

Методичні рекомендації до ПР 10.

Тема: Світові ресурси видів рослин гіперакумуляторів.

Теоретичний матеріал

В даний час розроблено дві стратегії використання рослин для «вилучення» ВМ із ґрунтів. Перша представляє використання рослин-наднакопичувачів. Ці рослини можуть поглинати один або два метали, їхнє накопичення в невеликій біомасі корелює з дуже високими концентраціями металу в пагонах. **Друга стратегія** ґрунтується на використанні високопродуктивних рослин, які не є металоспецифічними, формують велику надземну біомасу, але кількість ВМ у ній порівняно не висока.

Ключова роль в успішному проведенні очищення забруднених ВМ ґрунтів методом фітоекстракції полягає у правильному підборі високопродуктивних рослин з високою швидкістю винесення елементів-забруднювачів із ґрунту, характерних для даних ґрунтово-кліматичних умов. З цією метою рекомендуються такі культури, як козлятник (*Galega*) та борщівник (*Heracléum*), топінамбур (*Helianthus tuberosus*) та горець сахалінський (*Fallópiasa chalinénsis*), рослини родини хрестоцвітих, ріпак ярий (*Brassica napus*), гірчиця сарептська (*Brássica júncea*), сорго зернове (*Sorghum bicolor*), гречка, гірчиця біла (*Sinapis alba*) і сафлор (*Carthamus*), овес (*Avéna sativa*), війник наземний (*Calamagróstis epigéios*), лопух великий (*Arctium*), кульбаба лікарська (*Taráxacum officinále*), полин білий (*Artemísia alba*), конюшина лучна (*Trifolium pretense*), полин гіркий (*Artemisia absinthium*), грястиця збірна (*Dáctylis glomeráta*), акація біла (*Robinia pseudoacacia*), кедр (*Cedrus*), тальник, тонконіг польовий (*Poa pratensis*), райграс пасовищний (*Lolium perenne*)), мітлиця тонка (*Agróstis capilláris*), костриця лугова (*Festuca pratensis*) (табл. 8).

Таблиця 8 Вміст ВМ у рослинах-гіперакумуляторах, що ростуть на забруднених ґрунтах

Метал	Вид	Концентрація металу в пагоні, мг/кг сухої маси
Cd	Ярутка сизувата (<i>Thlaspica erulescens</i>)	1800
Cu	Іпомея альпійська (<i>Ipomea alpine</i>)	12300
Co	Базилік Роберта (<i>Haumania strumrobertii</i>)	10200
Fe	Ярутка круглолиста (<i>Thlaspirotun difolium</i>)	8200

Mn	Макадамія (<i>Macadamia neurophylla</i>)	51800
Ni	Психотрія Дуареї (<i>Psychotria douarrei</i>)	47500
Zn	Ярутка сизувата (<i>Thlaspidica erulescens</i>)	51600

Рослини, рекомендовані для цілей фіторе mediaції повинні мати такі властивості:

1. Здатністю акумулювати метал(и) переважно у надземних органах;
2. Стійкістю до металу, що накопичується;
3. Швидкими темпами зростання та великою біомасою;
4. Висока здатність відростання після скошування/

Таблиця 9

Деякі види рослин, здатні до гіперакумуляції ВМ

Родина	Рід, вид	Накопичуваний метал
Капустяні	Бурачок (<i>Alyssum</i> sp. 50 видів)	Ni
Капустяні	Арадонсіс Геллера (<i>Arabidopsis halleri</i>)	Cd, Zn
Свинчаткові	Армерія маранна (<i>Armeria maritima</i>)	Pb, Zn
Свинчаткові	Армерія (<i>Armeria plantarinaea</i>)	Zn
Капустяні	Гірчиця сарептська (<i>Brassica junicea</i>)	Cd, Cu, Ni, Pb, Se, Zn
Айстрові	Соняшник однорічний (<i>Helianthus annuus</i>)	Pb
Молочайні	<i>Leucocroton</i> (близько 30 видів)	Ni
Гвоздичні	Мінуарція весняна (<i>Minuartia verna</i>)	Ni, Zn
Капустяні	<i>Thlaspi</i> (понад 20 видів)	Ni
Капустяні	Ярутка альпійська (<i>Thlaspi alpestre</i>)	Zn
Капустяні	Ярутка сизувата (<i>Thlaspi caerulescens</i>)	Cd, Pb, Zn
Капустяні	Ярутка каламенарі (<i>Thlaspi calaminariae</i>)	Zn
Капустяні	Ярутка копеафолія (<i>Thlaspi icepeaeefolium</i>)	Zn
Капустяні	Ярутка козингенсу (<i>Thlaspi goesingense</i>)	Cd, Ni
Капустяні	Ярутка круглолиста (<i>Thlaspi rotundifolium</i>)	Pb
Товстянкові	Очиток Альфреда (<i>Sedum alfredii</i>)	Cd, Zn
Гвоздичні	Смолівка пухирникова (<i>Silene cucubalus</i>)	Zn
Молочайні	Філентус (<i>Phyllanthus</i>) (більше 40 видів)	Ni
Гвоздичні	Багатоплідник голий (<i>Polycarpon glabra</i>)	Pb, Zn
Фіалкові	Фіалка галмейна (<i>Viola calaminaria</i>)	Zn

В даний час в індустріально розвинених країнах прийом фітореMediaції ґрунтів, забруднених неорганічними та органічними контамінантами, в основі яких лежить здатність спеціально підібраних видів вищих рослин поглинати та акумулювати у своїй біомасі ВМ у кількості, що значно перевищує їх вміст у середовищі виростання, широко використовується.

