

Grzegorz Żurek

*Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Radzikowie*

*Włodzimierz Majtkowski*

*Krajowe Centrum Roślinnych Zasobów Genowych, Ogród Botaniczny  
w Bydgoszczy*

## **ROŚLINY ALTERNATYWNE W FITOEKSTRAKCJI METALI CIĘŻKICH Z OBSZARÓW SKAŻONYCH**

### **Streszczenie**

Metale ciężkie to pierwiastki o gęstości powyżej  $4,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , występujące naturalnie w skorupie ziemskiej. Niektóre z nich są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania organizmów żywych (np. miedź, cynk), a np. kadm, ołów, rtęć czy arsen są przyczyną wielu chorób. Do nadmiernej kumulacji tych pierwiastków w glebach i roślinach doprowadził rozwój przemysłu i komunikacji oraz nieracjonalne stosowanie środków ochrony roślin i nawozów mineralnych. Najbardziej efektywną metodą oczyszczania środowiska zanieczyszczonego metalami ciężkimi jest pozyskiwanie tych substancji z gleby za pomocą roślin, które są w stanie rosnąć w warunkach wysokiego stężenia toksycznych substancji i akumulować je w swoich organizmach. Z uwagi na wielostronne zastosowanie (rekultywacja i stabilizacja terenów skażonych, fitoekstrakcja metali ciężkich oraz wykorzystanie do produkcji bioenergii) na szczególne zainteresowanie zasługują: kostrzewa trzcinowa, mozga trzcinowata, rajgras wyniosły, perz wydłużony, proso różgowate, palczatka Gerarda, miskant cukrowy, sałata kompasowa, bylica zwyczajna, nawłocie: kanadyjska i późna. W opracowaniu niniejszym przedstawiono możliwe do zrealizowania scenariusze fitoekstrakcji metali ciężkich z gleb skażonych oraz późniejszej utylizacji roślin dla wycofania szkodliwych substancji.

**Słowa kluczowe:** biomasa, bioremediacja, metale ciężkie, rośliny energetyczne

### **Wstęp**

Metale ciężkie to pierwiastki o masie atomowej pomiędzy 63,4 a 200,59 oraz gęstości powyżej  $4,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , występujące naturalnie w skorupie ziemskiej. Do grupy tej zaliczają się: cynk (Zn), mangan (Mn), ołów (Pb), rtęć (Hg), miedź (Cu), nikiel (Ni), stront (Sr), bar (Ba), kadm (Cd), kobalt (Co), molibden (Mo) oraz metale lekkie – glin (Al) i półmetale – arsen (As) [Kabata-

Pendias, Pendias 1999; Baranowska-Morek 2003]. Niektóre z tych pierwiastków są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania organizmów żywych (np. Cu, Zn), inne zaś – jak np. Cd, Pb, As – są przyczyną wielu chorób [Sękara 2005]. Problemy zdrowotne, związane z długotrwałą ekspozycją organizmów ludzi bądź zwierząt na działanie metali ciężkich mogą dotyczyć zaburzeń centralnego systemu nerwowego (As), upośledzeń umysłowych (Hg), schorzeń nerek i wątroby (Hg, Cd), efektów skórnych (As).

W glebach pierwiastki te występują powszechnie na skutek uwalniania ze skał macierzystych w procesach glebotwórczych oraz podczas wybuchów wulkanów i ich naturalny poziom nie stanowi zagrożenia dla ekosystemów. Większe zagrożenie dla produkcji roślinnej występuje na terenach uprzemysłowionych oraz w pobliżu dróg, gdzie wraz ze spalinami, ściekami lub pyłami przemysłowymi pobierane są przez rośliny i włączane do łańcucha pokarmowego [Domagała-Świątkiewicz 2003].

Do nadmiernego nagromadzenia metali ciężkich w glebach i roślinach doprowadził rozwój przemysłu i komunikacji, nieracjonalne stosowanie w rolnictwie środków ochrony roślin, nawozów mineralnych i organicznych (np. wytwarzane z odpadów komunalnych komposty i osady ściekowe). Ponad 90% ogólnej zawartości kadmu, miedzi, cynku i ołowiu w glebach oraz osadach rzek i innych zbiorników wodnych pochodzi z zanieczyszczeń antropogenicznych [Kyzioł 1994].

Szczególnie wysoką zawartość metali ciężkich w glebie stwierdzono w rejonach sąsiadujących z hutami [Kabała, Singh 2001] i kopalniami [Roszyk, Szerszeń 1988; Pasieczna 2002; Rosada 2007]. W poprzednich latach zwłaszcza pestycydy były głównymi nośnikami metali ciężkich wchodzących w skład substancji czynnej (np. związki arsenu, miedzi, rtęci, cynku lub ołowiu) [Terelak i in. 2000].

