

Fytoremediácie – zelené technológie pre čistejšie životného prostredie

Lišková, D.: Phytoremediations – Green Technologies for a Cleaner Environment. *Životné prostredie*, 2016, 50, 1, p. 59 – 63.

Sustainable environment with the high biodiversity of organisms is one of the most important aspects of the healthy life. Diverse plants have distinct potential to revive the environment through their ability to accumulate, metabolize or stabilize toxic compounds polluting the soil, water or air. This power of plants is utilized for cleaning up the environment through environmentally friendly techniques, phytoremediations. Phytoremediation techniques coupled with the plant diversity represent one of the scopes of the Center of Excellence for Protection and Use of Landscape and Biodiversity of the Operational Programme Research and Development financed by the European Regional Development Fund. The list of results with suitable plants for phytoremediation, their characteristics and behaviour in contaminated milieu will be integrated to the database of workplaces of other partners resulting in complex information system aimed on studies of biodiversity and phytoremediation in the Center of Excellence.

Key words: environment, phytoremediation techniques, plants, pollution

Nadmerné množstvo toxických kovov v pôdach predstavuje riziko pre zdravie človeka, zvieratá, ako aj celkovo pre ekosystém. Toxické kovy sa do prostredia dostávajú a stále sa dostávajú najmä antropogénnou činnosťou. Hoci mnohé z týchto prvkov sú esenciálne a sú súčasťou ekosystémov, pri ich akumulácii a výskyte v nadmerných množstvách sa stávajú škodlivým pre ľudí, zvieratá, rastliny a iné organizmy v kontakte s pôdou alebo podzemnou vodou.

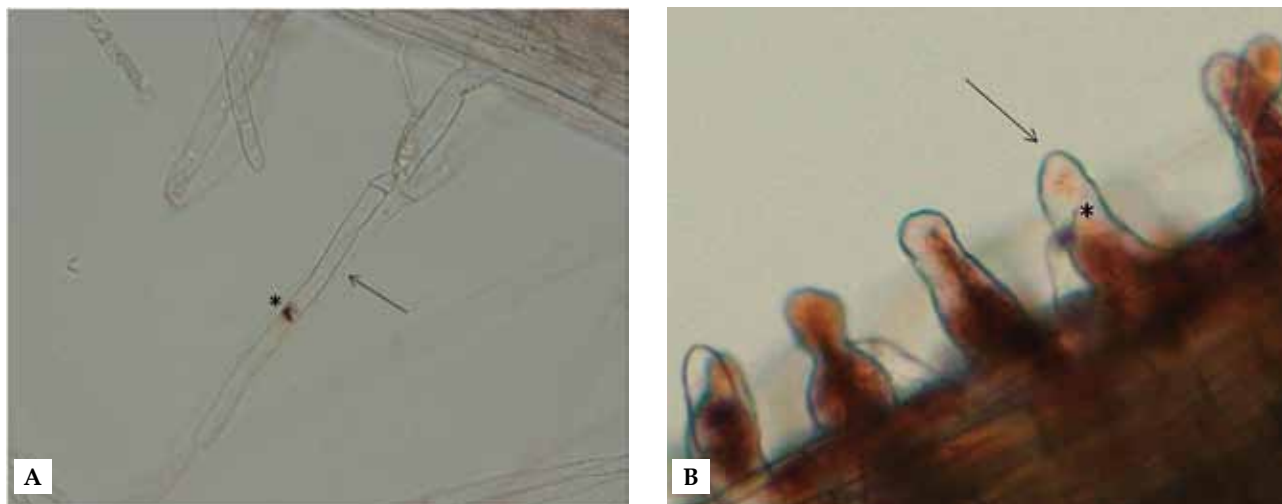
Myšlienka revitalizovať kontaminované životné prostredie pomocou rastlín vznikla po objave hyperakumulátorov kovov – rastlín akumulujúcich toxické kovy vo zvýšenom množstve bez toho, aby to ovplyvnilo ich normálny rast a vývin. Nové postupy na obnovu pôdy, vody a vzduchu s využitím špecifických vlastností rastlín dostali názov *fytozemediácie*. Ich výhodou sú relatívne nízke náklady a možnosť ich využitia v takých prípadoch a na takých miestach, kde sa nedajú využiť iné metódy očisťovania životného prostredia. Fytozemediácie sa dajú využiť tak na organické kontaminanty, ktoré sú metabolizovateľné, na toxické kovy, ktoré sa akumulujú v určitých častiach rastlín, ako aj na rádionuklidy. Pri fytozemediálnych postupoch sa životné prostredie síce čistí pomalšie, ale v prijateľnej miere a s minimálnym rušivým vplyvom na verejnosť blízkeho aj vzdialenejšieho okolia. Rastliny okrem toho zabraňujú priamemu kontaktu ľudí s kontaminovaným substrátom a pre pozitívny vzťah väčšiny ľudí k rastlinám predstavujú základ technológií, ktoré verejnosť prijíma kladne. Fytozemediácie sú zelené technológie, ktoré poukazujú na to, že zemediácia nie je len o čistení, ale aj o vplyve na blízke okolie a o kvalite života. Pri použití a výbere fytozemediáč-

