

Využitie rastlín na stabilizáciu a čistenie pôdy a vody kontaminovanej kovmi

Jana Kaduková, Andrea Miškufová a Miroslav Štofko¹

Utilization of plants for stabilization and cleaning up of metal contaminated soil and water

Phytoremediation has been defined as the use of green plants and their associated rhizospheric microorganisms to remove, degrade, or contain contaminants located in soils, sediments, groundwater, surface water, and even the atmosphere. Categories of phytoremediation include - phytoextraction or phytoaccumulation, phytotransformation, phytostimulation or plant-assisted bioremediation, phytovolatilization, rhizofiltration, pump and tree, phytostabilization, and hydraulic control. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils basically includes phytostabilization, phytoextraction, rhizofiltration and phytovolatilization. Selection of plants for phytoremediation of metals depends on a particular application.

Key words: phytoremediation, phytostabilization, phytoextraction, rhizofiltration, phytovolatilization.

Úvod

Rastliny sú považované za zdroj potravy, paliva alebo vlákien, ale ich schopnosť vysporiadať sa so znečistením životného prostredia a aktívne sa podieľať na jeho vyčistení bola spozorovaná len nedávno. Vyššie rastliny sú schopné metabolizovať a degradovať mnohé znečisťujúce látky, preto sú často označované ako „zelená pečeň“. Okrem toho niektoré rastliny sú schopné v pletivách akumulovať toxické kovy v takom rozsahu, že sa často hovorí o hyperakumulácii. Technológia, ktorá sa snaží tieto vlastnosti rastlín využiť pri čistení životného prostredia sa nazýva fytoremediácia.

Charakteristika fytoremediácie

Fytoremediáciou je označovaná skupina metód, ktoré využívajú zelené rastliny a ich rizosférické mikroorganizmy na fixáciu, akumuláciu a degradáciu znečisťujúcich látok nachádzajúcich sa v pôde, sedimentoch, spodnej alebo povrchovej vode alebo dokonca aj v atmosfére (Ouyang, 2002). Vybrané rastliny sa využívajú na extrakciu toxických kovov, vrátane rádioizotopov, ale aj organických látok zo životného prostredia. Dôležitým predpokladom pre úspešnú aplikáciu fytoremediácie je biologická dostupnosť znečisťujúcich látok pre rastlinu, ktorá je daná hlavne rozpustnosťou danej látky, typom pôdy a vekom kontaminácie.

Dôvodov na rozvoj tejto technológie je niekoľko. Predovšetkým dochádza k znižovaniu nákladov pri dekontaminačných procesoch. Fytoremediácia predpokladá využitie známych agrotechnických postupov bežne používaných v poľnohospodárstve. Finančné vstupy sú väčšinou nízke a náklady na priebeh remediácie minimálne. Ďalšou výhodou fytoremediácie je šetrný prístup k prostrediu, pretože sa vyhýba odstráneniu pôdy a použitiu ťažkej techniky (Dercová a kol., 2005). V prezentácii centra Naval Facilities Engineering Service z Kanady (1998) sa uvádza, že počas fytoremediácie približne 30 000 ton znečistenej pôdy na ploche asi 400 árov sa vyprodukuje približne 1200 ton biomasy, z ktorej po spálení vznikne asi 120 ton popola. Takže aj v prípade, že nemáme inú možnosť ako skládkovať, dochádza k podstatnej redukcii množstva znečisťujúcej látky určenej na skládkovanie.

Ideálna rastlina pre fytoremediáciu by mala:

- rýchlo rásť a produkovať veľa biomasy (najlepšie viac ako 3 tony na približne 40 ároch za rok),
- mať hlboké korene a ľahko pozbierateľnú nadzemnú časť,
- akumulovať veľké množstvo kovov v nadzemnej časti (aspoň okolo 1000 mg/kg).

Doteraz však nebola nájdená rastlina, ktorá by spĺňala všetky tri požadované charakteristiky. Aby bolo možné vyčistiť pôdu od znečisťujúcej látky napríklad počas troch až piatich rokov, rastlina musí akumulovať desaťnásobne viac znečisťujúcej látky, ako je jej koncentrácia v pôde. Napríklad ak sa v pôde nachádza 500 mg.kg⁻¹ znečisťujúcej látky, potom jej koncentrácia v rastline musí byť takmer 5000 mg.kg⁻¹, aby bola schopná vyčistiť pôdu do piatich rokov (Schnoor, 1997, Clemens a kol., 2002).

