
ЕКОЛОГІЯ, ІХТІОЛОГІЯ ТА АКВАКУЛЬТУРА

ECOLOGY, ICHTHYOLOGY AND AQUACULTURE

УДК 635.9: 504

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.37>

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИН-ФІТОРЕМЕДІАНТІВ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Бойко Т.О. – к.б.н.,

доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства

Херсонський державний аграрно-економічний університет

orcid.org/0000-0003-3864-2036

В статті розглядаються біологічні методи відновлення елементів навколишнього середовища, заснованих на використанні біологічної продуктивності організмів. Методи фітореMediaції передбачають використання властивостей рослин вилучати забруднюючі речовини з навколишнього середовища. Використання рослин-фітореMediaнтів дозволить досягти екологічного очищення великих територій від важких металів, нафтопродуктів, продуктами горіння різноманітних речовин без значних капіталовкладень і з мінімальним використанням складного обладнання, що особливо актуально для повоєнного відновлення урбанізованих територій. З'ясовано, що в міських умовах для фітостабілізації краще застосовувати дерева та кущі з добре розвиненою кореневою системою. Ефективним методом для населених пунктів є поєднання деревних та трав'янистих рослин-аккумуляторів. Створення групових посадок та масивів з деревних рослин у поєднанні з щільним трав'янистим покривом будуть сприяти зниженню вітрової та водної ерозії ґрунтів. Згідно проведених досліджень виявлено, що рослини-фітореMediaнти мають відповідати наступним вимогам: мати високу біологічну продуктивність, поглинати важкі метали у високих концентраціях і проявляти толерантність до цих сполук, більша частина яких має бути акумульована в надземних органах та відчужуватись при утилізації. Створення декоративних насаджень з використанням рослин-аккумуляторів та гіперакумуляторів з урахуванням природно-кліматичних особливостей територій, дозволить не лише зменшити екологічні загрози від неконтрольованого поширення політантів за межі забруднених територій, а й буде використане як інструмент реабілітації територій, що постраждали внаслідок бойових дій. Подальший пошук рослин-фітореMediaнтів, здатних вилучати політанти із ґрунту, направлений на створення здорового, екологічно-безпечного середовища проживання у міських територіях, мінімізацію антропогенного впливу на природне біорізноманіття, повноцінне відновлення усіх компонентів урбоєкосистем, відповідно до завдань сталого розвитку та подолання наслідків війни.

Ключові слова: відновлення територій, фітореMediaція, деградація, екологічні загрози.

Boiko T.O. Possibilities of using phytoremediation plants for the restoration of urbanized areas

The article discusses biological methods for restoring environmental elements based on the use of the biological productivity of organisms. Phytoremediation methods involve using the properties of plants to remove pollutants from the environment. The use of phytoremediation plants will allow achieving ecological cleaning of large areas from heavy metals, petroleum products, and combustion products of various substances. The methods do not require significant capital investments and involve minimal use of complex equipment, which is especially relevant for the post-war restoration of urbanized areas. It has been found that in urban environments, it is better to use trees and shrubs with a well-developed root system for phytostabilization. An

effective method for settlements is a combination of the woody and grassy plants-accumulators. Creating group plantings and arrays of the woody plants combined with dense grass cover will help reduce wind and water erosion of soils. According to the conducted studies, it was found that phytoremedial plants must meet the following requirements: have high biological productivity, absorb heavy metals in high concentrations and show tolerance to these compounds, the greater part of which must be accumulated in above-ground organs and disposed of during disposal. The creation of ornamental plantings using accumulator and hyperaccumulator plants, taking into account the natural and climatic features of the territories, will not only reduce environmental threats from the uncontrolled spread of pollutants beyond the borders of contaminated territories, but will also be used as a tool for the rehabilitation of territories affected by hostilities. The further search for the phytoremedial plants capable of removing pollutants from the soil is aimed at creating a healthy, ecologically safe habitat in urban areas, minimizing the anthropogenic impact on natural biodiversity, and fully restoring all components of urboecosystems, in accordance with the tasks of sustainable development and overcoming the consequences of war.