Celem niniejszego opracowania jest zaprezentowanie metod stosowanych w oczyszczaniu gleb z metali ciężkich, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania roślin oraz możliwych sposobów utylizacji substancji szkodliwych.

### **Metody stosowane w procesach oczyszczania gleb skażonych metalami ciężkimi**

Istnieje wiele metod oczyszczania środowiska skażonego metalami ciężkimi. Tradycyjne metody fizyko-chemiczne wymagają znacznych nakładów finansowych i najczęściej wiążą się z całkowitą wymianą skażonej ziemi. Mogą one polegać na działaniu wysoką temperaturą (witryfikacja, granulacja - substancje szkodliwe nie podlegają dalszemu wymywaniu z gleby), scalaniu (cementowaniu) gleby bądź wypłukiwaniu szkodliwych substancji. Koszty metod konwencjonalnych szacowane są na 10-1000 USD za 1 m<sup>3</sup> gleby [Ghosh, Singh 2005].

O wiele tańsze (ok. 0.05 USD za 1 m<sup>3</sup> gleby) oraz bardziej efektywne są metody oczyszczania gleb za pomocą roślin [Hinchman i in. 1999; Ghosh, Singh 2005; Rosada 2007]. Stopień tzw. bioakumulacji (nagromadzenia szkodliwych substancji w roślinie) zależy od wielu czynników, jak np. zawartość metali ciężkich w glebie, zawartość materii organicznej, wilgotność gleby, jej pH oraz gatunek rośliny. Istnieje grupa roślin, które wykształciły szereg mechanizmów umożliwiających akumulację metali ciężkich w tkankach, nie szkodząc jednocześnie samym roślinom [Porębska, Ostrowska 1999; Wierzbicka 2002; Baranowska-Morek 2003; Ghosh, Singh 2005; Arbatowska 2006].

Naturalna zdolność niektórych gatunków roślin do akumulacji metali ciężkich wykorzystywana jest w procesie oczyszczania środowiska (tzw. *fitoremediacja*) [Salt i in. 1995; Susurla i in. 2002]. Znane są gatunki gromadzące 1-2% metali w tkankach (tzw. *hiperakumulatory*), np. tobołki (*Thlaspi* sp.). Praktyczna przydatność hiperakumulatorów jest jednak ograniczona niewielkimi plonami biomasy tych gatunków, co w efekcie uniemożliwia efektywne wykorzystanie ich w bioremediacji. Rośliny mające skutecznie pobierać metale ciężkie powinny odznaczać się: szybkim wzrostem, dużym plonem biomasy i łatwością jego zbioru, głębokim systemem korzeniowym oraz akumulowaniem dużych ilości metali ciężkich w częściach nadziemnych [Gruca-Królikowska, Waclawek 2006].

W zależności od środowiska i charakteru procesu Gwóźdź i Kopyra [2003] wyróżniają kilka technologii fitoremediacji:

- *fitoekstrakcja* – usuwanie metali ciężkich dzięki akumulacji w nadziemnych częściach roślin,
- *fitostabilizacja* – unieruchamianie metali w glebie i zmniejszenie ich dostępności w środowisku,
- *fitostymulacja* - wspomaganie przez rośliny naturalnie występujących procesów degradacji mikrobiologicznej w ryzosferze,
- *fitodegradacja* – rozkład substancji organicznych przez rośliny i związane z nimi mikroorganizmy,
- *fitowolatyzacja* – przeprowadzenie zanieczyszczeń w stan lotny.

Najbardziej rozpowszechnioną i opłacalną techniką jest *fitoekstrakcja*, stosowana do usuwania z gleby metali ciężkich i pierwiastków radioaktywnych. Efektywność tego procesu zależy od wyboru rośliny, a do najbardziej wydajnych należą: gorczyca, tobołki, wiele gatunków traw i roślin motylkowatych. Wadą niektórych gatunków (np. tobołki) jest bardzo niski plon biomasy. Efektywność procesu fitoekstrakcji zależy od ilości wody (wraz z rozpuszczonymi w niej substancjami, m.in. metalami ciężkimi), przechodzącej przez roślinę w jednostce czasu. Dlatego takie gatunki, jak np. wierzba, są szczególnie predysponowane do tego zastosowania. Przykłady innych gatunków roślin, wykazujących zdolność do pobierania znacznych ilości m.c. z gleby, przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie zdolności do pobierania metali ciężkich z gleb przez wybrane gatunki roślin (na podstawie literatury)