¹ RNDr. Jana Kaduková, PhD., Ing. Andrea Miškufová, PhD., Prof. Ing. Miroslav Štofko, CSc., Katedra neželezných kovov a spracovania odpadov, Hutnícka fakulta, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 04200 Košice, jana.kadukova@tuke.sk (Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 30. 5. 2006)

Najvýhodnejšie je aplikovať fytoremediáciu na miesta s plytkou kontamináciou organickými látkami, makroživinami alebo kovmi. Je vhodná pre čistenie miest s veľkou rozlohou, kde použitie iných remedičných techník je príliš drahé alebo nepoužiteľné. Ide hlavne o miesta s nízkou koncentráciou, ktoré si vyžadujú len dlhodobé dočisťovanie, prípadne v kombinácii s inými metódami, kde vegetácia je použitá ako dokončovací krok (Schnoor, 1997).

V porovnaní s inými remedičnými technológiami sú výhody fytoremediácie (Raskin a kol., 1994, Schwitzguébel, 2002):

- minimálne narušenie životného prostredia počas aplikácie,
- možnosť aplikácie na široké spektrum znečisťujúcich látok, vrátane kovov a rádionuklidov,
- menšia produkcia sekundárnych odpadov ako pri tradičných metódach,
- možnosť degradovať organické látky až na CO₂ a H₂O, teda možnosť ich úplného odstránenia zo životného prostredia,
- cenovo výhodná technológia pre veľké plochy pôdy alebo veľké objemy vody s nízkymi koncentraciami znečisťujúcich látok,
- použiteľnosť vrchnej časti pôdy po remediácii a možnosť jej úpravy aj pre poľnohospodárske použitie,
- ponechanie pôdy po odstránení znečisťujúcich látok na mieste, teda nie je nutné ju skládkovať a nevzniká nový druh odpadu,
- zachytenie znečistených spodných vôd rastlinami umožňuje predísť úniku týchto látok do okolitého prostredia.

Nevýhody limitujúce použitie fytoremediácie sú:

- dlhý čas potrebný na priebeh procesu,
- obmedzená účinnosť na hornú časť pôdy približne meter od povrchu a spodnú vodu v blízkosti povrchu,
- klimatickými a hydrologickými podmienkami môžu byť obmedzené rastové rýchlosti použitých rastlín,
- potreba úpravy povrchu miesta pre fytoremediáciu, aby sa zabránilo zaplaveniu alebo erózii,
- znečisťujúce látky nahromadené v rastline môžu ešte stále vstúpiť do potravinového reťazca, ak tieto rastliny slúžia ako potrava živočíchov,
- niekedy potreba dodania pôdy.

Predpokladá sa, že fytoremediácia vytvorí určitý doplnok k tradičnejším bioremedičným metódam, ktoré sú založené len na využití mikroorganizmov. Konkrétne sa predpokladá najväčšie uplatnenie pri odstraňovaní toxických kovov a perzistentných organických látok z pôd, ako sú napr. chlórované pesticídy, insekticídy s obsahom organofosfátov, ropných uhľovodíkov (BTEX), polycyklických aromatických uhľovodíkov (PAHs), sulfónovaných aromatických zlúčenín, fenolov, nitroaromatických zlúčenín, polychlórovaných bifenylov (PCBs) a chlórovaných rozpúšťadiel (TCE, PCE). Rastlinná biomasa alebo aj iné rastlinné odpady z poľnohospodárstva môžu byť využité aj na odstraňovanie organických látok z vôd (Schwitzguébel, 2002).