nej techniky je potrebné vychádzať z pôdnych daností a koncentrácie toxického kovu – kontaminanta, požadovanej konečnej koncentrácie kovu – kontaminanta po ukončení fytozemediácie, výberu vhodných rastlín a ich počtu a v neposlednom rade treba počítať s časovým úsekom, v ktorom má k požadovanej zemediácii dôjsť (Ensley, 2000).

Bežne používané technológie na očisťovanie životného prostredia majú v porovnaní s fytozemediáciami niekoľko nevýhod. Napríklad nie je možné selektívne odstrániť toxické kovy, a preto mnohé kontaminované oblasti možno čistiť len veľmi prácny a finančne nákladnými metódami (odkopávanie kontaminovanej zeminy, často ornice, jej prevoz a vysypávanie do hlbokých jám na skládkach a jej zavážanie, stabilizácia pôdy, napr. cementom, alebo čistenie pôdy). Tieto značne invazívne a finančne náročné postupy vyžadujú zložité vybavenie a navyše vytvárajú znečistenie bezprostredného okolia prachom a hlukom, veľmi často vyžadujú aj vylúčenie verejnosti a predstavujú narušenie až deštrukciu ekosystému. Uvedené dôvody v mnohých prípadoch zabraňujú využiť tieto technológie hlavne v prípade veľkých kontaminovaných plôch alebo, naopak, malých obývaných plôch, ktoré by v takomto prípade zostali neošetrené bez porastu, a tým v možnom kontakte s ľuďmi či zvieratami (Raskin, Ensley, 2000).

Fytozemediálne technológie

Fytozemediálne technológie sú založené na využití prirodzených fyziologických a obranných schopností rastlín prežívať v znečistenom prostredí v dobrej



Obr. 1. Lokalizácia kadmia v koreňových vláskoch arábkovky Thalovej (*Arabidopsis thaliana*) a peniažteka modrastého (*Thlaspi caerulescens*) – vizualizácia kadmia ditizónom. Preparáty a foto: Danica Kučerová

Vysvetlivky: V koreňových vláskoch (označenie ←) arábkovky (A) je výskyt kadmia (označenie *) sporadický v porovnaní s koreňovými vláskami peniažteka (B) (zväčšenie 400-krát).

kondícii za súčasného príjmu, akumulácie alebo metabolizácie určitých typov polutantov organickej alebo anorganickej povahy. Podľa spôsobu, akým rastlina v kontaminovanom prostredí pôsobí, fytoremediačné techniky možno rozdeliť na: fytoextrakciu, fytostabilizáciu, rizofiltráciu, odstraňovanie rádionuklidov a fytovolatilizáciu.

Fytoextrakcia

Fytoextrakcia využíva rastliny akumulujúce kovy na transport a akumuláciu kovov z pôdy do koreňov a nadzemných častí rastlín, ktorých zber sa uskutočňuje bežnými poľnohospodárskymi metódami.

