно 0,24, *T. pratense* – 0,16, *T. rubens* – близько 0,11. Таким чином, жоден з видів конюшини не досяг індикаторного рівня ($BCF \approx 1$), а *T. medium* можна розглядати як вид з найвищою, хоча й помірною відносною здатністю до залучення Cr. У сидеральних культур *Brassicaceae* BCF для хрому коливався у ширшому інтервалі – від близько 0,44 у ріпаку озимому 'Горлиця' до майже 1,91 у редьки олійної 'Кияночка'. Для тифону 'Фітопал' коефіцієнт був близьким до одиниці, що вказує на здатність цього виду відобразити ґрунтовий рівень Cr у надземній біомасі. Гірчиця біла, гірчиця сарептська та суріпиця озима характеризувалися проміжними значеннями BCF Cr у межах 0,55–0,81 (Рис. 3.9.).

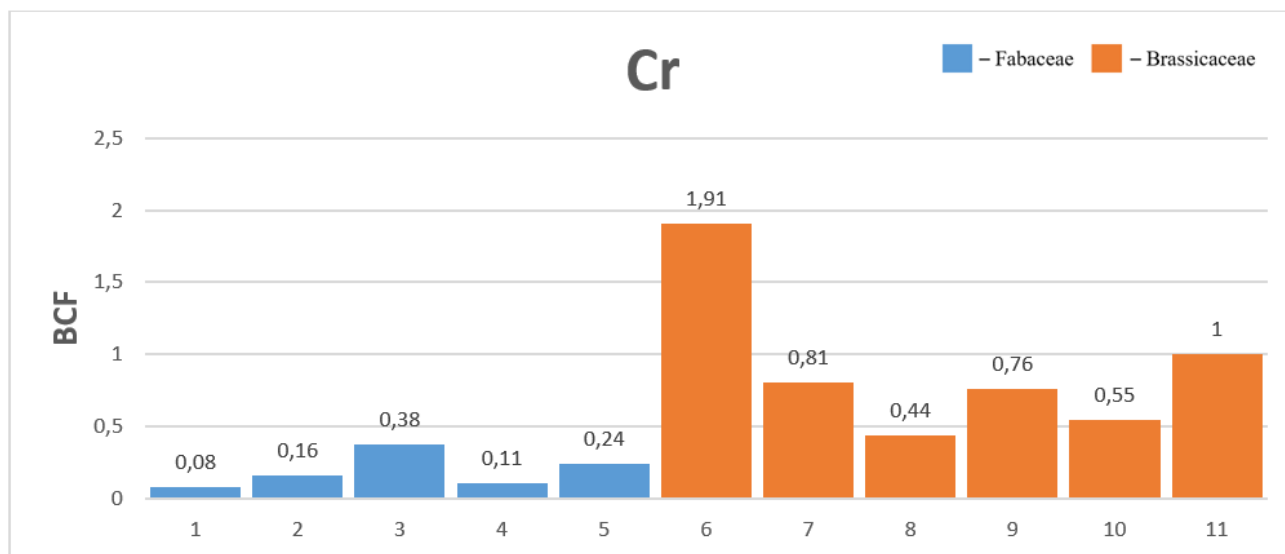


Рис.3.9. Значення біоконцентраційного фактору (BCF) для рослин: 1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – Редька олійна, 7 – Гірчиця біла, 8 – Ріпак озимий 9 – Гірчиця сарептська, 10 – Суріпиця озима, 11 – Тифон.

Щодо міді, для роду *Trifolium* біоконцентраційні коефіцієнти становили 0,17–0,40. Найнижче значення BCF Cu було властиве *T. repens* (приблизно 0,17), тоді як *T. pratense*, *T. rubens* та *T. dubium* мали коефіцієнти 0,37–0,40, а *T. medium* – близько 0,29. Це свідчить про відносно інтенсивне залучення есенціальної міді в надземну біомасу конюшин, хоча й без перевищення ґрунтових концентрацій. У *Brassicaceae* всі досліджені види продемонстрували вкрай низькі значення BCF Cu. У редьки олійної 'Кияночка' коефіцієнт становив близько 0,01, тоді як у гірчиці білої, ріпаку, гірчиці сарептської, суріпиці та тифону вміст міді у надземній масі був настільки низьким, що біоконцентраційні коефіцієнти наближалися до нуля. Це вказує на наявність у капустяних культур ефективних механізмів ексклюзії Cu з надземних органів за досліджуваних умов (Рис. 3.10.).

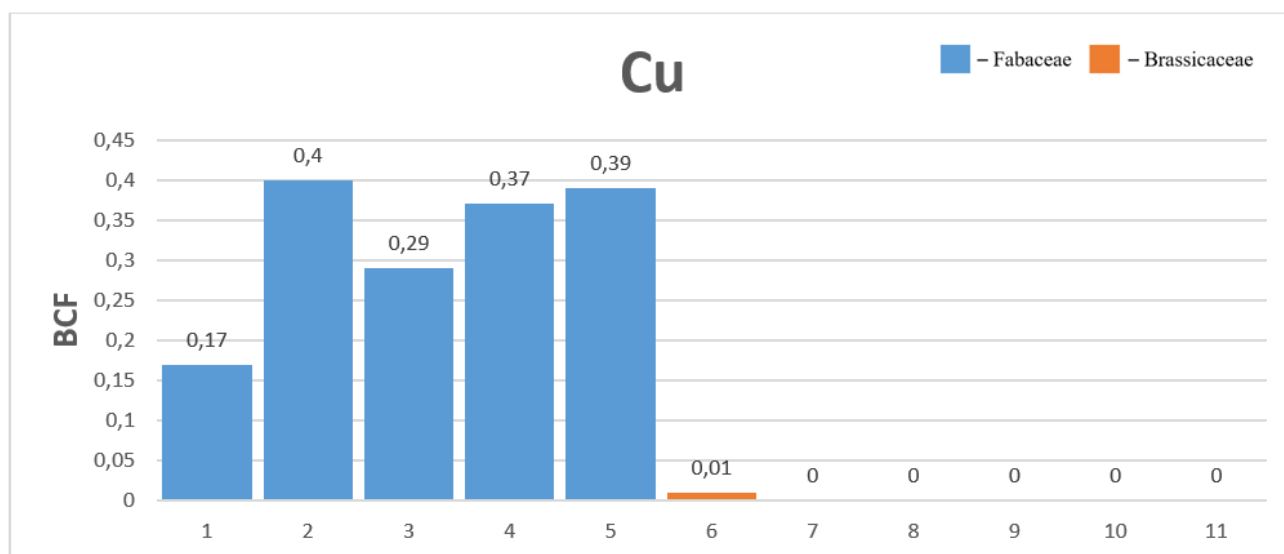


Рис.3.10. Значення біоконцентраційного фактору (BCF) для рослин: 1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – Редька олійна, 7 – Гірчиця біла, 8 – Ріпак озимий 9 – Гірчиця сарептська, 10 – Суріпиця озима, 11 – Тифон.