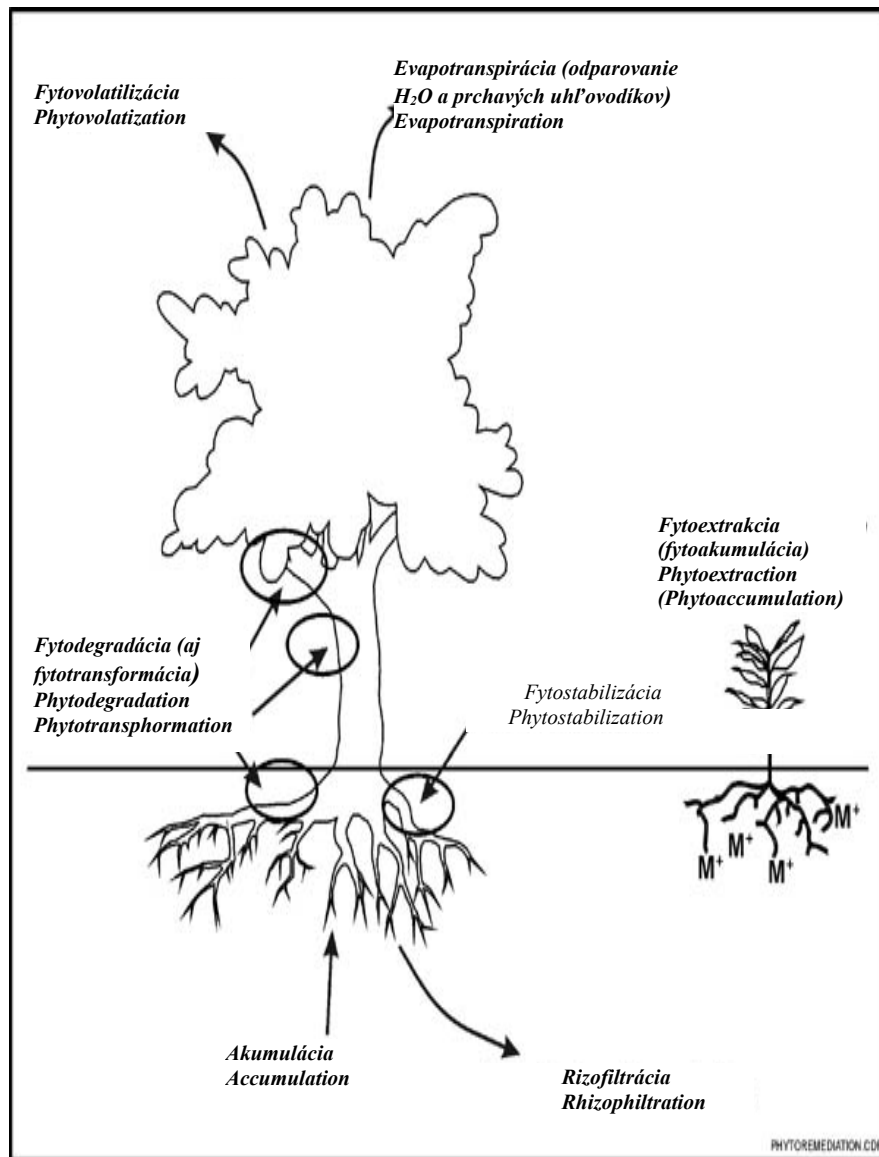
Rozdelenie fytoremedičných metód

Metódy patriace do skupiny fytoremedičných technológií (obr. 1) sú:

- fytoextrakcia alebo aj fytoakumulácia – použitie rastlín schopných akumulovať znečisťujúce látky vo svojich nadzemných častiach a tak umožniť ich odstránenie z pôdy,
- fytotransformácia – čiastočná alebo úplná degradácia komplexných organických molekúl, alebo ich inkorporácia do rastlinných pletív,
- fyto stimulácia alebo bioremediácia uľahčená rastlinami (niekedy označovaná aj ako fyto degradácia) – stimulácia degradácie organických látok mikroorganizmami alebo hubami pomocou látok (napr. enzýmov), ktoré rastlina uvoľňuje do svojej koreňovej zóny (rizosféry),
- fyto volatilizácia – premena znečisťujúcich látok na plynné látky počas rastlinného metabolizmu,
- rizofiltrácia – použitie rastlinných koreňov na absorpciu alebo adsorpciu znečisťujúcich látok, najčastejšie kovov, ale aj organických látok, z vôd a ich následné skoncentrovanie a vyzrážanie,
- „stromové čerpadlo“ – použitie stromov na odparovanie veľkých objemov vody z pôdy, čo zároveň umožní extrakciu kovov obsiahnutých v prečerpanej vode,
- fyto stabilizácia – použitie rastlín na zníženie pohyblivosti a biologickej dostupnosti znečisťujúcich látok s cieľom zabrániť ich vstupu do spodných vôd a potravinového reťazca,
- hydraulická kontrola – kontrola hladiny spodných vôd pomocou koreňových systémov rastlín.

Mechanizmy odstraňovania anorganických látok sa líšia od odstraňovania organických látok. Organické látky totiž môžu byť metabolickými cestami degradované úplne až na CO₂ a H₂O, ale anorganické látky

musia byť zo systému odstránené buď fyzicky alebo musia byť premenené na biologicky inertnú formu. Odstránenie anorganických látok musí byť dokončené buď odstránením biomasy s naviazanou anorganickou látkou, napríklad kovom, alebo jej premenou na prchavú formu a následným uvoľnením do prostredia (Cunningham, Ow, 1996). Výber rastlín vhodných pre fytoremediáciu kovov závisí od konkrétneho miesta a metódy (Schnoor, 1997).



Obr. 1. Rozdelenie fytoremediačných technológií.
Fig. 1. Phytoremediation technologies.