Rastlinami, produkujúcimi veľké množstvo biomasy (druhy čeľade *Salicaceae*) aj pri vysokej akumulácii kovu, možno odstrániť významné množstvo kovu z pôdy. Na zber rastlinného materiálu, obsahujúceho kovy, možno použiť obvyklé poľnohospodárske postupy bez toho, aby sa narušila vrchná vrstva pôdy, k čomu dochádza pri tradičných remediačných postupoch. Biomasa sa dá recyklovať a týmto spôsobom znova získať ekonomicky významné kovy. Alternatívne, ak je to potrebné, možno zozbieranú biomasu podrobiť ďalším procedúram minimalizujúcim objem a hmotnosť biomasy (napr. kompostovaniu, lisovaniu, tepelnému pôsobeniu).

Hlavné faktory, ovplyvňujúce fytoextrakciu pôd kontaminovaných kovmi, sú: 1) výber vhodného miesta na fytoextrakciu, 2) rozpustnosť kovu a jeho dostupnosť na príjem rastlinou a 3) schopnosť rastlín akumulovať kovy v častiach alebo pletivách vhodných na zber.

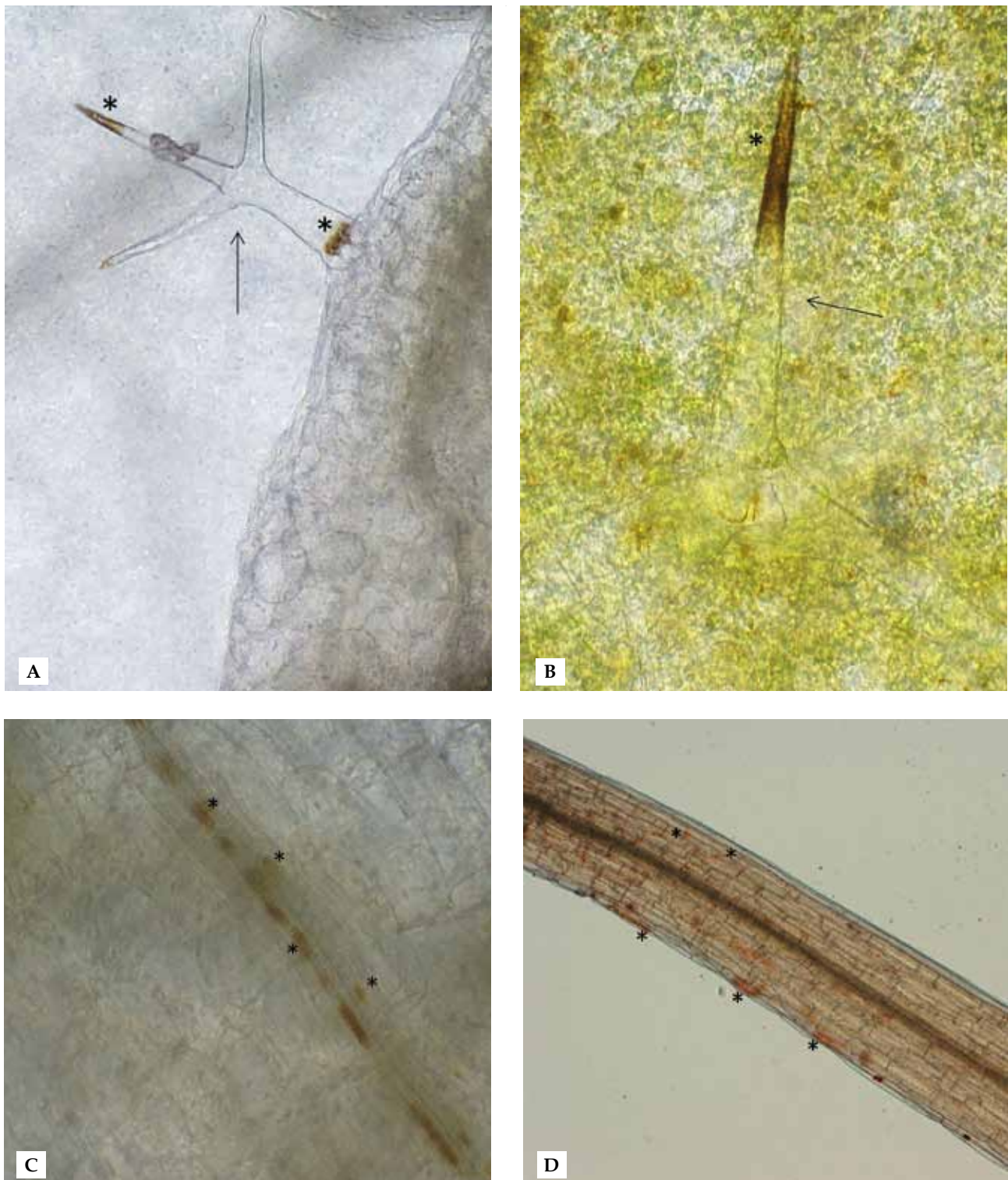
Koncentrácia kovu sa obyčajne stanovuje analýzou frakcie častíc definovaných ako pôda (v priemere

