



КЛАСИФІКУЮЧІ ОЗНАКИ ТЕХНОЛОГІЙ ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ. ОСНОВНІ РОСЛИНИ-ГІПЕРАКУМУЛЯТОРИ ТА ФІТОРЕМЕДІАТОРИ

Лектор: д. с.-г. н., проф. Забалуєв В.О.



ПЛАН ЛЕКЦІЇ №5

1. Типологія технологій фіторемедіації.
2. Успішні підходи до технологій фіторемедіації. Світовий та вітчизняний досвід.
3. Сутність рослинної гіперакумуляції.
4. Класифікація рослин гіперакумуляторів та основні напрямки їх використання у технологіях фіторемедіації.



1. *Типологія технологій фіторемедіації.*

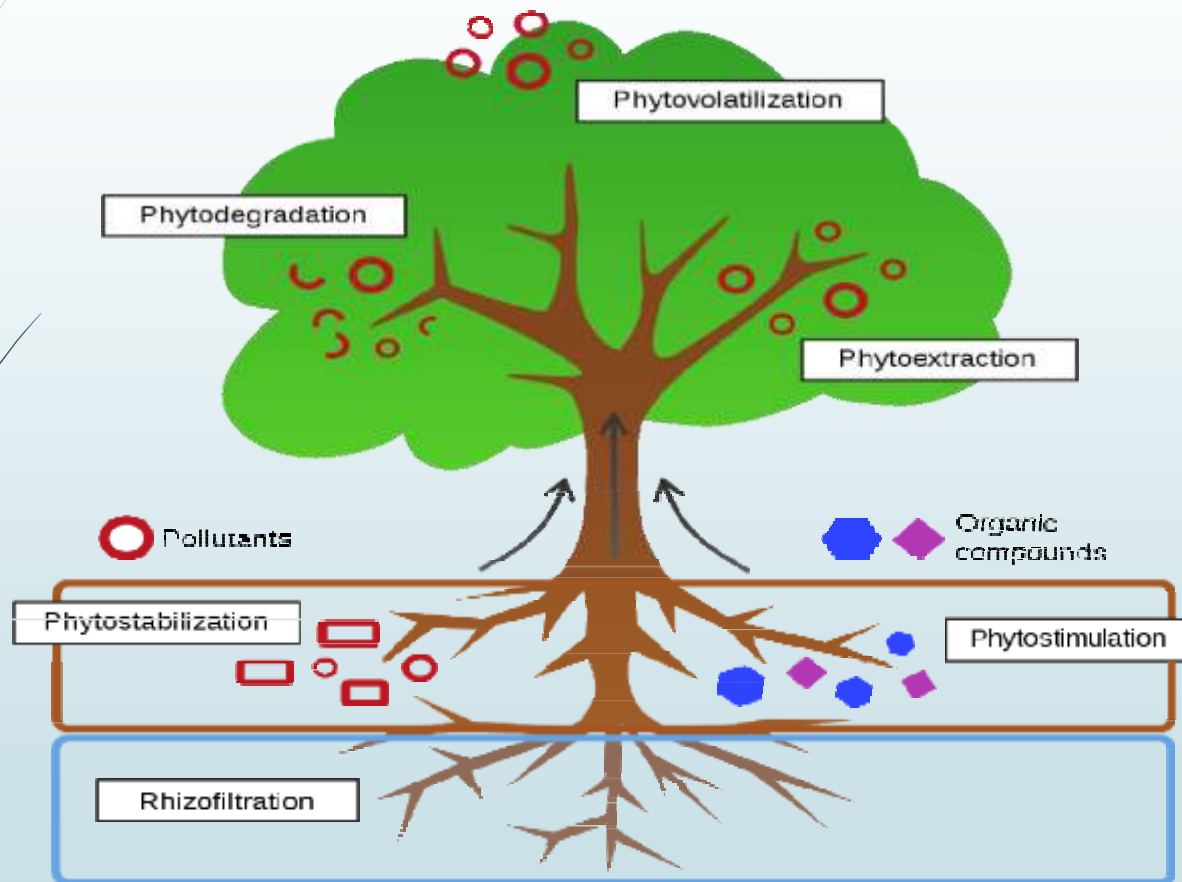
Фіторемедіація – відноситься до технологій, які використовують рослини для очищення хімічно забрудненої землі, повітря та води.