Rastliny akumulujúce toxické kovy je možné pestovať a zbierať s minimálnymi nákladmi, pričom dôjde k podstatnému zníženiu kontaminácie. Suché, spopolnené alebo kompostované rastlinné zvyšky s vysokým obsahom kovov môžu byť skládkované ako nebezpečné odpady alebo znovu využité ako suroviny na získavanie kovov (Raskin a kol., 1994; Koppolu a kol., 2003).

Fytoremediácia pôd znečistených ťažkými kovmi vo všeobecnosti zahŕňa fytostabilizáciu, fytoextrakciu, rizofiltráciu a fytovolatilizáciu.

Fytoextrakcia využíva rastliny s hyperakumulačnými schopnosťami pre cieľové kovy, teda rastliny schopné vo veľkom rozsahu akumulovať kovy a transportovať ich do nadzemných častí bez nepriaznivého vplyvu na ich rast a prosperitu (Schnoor, 1997). Translokácia kovov z koreňov do výhonku kvôli uľahčeniu zberu je jedným z hlavných cieľov fytoextračného výskumu (Jarvis, Leung, 2001). Niekedy nestačí len prirodzená schopnosť rastlín translokovať kovy do nadzemných častí, preto sa do pôdy pridávajú chelatačné činidlá zvyšujúce biodostupnosť a uľahčujúce presun kovu, napr. etyléndiamidtetraoctová kyselina (EDTA),

etyléndiamiddisukcinylová kyselina (EDDS). Najviac dostupných údajov o tomto procese bolo získaných pri štúdiu fytoextrakcie olova, pretože Pb sa jednak veľmi pevne viaže na pôdne častice (Wu a kol., 1999; Barona a kol., 2001; Kos, Leštan, 2003) a v prípade, že je zachytené rastlinou sa akumuluje hlavne v koreňoch. Len veľmi malá časť (okolo 5 %) je prirodzene presunutá do nadzemnej časti rastliny (Wozny, 1995, Kumar a kol., 1995; Sekhar a kol., 2004). Chelatačné činidlá podstatne uľahčia vstup kovu do rastliny a jeho presun v rastline, ale ich veľkou nevýhodou je, že vznikajúce cheláty kovov sú veľmi rozpustné a ľahko prenikajú do spodných vôd (Mulligan a kol., 2001; Römkens a kol., 2002; Madrid a kol., 2003). Okrem chelatačných činidiel bolo zistené, že aj zvýšená slanosť pôdy zvyšuje u niektorých rastlín presun kovu do nadzemnej časti (Otte, 1991). Translokácia olova rastlinami *Aster tripolium* a *Plantago maritima* do listov bola v slanom prostredí vyššia než v prostredí bez soli (Fitzgerald a kol., 2003).

Pri výbere rastlín vhodných na fytoextrakciu je nutné vziať do úvahy okrem ich schopnosti akumulovať kovy aj pri ich veľmi nízkej koncentrácii v pôde, aj schopnosť akumulovať viac druhov kovov, odolávať vysokým koncentraciám kovov v pôde alebo produkovať dostatočné množstvo biomasy (Smith a kol., 1994).

Niektoré rastliny sú schopné akumulovať oveľa väčšie množstvá určitých kovov ako sú skutočne nevyhnutné pre ich rast. Tieto rastliny sa nazývajú hyperakumulátory (Orcutt, Nilsen, 2000). Termín hyperakumulátor po prvýkrát použili Brooks a jeho spolupracovníci (Brooks a kol., 1977) na opis rastlín silne akumulujúcich nikel. Hyperakumulátory akumulujú vo svojich nadzemných častiach kovy v koncentráciách výrazne prevyšujúcich koncentrácie týchto kovov v pôde alebo v ostatných rastlinách rastúcich v ich blízkosti. Jedna z definícií považuje za hyperakumulátory všetky rastliny, ktoré obsahujú v listoch a stonkách viac ako 0,1 % Ni, Co, Cu, Cr a Pb a 1 % Zn v suchej hmotnosti rastliny bez ohľadu na koncentráciu kovov v pôde (Raskin a kol., 1994). Medzi hyperakumulátory patrí napríklad *Agrostis stolonifera* (psinček výbežkatý), ktorý dokáže z pôdy odčerpať 300-krát viac arzenu, ako na tom istom stanovišti voľne rastúce iné rastliny. *Minuartia verna* (kurička jarná) obsahovala 1000-násobok kadmia v pôde (Domažlická a kol., 1994, Hronec, 1996). Nikel dokážu odčerpávať z pôdy vo veľkých množstvách zástupcovia rodov *Alyssum* a *Thalspi* (Raskin a kol., 1994). Hyperakumulácia Ni bola celkovo zistená u 277 rôznych rastlín. Drevina z Novej Kaledónie, *Sebertia acuminata*, má viac než 11 % Ni v latexe (sušina). Mnoho rastlín z rodu *Thalspi* akumuluje aj olovo do 1 % v sušine a Zn do 3 % v sušine. *Armeria maritima* (trávnička prímoorská) je iným hyperakumulátorom olova v Európe (nad 1 % v sušine). Africké druhy *Aeollanthus biformifolius* (eolant) a *Haumaniastrum katangense* môžu obsahovať viac než 0,1 % Cu alebo Co v listovej sušine. *Astragalus* (kozinec) rastúce na pôde s obsahom Se môže akumulovať v sušine až 1 % Se (Banášová 1996). Stredomorský *Atriplex halimus* akumuluje okolo 0,2 % Pb v nadzemnej časti (Kadukova a kol., 2004). Hyperakumulátory sú však väčšinou rastliny malého vzrastu rastúce veľmi pomaly, preto sa výskum rozšíril aj na štúdium stromov. Hoci stromy sú schopné akumulovať len relatívne malé množstvo kovov z pôdy, produkujú také veľké množstvo biomasy, že je to z ekonomického hľadiska často výhodnejšie (Garbisu, Alkota, 2001; Pulford, Watson, 2002).