В даний час існують дві стратегії використання рослин для «добування» важких металів із ґрунтів.

Перша їх передбачає використання рослин-надкопичувачів.

Ці рослини специфічно поглинають один або два метали, накопичення у них невеликий біомаси корелює з дуже високими концентраціями металу у пагонах. Друга стратегія базується на використанні високопродуктивних рослин, які не є металоспецифічними, формують велику надземну біомасу, але кількість ВМ у ній порівняно невисока.

Необхідні властивості рослин-акумуляторів металів наступні:

- відсутність географічних переваг та швидке зростання;
- висока біопродуктивність;
- здатність утворювати продукцію комплексного застосування;
- сильна коренева система;
- здатність до гіперакумуляції важких металів;
- висока стійкість до важких металів;
- швидкий транспорт металів до надземних органів;
- здатність до акумулювання кількох металів;
- стійкість до хвороб та шкідників.

Таким чином, фітореMediaція є вирощуванням протягом певного періоду часу на ділянці спеціально підібраних видів рослин-гіперакумуляторів для вилучення ВМ кореневою системою та концентрування їх у надземній біомасі.

Принципова схема ремедіації територій виглядає так:

- посів насіння фітореMediaнтів на початку вегетації (навесні);
- скошування рослин наприкінці вегетації (на початку осені);
- утилізація насиченої поллютантами фіто маси.

Одним із головних завдань при розробці фітореMediaційних технологій є пошук місцевих видів рослин, здатних рости на забруднених ґрунтах та акумулювати значні кількості поллютантів.

Більшість дикорослих гіперакумуляторів відноситься до родини капустяних (Brassicaceae). Вони близькі родичі капусти (Brassica) та гірчиці (Sinápis). Один із видів гірчиці, званий індійською, або сарептською (Brássica

júpcea), виявився дуже ефективним накопичувачем свинцю, міді, нікелю (табл. 10- 11).

Таблиця 10

Важливі родини, роди та регіони походження гіперакумуляторів

Елемент	Родина	Рід	Регіон вивчення та ідентифікації
Миш'як (As)	Pteridaceae	Pteris, Pityrogramma	Китай, Південно-Східна Азія
Кадмій (Cd)	Brassicaceae, Crassulaceae	Noccaea, Sedum	Європа, Китай
Мідь (Cu)	Asteraceae,	Anisopappus,	Демократична
	Commelinaceae, Fabaceae, Lamiaceae, Linderniaceae, Malvaceae, Orobanchaceae, Polygonaceae	Commelina, Crepidiorhopalon, Haumaniastrum	республіка Конго, Китай, Південно-Східна Азія
Кобальт (Co)	Asteraceae, Lamiaceae, Linderniaceae, Orobanchaceae, Phyllanthaceae	Anisopappus, Crepidiorhopalon, Glochidion, Phyllanthus, Persicaria	Демократична республіка Конго, Нова Каледонія
Марганець (Mn)	Myrtaceae, Celastraceae, Proteaceae	Gossia, Denhamia, Virotia	Австралія. Нова Каледонія, Південно-Східна Азія
Нікель (Ni)	Asteraceae, Brassicaceae, Buxaceae, Cunoniaceae, Phyllanthaceae, Salicaceae, Violaceae	Alyssum, Buxus, Berkheya, Glochidion, Geissois, Homalium, Hybanthus, Phyllanthus, Leucocroton, Senecio, Xylosma	Бразилія, Куба, Середземномор'я, Нова Каледонія, Південно-Східна Азія, Туреччина
Свинець (Pb)	Brassicaceae	Noccaea	Європа
Рідкоземельні елементи	Gleicheniaceae	Dicranopteris	Китай
Селен (Se)	Fabaceae	Astragalus, Stanleya	США, Європа
Талій (Tl)	Brassicaceae	Biscutella, Iberis	Європа
Цинк (Zn)	Brassicaceae, Crassulaceae	Arabidopsis, Noccaea, Sedum	Європа, Китай

Примітка: Критерії включення були засновані на родинях, що містять три

або більше гіперакумулюючих родів або видів, і родах, що містять три або більше гіперакумулюючих видів (перелік не є вичерпним). У разі деяких елементів (As, Cd, Pb, Se, Tl, Zn) з меншою кількістю родин чи родів акцент було зроблено на кількості видів.

Рідкоземельні елементи: церій (Ce), диспрозій (Dy), ербій (Er), європій (Eu), гадоліній (Gd), гольмій (Ho), лантан (La), лютецій (Lu), неодим (Nd), празеодим (Pr), самарій (Sm), скандій (Sc), тербій (Tb), тулій (Tm), ітербій (Yb) та ітрій (Y).