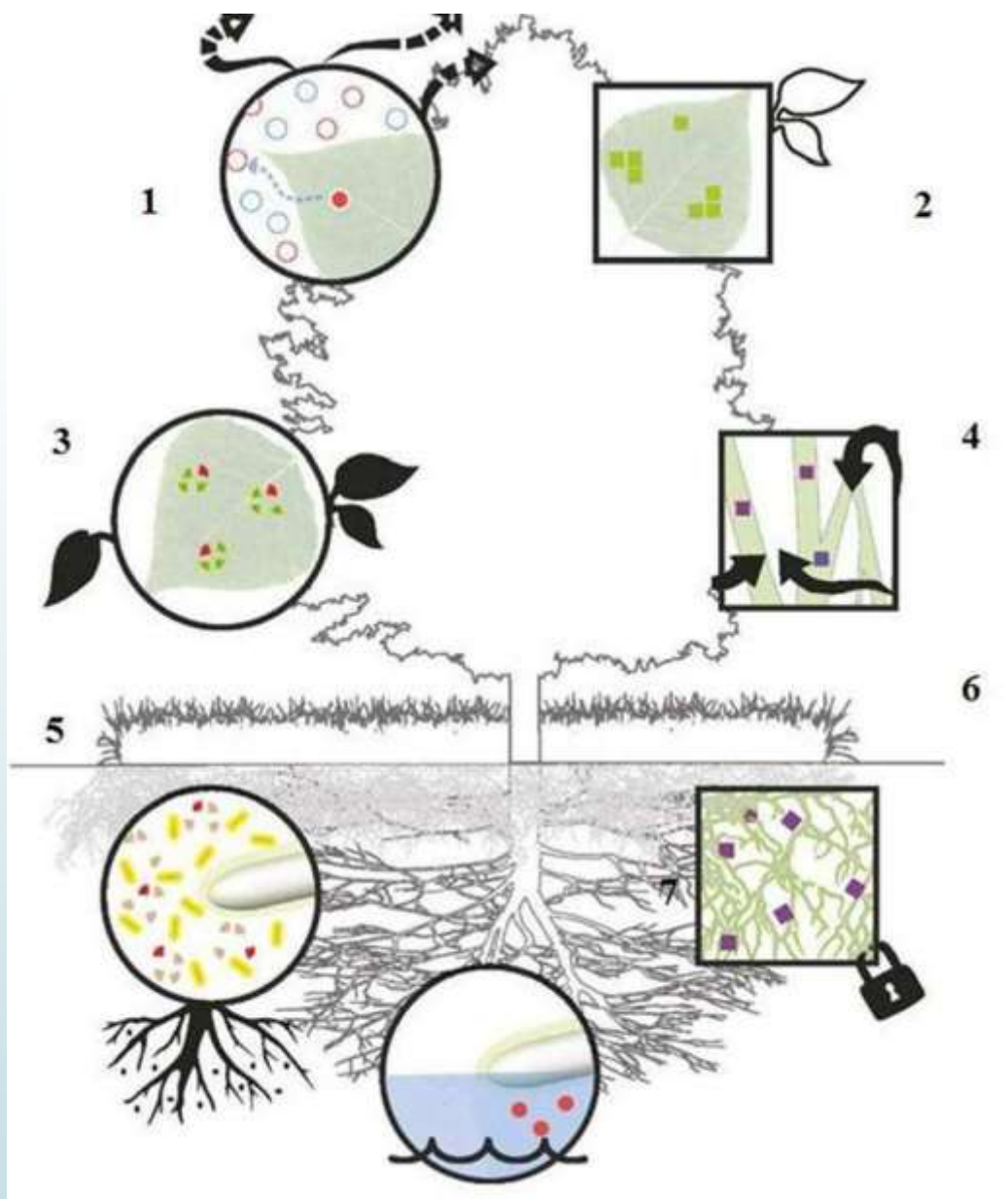
Фіторемедіація – це економічно ефективний метод на основі рослин, який використовує здатність рослин концентрувати компоненти навколишнього середовища та хімікати та метаболізувати різноманітні речовини у своїх тканинах.