V praxi ide pri fytoextrakcii o vysadenie vybraných rastlín na kontaminovanú plochu. Po akumulácii sú rastliny zozbierané a spracované tepelne, mikrobiálne alebo chemicky. Veľmi dôležitou otázkou fytoextrakcie je možnosť ekonomického znovuzískania kovov z rastlinnej biomasy alebo skládkovania takejto biomasy. Využitie matematického modelovania uľahčuje predpovedanie správania sa kovu v rastline, miest a foriem jeho uskladnenia v rámci rastliny, čo je nevyhnutné pri rozhodovaní ako kov znovu získať z rastliny (Chrysafooulou a kol., 2005). Zaujímavou možnosťou je využitie netypických vlastností rastlín na zefektívnenie fytoextrakcie. Napr. stredomorský slanomilný ker alebo strom *Tamarix smyrnensis* využíva solné žľazy na vylúčenie nadbytku soli v pôde. V prípade, že sa v pôde nachádzajú aj kovy, sú aj tieto vylúčené cez solné žľazy vo forme netoxických kryštálov (Kadukova a kol., 2006).

Fytovolatilizácia predstavuje zachytenie znečisťujúcich látok z pôdy, ich transformáciu na prchavé zlúčeniny a následné odparenie do atmosféry (Schnoor, 1997). Niektoré mikroorganizmy sú schopné enzymaticky redukovat' ortuťnaté ióny na kovovú ortuť, ktorá sa vzhľadom na svoje fyzikálne vlastnosti rozptyľuje do okolia vo forme pár. Gén kódujúci reduktázu ortuti sa podarilo vniesť do genómov rastlín *Arabidopsis thaliana* a *Lyriodendron tulipifera*, čo prispelo k zvýšeniu odolnosti rastlín voči zvýšenej koncentrácii Hg^{2+} v ich pletivách a súčasne sa podarilo previesť väčšiu časť ortuti vo forme Hg^0 do ovzdušia (Špirochová a kol., 2001). Takisto bola táto metóda použitá pri odstraňovaní selénu (Chaney a kol., 1997). V prípade použitia tohto spôsobu však musí byť zároveň realizované aj opatrenie zamedzujúce nekontrolovaný rozptyl plyných splođín.

Rizofiltrácia je používaná najčastejšie na čistenie spodných, povrchových alebo odpadových vôd s nízkymi koncentraciami kovov. Využíva suchozemské aj vodné rastliny schopné absorbovať, nahromadiť a zrážať kovy z prúdiacej vody v koreňoch. Výhodou rizofiltrácie je, že znečisťujúce látky nemusia byť transportované do výhonku, teda sa nemusia používať len hyperakumulátory. Táto metóda je vhodná predovšetkým na čistenie vôd s nízkymi koncentraciami kovov, ktoré nie je možné efektívne odstrániť inou