Для свинцю у представників роду *Trifolium* BCF змінювався у межах приблизно 0,10–0,27. Найнижчий коефіцієнт виявлено у *T. repens* (менше 0,1), тоді

як *T. pratense* та *T. dubium* характеризувалися найвищими значеннями – на рівні 0,25–0,27. *T. medium* та *T. rubens* займали проміжне положення з BCF Pb близько 0,19–0,22. Таким чином, конюшини відносяться до видів з помірним накопиченням свинцю, для яких переважна частка елемента залишається у ґрунті або кореневій системі. У *Brassicaceae* біоконцентраційні коефіцієнти Pb були значно вищими: від близько 0,35 у гірчиці білої 'Сонячна' до майже 0,79 у редьки олійної 'Кияночка'. Ріпак озимий, гірчиця сарептська, суріпиця озима та тифон демонстрували BCF Pb у межах 0,41–0,54. Такі значення характеризують капустяні культури як здатні до інтенсивнішого включення свинцю в надземну масу порівняно з конюшинами (Рис. 3.11.).

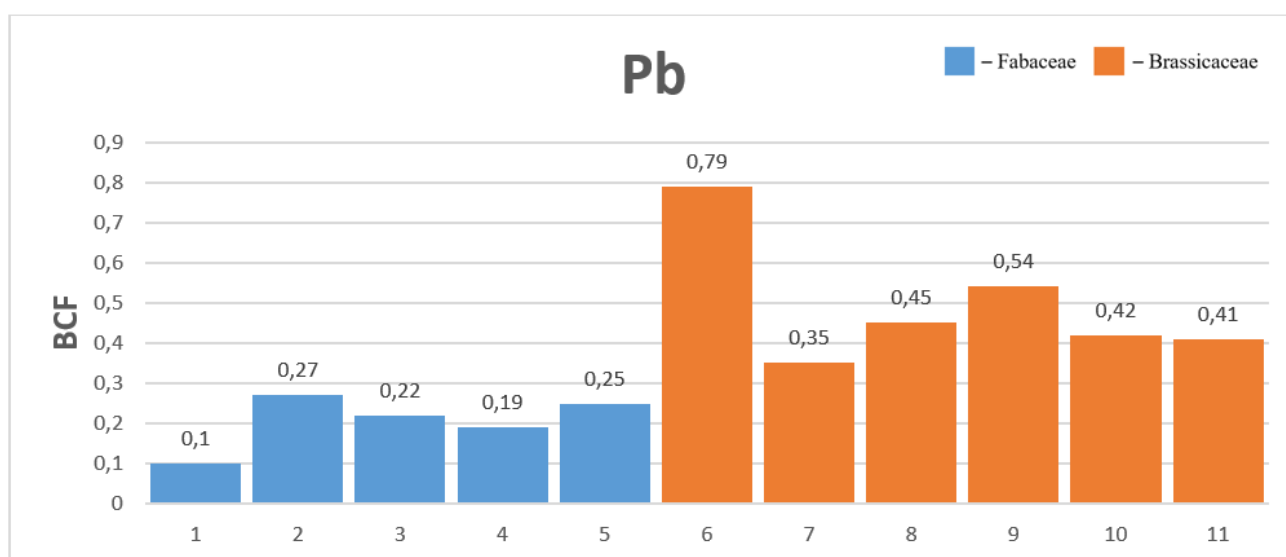


Рис.3.11. Значення біоконцентраційного фактору (BCF) для рослин: 1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – Редька олійна, 7 – Гірчиця біла, 8 – Ріпак озимий 9 – Гірчиця сарептська, 10 – Суріпиця озима, 11 – Тифон.

Найбільш контрастні відмінності між досліджуваними родинami зафіксовано для цинку. Для *Trifolium* BCF Zn перебував у межах 0,53–0,83 у *T. repens*, *T. pratense*, *T. medium* та *T. rubens* і досягав майже одиниці у *T. dubium* ($\approx 0,996$). Таким чином,

для цього виду надземна біомаса практично повністю відображала ґрунтовий рівень цинку, тоді як інші види роду характеризувалися високими, але дещо нижчими коефіцієнтами. У *Brassicaceae* біоконцентраційні коефіцієнти Zn були значно меншими: від близько 0,04 у суріпиці озимій 'Оріана' до 0,27 у гірчиці білій 'Сонячна'; для ріпаку озимого 'Горлиця' та тифону 'Фітопал' значення BCF Zn практично дорівнювали нулю. Це свідчить про те, що конюшини загалом ефективно акумулюють цинк, тоді як більшість капустяних культур обмежують його надходження у надземні органи (Рис. 3.12.).

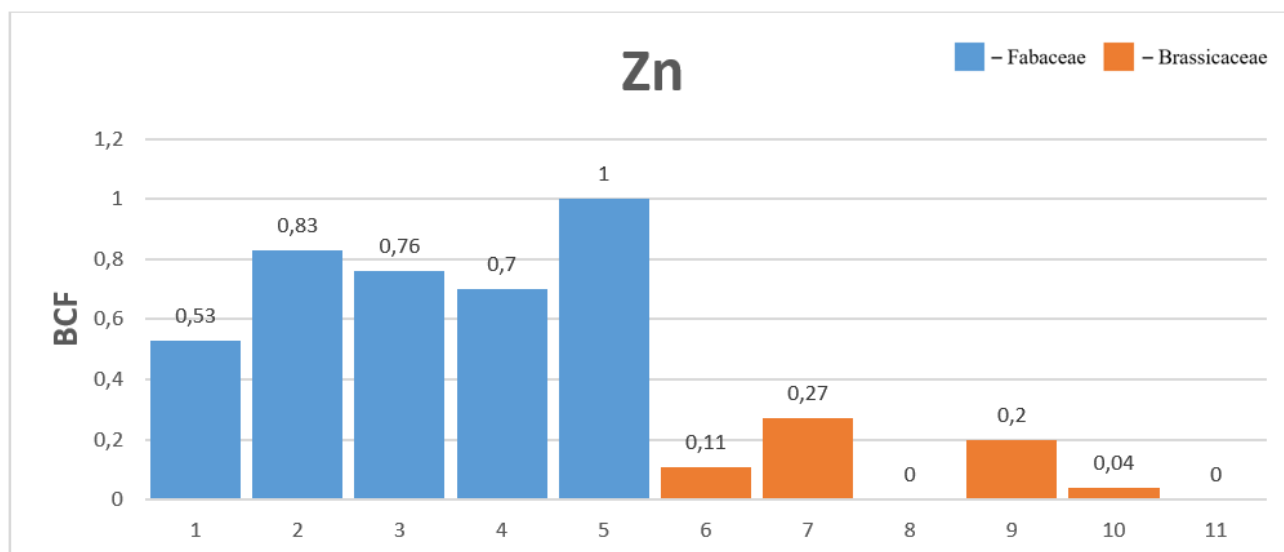


Рис.3.12. Значення біоконцентраційного фактору (BCF) для рослин: 1 – Конюшина повзуча, 2 – Конюшина лучна, 3 – Конюшина середня, 4 – Конюшина червонувата, 5 – Конюшина сумнівна, 6 – Редька олійна, 7 – Гірчиця біла, 8 – Ріпак озимий 9 – Гірчиця сарептська, 10 – Суріпиця озима, 11 – Тифон.

Узагальнюючи отримані результати, можна відзначити, що біоконцентраційні коефіцієнти відображають чіткі видоспецифічні стратегії регуляції вмісту важких металів у досліджуваних рослин. Конюшини здебільшого характеризуються помірним накопиченням Cd, Co, Cr і Pb при відносно високих значеннях BCF для есенціальних Cu та Zn, тоді як сидеральні культури родини

Brassicaceae демонструють протилежні тенденції – інтенсивніше включення Cd, Co, Cr і Pb за одночасного обмеження надходження Cu та Zn. Подальший аналіз цих закономірностей у контексті фітореMediaційного потенціалу видів і порівняння між родинами *Fabaceae* та *Brassicaceae* наведено у підрозділі 3.3.