Таблиця 11 Види гіперакумуляторів у Глобальній базі даних (станом на вересень 2023 року) із глобальними записами про найвищі концентрації, зареєстровані на сьогоднішній день

Елемент	Порогове значення, мг/г	Родина	Рід	Вид	Запис
Миш'як (As)	> 1000	1	2	5	<i>Pteris vittata</i> (2.3%)
Кадмій (Cd)	> 100	6	7	7	<i>Arabidopsis halleri</i> (0.36%)
Мідь (Cu)	> 300	20	43	53	<i>Aeolanthus bifolius</i> (1.4%)
Кобальт (Co)	> 300	18	34	42	<i>Haumaniastrum robertii</i> (1%)
Марганець (Mn)	> 10000	16	24	42	<i>Virotia neurophylla</i> (5.5%)
Нікель (Ni)	> 1000	52	130	532	<i>Berkheya coddii</i> (7.6%)
Свинець (Pb)	> 1000	6	8	8	<i>Nocca rotundifolia</i> subsp. <i>Cepaeifolia</i> (0.8%)
Рідкоземельні елементи (La, Ce)	> 1000	2	2	2	<i>Dicranopteris linearis</i> (0.7%)
Селен (Se)	> 100	7	15	41	<i>Astragalus bisulcatus</i> (1.5%)
Талій (Tl)	> 100	1	2	2	<i>Biscutella laevigata</i> (1.9%)

Цинк (Zn)	>3000	9	12	20	<i>Nocca caerulescens</i> (5.4%)
-----------	-------	---	----	----	-------------------------------------

Як видно з таблиці база даних містить 721 гіперакумуляторний вид (523 види із гіперакумуляцією нікелю, 53 міді, 42 кобальту, 1 хром, 42 марганцю, 20 цинку, два рідкоземельних елемента, 41 селен, два талію, сім кадмію, п'ять

миш'яке і вісім свинцю) з деякими видами, які демонструють гіперакумуляцію більш ніж одного елемента). Ці цифри будуть змінюватися в міру нових відкриттів або якщо попередні дослідження будуть не підтверджені.

Серед 721 видів гіперакумуляторів з 52 родин і 130 родів найбільшу частку мають представники родини Brassicaceae (83 види) і Phyllanthaceae (59 видів).

Слід зауважити, що у базі даних PHYTOREM, створеної відділом з використання екологічних біотехнологій в м. Хал (Квебек, Канада), зібрано величезну кількість інформації щодо наземних та водних рослин з усього світу, які мають потенціал для використання їх у фіторе mediaції ділянок, забруднених металами (табл. 12).

Таблиця 12

Перелік елементів, включених до бази даних PHYTOREM

Алюміній (Al)	Мідь (Cu)	Платина (Pt)	Уран (U)
Берилій (Be)	Молібден (Mo)	Радій (Ra)	Хром (Cr)
Кадмій (Cd)	Миш'як (As)	Ртуть (Hg)	Цезій (Cs)
Кобальт (Co)	Нікель (Ni)	Свинець (Pb)	Цинк (Zn)
Марганець (Mn)	Паладій (Pd)	Стронцій (Sr)	

Ця база даних була створена з використанням широкого комп'ютерного пошуку опублікованих доступних баз даних та реферованих комерційних послуг із застосуванням пошуку за ключовим словом та перехресними посиланнями з 19 елементами, для яких були необхідні дані.

Попередня база даних, отримана з використанням зазначених пошуків, містить 775 зареєстрованих видів рослин, що належать до 76 родин, 39 порядків і 9 підкласів. У ній є не тільки судинні рослини, що додатково поділяються на квітучі рослини, хвойні, папороті та споріднені з ними види, але також і інші організми, такі як бактерії, водорості, лишайники, гриби і бріофіти (мохи та печіночники) , які, зокрема, придатні до використання як додаткові сорбенти.

У разі судинних рослин база даних включає як дикі, так і культурні рослинні види та різновиди. Крім того, наводиться інформація з біології та екофізіології, якщо вона є. Ця інформація включає походження рослин,

таксономію, розподіл, біологію, вплив на екологію та здоров'я, використання видів, прийоми культивування, джерела матеріалу для досліджених видів, дикі або інші значущі родичі види, режим використання у фіторе mediaції (тобто стійкість до токсиканту та/або акумуляцію або гіперакумуляцію забруднювача).

В базі даних рослини далі розподіляються за їх здібностями акумулювати, гіперакумулювати, осаджувати або виявляти стійкість по відношенню до певних важких металів. Здебільшого рослини розглядаються як акумулятори, якщо вони накопичують метали в концентрації 100–200 мг/кг сухої маси. Рослинні види вважаються гіперакумуляторами, якщо вони поглинають більше 1000 мг/кг сухої маси більшість металів, 10000 мг/кг Mn або 100 мг/кг Cd. Було виявлено, що 465 видів рослин виявляють деякі здібності до ремедіації від будь-якого одного

елемента. Крім того, було знайдено, що 66 видів мають здатність поглинати два елементи, тоді як 25 видів виявляють здатність акумулювати три елементи. Найбільш широкі здібності до акумуляції металів – до чотирьох елементів і більше

- виявляють 15 видів, перерахованих в таблиці 13. Посилань, що стосуються берилію, паладію, платини або радію, не було виявлено.