metódou. Veľmi vhodná sa rizofitrácia ukázala na odstraňovanie rádionuklidov, ktoré boli účinne akumulované koreňmi kapusty sitinovej (*Brassica juncea*) alebo slnečnice ročnej (*Helianthus annuus*). Pre akumuláciu ťažkých kovov rizofitráciou sa osvedčili napríklad kukurica, slnečnica a ryža. Slnečnica znížila významne koncentráciu chrómu, mangánu, kobaltu, niklu a medi vo vode počas 24 hodín. Napr. 1,1 g sušiny koreňov slnečnice ročnej alebo kapusty sitinovej ponorených do 400 ml vody obsahujúcej 300 $\mu\text{g ml}^{-1}$ Pb, znížilo koncentráciu Pb pod 1 $\mu\text{g ml}^{-1}$ za 8 hodín. Koncentrácia Pb v koreňoch dramaticky stúpila, nad 10 % obsahu v sušine (Banášová, 1996). Podobne aj korene fazule (*Phaseolus vulgaris*) naakumulovali 50 % celkového olova v priebehu prvých 10 hodín (Piechalak a kol., 2002). *Eichhornia crassipes* „vodný hyacint“, pupkovník *Hydrocotyle umbellata*, žaburinka menšia *Lemna minor* a *Azolla pinnata* dokážu odčerpáť z vody a uložiť vo svojom tele Pb, Cu, Cd, Fe a Hg (Raskin a kol., 1994), okrem toho vodný hyacint dokáže odčerpáť z vody aj arzén (Cullen, Reiner, 1989).

Aj keď sa v súčasnosti rizofitrácia prevažne používa na čistenie vôd kontaminovaných ťažkými kovmi, je možné, že v budúcnosti sa jej aplikácia rozšíri aj na organické látky.

Fytostabilizácia je zvyčajne aplikovaná na pôdy, ktoré sú veľmi silne znečistené kovmi, a teda ich fytoextrakcia by trvala veľmi dlho (aj niekoľko desiatok tisíc rokov). Ide napríklad o haldy, odkaliská a podobne. V takýchto prípadoch je najvýhodnejšia aplikácia rýchlo rastúcich rastlín (napríklad krmív) odolných voči suchu, ktoré sú schopné rásť v pôdach s vysokou koncentráciou kovov s nízkym obsahom živín a akumulovať kovy v koreňoch alebo ich vyzrážať v koreňovej zóne (Wong, 2003).

Rastliny môžu stabilizovať kontaminanty vo svojich orgánoch pomocou:

- redoxných premien (napr. redukcia Cr^{VI} na Cr^{III}),
- prevedenia kontaminantov do nerozpustnej podoby (napr. olovo viazané s fosforečnanmi),
- zabudovania do rastlinných štruktúr.

Cieľom tejto metódy je znemožnenie alebo aspoň výrazne obmedzenie prenosu kontaminantov do okolia. Táto metóda sa využíva aj ako záverečný krok úpravy plôch inými technológiami.

Fytostimulácia alebo bioremediácia uľahčená rastlinami, niekedy označovaná aj **fyto-degradácia**, sa používa na premenu znečisťujúcich látok na netoxické priamo v pôde. Ide o spoluprácu rastliny a mikroorganizmov, alebo húb pri degradácii. Rastlina uvoľňuje do svojej koreňovej zóny rôzne látky, napríklad enzýmy, ktoré uľahčujú degradáciu organických látok mikroorganizmami a hubami žijúcimi v blízkosti koreňov (Zhao a kol., 2001). Prevažne sa využíva pre pôdy znečistené organickými látkami, ktoré sú potom rastliny schopné metabolizovať. Podmienkou je, aby produktom metabolických aktivít bola látka, ktorá je netoxická nielen pre rastliny ale aj pre ostatné organizmy. V prípade, že daná organická látka je akumulovaná a metabolizovaná v rastline, ide o fytotransformáciu (Fitz, Wenzel, 2002; Glick, 2003).

Rastliny vylučujú do okolitej rizosféry mnoho látok. Zistilo sa, že až 20 % vyprodukovaných uhlíkovodíkov je vylúčených koreňmi. Sú to napríklad sacharidy, aminokyseliny a iné organické zlúčeniny. Tieto látky môžu slúžiť ako zdroj energie pre mikroorganizmy žijúce v rizosfére a tak umožňovať rast ich populácií. Na druhej strane aj mikroorganizmy môžu poskytovať rastline látky, ktoré rastliny nie sú schopné samé vyprodukovať. Rizosféra je teda vďaka vzájomnému vzťahu rastlín a mikroorganizmov metabolicky veľmi aktívna oblasť, v ktorej môže prebiehať mnoho dejov dôležitých pri dekontaminácii (Špirochová a kol., 2001).

Táto metóda bola použitá ako remediačná technológia pri kontaminácii prostredia nasledujúcimi typmi látok: - TPH (ropné látky), PAH (polyaromatické uhlíkovodíky), chlórované pesticídy, iné chlórované látky – PCB, TCE, výbušniny a ďalšie nitrozlúčeniny, organofosfátové pesticídy a detergenty. Takisto bolo dokázané, že pôdne baktérie podstatne zvyšujú akumuláciu Se a Hg pomocou škripiny (*Scirpus robustus*) (de Souza a kol., 1999).