3.3. Порівняльний аналіз результатів між рослинами родин *Fabaceae* та *Brassicaceae*.

Порівняльний аналіз одержаних результатів свідчить про формування двох відмінних типів елементної поведінки у досліджуваних груп рослин. Представники роду *Trifolium* загалом характеризуються помірним накопиченням більшості потенційно токсичних елементів та відносно високим залученням есенціальних мікроелементів, насамперед Zn та Cu. Сидеральні культури родини *Brassicaceae*, навпаки, демонструють підвищену здатність акумулювати Cd, Co, Cr і Pb при одночасному обмеженні надходження цинку й міді у надземні органи. Така протилежна спрямованість елементних профілів є принципово важливою для подальшої оцінки їх фітореMediaційного потенціалу.

За фактичними концентраціями у надземній масі середнє значення кадмію у видів *Trifolium* становило близько 0,03 мг/кг, тоді як у *Brassicaceae* – близько 0,19 мг/кг. Подібна картина спостерігається для кобальту, хрому та свинцю: середній вміст Co у конюшин не перевищував 0,08 мг/кг, тоді як у капустяних сидератів наближався до 1,0 мг/кг; для Cr ці значення становили відповідно приблизно 1,7 та 6,8 мг/кг, а для Pb – близько 2,0 та 5,7 мг/кг. У термінах біоконцентраційних коефіцієнтів це виражається в тому, що середні BCF Cd, Co, Cr і Pb у *Brassicaceae* є помітно вищими, ніж у *Trifolium*, а для Cr середній BCF у капустяних культур наближається до одиниці, тоді як у конюшин він не перевищує приблизно 0,2. Таким чином, за умов досліду саме сидеральні культури родини *Brassicaceae* проявили себе як більш ефективні акумулятори низки токсичних металів.

Для міді й цинку зафіксовано протилежну тенденцію. Середній вміст Cu у надземній масі конюшин становив понад 5 мг/кг, тоді як у *Brassicaceae* залишався на рівні сотих часток міліграма. Цинк у *Trifolium* акумулювався на рівні близько 29–30 мг/кг, а в окремих видів (насамперед *T. dubium*) його концентрація майже збігалася з ґрунтовим фоном. У капустяних сидератів середній вміст Zn не перевищував 4 мг/кг, причому для частини видів його значення в надземній масі були дуже низькими. Відповідні біоконцентраційні коефіцієнти показують, що для роду *Trifolium* BCF Zn наближається до 0,8 у середньому, а для *T. dubium* є близьким до 1, тоді як у *Brassicaceae* цей показник зазвичай не перевищує 0,3 і часто наближений до нуля. Для Cu ситуація ще контрастніша: у конюшин BCF Cu коливається у межах 0,2–0,4, а у капустяних культур залишається на рівні, близькому до нуля.

Важливою є також міжвидова диференціація всередині кожної родини. Серед представників роду *Trifolium* найбільш «екстрактивний» тип елементної поведінки демонструє *T. dubium*, у якого спостерігаються найвищі концентрації Cd, Cr, Pb і Zn у надземній масі та відповідно підвищені значення BCF для цих металів. *T. medium* вирізняється відносно більшим залученням хрому, тоді як *T. pratense* і *T. rubens* мають вищі коефіцієнти накопичення міді при збереженні помірних рівнів для Cd і Pb. *T. repens* загалом характеризується найнижчими значеннями BCF для більшості металів, що дозволяє розглядати його радше як стабілізатор, ніж як активний екстрактор.

У межах *Brassicaceae* найбільш виражену здатність до акумуляції Cd, Co, Cr і Pb демонструє редька олійна сорту 'Кияночка', для якої біоконцентраційні коефіцієнти цих металів є максимальними, а коефіцієнт для Cr перевищує одиницю. Тифон 'Фітопал' характеризується BCF Cr, близьким до 1, та підвищеними значеннями для Pb, що також свідчить про можливість його використання при очищенні ґрунтів від цих елементів. Гірчиця біла 'Сонячна' та гірчиця сарептська 'Золотава' займають проміжне положення, поєднуючи помірно високі BCF Cd, Co,

Cr і Pb із відносно низьким накопиченням Cu і Zn. Суріпиця озима 'Оріана' та ріпак озимий 'Горлиця' також здатні залучати токсичні метали, однак загалом демонструють дещо нижчі коефіцієнти біоконцентрації, ніж редька та тифон.

З погляду практичного використання у фітореMediaційних технологіях отримані результати свідчать про доцільність різної спеціалізації досліджуваних рослин. Сидеральні культури родини *Brassicaceae*, особливо редька олійна 'Кияночка' та тифон 'Фітопал', доцільно розглядати як перспективні компоненти схем фітоекстракції Cd, Co, Cr і Pb з помірно забруднених супіщаних ґрунтів. Відносно високі значення BCF для цих металів у поєднанні з відомою здатністю капустяних культур нарощувати значну фітомасу створюють передумови для ефективного вилучення забруднювачів з орного шару.

Представники роду *Trifolium* в умовах проведеного досліджу виявили себе як рослини з помірним накопиченням токсичних металів і високим залученням есенціальних Zn та Cu. Це дозволяє розглядати їх, з одного боку, як важливий елемент стабілізаційних і рекультиваційних посівів на деградованих ґрунтах із помірним техногенним навантаженням, де необхідно відновити структуру ґрунту, його азотний режим та забезпечити покривну функцію. З іншого боку, види з вищими значеннями BCF Zn і Cu, насамперед *T. dubium* та *T. pratense*, можуть бути задіяні у схемах контрольованого вилучення цих елементів у разі їхнього надлишку.

У цілому порівняння результатів для *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та *Brassicaceae* показує, що жодна з груп не є універсальним фітореMediaтором для всіх досліджених металів. Натомість формується комплементарна система: конюшини доцільно використовувати як довготривалі покривні культури, які забезпечують фіксацію азоту, стабілізацію ґрунту та регуляцію вмісту есенціальних мікроелементів, тоді як капустяні види можуть відігравати роль «робочих» фітоекстракторів, спрямованих на цілеспрямоване зниження вмісту Cd, Co, Cr і Pb. Така комбінація відкриває можливості для проектування багатоконпонентних фітореMediaційних систем, у яких послідовне або сумісне використання *Fabaceae*

та *Brassicaceae* дозволяє поєднати очищення ґрунту від токсичних металів із його відновленням та підвищенням родючості.

3.4. Особливості накопичення ртуті у представників роду *Trifolium* родини *Fabaceae*.

Оцінка вмісту ртуті у *Trifolium repens* та *Trifolium pratense* на градієнті забруднення ґрунтів у межах м. Києва дала змогу виявити видоспецифічні особливості акумуляції Hg представниками роду *Trifolium* та зіставити їх із раніше виявленими закономірностями накопичення інших важких металів.

За всіх досліджених рівнів забруднення ґрунту ртуттю (0,04–5,26 мг/кг) обидва види конюшини зберігали високу життєздатність, завершували повний онтогенетичний цикл, утворювали квітки, плоди й життєздатне насіння без виражених симптомів фітотоксичності. Це свідчить про стійкість *T. repens* та *T. pratense* до наявних концентрацій Hg у субстраті та підтверджує їхню адаптованість до умов техногенного навантаження.