Фіторе mediaція заснована на певних природних процесах, що здійснюються рослинами, наприклад:

- Поглинання металів і певних органічних сполук (тобто помірно розчинних у воді, $\log K_{ow}$ =0.5 до 3, таких як ВТЕХ) із ґрунту та води; фотосинтез органічних сполук; і транспірація вуглекислого газу.
- Накопичення або переробка цих сполук шляхом здерев'яніння, випаровування, метаболізму та мінералізації (перетворення на вуглекислий газ і воду);
- Використання ферментів для перетворення складних органічних молекул у простіші молекули (зрештою CO_2 і воду);
- Через виділення хімічних речовин (ексудатів) і розкладання кореневої тканини, збільшення вмісту вуглецю та кисню в ґрунті біля коренів (отже посилюючи мікробну/грибкову активність);
- Використання підземних вод (навіть забруднених) для діяльності рослин.

Механізми фітореMediaції





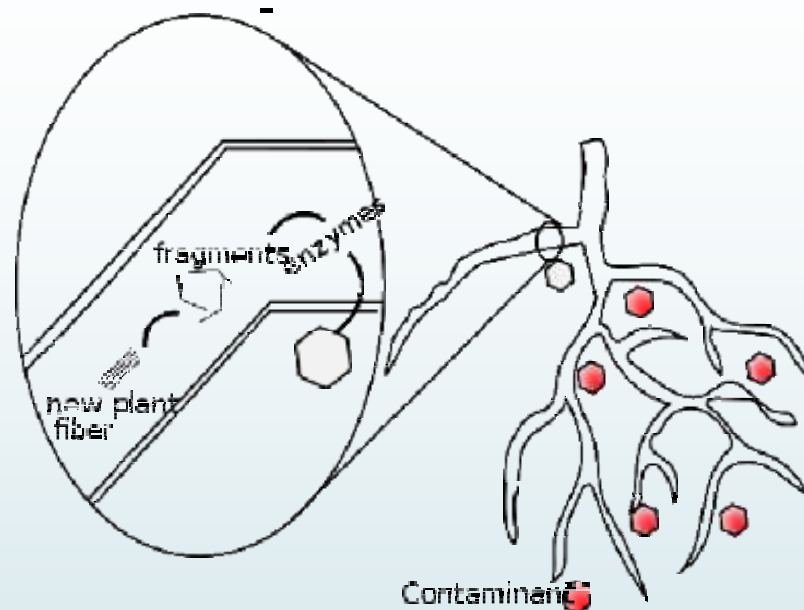
Основні види та форми фіторемедіації

1 – Фітоволатилізація; 2 – Фітометаболізм; 3 – Фітодеградація; 4 – Фітоекстракція; 5 – Ризодеградація; 6 – Фітостабілізація; 7 – Фітогідраліка.

Фітоекстракція/фітоаккумуляція

1. Це поглинання забруднюючих речовин із забруднених місць (грунт, вода, опади) корінням рослин, а також їх транспортування та накопичення в надземних тканинах рослин.
2. Додатково відомий як фітомайнінг і біомайнінг.
3. Для цього використовуються рослини з генетичною здатністю переносити більшу кількість небажаних забруднюючих речовин.
4. Ці рослини культивують протягом певного часу на забруднених місцях, збирають урожай, а потім спалюють для повторної обробки токсинів.
5. Щоб зменшити концентрацію цих забруднювачів у забрудненому ґрунті до прийняттого рівня, було використано багато циклів культивації, збору врожаю та спалювання.
6. Відповідно до вимог щодо утилізації небезпечних відходів, зола від спалювання використовується на звалищах.

Фітодеградація.