Záver

Odstraňovanie kovov z pôdy pomocou rastlín je nová, ale veľmi zaujímavá oblasť výskumu, ktorá na jednej strane prináša nové možnosti do oblasti čistenia kontaminovaných pôd, ale na druhej strane rozširuje naše poznanie aj v oblastiach základného výskumu, napr. v rastlinnej fyziológii a biochémií. Štúdiom interakcií medzi kovom a rastlinami pomáha pochopiť mechanizmy podieľajúce sa na zachytení, akumulácii kovov a rezistencii rastlín voči prítomnosti kovov v prostredí. Aj keď sú v súčasnosti metódy fyto-remediácie stále ešte na začiatku svojho vývoja, jedného dňa sa môžu stať riadne definovanou a odskúšanou technológiou vhodnou na čistenie životného prostredia so širokým komerčným využitím.

Článok vznikol v súvislosti s riešením grantovej úlohy VEGA 1/3220/06.

References

- [1] Banášová, V.: Rastliny na substrátoch s vysokým obsahom ťažkých kovov, *Zborník zo seminára: Ťažké kovy v ekosystéme, E'96, BIJO Slovensko, s r.o., 1996, 81-94.*
- [2] Barona, A., Aranguiz, I., Elías, A.: Metal associations in soil before and after EDTA extractive decontamination: implications for the effectiveness of further clean-up procedures, *Environmental Pollution, 113, 2001, 79-85.*
- [3] Brooks, R., R., Lee, J., Reeves, R., D., Jaffre, T.: Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants, *Journal of Geochemical Exploration, 7, 1977, 49-57.*
- [4] Clemens, S., Palmgren, M., G., Krämer, U.: A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation, *Trends in Plant Science, 7, 7, 2002, 309-315.*
- [5] Cullen, R., W., Reiner, K., J.: Arsenic speciation in the environment, *Chemical Review, 89, 1989, 713-764.*
- [6] Cunningham, S., D., Ow, D., W.: Promises and Prospects of Phytoremediation, *Plant Physiology, 110, 1996, 715-719.*
- [7] de Souza, M., P., Chee, H., N., Terry, N.: Rhizosphere bacteria enhance the accumulation of selenium and mercury in wetland plants, *Planta, 209, 1999, 259-263.*
- [8] Dercová, K., Makovníková, J., Barančíková, G., Žuffa, J.: Bioremediácia toxických kovov kontaminujúcich vody a pôdy, *Chemické listy, 99, 2005, 682-693.*
- [9] Domažlická, E., Vodičková, H., Mader, P.: Fytochelatiny, *Biologické listy, 59, 2, 1994, 81-92.*
- [10] Fitz, W., J., Wenzel, W., W.: Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation, *Journal of Biotechnology, 99, 2002, 259-278.*
- [11] Fitzgerald, E., J. a kol.: Copper and lead concentrations in salt marsh plants on the Suir Estuary, *Ireland, Environmental Pollution, 123, 67 – 74, 2003.*
- [12] Garbisu, C., Alkorta, I.: Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment, *Biosource Technology, 77, 2001, 229-236.*
- [13] Glick, B., R.: Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment, *Biotechnology Advances, 21, 2003, 383-393.*
- [14] Hronec, O.: Ťažké kovy a ich pohyb v pôdach a rastlinách, *Zborník zo seminára: Ťažké kovy v ekosystéme, E'96, BIJO Slovensko, s r.o., 1996, 41-49.*
- [15] Chaney, R., L., Malik, M., Li, Y., M., Brown, S., L., Brewer, E., P., Angle, J., S., Baker, A., J., M.: Phytoremediation of soil metals, *Current Opinion in Biotechnology, 8, 1997, 279-284.*
- [16] Chrysafofoulou, E., Kadukova, J., Kalogerakis, N.: A whole-plant mathematical model for the phytoextraction of lead (Pb) by maize, *Environment International, 31/2, 2005, 255-262.*
- [17] Jarvis, M., D., Leung, D., W., M.: Chelated lead transport in *Chamaecytisus proliférus* (L. f.) link ssp. *proliférus* var. *palmensis* (Christ, H., ed): an ultrastructural study, *Plant Science, 161, 2001, 433-441.*
- [18] Kadukova, J., Manousaki, E., Kalogerakis, N.: Pb and Cd Accumulation and Excretion by Salt Glands of Salt Cedar (*Tamarix smyrnensis* Bunge), *Environmental Pollution, 2006 (article in press).*
- [19] Kadukova, J., Papadantonakis, N., Naxakis, G., Kalogerakis, N.: Lead accumulation by the salt-tolerant plant *Atriplex halimus*, In: *Proceedings from International Conference on Protection and restoration of the environment VII – Mykonos 2004 (Eds. Moutzouris, C., Christodoulatos, C. a kol.), Greece, June 28 – July 1, 2004, 93.*
- [20] Kos, B., Leštan, D.: Induced Phytoextraction/Soil Washing of Lead Using Biodegradable Chelate and Permeable Barriers, *Environmental Science and Technology, 37, 2003, 624-629.*
- [21] Koppolu, L., Agblevor, F., A., Clements, L., D.: Pyrolysis as a technique for separating heavy metals from hyperaccumulators. Part II: Lab-scale pyrolysis of synthetic hyperaccumulator biomass, *Biomass and Bioenergy, 25, 2003, 651-663.*
- [22] Kumar, N., P., B., A., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I.: Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils, *Environmental Science and Technology, 29, 1995, 1232-1238.*
- [23] Madrid, F., Liphadzi, M., S., Kirkham, M., B.: Heavy metal displacement in chelate-irrigated soil during phytoremediation, *Journal of Hydrology, 272, 2003, 107-119.*
- [24] Mulligan, C., N., Yong, R., N., Gibbs, B., F.: Remediation technologies for metal contaminated soils and groundwater: an evaluation, *Engineering Geology, 60, 2001, 193-207.*
- [25] Orcutt, D., M., Nilsen, E., T.: The Physiology of Plants Under Stress, Soil and Biotic Factors, *John Wiley&Sons, 2000.*