На ділянці з фоновими умовами ($0,04 \pm 0,01$ мг/кг Hg) вміст ртуті в надземних органах обох видів був співставним і становив близько 0,05 мг/кг сухої речовини, що забезпечувало значення $BCF > 1$. Це відповідає критеріям гіпераккумуляції та свідчить про високу здатність обох видів інтенсивно вилучати ртуть із ґрунтового розчину за низьких фонів забруднення. За таких умов конюшини можуть потенційно використовуватися як елементи фітоекстракційних схем, спрямованих на поступове очищення ґрунту від слідових концентрацій Hg.

За підвищення концентрації ртуті у ґрунті до $0,82 \pm 0,16$ мг/кг спостерігалось зростання вмісту Hg у надземній масі обох видів, хоча характер відповіді дещо відрізнявся. *Trifolium repens* у цих умовах накопичувала ртуть у надземній частині на рівні, що перевищував показники *T. pratense*, зберігаючи відносно високі значення BCF. Це може свідчити про більшу інтенсивність включення Hg у

метаболічні потоки в системі «корінь–пагін» у конюшини повзучої за помірного забруднення.

На ділянці з найбільшим рівнем забруднення ($5,26 \pm 1,05$ мг/кг Hg), який істотно перевищує гранично допустиму концентрацію для ґрунтів, вміст ртуті у надземних органах обох видів зростав, однак біоконцентраційний фактор зменшувався. Максимальні зафіксовані значення становили $0,25 \pm 0,01$ мг/кг для *T. repens* та $0,45 \pm 0,01$ мг/кг для *T. pratense*. Таким чином, за умов сильної контамінації саме *T. pratense* характеризувалася вищою здатністю до акумуляції Hg у надземній масі. З огляду на те, що цей вид формує більшу фітомасу, його можна розглядати як перспективний об'єкт для практичної фітоекстракції Hg за умови належної утилізації забрудненої біомаси.

Аналіз залежності концентрації ртуті у рослинах *T. repens* від її концентрації у ґрунтах демонструє нелінійну залежність: на низьких рівнях Hg рослина активно накопичує ртуть, а після пікового вмісту спостерігається зниження концентрації Hg у рослині. Рослини *T. repens* показали специфічну реакцію на зміну рівня забруднення, що робить цей вид потенційно більш стійким.

Для *T. pratense* встановлено наближену до лінійної залежність між вмістом Hg у ґрунті та її концентрацією в надземних органах: збільшення рівня забруднення супроводжується пропорційним зростанням вмісту ртуті в рослині. Такий характер відповіді дає підстави розглядати конюшину лучну не лише як вид із високим фітоекстрактивним потенціалом, але й як біогеохімічний індикатор ступеня забруднення ґрунтів ртуттю (Рис. 3.13.).

Попри підвищені концентрації Hg у ґрунті, масова частка ртуті в надземній біомасі *T. repens* та *T. pratense* залишалася нижчою за граничні допустимі рівні для кормів і харчових продуктів рослинного походження. Водночас на забруднених територіях використання конюшин як кормових культур пов'язане з потенційним ризиком включення ртуті до трофічних ланцюгів, що потребує додаткового контролю.

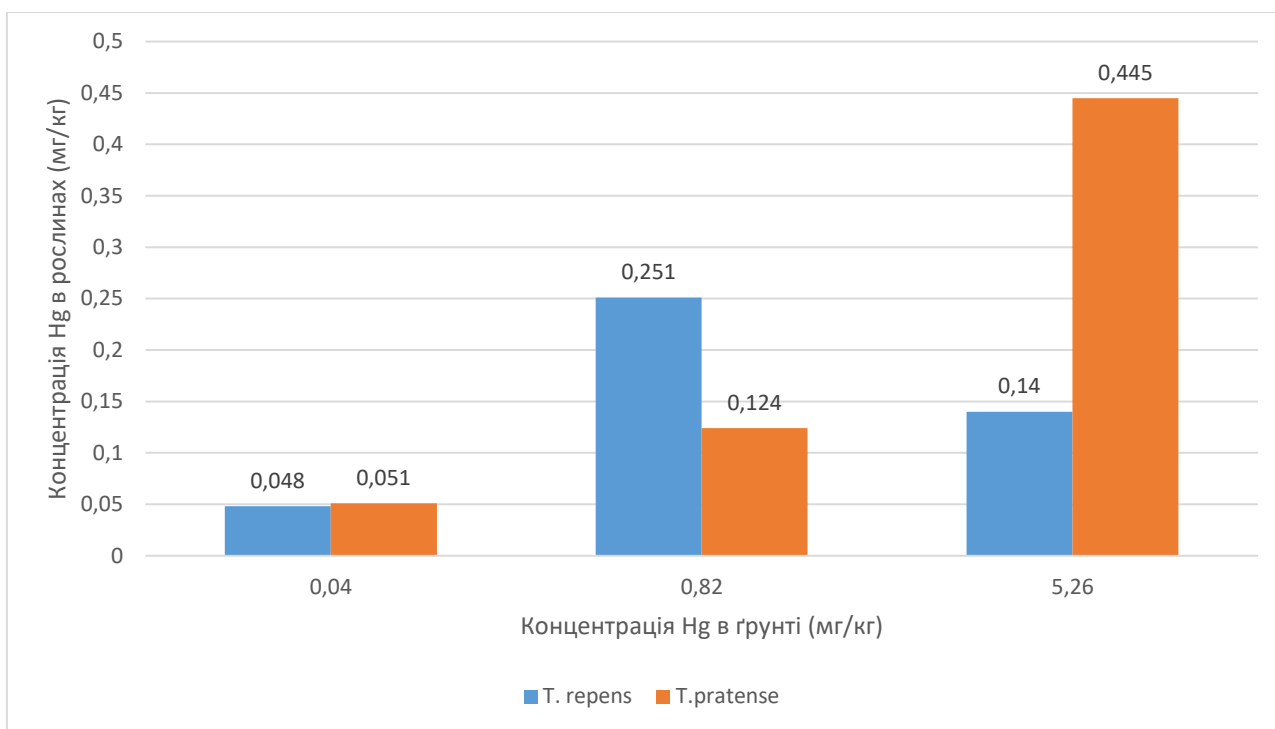


Рис. 3.13. Масова концентрація ртуті у рослинах конюшини залежно від її концентрації у ґрунтах (мг/кг)

Порівняння з іншими важкими металами свідчить, що для Cd, Cr, Pb та Zn за умов дослідних ділянок Національного ботанічного саду імені М. М. Гришка НАН України *Trifolium* демонструє переважно помірні значення $BCF < 1$, тоді як для ртуті за низьких фонів забруднення BCF може перевищувати одиницю. Це підтверджує специфічність поведінки Hg у системі «ґрунт–рослина» та необхідність окремого врахування цього елемента при оцінці фіторе mediaційного потенціалу *Fabaceae*.

Узагальнюючи, *T. repens* можна охарактеризувати як вид, що ефективно акумулює ртуть за низьких і помірних рівнів забруднення, але частково обмежує її надходження в надземну масу при значній контамінації, виконуючи стабілізувальну функцію. *T. pratense* відзначається вищим накопиченням Hg у надземній біомасі за високих концентрацій у ґрунті та лінійним характером відповіді, що робить цей вид перспективним кандидатом для фітоекстракції ртуті на техногенно забруднених територіях за умови розробки безпечних технологій поводження з забрудненою рослинною масою.