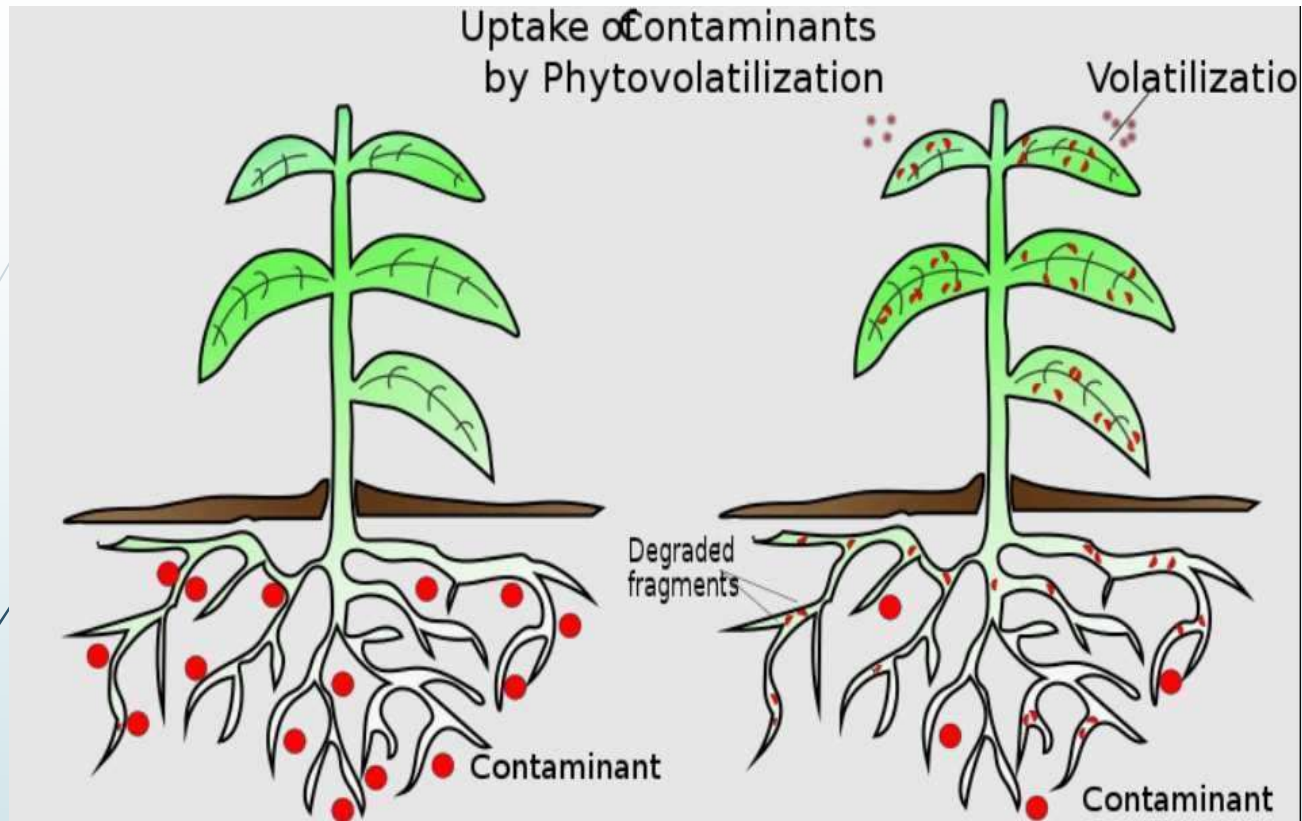
Переваги

- Вона не залежить від ризосферних бактерій.
- Рослинні ферменти відіграють роль у розкладанні.

Недоліки

- Вона обмежений лише розкладанням органічних забруднень.
- Вона неефективний проти глибокого забруднення, але ефективний проти незначного забруднення.

Фітовипаровування.



Переваги

- Забруднювачі можуть бути перетворені в менш небезпечну форму
- Забруднюючі речовини, що викидаються в атмосферу, значно розбавляються і менш шкідливі.

Недоліки

- Рослинність може накопичувати забруднюючі речовини.
- Були повідомлення про низьку кількість забруднюючих речовин у тканинах рослин.