<2 mm). Na poškodených plochách však množstvo materiálu definovaného ako pôda veľmi varíruje, pretože sa tu vyskytujú skaly, štrk a pod. Kovy považované za ľahko dostupné pre rastliny sú tie, ktoré sú rozpustné v pôdnom roztoku alebo sú ľahko uvoľňované alebo rozpúšťané napr. koreňovými exudátmi. Pretože úspech fytoextrakcie závisí od relatívne veľkého množstva rozpusteného kovu na dosiahnutie preukazného príjmu do rastlín, treba podmienky v pôde upraviť na zvýšené požiadavky na rozpustnosť a dostupnosť kovov (napr. úpravou – znížením pH, pridaním chelátov – EDTA a vytvorením chelátových komplexov).

Fytoextrakcia využíva korene rastlín na absorpciu toxických kovov zo substrátu, ich translokáciu a akumuláciu v nadzemných častiach, pletivách rastlín (obr. 1, 2). Výsledkom tejto akumulácie je zníženie kontaminácie substrátu a tiež transfer kovu z pôdy do rastliny. Uhlík v rastlinách môže byť oxidovaný na CO_2 , čím ďalej znižuje objem materiálu, ktorý sa ďalej spracováva, skládkuje alebo recykluje. Fytoextrakčný proces závisí od kovu, ktorý sa najskôr akumuluje v koreňoch rastlín a potom sa translokuje do zberových častí rastliny. Väčšinou sa za zberové časti považujú nadzemné časti rastlín, hoci aj korene niektorých poľnohospodárskych plodín sú vhodné na zber (Blaylock, Huang, 2000).

Fytostabilizácia

Pri fytostabilizácii rastliny stabilizujú kontaminant, znečistenie v pôde, čím sa stáva neškodným. Kontaminovaná pôda a sedimenty sa stabilizujú na danom mieste využitím vegetácie a zoslabením migrácie toxických kontaminantov v pôde. Je to technika, ktorá znižuje riziko pôdnej kontaminácie tým, že sa tvoria



Obr. 2. Lokalizácia kadmia vo výhonkoch arábkovky Thalovej (*Arabidopsis thaliana*) – vizualizácia kadmia ditizónom. Preparáty a foto: Danica Kučerová