Key words: restoration of territories, phytoremediation, degradation, ecological threats.

Постановка проблеми. В сучасних умовах сьогодення, коли до традиційних аспектів антропогенного навантаження на екосистеми додаються наслідки забруднення комплексом забруднюючих речовин внаслідок бойових дій, науковий інтерес викликають різноманітні біологічні методи відновлення елементів навколишнього середовища, заснованих на використанні біологічної продуктивності організмів. Одним з таких методів є фіторе mediaція – комплекс методів очистки навколишнього середовища з використанням рослин [1]. Ці методи передбачають використання властивості рослин вилучати забруднюючі речовини з навколишнього середовища. Процеси фіторе mediaції поєднують природні механізми самовідновлення з компонентів довкілля з посиленою дією впливу людини. Такий підхід є свосереднім переходом між природними процесами саморегенерації та техногенним відновленням, оскільки не потребує використання складних технологій.

Основою для фіторе mediaції середовища (грунтів, водних об'єктів) є гармонійна взаємодія між рослинними організмами, мікроорганізмами та екологічними умовами конкретної території [2]. Такий симбіоз дозволяє досягти екологічного очищення без значних капіталовкладень і з мінімальним використанням складного обладнання, що особливо актуально для повоєнного відновлення урбанізованих територій, які тривалий час знаходяться на лінії зіткнення. Основна задача людини в цьому процесі полягає у створенні оптимальних умов для росту рослин, формуванні відповідних фітоценозів та використанні низки агротехнічних прийомів. Такі дії будуть сприяти активнішому розкладанню або зв'язуванню забруднюючих речовин.

Результати роботи та їх обговорення. На сьогодні питання відновлення урбанізованих територій, деградованих внаслідок військових дій стоїть достатньо гостро. При розсіянню забрудненні ґрунтів на великих площах сполуками важких металів, нафтопродуктами, продуктами горіння різноманітних речовин, яке виникає внаслідок обстрілів, альтернативи фіторе mediaції майже немає. Наукові дослідження потребують удосконалення підходів до застосування практик з метою біологічної фіторе mediaції ґрунтів, для компенсації негативного впливу шкідливих речовин із застосуванням економічно доцільних технологій. Використовуються рослини-акумулятори та гіперакумулятори, здатні накопичувати поллютанти в своїх органах, завдяки чому відбувається їх вилучення з середовища. Підбір таких рослин для міст України різних рослинно-кліматичних зон є однією з стратегічних цілей, для повноцінного відновлення всіх компонентів урбоекосистем.

Забруднення металами негативно впливає на біологічні системи та не піддається біодеградації. Токсичні важкі метали такі як свинець (Pb), кобальт (Co) і кадмій (Cd), відрізняються від інших забруднювачів тим, що не розкладаються

біологічно, а накопичуються в живих організмах, викликаючи різні захворювання навіть у низьких концентраціях [3]. Через тривале накопичення у ґрунтах важкі метали становлять серйозну загрозу для живих організмів [4]. Вони впливають на ріст та розвиток рослин, утворення щільного трав'янистого покриву та негативно впливають на розвиток ґрунтових мікроорганізмів [5]. Таким чином, якщо важкі метали не можуть бути розкладені хімічним шляхом, то потребують фізичного видалення з ґрунту або переведення у нетоксичні форми [6]. Технології фітореMediaції привертають увагу науковців, оскільки використовують здатність рослин адсорбувати забруднюючі речовини з навколишнього середовища, що дає можливість до рекультивації великих площ з відносно невеликими капіталовкладеннями та без екологічних ризиків для довкілля.

В низці вітчизняних та закордонних наукових джерелах описані методи фітореMediaції [7-16]. Основними механізмами поглинання органічних і неорганічних забруднювачів є фітозакріплення (phytostabilization), ризодеградація (rhizodegradation), ризофільтрація (rhizofiltration), фітодеградація (phytodegradation), фітоаккумуляція (*phytoaccumulation*) та фітоволатизація (phytovolatilization) (рис. 1).