Таблиця 13 Список рослин з найвищими величинами акумуляції металів у базі даних PHYTOREM

Еле- мент	Рослина з найвищою зафіксованою концентрацією	Походження рослини	Максимальна концентрація, що акумулюється (мг/кг сухої маси)
Al	<i>Solidago hispida</i>	Канада	6820
As	<i>Agrostic tenuis (capillaries)</i>	Вирощується	2000
Cd	<i>Vallisneria spiralis</i>	Індія	6242
Co	<i>Haumanistrum robertii</i>	Африка	10200
Cr	<i>Medicago sativa</i>	Вирощується	7700
Cs	<i>Heliantus annuus</i>	Вирощується	Високе поглинання
Cu	<i>Larrea tridentate</i>	США	23700 біопоглинання
Hg	<i>Pistia stratiotes</i>	Повсюдно у тропіках	1100
Mn	<i>Macdemia neurophylla</i>	Нова Каледонія	51800
Mo	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Європа	1500-1800
Ni	<i>Psychotria douarrei</i> <i>Hybanthus floribundus</i>	Нова Каледонія Австралія	4500; 22% всієї золи
Pb	<i>Brassica juncea</i>	Вирощується	26200

Sr	<i>Helianthus annuus</i>	Вирощується	Високе поглинання
U	<i>Helianthus annuus</i>	Вирощується	>15000
Zn	<i>Thlaspi caerulescens</i>	ЄАвропа	52000

Крім того, було виявлено, що деякі рослини, представлені в табл. , здатні поглинати дуже високі рівні металів. Деякі гіперакумулятори, такі як соняшник або люцерна, являють собою важливі агенти з найбільш високим потенціалом до фітореMediaції, так як вони є також оброблюваними рослинами з добре відрегульованими прийомами культивування.

Експедиційні роботи в 1998 році під керівництвом Чена Тонгбіна в сильно забруднених плавильними підприємствами провінціях КНР виявили папороть *Pteris vittata*, яка не тільки інтенсивно зростає в навколишньому середовищі з високим вмістом миш'яку, але й накопичує його високий рівень у біомасі. До цього у всьому світі не було виявлено рослини, здатної до гіперакумуляції миш'яку в концентрації понад 1000 мг/кг. До теперішнього часу вивчена генетична основа

гіпер-аккумуляції миш'яку у рослин *Pteris vittata*, і цей вид розглядається як найбільш перспективний для фітореMediaції в Китаї.

Цікаві дослідження з використання декоративних культур як фітомеліорантів у міському середовищі. Показано, що чорнобривці, бегонії, амарант та 4 види газонних злаків (райграс пасовищний, костриця червона, багаття безосте, тонконіг лучний) здатні акумулювати свинець і кадмій у своїх органах. Наприкінці вегетаційного періоду рослини слід видаляти з клумб та квітників разом із кореневою системою для подальшої утилізації.

Разом з тим, відмічається, що відновлення функціональних та екосистемних властивостей забруднених земель дозволить повернути їх до сільськогосподарського використання. Варіанти фізико-хімічної реабілітації забруднених ґрунтів зазнають критики через їх дороговизну та недостатню ефективність. Використання рослин і супутніх з ними мікроорганізмів може бути стійким та економічно вигідним засобом зменшення впливу забруднюючих речовин на ґрунтовий комплекс. Фітоменеджмент має бути спрямований на використання непродуктивних культур для пом'якшення екологічних і санітарних ризиків, спричинених забруднювачами, та відновлення властивостей екосистеми. Культури, що використовуються для відновлення ґрунтів, повинні бути толерантними до забруднюючих речовин, унеможлиблювати їх перенесення в харчовий ланцюг і ефективно виробляти товарну біомасу. Виходячи зі здатності енергетичних культур накопичувати неорганічні забруднювачі в кореневій системі та розкладати стійкі органічні забруднювачі в ґрунті, ці види рослин є оптимальними для фітостабілізації та фітодеструкції.

Вирощування енергетичних культур на забруднених та деградованих ґрунтах вважаємо перспективним варіантом з метою уникнення використання орних земель сільськогосподарського призначення та зменшення конкуренції між продовольчим та біоенергетичним землекористуванням.

Згадані енергетичні культури характеризуються високим потенціалом виробництва біомаси та низькими затратами для вирощування, тому вони можуть зайняти лідируючі позиції з-поміж рослин, що використовують для очищення ґрунтів. Оскільки за існуючої глобальної тенденції обмеження земель сільськогосподарського використання, розвиток біоенергетичної промисловості, що заснована на вирощуванні енергетичних культур, має базуватися на використанні маргінальних земель. Енергетичні культури з короткою ротацією можуть бути використані для відновлення забруднених земель як альтернативний спосіб фітореMediaції. Широкий спектр видів рослин має потенціал для використання в біоенергетичних та фітореMediaційних областях на основі їх екосистемних властивостей для встановлення кращого зв'язку між фітотерапією ґрунту – відновлення та виробництво біопалива.