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літератури та експериментальних даних обґрунтовано доцільність використання представників родин *Fabaceae* (рід *Trifolium*) та *Brassicaceae* як компонентів фіторе mediaційних технологій. Досліджувані види поєднують сидеральні властивості (формування значної біомаси, поліпшення структури та азотного режиму ґрунту) з здатністю до акумуляції окремих важких металів у надземній масі, що дозволяє одночасно вирішувати завдання підтримання родючості та екологічної реабілітації деградованих ґрунтів.

2. Встановлено рівні вмісту Cd, Co, Cr, Cu, Pb та Zn у сірому лісовому деградованому супіщаному ґрунті дослідних ділянок Національного ботанічного саду ім. М.М. Гришка НАН України. Для ділянки з *Trifolium* характерні концентрації Cd близько 0,17 мг/кг, Co – близько 2,1 мг/кг, Cr – близько 8,9 мг/кг, Cu – близько 16,6 мг/кг, Pb – близько 9,4 мг/кг, Zn – близько 38,6 мг/кг. На ділянці з сидеральними культурами родини *Brassicaceae* вміст Cd ($\approx 0,68$ мг/кг) та Pb ($\approx 11,5$ мг/кг) є вищим порівняно з ділянкою *Trifolium*, тоді як концентрації Cr, Cu, Co та Zn перебувають на подібному рівні. Отримані значення характеризують ґрунт як техногенно навантажений, але не екстремально забруднений, що є типовим для умов урбанізованого середовища та дозволяє коректно оцінювати фіторе mediaційний потенціал досліджених культур.

3. Показано видові особливості накопичення Cd, Co, Cr, Cu, Pb та Zn у представників роду *Trifolium*. У надземній масі *T. repens*, *T. pratense*, *T. medium*, *T. rubens* та *T. dubium* зафіксовано невисокі концентрації Cd ($\approx 0,02$ – $0,04$ мг/кг) і Co ($\approx 0,05$ – $0,10$ мг/кг), помірні рівні Cr ($\approx 0,68$ – $3,35$ мг/кг) та Pb ($\approx 0,93$ – $2,55$ мг/кг) і більш інтенсивне накопичення Cu ($\approx 2,87$ – $6,68$ мг/кг) та Zn ($\approx 20,35$ – $38,47$ мг/кг). Найвищі значення вмісту Zn виявлено у *T. dubium*, а Cu – у *T. pratense* та *T. dubium*, що свідчить про виражену здатність цих видів до включення мікроелементів у метаболізм за умов помірного техногенного навантаження.

4. Сидеральні культури родини *Brassicaceae* (*Raphanus sativus oleifera* ‘Кияночка’, *Sinapis alba* ‘Сонячна’, *Brassica napus* ‘Горлиця’, *Brassica juncea* ‘Золотава’, *Brassica campestris* ‘Оріана’, *Typhon* ‘Фітопал’) демонструють інший тип елементного профілю порівняно з *Trifolium*. У їхній надземній масі виявлено істотно вищі концентрації Cd ($\approx 0,10$ – $0,36$ мг/кг), Co ($\approx 0,79$ – $1,28$ мг/кг), Cr ($\approx 3,28$ – $14,34$ мг/кг) та Pb ($\approx 4,01$ – $9,12$ мг/кг), тоді як вміст Cu практично не перевищував межі визначення, а Zn перебував переважно на рівні одиниць–десятків мг/кг. Це свідчить про виражену здатність капустяних культур до акумуляції токсичних елементів (Cd, Co, Cr, Pb) за недостатньої участі в обігу Zn і Cu.

5. Розрахунок біоконцентраційних коефіцієнтів (BCF) для Cd, Co, Cr, Cu, Pb та Zn дозволив виділити групи видів із підвищеним фітоекстракційним потенціалом. У представників роду *Trifolium* значення BCF для Cd, Co, Cr, Cu та Pb знаходяться нижче 1 (Cd – $0,12$ – $0,24$; Co – $0,03$ – $0,05$; Cr – $0,08$ – $0,38$; Cu – $0,17$ – $0,40$; Pb – $0,10$ – $0,27$), що вказує на переважно стабілізаційну роль цих рослин у ґрунтово-рослинній системі. Водночас для Zn значення BCF досягають $0,53$ – $1,00$, причому у *Trifolium dubium* воно дорівнює 1, що свідчить про здатність цього виду ефективно залучати Zn з ґрунту і робить його перспективним для фітоекстракції цинку.

6. Серед культур родини *Brassicaceae* виявлено види з найбільшим BCF для Cd, Co, Cr та Pb, що визначає їх як пріоритетні об’єкти для фітоекстракційних технологій. Найвищі значення BCF для Cd ($0,53$), Co ($0,67$), Cr ($1,91$) та Pb ($0,79$) встановлено у редьки олійної сорту ‘Кияночка’, тоді як для Cr на рівні $BCF \approx 1$ характерні також рослини тифону сорту ‘Фітопал’. Інші капустяні сидерати (*S. alba* ‘Сонячна’, *B. juncea* ‘Золотава’, *B. campestris* ‘Оріана’, *B. napus* ‘Горлиця’) формують BCF середнього рівня ($\approx 0,26$ – $0,60$ для Cd, Co, $0,44$ – $0,81$ для Cr, $0,35$ – $0,54$ для Pb), що свідчить про їхню перспективність для зниження вмісту цих металів у ґрунті при багаторічному залученні в систему сівозмін. Для Zn у всіх представників *Brassicaceae* $BCF < 1$, а для Cu – близьке до нуля, що вказує на їхню обмежену роль у фітоекстракції цих елементів.

7. Порівняльний аналіз родин *Fabaceae* та *Brassicaceae* показав, що в умовах сірого лісового деградованого супіщаного ґрунту жоден із досліджених видів не є універсальним гіпераккумулятором для всіх металів, однак їх поєднання дозволяє реалізувати комплексний фітореMediaційний підхід. Бобові (рід *Trifolium*) ефективніші для залучення мікроелементів Zn і Cu при одночасному поліпшенні азотного режиму й структури ґрунту, тоді як капустяні сидерати (*R. sativus oleifera* ‘Кияночка’, Турфон ‘Фітопал’ та ін.) більш результативні щодо Cd, Co, Cr і Pb. Це створює підґрунтя для формування змішаних сидерально-фітореMediaційних посівів, орієнтованих на довготривале зниження техногенного навантаження та відновлення родючості ґрунту.

8. Для ртуті (Hg) за результатами окремого блоку досліджень встановлено градієнт забруднення ґрунтів у межах 0,04–5,26 мг/кг та здатність *Trifolium repens* і *Trifolium pratense* успішно вегетувати за таких умов. В надземній масі цих видів концентрація Hg зростала зі збільшенням умісту металу в ґрунті, досягаючи на найбільш забруднених ділянках значень порядку 0,25–0,45 мг/кг. На референтній ділянці з мінімальним рівнем забруднення (близько 0,04 мг/кг Hg у ґрунті) біоконцентраційний фактор для Hg у обох видів перевищував 1, що свідчить про їхню здатність до активного залучення ртуті з ґрунтового розчину. При зростанні техногенного навантаження BCF для Hg зменшувався, але абсолютний вміст Hg у надземній масі підвищувався, причому *T. pratense* накопичувала ртуть істотно більше, ніж *T. repens*. Це дозволяє розглядати конюшину лучну як перспективний вид для фітоекстракції Hg на ділянках із помірним і підвищеним рівнем забруднення, а конюшину повзучу – як толерантний індикаторний вид та компонент стабілізаційних фітореMediaційних систем.

9. Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості науково обґрунтованого підбору видів та сортів бобових і капустяних культур для рекультивації сірого лісового деградованого супіщаного ґрунту з підвищеним вмістом Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Zn та Hg. Редька олійна ‘Кияночка’ та тифон ‘Фітопал’

можуть бути рекомендовані як базові фітоекстракційні культури для зменшення вмісту Cd, Co, Cr і Pb, тоді як *Trifolium dubium* доцільно залучати для вилучення Zn, а *Trifolium pratense* та *T. repens* – для комплексного фіторе mediaційного опрацювання ділянок із забрудненням Hg. Запропонований підхід сприяє реалізації екологічно безпечних, біологічно орієнтованих технологій рекультивациі ґрунтів та може бути адаптований до інших регіонів із подібною структурою техногенного навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Pilon-Smits E. Phytoremediation. *Annu Rev Plant Biol.* 2005. Vol. 56. P. 15–39. DOI: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214. PMID: 15862088.
2. Ali H., Khan E., Sajad M. A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. *Chemosphere.* 2013. Vol. 91, № 7. P. 869–881.
3. Kumar A., Dadhwal M., Mukherjee G., Srivastava A., Gupta S., Ahuja V. Phytoremediation: Sustainable Approach for Heavy Metal Pollution. *Scientifica.* 2024. Article ID 3909400. DOI: 10.1155/2024/3909400.
4. Kafle A., Timilsina A., Gautam A., Adhikari K., Bhattarai A., Aryal N. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances.* 2022. Vol. 8. Article 100203.
5. Pilon-Smits E. Phytoremediation. *Annu Rev Plant Biol.* 2005. Vol. 56. P. 15–39. DOI: 10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214. PMID: 15862088.
6. Kumar V., Rout C., Singh J., Saharan Y., Goyat R., Umar A., ... Baskoutas S. A review on the clean-up technologies for heavy metal ions contaminated soil samples. *Heliyon.* 2023. Vol. 9, № 5.
7. Acharya A., Perez E., Maddox-Mandolini M., De La Fuente H. The status and prospects of phytoremediation of heavy metals. *arXiv preprint.* 2023. arXiv:2312.14288.
8. Bedassa M. Determination of Bio-concentration Factor of Heavy metal from Soil to Onion around Mojo, Meki and Ziway area of Oromia Ethiopian. *Journal of Medical Care Research and Review.* 2023. Vol. 6, № 8. P. 1–5.
9. Boim A. G. F., Melo L. C. A., Moreno F. N., Alleoni L. R. F. Bioconcentration factors and the risk concentrations of potentially toxic elements in garden soils. *Journal of Environmental Management.* 2016. Vol. 170. P. 21–27.
10. Munishi L. K., Ndakidemi P. A., Blake W., Comber S., Hutchinson T. H. Accumulation and bioconcentration of heavy metals in two phases from agricultural soil to plants in Usangu agroecosystem-Tanzania. *Heliyon.* 2021. Vol. 7, № 7.

11. Heta G., Zejnullahu F., Zeneli V., Ognenoska V., Petkoska A. T., Pavlovska G. Ecological Risk Factor, Contamination Factor and Bioconcentration Factor of Heavy Metals in Vegetables Grown on Polluted Soils in Kosovo. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2025.
12. Aziz R. A., Yiwen M., Saleh M., Salleh M. N., Gopinath S. C., Giap S. G. E., ... Gobinath R. Bioaccumulation and translocation of heavy metals in paddy (*Oryza sativa* L.) and soil in different land use practices. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 18. Article 13426.
13. Khatoon Z., Orozco-Mosqueda M. d. C., Santoyo G. Microbial Contributions to Heavy Metal Phytoremediation in Agricultural Soils: A Review. *Microorganisms*. 2024. Vol. 12, № 10. Article 1945. DOI: 10.3390/microorganisms12101945.
14. Jothimani P., Subramanian P., Sangeetha R. Phytoremediation of Heavy Metals – A Review. 2013. P. 17–23.
15. Barra Caracciolo A., Terenzi V. Rhizosphere microbial communities and heavy metals. *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, № 7. Article 1462.
16. Khan A. G. Role of soil microbes in the rhizospheres of plants growing on trace metal contaminated soils in phytoremediation. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2005. Vol. 18, № 4. P. 355–364.
17. Jing Y. D., He Z. L., Yang X. E. Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Zhejiang University Science B*. 2007. Vol. 8, № 3. P. 192–207.
18. Gamalero E., Lingua G., Berta G., Glick B. R. Beneficial role of plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on plant responses to heavy metal stress. *Canadian Journal of Microbiology*. 2009. Vol. 55, № 5. P. 501–514.
19. Fagorzi C., Checcucci A., DiCenzo G. C., Debiec-Andrzejewska K., Dziewit L., Pini F., Mengoni A. Harnessing rhizobia to improve heavy-metal phytoremediation by legumes. *Genes*. 2018. Vol. 9, № 11. Article 542.

20. Hao X., Taghavi S., Xie P., Orbach M. J., Alwathnani H. A., Rensing C., Wei G. Phytoremediation of heavy and transition metals aided by legume-rhizobia symbiosis. *International Journal of Phytoremediation*. 2014. Vol. 16, № 2. P. 179–202.
21. Bharani A., Sentilraja K., Shahidha P. A., Mahimairaja S. Rhizosphere microbes as biosorbents for heavy metal removal.
22. Hasan M., Naushin F., Khan F. A. Soil symbionts in alleviation of heavy metals-laden sewage sludge-impacts in legumes: implications for phytoremediation. *Discover Plants*. 2025. Vol. 2, № 1. Article 103.
23. Pandey A. K., Zorić L., Sun T., Karanović D., Fang P., Borišev M., Wu X., Luković J., Xu P. The anatomical basis of heavy metal responses in legumes and their impact on plant–rhizosphere interactions. *Plants*. 2022. Vol. 11, № 19. Article 2554. DOI: 10.3390/plants11192554.
24. Liu Z., Tran K. Q. A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 226. Article 112821.
25. Mang K. C., Ntushelo K. Phytoextraction and phytostabilisation approaches of heavy metal remediation in acid mine drainage with case studies: a review. *Applied Ecology & Environmental Research*. 2019. Vol. 17, № 3.
26. Nascimento C. W. A. D., Xing B. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Scientia Agricola*. 2006. Vol. 63. P. 299–311.
27. Zheng K., Liu Z., Liu C., Liu J., Zhuang J. Enhancing remediation potential of heavy metal contaminated soils through synergistic application of microbial inoculants and legumes. *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. Article 1272591.
28. Vasilica S. T. A. N., Gament E., Cornea C. P., Voaideş C., Mirela D. U. Ş. A., Plopeanu G. Effects of heavy metal from polluted soils on the *Rhizobium* diversity. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2011. Vol. 39, № 1. P. 88–95.