Методи очищення забруднених ґрунтів з використанням рослин

Метод	Середовище	Забруднення
Фітоекстракція	Ґрунт, донні осади	Метали, радіонукліди
Фітодезактивація	Ґрунт, донні осади, забруднена вода	Радіонукліди
Фітотрансформація	Ґрунт, донні осади	Органічні ксенобіотики, іноді метали
Фітодеградація	Ґрунт, донні осади	Органічні ксенобіотики
Фітовипаровування	Ґрунт, витягнуті донні осади	Метали, органічні забруднення
Ризосферна біоремедіація	Ґрунт, донні осади	Нафта та нафтопродукти, ПАУ, ПХБ, пестициди, інші органічні забруднення
Ізолюючий рослинний покрив	Ґрунт, витягнуті донні осади, полігони твердих побутових відходів та сховищ небезпечних відходів	Різні забруднення, тверді відходи

2. Успішні підходи до технологій фітореMediaції. Світовий та вітчизняний досвід

Для іммобілізації металів у середовищі можуть використовувати неорганічні меліоранти: глину, бентоніт, каолініт, цемент, карбонат кальцію, Fe/Mn сполуки, цеоліти і органічні стабілізатори (компост, послід, органічні добрива) або комбінувати органічні меліоранти з неорганічними.

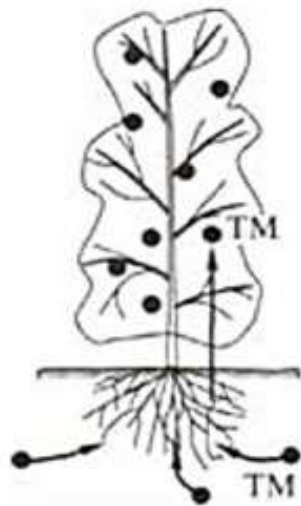
Органічні меліоранти	Іммобілізовані важкі метали	Неорганічні меліоранти	Іммобілізовані важкі метали
Подрібнена тирса	Cd, Pb, Hg, Cu	Вапно	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
Жом (цукрової тростини)	Pb	Фосфати	Pb, Zn, Cu, Cd
Лігнін (із стічних вод паперової промисловості)	Zn, Pb, Hg	Зола (відходи теплових електростанцій)	Cd, Pb, Cu, Zn, Cr
Хитозан (відходи харчової промисловості)	Cd, Cr, Hg	Гідроксилапатит	Zn, Pb, Cu, Cd
Пташиний послід (відходи птахівництва)	Cu, Pb, Zn, Cd	Шлак (відходи теплових електростанцій)	Cd, Pb, Zn, Cr
Листя	Cr, Cd	Са-монтморилоніт (мінерал)	Zn, Pb
Послід великої рогатої худоби (відходи)	Cd	Цементний пил (відходи цементної промисловості)	Cr, Cu, Zn, Pb
Солома	Cd, Cr, Pb	Бентоніт	Pb

Органічні та неорганічні іммобілізатори важких металів

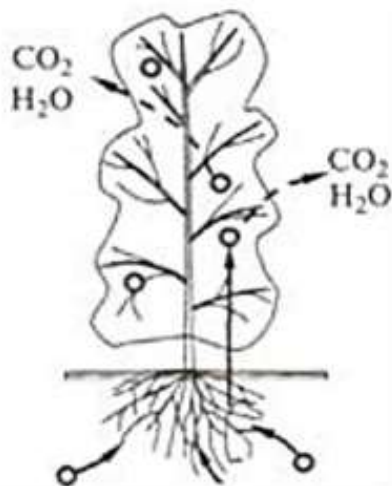
3. Сутність рослинної гіперакумуляції.

Фіторе mediaція складається з двох принципово різних стратегій: фітоекстракції – вирощуванні рослин-гіперакумуляторів, здатних вилучати ВМ у значних кількостях, та, навпаки, фітостабілізації – толерантних рослин до рівня забруднення ґрунту до 1,5 ГДК.