У дослідженні українських вчених зосереджено увагу на обґрунтуванні ефективності використання п'яти потенційних культур для великомасштабного виробництва біопалива: *Salix*, *Miscantus x giganteus*, *Panicum virgatum* L., *Sorghum alatum* Parodi, *Andropogon gerardi*, враховуючи їх ботаніко-біологічні, адаптивні особливості, поширеність, фітореMediaційний ефект та потенціал поглинання вуглецю (рис. 1).



Рис. 1. Розподіл енергетичних культур на території України: М - міскантус

гігантський; С – світчграс; Б – біг-блуестем; Сб – сорго багаторічне; В – верба кошикова.

По результатах досліджень, вегетативна фітомаса, формуючи продуктивність за допомогою потужної кореневої системи, акумулювала значну кількість важких металів з ґрунтового комплексу. Агрохімічний аналіз ґрунту та надземної вегетативної маси енергетичних культур показав чітку динаміку поглинання важких металів кореневою системою рослин. Визначено, що вміст важких металів у ґрунті з роками дослідження знижується. Доведено також ефективність енергетичних культур за багаторічного циклу вирощування в накопиченні на поверхні ґрунту мульчуючого шару та збагаченні його на вміст органічної речовини.

Поряд зі здатністю енергетичних рослин до фіторе mediaції забруднених важкими металами ґрунтів встановлено, що вони мають потенціал до розкладання органічних забруднювачів, зокрема поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Доведено, що кореневі екsudати культур мають деструкційну здатність – вони розкладають пірен і фенатрен.

Як пояснювалося вище, ***встановлено порогові критерії гіперакумуляції як мінімум на 2-3 порядки вище, ніж концентрації в листках на нормальних ґрунтах, і принаймні на один порядок більше, ніж діапазон концентрацій у листках на металоносних ґрунтах.***

Виходячи з цього, рекомендовано наступні критерії концентрації для різних металів і металоїдів у висушеному листі: 100 мг/г для Cd, Se та Tl; 300 мг/г для Co, Cu та Cr; 1000 мг/г для Ni, Pb та As; 3000 мг/г для Zn; і 10 000 мг/г для Mn, при цьому рослини ростуть у їх природних місцях існування. Якщо прийняти ці критерії, на сьогодні в літературі цитується понад 500 таксонів рослин як гіперакумулятори одного або кількох елементів (As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Se, Tl, Zn).

Це все ще представляє дуже малу частку з (приблизно) 300 000 визнаних видів судинних рослин. Приблизні цифри для різних елементів такі: Ni (450), Cu (32), Co (30), Se (20), Pb (14), Zn (12), Mn (12), As (5), Cd (2), Tl (2). Ці цифри можуть

змінюватися і можуть збільшуватися в ході подальших досліджень та аналізу. Деякі з попередньо ідентифікованих гіперакумуляторів, зокрема Cu, Co або Pb, також можуть бути вилучені зі списку після подальших випробувань (наприклад, у тепличних експериментах, під час яких можна усунути забруднення з повітря).

Було припущено, що переважання гіперакумуляторів нікелю є результатом більших зусиль, докладених для їх пошуку, але є більш фундаментальна причина: загальна площа багатих на нікель ультрабазитових ґрунтів значно

вища, ніж ґрунтів оцінених на акумуляцію іншими металами.

Застосування фітореMediaції має деякі обмеження. Значною мірою вони включають потенційне забруднення рослинності та ланцюгів живлення та виключно важкі приживаність та підтримання нормального росту та розвитку рослин на забруднених ділянках. Крім того, фітореMediaція потребує великого періоду часу для зниження забруднення. Для промислового забруднення ґрунтів через високий рівень у них важких металів більш прийнятною є фітостабілізація, тоді як для сільськогосподарських земель можлива фіто екстракція.

З іншого боку в рослинах містяться в різних кількостях майже всі відомі хімічні елементи, але для забезпечення нормальної життєдіяльності рослин необхідними є 17 елементів (С, Н, О, N, К, Са, Mg, Р, S, Cl, В, Fe, Mn, Zn, Cu, Мо, Ni), з яких перші 9 відносять до макро-, а останні – до мікроелементів.

Відомо, що поглинання іонів важких металів рослинами знаходиться в прямій залежності від їх доступного вмісту в ґрунті або ґрунтовому розчині, наприклад, у вигляді вільних іонів. Істотний вплив на надходження важких металів у рослини спричиняють інші іони. При цьому найбільший антагонізм проявляють елементи- аналоги і гомологи, а також катіони однакової валентності, що здатні утворювати подібні комплекси. Відомо, навіть відносно низькі концентрації іонів металів (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Co, Ni та ін.) є токсичними для вищих рослин.