Table 1. Comparison of abilities to excavate heavy metals from the soils by selected plant species (literature survey)

Rodzaj, gatunek	Zdolność do pobierania m.c. z gleby (g/ha)			
	Zn	Cu	Pb	Cd
<i>Lactuca serriola</i>	20 600	b.d.	b.d.	420
<i>Artemisia vulgaris</i>	8 000	1 620	340	720
<i>Salix viminalis</i>	b.d.	b.d.	b.d.	217
<i>Salix caprea</i>	2 340	76	242	41
<i>Betula pendula</i>	2 480	27	285	8
<i>Deschampsia cespitosa</i>	11 500	b.d.	1 600	470
<i>Chenopodium album</i>	13 200	620	200	b.d.

Zawartość metali ciężkich w roślinach może być zmienna w zależności od zdolności przemieszczania się toksycznych jonów z gleby do pędów. Jony metali ciężkich można pod tym względem uszeregować zgodnie z ich malejącą ruchliwością: Cd > Zn > Ni > Cu > Pb [Starck 2002].

Rośliny najczęściej wykorzystywane w procesie bioakumulacji należą do wielu rodzin, z których na szczególną uwagę zasługują: krzyżowe (*Cruciferae*), trawy (*Poaceae*), motylkowate (*Papilionaceae*), złożone (*Asteraceae*), wierzbowate (*Salicaceae*) oraz goździkowate (*Caryophyllaceae*).

Z uwagi na wielostronne zastosowanie tzw. gatunków alternatywnych (rekultywacja i stabilizacja terenów skażonych, bioakumulacja metali ciężkich oraz wykorzystanie do produkcji bioenergii) na szczególną uwagę zasługują: z rodziny traw - kostrzewa trzcinowa (*Festuca arundinacea* Schreb.), mozga trzcinowata (*Phalaris arundinacea* L.), rajgras wyniosły (*Arrhenatherum elatius* (L.) P.B. ex J. et C. Presl), perz wydłużony (*Thinopyrum elongatum* (Host) D.R. Dewey), proso różgowate (*Panicum virgatum* L.), palczatka Gerarda (*Andropogon gerardii* Vitm.), miskant cukrowy (*Miscanthus sacchariflorus* Hack.) oraz z rodziny złożonych: sałata kompasowa (*Lactuca serriola* L.), bylica zwyczajna (*Artemisia vulgaris* L.), nawłocie: kanadyjska (*Solidago canadensis* L.) i późna (*S. serotina* Aiton).

### Utylizacja biomasy roślinnej skażonej metalami ciężkimi

Kolejną, bardzo istotną czynnością po zbiorze biomasy roślinnej jest unieszkodliwienie zawartych w niej szkodliwych substancji. Ponieważ nie można brać pod uwagę jakiegokolwiek wykorzystania żywieniowego takiej roślinno-

ści to pozostaje do dyspozycji jedynie przekształcenie biomasy na energię z jednoczesnym odzyskaniem metali ciężkich w procesie spalania, fermentacji, obróbki termochemicznej czy gazyfikacji.

W pierwszym etapie należy zredukować objętość biomasy przez np. kompostowanie czy sprasowanie, z zachowaniem środków ostrożności ograniczających do minimum „ucieczkę” metali ciężkich do środowiska. Redukcja objętości ma głównie ograniczać koszty transportu do miejsca przerobu. W trakcie procesu przerobu biomasy na energię należy również zachować środki ostrożności, zabezpieczające przed niekontrolowanym przedostaniem się szkodliwych substancji do środowiska. Dla przykładu w procesie spalania należy oczyszczać gazy spalinowe, w procesie fermentacji przygotowującym biomasę do biogazowni – zabezpieczać podłoże przed wyciekami zanieczyszczonymi metalami ciężkimi.

Pozostałości po procesach przerobu (popioły, szlamy, itp.) można przechowywać na specjalnych składowiskach lub „zwrócić” do zakładu przerabiającego rudy metali. Taka „zwrotna” substancja nosi nazwę ‘biorudy’ (ang. *bio-ore*). Główną zaletą tej metody jest znaczna redukcja masy substancji szkodliwych. Dla przykładu plon rzepaku wykorzystanego w procesie fitoekstrakcji miedzi (a zatem nieprzydatnego do jakichkolwiek celów spożywczych) może sięgnąć np. 6 ton z hektara. Zawartość miedzi w takim plonie może wynosić 60-90 kg. Z kolei współspalanie skażonej biomasy roślinnej z węglem może zredukować ilość np. ołowiu o 90% i przeprowadzić ten pierwiastek do popiołu [Ghosh, Singh 2005].