Vysvetlivky: A, B – trichómy (označenie ←) na povrchu listov arábkovky Thalovej, vizualizácia kadmia (označenie *) v trichómoch (zväčšenie 400-krát); C – rez hypokotylom arábkovky Thalovej, kadmium je lokalizované v xyléme a xylémových parenchymatických bunkách (označenie *, zväčšenie 400-krát); D – rez hypokotylom arábkovky Thalovej, kadmium je lokalizované v epiderme (označenie *, zväčšenie 100-krát)

nerozpustné zlúčeniny. Menej rozpustné formy kovov sa ťažšie lúhujú cez pôdny profil a zrejme slabšie biologicky interagujú so živými organizmami. Rastliny, napr. palina, turica, niektoré druhy tráv, sa využívajú ako pokryv pôdy, brániaci erózii, redukujú filtráciu vody a slúžia ako bariéra pri kontakte s pôdou. Pri fytostabilizácii nedochádza k odstráneniu kontaminantov z pôdy, ale k redukcii rizika pre zdravie ľudí a ochrane životného prostredia. Tradičná agronomická prax spolu s obnovením vegetácie poškodených oblastí a aplikáciami aditív (napr. vápnením/lúhovaním, použitím kalu, sadry, hnojív, ktoré sú bežnou súčasťou tradičného poľnohospodárstva na zlepšenie fyzikálnych a chemických vlastností pôdy) umožňuje optimalizovať rast rastlín v narušených a suboptimálnych podmienkach.

Pri fytostabilizácii zohrávajú rastliny tiež dôležitú sekundárnu úlohu, fyzikálne stabilizujú pôdy pomocou hustého koreňového systému, čo zabraňuje erózii a vytvára ochranu povrchu pôdy pred kontaktom s človekom alebo zvieratami a pred vplyvom dažďa. Korene rastlín minimalizujú filtráciu vody cez pôdu, čím redukujú ďalšie vymývanie. Tiež slúžia na sorpciu povrchom alebo precipitáciu kovových kontaminantov. Je možné, že niektoré rastliny prispievajú k priamej indukcii tvorby nerozpustných kovových komplexov, napr. na povrchu koreňov.

Ideálne rastliny na fytostabilizáciu, na rozdiel od rastlín využiteľných na fytoextrakciu, musia byť slabými translokátormi kovových kontaminantov do nadzemných častí, konzumovateľných človekom alebo živočíchmi. Mali by byť tolerantné voči kovom v pôde ako aj voči iným východiskovým podmienkam kontaminovaného stanovišťa (napr. pH pôdy, zasolenie, štruktúra pôdy, obsah vody). Tieto rastliny musia rásť rýchlo, aby vytvorili čo najrýchlejšie pokryv pôdy, mali by mať hustý koreňový systém aj rozvetvenú nadzemnú časť, relatívne intenzívnu transpiráciu, aby mohli efektívne odvodniť pôdu. Ďalej by tieto rastliny mali byť nenáročné, dlhoveké alebo so schopnosťou auto-propagácie (Berti, Cunningham, 2000).

Rizofiltrácia

Pri rizofiltrácii korene rastlín rastú v prevzdušnenej vode, zrážajú a koncentrujú toxické kovy z kontaminovaných odpadových vôd. Znečistenie povrchových, ako aj podzemných vôd toxickými kovmi a rádionuklidmi je vážnym environmentálnym problémom. Bolo vyvinutých niekoľko metód na odstránenie toxických kovov z vody na základe výmeny iónov alebo chemickej a mikrobiologickej precipitácie. Takéto technológie by mohli byť efektívne aj pri prevencii znečistenia a v programoch na redukcii odpadu. Preto je v poslednej dobe zvýšený záujem o využitie živých baktérií a ich extraktov, húb a rias na bioremediáciu a čistenie tečúcej vody. Možný mechanizmus odstránenia to-

xických kovov pomocou koreňov zahŕňa ich zrážanie mimo buniek a na bunkovom povrchu, viazanie na povrch buniek, vnútrobunkový príjem, ktorý pokračuje cytoplazmatickou kompartmentáciou, teda ukladaním v rôznych častiach cytoplazmy a/alebo ukladaním do vakuol. Presné mechanizmy presunu nie sú známe a zrejme pre rôzne kovy nebudú rovnaké.