Використовують різні показники для оцінки поглинання важких металів рослинами у системі ґрунт-рослина. Найбільш відомим показником з цієї групи є **коефіцієнт біологічного поглинання** (Ах або КБП), що є відношенням вмісту елемента в золі рослин до його валового вмісту в ґрунті. А.І. Перельман,

Таблиця 14 Кілька сільськогосподарських рослин, які використовуються для фітореMediaції важких металів

Види рослинs	Субстрат забруднення	Важкі метали
<i>Allium schoenoprasum</i> L.	Ґрунти	Ni, Co, Cd
<i>Brassica juncea</i> L.	Ґрунти і вода	Cd, Cu, Zn, Pb
<i>Brassica napus</i> L. (canola)	Ґрунти	Cd, Cu, Zn, Pb
<i>Cajanus Cajan</i> (L.) Milsp.	Ґрунти	As, Cd
<i>Cicer aeritinum</i> L.	Ґрунти	Cd, Pb, Cr, Cu
<i>Cucumis sativus</i> L.	Вода	Pb
<i>Eichhornia crassipes</i> L.	Вода	As, Cr, Zn, Cs, Co
<i>Jatropha curcas</i> L.	Ґрунти	Fe, Al, Cu, Mn, Cr, As, Zn, Hg

<i>Lantana camara</i> L.	Ґрунти	Pb
<i>Lens culinaris</i> Medic.	Ґрунти	Pb
<i>Lepidium sativum</i> L.	Ґрунти	As, Cd, Fe, Pb, Hg
<i>Lactuca sativa</i> L.	Ґрунти	Cu, Fe, Mn, Zn, Ni, Cd, Pb, Co, As
<i>Medicago sativa</i> L.	Ґрунти	Cd
<i>Oryza sativa</i> L.	Ґрунти	Cu, Cd
<i>Pistia stratiotes</i> L.	Вода	Cr, Cd, As
<i>Pisum sativum</i> L.	Ґрунти	Pb, Cu, Zn, Fe, Cd, Ni, As, Cr
<i>Raparus sativus</i> L.	Ґрунти	As, Cd, Fe, Pb, Cu
<i>Spinacia oleracea</i> L.	Ґрунти	Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Cr
<i>Solanum nigrum</i> L.	Ґрунти	Cd
<i>Sorghum bicolor</i> L.	Ґрунти	Cd, Cu, Zn, Fe
<i>Zea mays</i> L.	Ґрунти	Cd, Pb, Zn, Cu

використовуючи дані про середній склад золи живих організмів та кларки твердої земної кори, зробив розрахунки КБП, на підставі яких розділив хімічні елементи на 2 великі групи: «**елементи біологічного накопичення**» – КБП > 1, та «**елементи біологічного захоплення**» – КШП < 1 (табл. 15).

Наведені у таблиці 15 значення коефіцієнтів біологічного поглинання відбивають загальну закономірність розподілу елементів у біосфері, а конкретних систем «ґрунт-рослина» величини КБП сильно варіюють. Часто на підставі величини КБП оцінюють екологічний ризик обробітку культур у конкретних умовах забруднення, а також виявляють рослини-гіперакумулятори, придатні для цілей фіторе mediaції забруднених ґрунтів.

Таблиця 15 Ряди біологічного поглинання елементів

		Коефіцієнт біологічного поглинання				
		100 x n	10 x n	n	0, n	0,0n - 0,00n
Елементи біологічного накопичення	Енергічного	P, S, Cl, Br, I				
	Сильного			Ca, Na, K, Mg, Sr, Zn, B, Se		
Елементи біологічного захоплення	Середнього			Mn, F, Ba, Ni, Cu, Ga, Co, Pb, Sn, As, Mo, Hg, Ag, Ra		

	Слабкого і дуже слабого	Si, Al, Fe, Ti, Zr, Rb, V, Cr, Li, Y, Nb, Th, Sc, Be, Cs, Ta, U, W, Sb, Cd
--	-------------------------	--

Вплив цей неоднозначний: в однієї й тієї ж культури при зміні агрофону вміст одних елементів достовірно знижувався, інших – збільшувався (табл. 16).

Одним із напрямків детоксикації забруднених ґрунтів є підвищення сорбційної ємності ґрунту шляхом внесення різних меліорантів-сорбентів. Як меліоранти-сорбенти використовують місцеві матеріали – відходи гірських розробок, збагачувальних фабрик, переробки мінеральної сировини, а також багато природних мінералів: шунгіт, бентоніт, глауконіт, перліт, діатоміт, вермікуліт, цеоліт, трепели, опоки та ін. гній, торф, сапропель, біогумус, гумати

Для фітостабілізації використовують толерантні до токсичної дії ВМ рослини. **Інтенсивність прояву симптомів токсичності, викликаних надлишком катіонів ВМ, варіює залежно від виду рослин.** Так, накопичення Zn та Ni знижується у ланцюгу: пшениця (*Triticum L.*) – овес (*Avena L.*) – редис (*Raphanus sativus*); Cd: *Triticum L.* – *Raphanus sativus* – *Avena L.* Зниження стійкості до накопичення Cr у товарної частини овочевих культур відбувається в ряді: капуста (*Brassica oleracea*) – картопля (*Solanum tuberosum*) – морква (*Daucus carota L.*) – буряк столовий (*Beta vulgaris*) – петрушка (*Petroselinum L.*) – кріп городній (*Anethum graveolens*); Cd – *Brassica oleracea* – *Solanum tuberosum* – *Beta vulgaris* – *Daucus carota L.* – кукурудза (*Zea mays L.*) – *Petroselinum L.* – *Anethum graveolens*; Pb – *Solanum tuberosum* – *Brassica oleracea* – *Zea mays L.* – буряк кормовий (*Beta vulgaris L. subsp. vulgaris var. crassa*) – *Beta vulgaris*; Zn – *Brassica oleracea* – *Solanum tuberosum* – *Zea mays L.* – *Beta vulgaris* – *Beta vulgaris L. subsp. vulgaris var. crassa* – салат (*Lactuca sativa L.*) – *Petroselinum L.* – *Anethum graveolens*.