- 29.Hou D., Jia X., Wang L., McGrath S. P., Zhu Y. G., Hu Q., ... Nriagu J. Global soil pollution by toxic metals threatens agriculture and human health. *Science*. 2025. Vol. 388, № 6744. P. 316–321.
- 30.Michael A. Heavy Metals in Soil: A Review. *Chemical Engineering & Process Technology*. 2023. Vol. 8, № 1. Article 1076.
- 31.Das S., Sultana K. W., Ndhlala A. R., Mondal M., Chandra I. Heavy metal pollution in the environment and its impact on health: exploring green technology for remediation. *Environmental Health Insights*. 2023. Vol. 17. DOI: 10.1177/11786302231201259.
- 32.Li Q., Wang Y., Li Y., Li L., Tang M., Hu W., ... Ai S. Speciation of heavy metals in soils and their immobilization at micro-scale interfaces among diverse soil components. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 825. Article 153862.
- 33.Kachova-Doichinova V. Behavior of heavy metals in soils – distribution and mechanism of interaction with soil constituents. 2015.
- 34.Liu Z., Zhang X., Wang Y., Wen Y. Distributions and influencing factors of heavy metals in soils from Zhenjiang and Yangzhou, China. *Minerals*. 2025. Vol. 15, № 2. Article 171.
- 35.Kicińska A., Pomykała R., Izquierdo-Diaz M. Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*. 2022. Vol. 73, № 1. Article e13203.
- 36.Wan Y., Liu J., Zhuang Z., Wang Q., Li H. Heavy metals in agricultural soils: sources, influencing factors, and remediation strategies. *Toxics*. 2024. Vol. 12, № 1. Article 63.
- 37.Sharma J. K., Kumar N., Singh N. P., Santal A. R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: an approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1076876.
- 38.Wuana R. A., Okieimen F. E. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*. 2011. Vol. 2011, № 1. Article 402647.

- 39.Hou D., O'Connor D., Igalavithana A. D., Alessi D. S., Luo J., Tsang D. C., ... Ok Y. S. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2020. Vol. 1, № 7. P. 366–381.
- 40.Rashid A., Schutte B. J., Ulery A., Deyholos M. K., Sanogo S., Lehnhoff E. A., Beck L. Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutants affecting crop health. *Agronomy*. 2023. Vol. 13, № 6. Article 1521. DOI: 10.3390/agronomy13061521.
- 41.Campillo-Cora C., Rodríguez-Seijo A., Pérez-Rodríguez P., Fernández-Calviño D., Santás-Miguel V. Effect of heavy metal pollution on soil microorganisms: influence of soil physicochemical properties. A systematic review. *European Journal of Soil Biology*. 2025. Vol. 124. Article 103706.
- 42.Singh J., Kalamdhad A. S. Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life. *International Journal of Research in Chemistry and Environment*. 2011. Vol. 1, № 2. P. 15–21.
- 43.Zhu D., Zhang Z. H., Wang Z. H. Effects of heavy metals on soil microbial community of different land use types. *Journal of Mountain Science*. 2023. Vol. 20, № 12. P. 3582–3595.
- 44.Jarosławiecka A. K., Piotrowska-Seget Z. The effect of heavy metals on microbial communities in industrial soil in the area of Piekary Śląskie and Bukowno (Poland). *Microbiology Research*. 2022. Vol. 13, № 3. P. 626–642.
- 45.Liu Z., Bai Y., Gao J., Li J. Driving factors on accumulation of cadmium, lead, copper, zinc in agricultural soil and products of the North China Plain. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, № 1. Article 7429.
- 46.Cadmium, a proven carcinogen, has contaminated some of the most consumed foods in France. Doctors warn against a “public health time bomb”. *Le Monde*. URL: <https://www.lemonde.fr/en/environment/article/2025/06/06/cadmium-a-proven-carcinogen-has-contaminated-some-of-the-most-consumed-foods-in-france-doctors->

- [warn-against-a-public-health-time-bomb_6742083_114.html](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0730-0_2) (дата звернення: 03.11.2025).
47. Ferreira T. C., Aguilar J. V., Bomfim N. C. P., Olivio M. L. G., dos Santos B. S., Rosalem P. F., de Camargos L. S. The Fabaceae family in the face of the influence of the potentially toxic element nickel: a scoping review. *Discover Plants*. 2025. Vol. 2, № 1. Article 39.
48. Siddiqui S. Global patterns and drivers of species and genera richness of Fabaceae. *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Article 1581814.
49. Ahmad E., Zaidi A., Khan M. S., Oves M. Heavy metal toxicity to symbiotic nitrogen-fixing microorganism and host legumes. In: Zaidi A., Wani P., Khan M. (eds.). *Toxicity of Heavy Metals to Legumes and Bioremediation*. Vienna: Springer, 2012. P. 31–56. DOI: 10.1007/978-3-7091-0730-0_2.
50. El Sabagh A., Hossain A., Islam M. S., Fahad S., Ratnasekera D., Meena R. S., ... Hasanuzzaman M. Nitrogen fixation of legumes under the family Fabaceae: adverse effect of abiotic stresses and mitigation strategies. In: *The Plant Family Fabaceae: Biology and Physiological Responses to Environmental Stresses*. Singapore: Springer Singapore, 2020. P. 75–111.
51. Xu P., Wang E. Diversity and regulation of symbiotic nitrogen fixation in plants. *Current Biology*. 2023. Vol. 33, № 11. P. R543–R559.
52. Ayub M. A., ur Rehman M. Z., Umar W., Zuhra N., Shabaan M. Role of legumes in phytoremediation of heavy metals. In: *Advances in Legumes for Sustainable Intensification*. Cambridge, MA: Academic Press, 2022. P. 345–360.
53. Taylor B. N., Simms E. L., Komatsu K. J. More than a functional group: diversity within the legume–rhizobia mutualism and its relationship with ecosystem function. *Diversity*. 2020. Vol. 12, № 2. Article 50.
54. Santoyo-Martínez M., Mussali-Galante P., Hernández-Plata I., Valencia-Cuevas L., Rodríguez A., Castrejón-Godínez M. L., Tovar-Sánchez E. Phytoremediation potential of *Crotalaria pumila* (Fabaceae) in soils polluted with heavy metals: evidence from

- field and controlled experiments. *Plants*. 2024. Vol. 13, № 14. Article 1947. DOI: 10.3390/plants13141947.
55. Makarova A., Nikulina E., Avdeenkova T., Pishaeva K. The improved phytoextraction of heavy metals and the growth of *Trifolium repens* L.: the role of K₂HEDP and plant growth regulators alone and in combination. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 5. Article 2432.
56. Sotiriou V., Michas G., Xiong L., Drosos M., Vlachostergios D., Papadaki M., ... Giannakopoulos E. Effects of heavy metal ions on white clover (*Trifolium repens* L.) growth in Cd, Pb and Zn contaminated soils using zeolite. *Soil Science and Environment*. 2023. Vol. 2, № 1.
57. Memić S., Bektić S., Huseinović S. Effect of soil composition on heavy metal uptake and distribution in white clover (*Trifolium repens* L.). *Journal of Applied Life Sciences International*. 2023. Vol. 26, № 5. P. 87–95.
58. Kujawska J., Pawłowska M. Bioavailability of barium to *Trifolium pratense* L. in soils contaminated with drill cuttings. *International Agrophysics*. 2019. Vol. 33, № 4. P. 417–426.
59. Murtić S., Zahirović Ć., Čivić H., Sijahović E., Jurković J., Avdić J., ... Podrug A. Phytoaccumulation of heavy metals in native plants growing on soils in the Spreča river valley, Bosnia and Herzegovina. *Plant, Soil and Environment*. 2021. Vol. 67, № 9.
60. Bortoloti G. A., Baron D. Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: a biochemical and physiological approach. *Environmental Advances*. 2022. Vol. 8. Article 100204.
61. Roy S., Mondal S. Brassicaceae plants response and tolerance to metal/metalloid toxicity. In: *The Plant Family Brassicaceae: Biology and Physiological Responses to Environmental Stresses*. Singapore: Springer Singapore, 2020. P. 363–377.
62. Essoh A. P., Monteiro F., Pena A. R., Pais M. S., Moura M., Romeiras M. M. Exploring glucosinolates diversity in Brassicaceae: a genomic and chemical assessment for