Ideálne rastliny na rizofiltráciu by mali mať schopnosť prijať maximum toxického kovu z kontaminovanej tečúcej vody, malo by sa s nimi ľahko manipulovať, ich údržba by mala byť nízkonákladová a mali by tvoriť minimum sekundárneho odpadu vyžadujúceho likvidáciu. Je tiež žiaduce, aby rastlina využívaná v rizofiltračnom systéme v hydroponii produkovala dostatočné množstvo koreňovej biomasy alebo povrchu. Rizofiltračná rastlina by mala byť schopná akumulovať preukazné množstvo kontaminantu a tolerovať vysoké hladiny toxického kovu (kontaminantu), tiež by mala mať vysoký pomer koreňa k stonke a dobre rásť v kontrolovaných podmienkach.

Po identifikácii vhodnej rastliny na rizofiltráciu v danom prostredí treba skonštruovať špeciálnu rizofiltračnú jednotku na rastliny odstraňujúce toxické kovy. Pretože medzi minerálnymi živinami na podporu rastu rastlín a znečistenou vodou môže dôjsť k interakciám, je dôležité, aby rastliny v kontaminovanej vode mali vytvorený hustý koreňový systém a dostatok živín bez toho, aby sa tieto pridávali do upravovanej vody. Riešením problému môže byť aplikácia živín na list, ale účinnejšie je vytvoriť oddelenú zónu dávkovania živín v časti koreňového systému. Rastliny vhodné pre rizofiltráciu sú napr. slnečnica, kapusta sitinová, tabak, raž, špenát, kukurica (Dushenkov, Kapulnik, 2000).

Využitie rastlín na odstránenie rádionuklidov

Rádioaktívna kontaminácia sa stala vážnym problémom od vzniku a vývinu nukleárnych technológií. Remediacia pôdy, podzemnej vody a odpadovej vody znečistenej rádionuklidmi je podobná ako remediacia inými anorganickými kontaminantmi s rizikom vyplývajúcim z rádioaktivity. Rádionuklidy adsorbované na pôdne častice sa odstraňujú ťažšie. Úspech pri čistení pôdy závisí od použitia špecifických postupov, ktoré môžu zvýšiť rýchlosť prenosu rádionuklidu do formy prijateľnej pre rastlinu bez toho, aby sa rádionuklidy ďalej šírili do prostredia. Najvážnejším faktorom súvisiacim s remediaciou pôdy kontaminovanej rádionuklidmi je to, že s časom sa kontaminant v pôde redistribuuje na základe jeho vlastností a vlastností pôdy. Pretože len malé frakcie rádionuklidov sú dostupné na biologický príjem, a táto kvóta je silne limitovaná časom, zdá sa, že takáto fytoremediácia je realizovateľná v prípade, ak množstvo kontaminantu, ktorý treba odstrániť, nie je veľké. Rastlinné druhy vhodné pre tento spôsob remediácie závisia od typu kontaminantu. Pre

céziu sú to napr. mykorízne rastliny – datelina, sorgum, ďalej to môžu byť repa alebo druhy čeľade *Che-nopodiaceae*, ktoré sú vhodné aj na remediáciu stroncia. Pre remediáciu uránu sú to kultivary slnečnice, ale aj lesné dreviny – smrek alebo niektoré druhy duba, či borievky (Negri, Hinchman, 2000).