Таблиця 16 Комплекс заходів щодо санації ґрунтів залежно від ступеня забруднення важкими металами

Супінь забруднення	Методи санації ґрунтів	Прийоми санації ґрунтів
Надзвичайно небезпечна (Zc>128)	Фізична очистка	Вилучення забрудненого ґрунту та внесення чистого ґрунту
	Хімічна очистка	Промивання ґрунту водою та мінеральними кислотами, фульво-кислотами, розчинами комплексоутворювачів; промивний режим зрошення, зміна рН ґрунтового розчину

Висконебезпечна (Zc=32,1...128) и помірно-небезпечна (Zc=16,1...32)	Фізична детоксикація	Агромеліоративні прийоми: глибоке оранка, розпушування і т.д.
	Хімічна детоксикація	Внесення органічних добрив; Внесення сорбент-меліорантів; добривно-меліоративна суміш; вапнування ґрунту, внесення фосфорних добрив
Низька (Zc<16)	Біологічна очистка	Фітомеліорація; фітомеліоративні компоненти сівозміни
	Біологічна детоксикація	Внесення у ґрунт мікроорганізмів, що переводять важкі метали у форми, недоступні рослинам

Толерантність зернових культур оцінено за рівнем максимально можливої продуктивності, показників якості зерна та вмісту ВМ у товарній продукції в межах ГДК. Встановлено, що толерантність змінюється так: просо (*Panicum L.*) > озимі зернові (*Secale cereale, Triticosecale, Triticum L.*) > горох посівний (*Pisum sativum*) > ярові зернові (*Triticum L., Hordeum vulgare, Triticosecale, Avena sativa*). Сильними фітостабілізаторами є багаторічні трави: люцерна (*Medicago sativa*), козлятник (*Galega officinalis*).

Для фітоекстракції ВМ з ґрунту використовують спеціально підібрані види рослин-гіперакумуляторів, таких як бурячок стінний (*Alyssum murale*), резуха

Галлера (*Cardaminopsis halleri (L.)*), гірчиця сарептська (*Brassica juncea*), петрушка кучерява (*Petroselinum crispum*) та ін. Коефіцієнт накопичення ВМ у рослинах посилюють завдяки внесенню у ґрунт ефекторів фітоекстракції (ЕДТА, ДДДА, ДТПА) і регуляторів росту рослин, наприклад препарату “Корневін”

Результати дослідження захисних механізмів рослин у разі забруднення ґрунтів ВМ на основі біоаккумуляції забруднювачів представлено групою дослідників з росії. Запропоновано використовувати деякі дикоростучі рослини для зниження вмісту ВМ у ґрунтах за рахунок їхньої акумуляції у різних частинах рослин (Cu, Zn, Mn, Fe і Pb – у листі рослин, Cr і Pb – у стеблах; Pb, Zn, Ni, Cr, Cu, Fe і Mn – у корінні рослин). Встановлено, що поглинання ВМ залежить від виду рослин і змінюється в їх онтогенезі. Наприклад, рослини виду *Chenopodium album L.* більше накопичують Zn і Cu; *Taraxacum officinale Wigg.* – Fe; *Calamagrostic epigeios (L.) Roth.* і *Melilotus officinalis (L.) Pall.* – акумулювали Cu і Fe. Гіперакумуляторами Zn, Cr і Cu є *Artemisia vulgaris L.*, а переважно Cr, Zn і Pb – *Artemisia absinthium L.*

Відповідно до узагальнення відновлення техногенно забруднених ґрунтів за використання біологічних методів є перспективним напрямом, що динамічно розвивається. Переваги використання біологічних методів ремедіації ґрунтів є такі: екологічна чистота й безпека використання біологічних методів ремедіації, мінімальне порушення фізичного й хімічного складу ґрунтів; їх застосування не потребує значних витрат матеріальних ресурсів; висока ефективність за низьких концентрацій забруднювача. ***Перспективи подальшого розвитку методів біоремедіації ґрунтів за впливу фактора забруднення пов'язані з розробкою нових способів екологічно безпечного використання хімічно деградованих ґрунтів за використання біологічних методів і за вирішення таких задач:***

- 1) аналіз сучасних методів і технологій біоремедіації ґрунтів;
- 2) моніторингу ґрунтів за дослідження змін властивостей і функцій ґрунтової системи та проведення біоремедіації техногенно забруднених ВМ ґрунтів;
- 3) наукове обґрунтування спектра рослин, сівозмін культурфітоценозів, що є придатними для використання як фітомеліоранти за різних рівнів і характеру забруднення ґрунтів різного генезису;
- 4) розробка мікробних і ферментних препаратів, дослідження їх впливу на влас тивості ґрунту, на здатність до біодеградації ВМ і за їх використання для розроблення нових способів і технологій ремедіації забруднених ґрунтів;
- 5) проведення еколого-економічного оцінювання ефективності використання біологічних методів ремедіації ґрунтів для ефективного менеджменту ґрунтовими ресурсами.