Ці процеси мають різні механізми застосування і залежать від типу забруднювачів (органічні або неорганічні) та особливостей середовища (ґрунт, вода, осади тощо).

В основі процесу **фітозакріплення** лежить можливість корневих систем рослин виділяти речовини, які стабілізують, зв'язують та закріплюють політанти в ґрунтовій матриці, знижуючи їх біодоступність. Деякі види рослин здатні іммобілізувати забруднювачі в ґрунті шляхом адсорбції на коренях, накопичення в тканинах або осадження їх в ризосфері.

Поглинання або адсорбція забруднюючих речовин, які перебувають у розчиненому стані на коренях рослин або в їх тканинах, є процесом **ризофільтрації**. Цей механізм використовують для видалення сполук металів і радіонуклідів із ґрунтових, поверхневих та стічних вод.

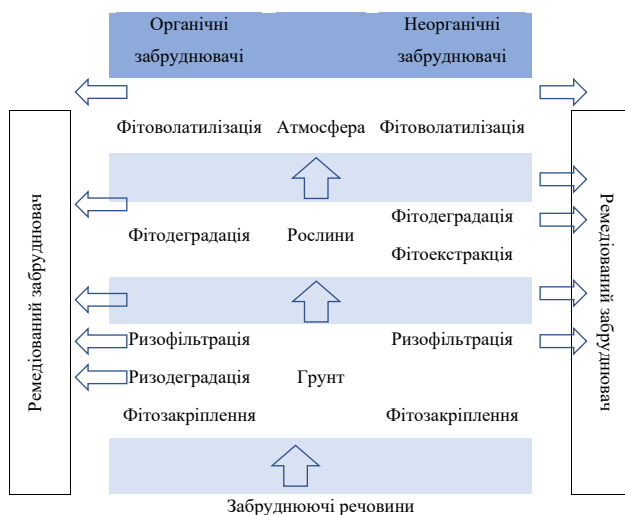


Рис. 1. Механізми впровадження технології фітореMediaції [17]

Ризодеградація – це процес руйнування забруднюючих речовин у ґрунті до проникнення їх у тканини рослини, шляхом активності мікроорганізмів у ризосфері, які споживають органічні речовини як джерело енергії. Корені рослин виділяють органічні сполуки (цукри, спирти, кислоти, вторинні метаболіти тощо), що стимулюють розвиток мікрофлори та сприяють процесам біоремедіації. Технології ризодеградації застосовуються для знешкодження нафтопродуктів, низки ароматичних та поліароматичних сполук і гербіцидів [2].

Технології **фітоекстракції** засновані на тому, що деякі види рослин здатні поглинати та гіперакумулювати деякі метали та надлишки поживних речовин у вегетативних органах рослин [12]. Фітоекстракція дозволяє вилучати важкі метали з ґрунту завдяки здатності рослин поглинати метали, необхідні для їх росту (Fe, Ni, Zn, Mn, Mg, Cu, Mo) [2]. Процеси застосовуються для вилучення металів, металоїдів, радіонуклідів із ґрунту, осадів або мулу. Біомасу можливо використовувати для повторного використання металів, для чого її компостують або спалюють, після чого золу акумулюють на регульованих звалищах.

Технологія **фітоволатилізації** заснована на здатності рослин поглинати та транспортувати забруднюючі речовини, після чого відбувається їх випаровування в атмосферу. Очищення відбувається не тільки за рахунок виділення, а й подальшого розпаду токсичних сполук в атмосфері, під дією ультрафіолетового випромінювання та кисню [18]. Цей механізм виявився особливо ефективним для детоксикації ґрунтів і водойм, забруднених органічними сполуками, а також сполуками селену та ртуттю. У процесі фітоволатилізації деякі токсиканти можуть перетворитись на менш шкідливі леткі форми. Попри очевидні переваги, ця технологія має низку суттєвих недоліків. Нетрансформовані або частково перетворені токсиканти можуть потрапляти до харчових ланцюгів, осідаючи на рослинах. Відповідно технологія потребує ретельного планування та оцінки ризиків вторинного забруднення середовища. Для даної технології в населених пунктах можливо використовувати види роду *Populus* L. та *Robinia pseudoacacia* L. [2, 13].