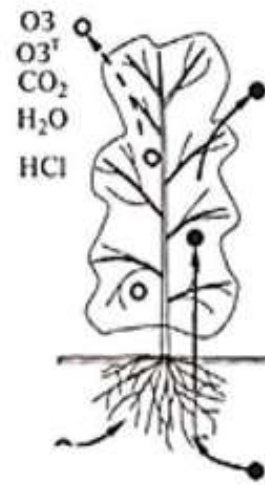
Ефективність рослин, що використовуються у фітоекстракції, як вказувалося, визначається так званим коефіцієнтом фітоекстракції (біологічного накопичення), який є відношенням концентрації металу в рослині до концентрації металів у ґрунті. За цим коефіцієнтом, що показує здатність накопичувати метали в біомасі, відбираються рослини-гіперакумулятори. До рослин-гіперакумуляторів ВМ в даний час віднесені: гірчиця сарептська (*Brássica júncea*), люцерна (*Medicago sativa*), соняшник (*Helianthus annus*), сорго (*Sorghum*), ряд трав'янистих рослин та деякі зернові культури.



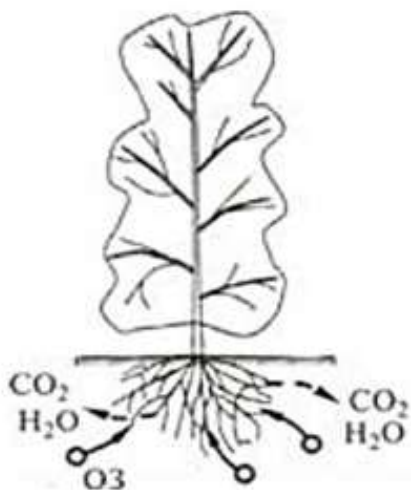
Фітоекстракція



Фітодеградація



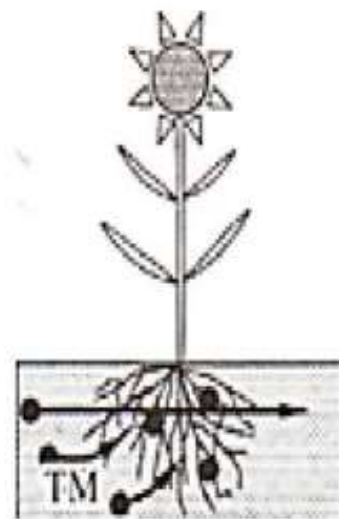
Фітовипаровування



Ризосферна біоремедіація



Фітостабілізація



Ризофільтрація.

Варіанти фіторемедіації (ТМ – важкі метали, ОЗ – органічні забруднювачі, ОЗт – трансформаційні форми органічних забруднювачів)



Рослини, що становлять металофітні флори, можна розділити на дві групи:

1. **Металофіти** – види, які мешкають тільки на збагачених важкими металами ґрунтах у межах певного району. Деякі металофіти можуть без ознак інтоксикації акумулювати значно більше важких металів, ніж звичайні рослини. Механізми, що використовуються при гіперакумуляції, є предметом дискусій, проте існують уявлення про те, що гіперакумуляції сприяють тіолвмісні поліпептиди, функціонально подібні до металотіонеїнів. Своєрідною особливістю металофітів є специфічність до металу, впливу якого піддається населення. Іноді у популяцій відзначається стійкість одночасно до двох і більше металів (супутня, або множинна металостійкість), яка, однак, нижча за основну металостійкість.



2. *Псевдометалофіти* – звичайні види місцевої флори, які мешкають на ґрунтах з дуже великим вмістом важких металів або завдяки вищій металостійкості виду в цілому, або за рахунок утворення металостійких популяцій. У свою чергу, псевдометалофіти поділяють на:

- а) вибіркові – зустрічаються і навіть більш життєві на збагачених металами ґрунтах, порівняно із звичайними;
- б) індиферентні – зустрічаються регулярно на багатих металами ґрунтах, але їх велика кількість, життєвість нижче, ніж у тих же видів на звичайних ґрунтах;
- в) випадкові металофіти – рудеральні види, що спорадично з'являються і пригнічені на збагачених ґрунтах. Їхня адаптація до важких металів може відбуватися за рахунок формування стійких популяцій.