Вагомий доробок і українських вчених у сфері фіторемедіації. Так, зроблено аналіз запатентованих способів біоремедіації забруднених ґрунтів в Україні свідчить про використання амброзії (*Ambrosia artemisiifolia* L., *Ambrosia trifida* L.), яку збирають до набуття повної фази цвітіння, хоча її використання має обмеження внаслідок алергічної дії на людей; технічних олійних культур – ріпаку (*Brassica napus* L.) або суріпиці (*Barbarea vulgaris* R. Br.), або тифону (*Brassica rapa*) як рослин-аккумуляторів ВМ, висів і вирощування рослин родини Gramineae (насадження кукурудзи (*Zea mays* L.) або пшениці (*Triticum* L.)), скошування їх фітомаси та її утилізацію; газонної трави за попередньої обробки насіння розчином гумінового стимулятора-адаптогена; використання стрес-толерантних трансгенних рослин *Triticum* L. до дії ВМ.

За фіторекультивуації техногенно забруднених і збіднених ґрунтів розроблено біопрепарат комплексної дії, який одержано з культуральної рідини *Pseudomonas* sp. PS-17, вирощеної на оптимізованому поживному середовищі, з

подальшою стерилізацією отриманої культуральної рідини і видаленням осаду клітин.

Розроблено спосіб вирощування с.-г. культур на ґрунтах, забруднених радіонуклідами і/або важкими металами, що передбачає передпосівну обробку ґрунту та насіння шляхом його дражування біогумусом черв'яка. У іншому відомому способі використовують біогумус червоного каліфорнійського черв'яка або біогумус дощового черв'яка разом із природним сапропелем у складі агроекологічного препарату «біокольчуга».

У наступному відомому способі для рекультивації техногенно забруднених ґрунтів також використовують натуральний біогумус і глауконіт за співвідношення компонентів 50-90 та 50-10 вагових (у %). Відомий інший спосіб, що передбачає використання промислового препарату “Гумівіт” як складової суміші, котра підвищує вміст ґрунтових мікроорганізмів.

Розроблено кондуктометричний біосенсор, який включає селективну до ВМ ферментну систему інвертаза – мутаротаза – глюкозооксидаза та мультибіосенсор, що складається з ферментів, відповідно, ацетилхолінестерази, бутерилхолінестерази, уреази, глюкозооксидази, мутаротаз – інвертази – глюкозоок-сидази, селективних до токсичних речовин – ВМ, пестицидів і гербіцидів, з метою точного, селективного, експресного визначення їх вмісту у водних розчинах різних об'єктів довкілля.

Наступне технічне рішення передбачає проведення моніторингу вмісту ВМ у ґрунтах, що використовуються для вирощування кормових культур, призначених для виготовлення комбікормів, їх збагачення органічними сполуками селену в концентрації 25-30 мг/кг та пектиновмісними речовинами (10-15 % пектину на суху масу виноградних вичавок), і подальшим моніторингом вмісту селену і ВМ у продукції птахівництва (яйця, м'ясо, субпродукти), що призводить до зниження ризику розвитку серцево-судинних та онкологічних захворювань у людини.

Повний перелік відомих гіперакумуляторів важких металів а також полютантів різної природи у ґрунті, повітрі та воді представлено у монографічній публікації Цицюра Я.Г., Шкатула Ю.М., Забарна Т.А., Пелех Л.В. Інноваційні підходи до фіторе mediaції та фіторекультивації у сучасних системах землеробства. Монографія. Вінниця: ТОВ «Друк». 2022. 1200 с.

Рекомендована література

1. Цицюра Я.Г., Шкатула Ю.М., Забарна Т.А., Пелех Л.В. Інноваційні підходи до фіторе mediaції та фіторекультивації у сучасних системах землеробства. Монографія. Вінниця: ТОВ «Друк». 2022. 1200 с.
2. Панас Р.М. Екологія ґрунтів: навчальний посібник. Львів: «Новий

Світ- 2000», 2021. 481 с.

3. Чорний С.Г. Оцінка якості ґрунтів : навчальний посібник. Миколаїв : МНАУ, 2018. 233 с.

4. Нормування антропогенного навантаження на навколишнє середовище. Частина 1. Нормування інгредієнтного забруднення: навчальний посібник / Петрук В. Г., Васильківський І. В., Іщенко В. А., Петрук Р. В., Турчик П. М. Вінниця : ВНТУ, 2013. 253 с.

5. Дідух Я.П. Основи біоіндикації. Київ: Наукова думка, 2012. 312 с.