Фітодеградація (або **фітотрансформація**) заснована на розщепленні забруднювачів, які потрапили в рослину шляхом внутрішньоклітинного метаболізму або зовнішнього впливу ферментів, що виділяються рослиною. При цьому токсичні сполуки адсорбуються з ґрунту. Метод виявляється ефективним при високих концентраціях політантів, в результаті якого складні органічні молекули розкладаються на простіші [12, 18].

Технологія **фітостабілізації** полягає у зменшенні рухливості, розчинності або біодоступності забруднювачів в ґрунті. По суті, дані процеси не «виводять» токсичні речовини з ґрунту, а закріплюють їх у недоступній або малодоступній для живих організмів формі. Згідно Я.Г. Цицюри зі співавторами [2] даний метод ефективний при інактивації металів, однак малорезультативний для зв'язування нафтопродуктів. В міських умовах для фітостабілізації краще застосовувати дерева та кущі з добре розвинутою кореневою системою [19, 20]. Для таких цілей підійдуть *Betula pendula* Roth., *Salix alba* L., *Populus nigra* L. та гібридні тополі, *Quercus robur* L., *Pinus sylvestris* L., *Cotoneaster lucidus* Schlecht., *Rhamnus cathartica* L., *Rosa canina* L. та *Berberis vulgaris* L. Для ефективності очищення великих територій доцільно створювати великі угруповання з цих рослин.

Ефективним методом для населених пунктів є поєднання деревних та трав'янистих рослин-аккумуляторів. Створення групових посадок та масивів з деревних рослин у поєднанні з щільним трав'янистим покривом будуть сприяти зниженню вітрової та водної ерозії ґрунтів. Такі рослини як *Festuca glauca* Vill., *Alopecurus*

pratensis L. не тільки декоративні рослини, а здатні накопичувати у вегетативних органах сполуки металів. А *Alopecurus pratensis* здатний рости на ґрунтах, забруднених нафтопродуктами, та в симбіозі із ґрунтовими мікроорганізмами руйнувати ці речовини, до того як вони потраплять в ланцюг живлення. Низка газонних трав *Lolium perenne* L., *Festuca rubra* L., *Bromus inermis* Leyss., *Poa pratensis* L., а також декоративні рослини *Tagetes erecta* L., *Begonia* × *tuberhybrida* Voss, *Amaranthus retroflexus* L., *Panicum virgatum* L. та декоративні форми *Helianthus annuus* L. здатні накопичувати в своїх органах сполуки кадмію та свинцю.

Слід зауважити, що рослини-фіторемедіанти мають відповідати наступним вимогам: мати високу біологічну продуктивність, поглинати важкі метали у високих концентраціях і проявляти толерантність до цих сполук, більша частина яких має бути акумульована в надземних органах та відчужуватись при утилізації. Високим потенціалом для застосування технології фіторемедіації володіють рослини-гіперакумулятори, які здатні концентрувати метали в надземній біомасі у концентраціях набагато більших, ніж у ґрунті [21]. На сьогодні в світі ідентифіковано близько 700 видів гіперакумуляторів різноманітних металів [22,23]. Однак, дослідження, присвячені пошуку рослин, придатних для цих цілей, продовжуються для різних рослинно-кліматичних зон.

Таким чином, підсумовуючи переваги доступних фіторемедіаційних технологій можна виділити основні серед них:

- збереження екологічного балансу територій, оскільки процеси фітотвордження є природними процесами;
- економія, так як витрати на реалізацію фіторемедіаційних програм значно нижчі (в 4-5 разів), ніж на використання фізичних або хімічних методів очищення;
- мінімальне порушення структури та родючості ґрунту;
- зменшення ризиків вторинного забруднення ґрунту політантами, оскільки дозволяє уникнути переміщення забруднювачів з однієї ділянки на іншу;
- дає можливість відновлювати ґрунти на великих площах, які після фіторемедіації можливо використовувати для сільськогосподарських або рекреаційних цілей;
- збільшення естетичної привабливості місцевості та психологічного комфорту населення через використання декоративних рослин.