Рослини, здатні до гіперакумуляції важких металів

Рід, вид	Метал що накопичується
<i>Alyssum</i> (біля 50 видів)	Ni
<i>Arabidopsis halleri</i>	Cd, Zn
<i>Armeria maritima</i>	Pb, Zn
<i>Armeria plantaginea</i>	Zn
<i>Brassica juncea</i>	Cd, Cu, Ni, Pb, Se, Zn
<i>Helianthus annuus</i>	Pb
<i>Leucocroton</i> (більше 30 видів)	Ni
<i>Minuartia verna</i>	Ni, Zn
<i>Thlaspi</i> (більше 20 видів)	Ni
<i>Thlaspi alpestre</i>	Zn
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Cd, Pb, Zn
<i>Thlaspi calaminaria</i>	Zn
<i>Thlaspi capeaefolium</i>	Zn
<i>Thlaspi goesingense</i>	Cd, Ni
<i>Thlaspi rotundifolium</i>	Pb
<i>Sedum alfredii</i>	Cd, Zn
<i>Silene vulgaris</i>	Zn
<i>Phyllanthus</i> (більше 40 видів)	Ni
<i>Polycarpea glabra</i>	Pb, Zn
<i>Viola calaminaria</i>	Zn

**Вміст важких металів (мг/кг) у надземній біомасі (кг/га)
рослин-гіперакумуляторів (згруповано)**

Метал	Вид рослин	Вміст	Біомаса
<u>Au</u>	<u>Brassica juncea</u> (індукована гіперакумуляція)	10 (0.001)*	20000
<u>Cd</u>	<u>Thlaspi caerulescens</u>	160	
		1800	
		3000 (1)	4000
		5000	
<u>Co</u>	<u>Haumaniastrum robertii</u>	10200 (1)	4000
<u>Cu</u>	<u>Haumaniastrum katangense</u>	8356 (1)	5000
	<u>Ipomoea alpina</u>	12300	
	<u>Aeolanthus biformifolius</u>	13700	
<u>Pb</u>	<u>T. rotundifolium</u>	8200 (5)	4000
	<u>Helianthus annuus</u>	5600	
	<u>Brassica nigra</u>	9400	
	<u>Brassica juncea</u>	10300	
	<u>Medicago sativa</u>	43300	
	<u>Betula occidentalis</u>	1000	
<u>Mn</u>	<u>Alyxia rubricaulis</u>	11500	
	<u>Macadamia neurophylla</u>	51800	
		55000 (400)	30000
<u>Ni</u>	<u>Berkheya coddii</u>	5500	
		17000 (2)	18000
	<u>T. caerulescens</u>	2740	
		16200	
	<u>Phyllanthus serpens</u>	38100	
	<u>Psychotria douarrei</u>	47500	
	<u>Sebertia acuminata</u>	250000	
<u>Zn</u>	<u>T. calaminare</u>	10000 (100)	4000
	<u>T. caerulescens</u>	21150	
		39600	
		51600	

4. Класифікація рослин гіперакумуляторів та основні напрямки їх використання у технологіях фіторе mediaції.

Надлишок ВМ в середовищі, як правило, призводить до їх підвищеного накопичення рослинними організмами, при цьому величина та характер поглинання у різних видів рослин має свою специфіку:

1. Рослини-індикатори. Види, що акумулюють елемент прямо пропорційно його змісту в середовищі;
2. Рослини-акумулятори. Рослини, що накопичують елемент навіть при низькій його кількості в ґрунті;
3. Рослини-виключники. Рослини, які не реагують підвищенням вмісту елемента в тканинах навіть при його надлишку в середовищі.



Таким чином, рослини, придатні 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) високою здатністю до відростання після скошування.



Розподіл енергетичних культур на території України: М - міскантус гігантський; С – світчграсс; Б – біг-блуестем; Сб – сорго багаторічне; В – верба кошикова

Незалежно від виду енергетичної культури інтенсивність переходу важких металів у системі "грунт-рос-лина" має такий вигляд: $Cd > Cu > Zn > Pb > Co$.

Необхідні властивості рослин-аккумуляторів металів такі:

- 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.