- deciphering abiotic stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2020. Vol. 150. P. 151–161.
63. Liu Z., Wang H., Lv J., Luo S., Hu L., Wang J., ... Yu J. Effects of plant hormones, metal ions, salinity, sugar, and chemicals pollution on glucosinolate biosynthesis in cruciferous plant. *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. Article 856442.
64. Kumari S., Jamwal R., Mishra N., Singh D. K. Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: a review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*. 2020. Vol. 13. Article 100283. DOI: 10.1016/j.enmm.2020.100283.
65. Clemens S. Mercury in plants. In: *Encyclopedia of Metalloproteins*. New York: Springer, 2013. P. 1352–1356. DOI: 10.1007/978-1-4614-1533-6_313.
66. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Substance priority list. Centers for Disease Control and Prevention. 2024. URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/programs/substance-priority-list.html> (дата звернення: 03.11.2025).
67. Смоляр В. І., Петрашенко Г. І. Ртуть в харчових продуктах і раціонах та її токсичність. *Проблеми харчування*. 2008. Т. 18, № 3–4. С. 23–31. URL: http://medved.kiev.ua/web_journals/arhiv/nutrition/2008/3-4_08/str23.pdf
68. Дмитруха Т. І. Забруднення довкілля ртуттю – найгостріша екологічна проблема сучасності. *Екологічна безпека та природокористування*. 2014. № 15. С. 46–52.
69. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. Київ: ГО «Центр екологічних ініціатив “Екодія”», 2023. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii.pdf>
70. Самчук А. І., Вовк К. В., Акімова О. Р. Форми знаходження важких металів у ґрунтах зон екологічного ризику м. Київ. *Геохімія та рудоутворення*. 2015. № 35. С. 63–68. DOI: 10.15407/gof.2015.35.063.

71. Ковальчук В. Ртуть в ґрунтах та фітоценозах Київщини, механізм накопичення та форми поширення. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Географія. 2011. Вип. 59. С. 43–45. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_geograf_2011_59_14
72. Кабінет Міністрів України. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин : Постанова від 1 серпня 2024 р. № 898. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/898-2024-%D0%BF>
73. Tiodar E. D., Văcar C. L., Podar D. Phytoremediation and microorganisms-assisted phytoremediation of mercury-contaminated soils: challenges and perspectives. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, № 5. Article 2435. DOI: 10.3390/ijerph18052435.
74. Liu Z., Chen B., Wang L. A., Urbanovich O., Nagorskaya L., Li X., Tang L. A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 400. Article 123138. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123138.
75. Feng X., Wang J. Phytoextraction of mercury-contaminated soil. In: *Twenty Years of Research and Development on Soil Pollution and Remediation in China*. Singapore: Springer Singapore, 2018. P. 499–507. DOI: 10.1007/978-981-10-6029-8_30.
76. Monroy-Licht A., Méndez-Cuadro D., Olivero-Verbel J. Elemental mercury accumulation in *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms-Laubach. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30, № 4. P. 9898–9913. DOI: 10.1007/s11356-022-22521-y.
77. Siwik E. I., Campbell L. M., Mierle G. Distribution and trends of mercury in deciduous tree cores. *Environmental Pollution*. 2010. Vol. 158, № 6. P. 2067–2073. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.03.002.
78. Nonnoi F., Chinnaswamy A., de la Torre V. S. G., de la Peña T. C., Lucas M. M., Pueyo J. J. Metal tolerance of rhizobial strains isolated from nodules of herbaceous

- legumes (*Medicago* spp. and *Trifolium* spp.) growing in mercury-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*. 2012. Vol. 61. P. 49–59. DOI: 10.1016/j.apsoil.2012.06.004.
79. Liu Z., Wang L. A plant species (*Trifolium repens*) with strong enrichment ability for mercury. *Ecological Engineering*. 2014. Vol. 70. P. 349–350. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.06.029.
80. Malizia D., Giuliano A., Ortaggi G., Masotti A. Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*. 2012. Vol. 6, Suppl. 2. Article S6. DOI: 10.1186/1752-153X-6-S2-S6.
81. Собко В. Г., Гапоненко М. Б. Інтродукція рідкісних і зникаючих рослин флори України. Київ: Наукова думка, 1996. 284 с.
82. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні в 2021 році. Міністерство екології та природних ресурсів України. Київ, 2021. 514 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 03.11.2025).
83. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Київської області у 2021 році. Департамент екології та природних ресурсів КОДА. Київ, 2022. 212 с.
84. Рудь Н. В. Фітомоніторинг техногенного забруднення садово-паркових ландшафтів в умовах мегаполісу : дис. ... канд. біол. наук : 03.00.16 – екологія. Київ, 2015. 237 с.
85. Вишневський В. І., Доніч О. А., Кудий А. В. Клімат Києва та його околиць. Київ: Варто, 2023. 124 с.
86. Рахметов Д. Б., Заїменко Н. В., Гапоненко М. Б. та ін. Наукові об'єкти НБС імені М. М. Гришка НАН України, що становлять національне надбання : монографія. Київ: НБС ім. М. М. Гришка НАН України; Паливода, 2019. 224 с.
87. Rigoletto M., Calza P., Gaggero E., Malandrino M., Fabbri D. Bioremediation methods for the recovery of lead-contaminated soils: a review. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 10. Article 3528.

88. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019. Vol. 2019. Article 6730305.
89. Рахметов Д. Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні : монографія. Київ: Аграр Медіа Груп, 2011. 398 с.
90. Zaimenko N., Gnatiuk A., Gritsenko V., Zakrasov O., Pavliuchenko N., Kharytonova I., ... Holichenko N. Biochemical and allelopathic features of *Adonis vernalis*, *Allium ursinum*, and *Leucojum vernum* in the M. M. Gryshko National Botanical Garden of the NAS of Ukraine. *Plant Introduction*. 2024. № 101–102. P. 3–18.
91. WHITE CLOVER. *Trifolium repens* L. USDA NRCS PLANTS Database : Plant Fact Sheet. URL: https://plants.usda.gov/DocumentLibrary/factsheet/pdf/fs_trre3.pdf (дата звернення: 03.11.2025).
92. White Clover. Clemson University Home & Garden Information Center : веб-сайт. URL: <https://hgic.clemson.edu/factsheet/white-clover/> (дата звернення: 23.11.2025).
93. Red clover (*Trifolium pratense*). Go Botany, Native Plant Trust : веб-сайт. URL: <https://gobotany.nativeplanttrust.org/species/trifolium/pratense> (дата звернення: 03.11.2025).
94. *Trifolium medium*. FloraVeg.EU : веб-сайт. URL: <https://floraveg.eu/en/taxon/overview/Trifolium%20medium> (дата звернення: 03.11.2025).