- [26] Otte, M., L.: Contamination of coastal wetlands with heavy metals: factors affecting uptake of heavy metals by salt marsh plants, In: Rozema, J., Verkleij, J.A.C. (Eds.), *Ecological Responses to Environmental Stresses*, Kluwer Academic, Netherlands, 126 – 133, 1991.
- [27] Ouyang, Y.: Phytoremediation: modeling plant uptake and contaminant transport in the soil-plant-atmosphere continuum, *Journal of Hydrology*, 266, 2002, 66-82.
- [28] Piechalak, A., Tomaszewska, B., Baralkiewicz, D., Malecka, A.: Accumulation and detoxification of lead ions in legumes, *Phytochemistry*, 60, 2002, 153-162.
- [29] Prezentácia na seminári Phytoremediation, RITS'98, *Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, Kanada*, 1998.
- [30] Pulford, I., D., Watson, C.: Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees – a review, *Environment International*, 29, 2003, 529-540.
- [31] Raskin, I., Kumar, P, B, A., N., Dushenkov, S., Salt, D., E.: Bioconcentration of heavy metals by plants (Review article), *Current Opinion in Biotechnology*, 5, 1994, 285-290.
- [32] Römkens, P., Bouwman, L., Japenga, J., Draaisma, C.: Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils, *Environmental Pollution*, 116, 2002, 109-121.
- [33] Schnoor, J., L.: Phytoremediation, Technology evaluation report, *Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Iowa*, 1997.
- [34] Schwitzguébel, J., P.: Hype or Hope: The Potential of Phytoremediation as an Emerging Green Technology, *Federal Facilities Environmental Journal*, 2002, 109-125.
- [35] Sekhar, K., Ch., Kamala, C., T., Chary, N., S., Balaram, V., Garcia, G.: Potential of *Hemidesmus indicus* for phytoextraction of lead from industrially contaminated soils, *Chemosphere*, 58, 4, 2005, 507-514.
- [36] Smith, L., A., Alleman, B., C., Copley-Graves, L.: Biological Treatment Options, In: Emerging Technology for Bioremediation of Metals, (Means, J.L. and Hinchee, R. E., eds.), *Lewis Publishers, Ohio*, 1994, 1-12.
- [37] Špirochová, I., Punčochářová, J., Kafka, Z., Kubal, M., Soudek, P., Vaněk, T.: Studium kumulace těžkých kovů v rostlinách, *Chemické listy*, 95, 2001, 335-336.
- [38] Wong, M., H.: Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils, *Chemosphere*, 50, 2003, 775-780.
- [39] Wozny, A.: Lead in Plant Cells, *Sorus, Poland*, 1995.
- [40] Wu, J., Hsu, F., C., Cunningham, S., D.: Chelate-Assisted Pb Phytoextraction: Pb Availability, Uptake, and Translocation Constraints, *Environmental Science and Technology*, 33, 1999, 1898-1904.
- [41] Zhao, F., J., Hamon, R., E., McLaughlin, M., J.: Root exudates of the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* do not enhance metal mobilization, *New Physiologist*, 151, 2001, 613-620.