Fytovolatilizácia

Rastliny pri fytovolatilizácii extrahujú prchavý kov (ortuť, selén) z pôdy a volatilizujú, resp. uvoľňujú ho cez listy. Ako príklad volatilizácie uvedieme selén, ktorý je jedným z najväčších kontaminantov životného prostredia. Hoci selén je mikroelement pre človeka aj zvieratá, už mierne zvýšenie jeho hladiny sa prejavuje toxicky. Fytoremediácie ponúkajú lacnú a pre životné prostredie prijateľnú technológiu na revitalizáciu pôdy a vody kontaminovanej selénom. Fakt, že vodné (pálka) aj suchozemské rastliny (rôzne druhy tráv, stavikrv) sú schopné bioakumulovať selén v pletivách na takú hladinu, ktorá je vyššia ako v kontaminovanej vode a pôde, sa využíva pri dekontaminácii prostredia zamoreného selénom. Prenos selénu z pôdy a vody do rastlinných pletív silne závisí od jeho chemickej povahy. Všeobecne viac oxidované formy selénu sú dobre rozpustné, a preto ľahko dostupné pre rastliny, pričom redukované anorganické formy alebo elementárny selén sú menej biologicky dostupné. Metódou umelo vytvorených mokradí možno odstrániť signifikantný podiel selénu jeho volatilizáciou do atmosféry pomocou vodných, príp. mokradných rastlín a mikroorganizmov. Tento typ odstraňovania selénu má viacero výhod. Medzi najdôležitejšie patrí to, že sa minimalizuje odbúravanie selénu v sedimente a rastlinných pletivách, kde selén prechádza do potravného reťazca. Okrem odstránenia selénu z určitej oblasti volatilizácia má tú výhodu, že detoxikuje anorganický selén, pretože hlavná zložka prchavej formy selénu (DMSe – dimethylselenid) má 500- až 600-krát nižšiu toxicitu ako anorganická forma, čiastočne ukladaná do sedimentu alebo akumulovaná rastlinami (De Souza et al., 2000).

* * *

Fytoremediácie môžu predstavovať ekonomicky výhodné riešenie na čistenie kontaminovaných oblastí. Mnohé z týchto technológií boli cielene vyvinuté na komercializáciu. Súbor vhodných rastlín, ich charakteristiky a prejavy v kontaminovanom prostredí budú súčasťou databázy pre všetkých partnerov projektu *Centra excelentnosti pre ochranu a využívanie krajiny a biodiverzitu*, ktoré vzniklo v roku 2009 na Ústave krajinej ekológie Slovenskej akadémie vied v rámci Operačného programu Výskum a vývoj (na podporu sietí excelentných pracovísk výskumu a vývoja ako pilierov rozvoja regiónu v Bratislavskom kraji). Aj pre piatich partnerov Centra excelentnosti – Botanický ústav SAV,

Ústav zoológie SAV, Ústav hydrológie SAV, Ústav molekulárnej biológie SAV, Chemický ústav SAV a Prírodovedeckú fakultu Univerzity Komenského – sa tak vytvorí komplexný informačný systém na štúdium biodiverzity a fytoremediácií.

Tento článok bol vytvorený v rámci projektu Centrum excelentnosti pre ochranu a využívanie krajiny a biodiverzitu na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj, financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- Berti, W. R., Cunningham, S. D.: Phytostabilization of Metals. In: Raskin, I., Ensley, B. D. (eds.): *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plant to Clean Up the Environment*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 71 – 88.
- Blaylock, M. J., Huang, J. W.: Phytoextraction of Metals. In: Raskin, I., Ensley, B. D. (eds.): *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plant to Clean Up the Environment*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 53 – 70.
- De Souza, M. P., Pilon-Smits, E. A. H., Terry, N.: The Physiology and Biochemistry of Selenium Volatilization by Plants. In: Raskin, I., Ensley, B. D. (eds.): *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plant to Clean Up the Environment*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 171 – 190.
- Dushenkov, S., Kapulnik, Y.: Phytofiltration of Metals. In: Raskin, I., Ensley, B. D. (eds.): *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plant to Clean Up the Environment*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 89 – 106.
- Ensley, B. D.: Rationale for Use of Phytoremediation. In: Raskin, I., Ensley, B. D. (eds.): *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plant to Clean Up the Environment*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 3 – 11.
- Negri, M. C., Hinchman, R. R.: The Use of Plants for the Treatment of Radionuclides. In: Raskin, I., Ensley, B. D. (eds.): *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plant to Clean Up the Environment*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 107 – 132.
- Raskin, I., Ensley, B. D. (eds.): *Phytoremediation of Toxic Metals. Using Plant to Clean Up the Environment*. New York (USA): John Wiley & Sons, Inc., 2000, 304 p.

RNDr. Desana Lišková, PhD., desana.liskova@savba.sk
Chemický ústav SAV, Dúbravská cesta 9, 845 38 Bratislava