### Posumowanie

Technologie fitoekstrakcji metali ciężkich są ciągle na etapie badań, doboru gatunków, elementów agrotechniki i metod późniejszego unieszkodliwienia niepożądanych substancji. Najistotniejszym zadaniem dla przyszłych prac badawczych, oprócz doboru najwydajniejszych gatunków roślin, jest określenie efektywnych metod neutralizacji szkodliwych substancji w trakcie procesu przerobu biomasy roślinnej na energię.

Istnieje szereg niewyjaśnionych do końca szczegółów z dziedziny technologii przerobu skażonej biomasy, jak również z zakresu logistyki i organizacji procesu fitoekstrakcji. Pomimo wieloletnich tradycji w dziedzinie badań nad zdolnością roślin do akumulacji metali ciężkich, nowe zastosowania gatunków o znaczym potencjale w zakresie produkcji biomasy wymagają całkowicie nowego spojrzenia na te zagadnienia.

### Bibliografia

Arbatowska A. 2006. *Armeria maritima* - gatunek roślin przystosowany do wzrostu na glebach skażonych metalami ciężkimi. Kosmos, Nr 55(2-3), s. 217-227

- Baranowska-Morek A. 2003. Roślinne mechanizmy tolerancji na toksyczne działanie metali ciężkich. Kosmos, Nr 52(2-3), s. 283-295
- Domagała-Świątkiewicz I. 2003. Jak zapobiegać skażeniu roślin metalami ciężkimi? Działkowiec, Nr 2, s. 630: 58-59
- Ghosh M., Singh S.P. 2005. A review of phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. Applied Ecology and Environmental Research, Nr 3(1), s. 1-18
- Gruca-Królikowska S., Waclawek W. 2006. Metale w środowisku. Cz. II. Wpływ metali ciężkich na rośliny. Chemia. Dydaktyka. Ekologia. Metrologia, Nr 11, 1-2, s. 41-56
- Gwóźdź E. A., Kopyra M. 2003. Reakcja komórek roślinnych na metale ciężkie – aspekty biotechnologiczne. Biotechnologia, Nr 3, 62, s. 107-123
- Hinchman R. R., Negri C. M., Gatliff E. G. 1999. Phytoremediation: using green plants to clean up contaminated soil, groundwater and wastewater. Agronne Nat.Lab., Applied Natural Sciences, Internet
- Kabała C., Singh B.R., 2001. Fractionation and mobility of copper, lead, and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter. Journal of Environmental Quality, Nr 30, s. 485-492
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 1999. Biogeochemia pierwiastków śladowych. PWN, Warszawa
- Kyzioł J. 1994. Minerale ilaste jako sorbenty metali ciężkich. Wyd. PAN, Wrocław-Warszawa-Kraków
- Pasieczna A. 2002. Zawartość cynku w glebach wybranych miast w Polsce. Zeszyty Naukowe Komitetu "Człowiek i Środowisko" PAN, Nr 33, s. 203-212
- Porębska G., Ostrowska A. 1999. Heavy metal accumulation in wild plants: implications for phytoremediation. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 8, no. 6, s. 433-442
- Rosada J. 2007. Progress in Plant Protection - Postępy w Ochronie Roślin, Nr 47(1), s. 119-127
- Roszyk E., Szerszeń L., 1988, Nagromadzenie metali ciężkich w warstwie ornej gleb stref ochrony sanitarnej przy hutach miedzi. Roczniki Gleboznawcze T. XXXIX, Nr 4, s. 135-158
- Salt D.E. Blaylock M., Nanda Kumar P.B.A., Dushenkov D., Enslay B., Chet I., Raskin I. 1995. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. Biotechnology, Nr 13, s. 468-474
- Sękara A. 2005. Metale ciężkie w środowisku. Hasło Ogrodnicze, Nr 6: [www.ho.haslo.pl/article.php?id=2297](http://www.ho.haslo.pl/article.php?id=2297)

Susurla S., Medina V.F., McCutcheon S.C. 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering*, Nr 18, s. 647-658

Starck Z. 2002. Fizjologiczne podstawy produktywności roślin. W: Kopcewicz J., Lewak S. (red.) *Fizjologia roślin*. Wydawnictwo PWN, Warszawa, s. 679-706

Terelak H., Motowicka-Terelak T., Stuczyński T., Pietruch C. 2000. Pierwiastki śladowe (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) w glebach użytków rolnych Polski. IOŚ, Warszawa

Wierzbicka M. 2002. Przystosowania roślin do wzrostu na hałdach cynkowo-olowiowych okolic Olkusza. *Kosmos*, 51, Nr 2(255), s. 139-150