Список видів рослин, ефективних для застосування як фіторемедіантів забрудненого ВМ ґрунту

Вид рослини	Акумуляований хімічний елемент
<i>Alyssum</i> sp. Бурячок	Ni
<i>Amaranthus retroflexus</i> L. Щириця колосиста	¹³⁷ Cs
<i>Anthyllis vulneraria</i> L. Виразник ранозагоювальний	Pb, Cd, Zn
<i>Armeria maritima</i> Willd. Армерія приморська	Pb, Cd, Zn
<i>Azolla pinnata</i> R.Br. Азолла периста	Pb, Cu, Cd, Fe
<i>Brassica canola</i> L. Ріпак	¹³⁷ Cs
<i>B. juncea</i> L. Гірчиця сарептська	Pb, Cd, Zn, Cu, Mn, Fe, Cr, Ni, Se
<i>Datura innoxia</i> Mill. Дурман індіанський	Ba
<i>Eucalyptus</i> sp. Евкалипт	Na, As
<i>Eichornia crassipes</i> (Mart.) Solms. Ейхорнія відмінна або красива (водний гіацинт)	Pb, Cu, Cd, As, Cr, Ni, Se
<i>Festuca arundinaceae</i> Schreb. Вівсяниця очеретяна	Pb, Cd, Zn
<i>Helianthus annuus</i> L. Соняшник маслянистий	¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr, U, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni
<i>Hordeum vulgare</i> L. Ячмінь звичайний	As, Pb, Cd
<i>Hydrocotyle umbellata</i> L. Парасольковий щитolistник	Pb, Cu, Cd, Fe
<i>Kochia scoparia</i> L. Кохія, або літній кипарис	¹³⁷ Cs и др. радіонукліди
<i>Koeleria vallesiana</i> (Honck.) Bertol. Тонконіг	Pb, Cd, Zn
<i>Lemna minor</i> L. Ряска маленька	Pb, Cu, Cd, Fe, Hg
<i>Lolium multiflorum</i> L. Райграс багатоквітковий	Pb
<i>Lupinus angustifolius</i> L. Люпин вузьколистий	As
<i>Phaseolus acutifolius</i> Gray. Квасоля гостролиста	¹³⁷ Cs
<i>Pteris vittata</i> L. Птерис стрічковий	As

Заходи щодо використання ґрунтів залежно від їх забруднення важкими металами

Вміст	Рівні	<u>Міроприємства</u>
	Дуже низький	При низькому вмісті в ґрунті найважливіших елементів (мідь, цинк, марганець, кобальт та ін.) – застосування мікродобрив
	Середній	Не потрібно
	Підвищений	Усунення впливу джерела забруднення та періодичний контроль ґрунтів та продукції
	Високий	Обов'язкове усунення впливу джерела забруднення, постійний контроль вмісту ВМ у ґрунтах та продукції
Забруднення	Низький ГДК	Добір сільськогосподарських культур, що не накопичують ВМ; комплекс технологічних прийомів щодо зменшення надходження ВМ у продукцію (вапнування, застосування органічних та мінеральних добрив та ін.); виключити вирощування зелених культур та овочів
	Середній ГДК	Вирощування сільськогосподарських культур, що не накопичують ВМ (зернові, насінники трав, технічні культури, саджанці плодових культур, квітникарство) з обов'язковим комплексом заходів щодо зниження надходження ВМ у продукцію
	уже високий ГДК	Виключити вирощування культур для продовольчих цілей. Необхідні додаткові заходи щодо рекультивації цих ґрунтів

Наприклад, гіперакумулятором хрому



Представники родини *Convolvulaceae* (1 – 3 види березки *Convolvulus*, 4 – 7 – роду *Ipomoea*). 1 – *Convolvulus farinosus* (фото: Denis Payet), 2 – *Convolvulus sneorum* (фото: Philip Bird), 3 – *Convolvulus tricolor* (фото: judywhite), 4 – *Ipomoea magnusiana* (фото: Bart Wursten), *Ipomoea tricolor* сортів: 5 – Пурпурна зірка (фото: fotosen), 6 – Мілкі Вей (фото: Gennytzin De Zaroran), 7 – Скарлет



ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!