Однак, попри численні переваги фіторемедіації як доступної та екологічно безпечної технології, вона має певні обмеження, які можуть ускладнити або звужити її застосування в конкретних умовах. Одним з основних обмежень фіторемедіації є низька швидкість очищення. Повне відновлення забрудненої ділянки може тривати від кількох місяців до кількох років, що залежить від рівня забруднення, типу забруднювача та особливостей рослин. Процеси фіторемедіації є біологічними процесами, які залежать від температури, вологості та сезонності. В осінньо-зимовий період ефективність акумулювання рослинами політантів значно знижується або повністю зупиняється. Ще одним обмеженням є те, що високі концентрації сполук важких металів можуть бути токсичними для самих рослин, гальмуючи їх ріст, або спричиняючи загибель. Цей фактор обмежує вибір рослин-аккумуляторів. Коренева система трав'янистих рослин, які використовуються як фіторемедіанти, досягає обмеженої глибини (1-1,5 м). При їх використанні відновлення ефективне для поверхневих шарів ґрунту або ґрунтових вод, а інші шари залишаються недоступними для очищення. Метали, які накопичуються в рослинах, можуть повертатись в екосистему через розкладання зеленої маси, опадання листя або потрапляння в харчові ланцюги, за умови, що не здійснюється своєчасне

прибирання біомаси. Тобто є загроза потенційного вторинного забруднення. Технологія фіторемедіації є ефективною переважно для вилучення важких металів та деяких органічних сполук, однак вона є малопродуктивною щодо нафтопродуктів та комплексних полімерів. Ще одним обмеженням даної технології є необхідність спеціальної утилізації або переробки забрудненої біомаси, що створює додаткові витрати та потребує контролю.

Таким чином, підбір методів екологічної ремедіації забруднених ґрунтів урбанізованих територій України, пошук декоративних культур з високими фіторемедіаційними властивостями, адаптованих до природно-кліматичних умов конкретного міста країни, розроблення біологічно-обґрунтованих технологій їх розмноження та вирощування на забруднених землях з метою зниження токсичної дії поліютантів на навколишнє середовище є надзвичайно важливим та актуальним завданням повоєнного відновлення.

Висновки. Забруднені внаслідок збройного протистояння урбанізовані території України для свого відновлення потребуватимуть швидких природоорієнтованих рішень. Використання технологій фіторемедіації дозволить перетворити деградовані ландшафти у сучасні рекреаційні зони зі значним відсотком озеленення та різними підходами до створення зелених насаджень. Створення декоративних насаджень з використанням рослин-аккумуляторів та гіперакумуляторів важких металів з урахуванням природно-кліматичних особливостей територій, дозволить не лише зменшити екологічні загрози від неконтрольованого поширення поліютантів за межі забруднених територій, а й буде використане як інструмент реабілітації територій, що постраждали внаслідок бойових дій. Подальший пошук рослин-фіторемедіантів, здатних вилучати поліютанти із ґрунту та проявляти толерантність до їх дії, направлений на створення здорового, екологічно-безпечного середовища проживання у міських територіях, мінімізацію антропогенного впливу на природне біорізноманіття, повноцінне відновлення усіх компонентів урбоєкосистем, відповідно до завдань сталого розвитку та подолання наслідків війни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Гирля Л.М. Фіторемедіація – ефективний шлях зниження вмісту важких металів у ґрунтах. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Серія: Екологія. 2011. Т. 152, Вип. 140. 57-59. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchdue_2011_152_140_14 (дата звернення 20.06.2025)
2. Інноваційні підходи до фіторемедіації та фіторекультивування у сучасних системах землеробства. Монографія / Я.Г. Цицюра, Ю.М. Шкатула, Т.А. Забарна, Л.В. Пелех. Вінниця: ТОВ «Друк», 2022. 1200 с.
3. Pehlivan E., A. M. Ozkan, Dinc S. and Parlayici S. Adsorption of Cu²⁺ and Pb²⁺ ion on dolomite powder. *Journal of Hazardous Materials*. 2009 vol. 167, № 1–3. 1044–1049.
4. Bieby Voijant Tangahu, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Hassan Basri, Mushrifah Idris, Nurina Anuar, Muhammad Mukhlisin. A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*. 2011. doi:10.1155/2011/939161
5. Roy S., Labelle S., Mehta P. et al. Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites. *Plant and Soil*. 2005. Vol. 272, №. 1-2, 277–290.
6. Gaur A., Adholeya A. Prospects of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Current Science*. 2004. Vol. 86. № 4. 528–534.

7. Гацишин В.Р., Пацула О.І., Терек О.І. Накопичення важких металів у рослинах *Brassica napus* L. і *Helianthus annuus* L. під впливом солей цинку та регулятора росту трептолеуму. *Фізіологія рослин і генетика*. 2014. Т. 46. № 4. 343-350.
8. Гуральчук Ж.З. Фітотоксичність важких металів та стійкість рослин до їх дії. К.: Логос, 2006. 208 с.
9. Головач О., Козловський В., Демків О. Забруднення сільськогосподарських ґрунтів важкими металами та характер їхнього перерозподілу у рослинах кукурудзи. *Вісник Львівського ун-ту*. Серія біологічна. 2004. Вип. 38. 205-210.
10. Денчиля-Сакаль Г. М., Ніколайчук В. І., Колесник А.В., Вакерич М.М., Ткач О.П. Особливості акумуляції важких металів в рослинах *Trifolium pratense* L. *Науковий вісник Ужгородського університету*. Серія Біологія. 2012. Вип. 33. 189-191.
11. Berrow M.L., Bourridge J.C. Uptake, distribution and effects of metal compounds on plants. *Metal and Their Compounds Environment: Occurrence, Analysis and Biol. Relevance*. New York: *Verlag Chemie*. 1991. 399-10.
12. U. S. Environmental Protection Agency. Introduction to Phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory. EPA/600/R-99/107. 2000. <http://www.clu-in.org/download/remed/introphyto.pdf>.
13. Erakhrumen A. and Agbontalor A. Review Phytoremediation: an environmentally sound technology for pollution prevention, control and remediation in developing countries. *Educational Research and Review*. 2007. Vol. 2. № 7. 151-156.
14. Van Ginneken L., Meers E., Guisson R. et al. Phytoremediation for heavy metal-contaminated soils combined with bioenergy production. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2007. Vol. 15. № 4. 227-236.
15. Alex-Alan F. de Almeida, Valle Raúl R., Mielke Marcelo S. et al. Tolerance and prospection of phytoremediation woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. *Plant Physiol*. 2007. Vol. 19. № 2. 83-98.
16. Najib R., Hourti T., Khairallah Y., Khalil M.I.. The phytoremediator capacity of *Quercus cerris* L. against heavy metals contamination in the Ezer forest, Lebanon. – *Forestry Studies*. Metsanduslikud Uurimused. 2024. Vol.80. 110-126, ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>
17. Interstate Technology and Regulatory Council, Phytotechnology Technical and Regulatory. Guidance and Decision Trees. 2009. <http://www.itrcweb.org/guidancedocument.asp?TID=63>
18. Prasad M. N. V., De Oliveira Freitas H.M. Metal hyperaccumulation in plants-biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*. 2003. Vol. 6. № 3. 110-146.
19. Alkorta I, Becerril JM, Garbisu C. Phytostabilization of metal contaminated soils. *Rev Environ Health*. 2010. 25(2). 135-46. doi: 10.1515/reveh.2010.25.2.135
20. Ralinda R. Miller, P.G. Phytoremediation. *Technology Overview Report* 1996. 26 p.
21. Baker A. J. M., Brooks R. R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery*. 1989. Vol. 1. 81-126.
22. Reeves RD, Baker AJM, Jaffré T, Erskine PD, Echevarria G, van der Ent A. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloïd trace elements. *New Phytol*. 2018. 218(2). 407-411. doi: 10.1111/nph.14907. Epub 2017 Nov 15. PMID: 29139134.
23. Global Hyperaccumulator Database www.hyperaccumulators.org