

Piotr Mirosław Szulc *, Mirosław Kobierski **

PRZYDATNOŚĆ WYDMUCHRZYCY PONTYJSKIEJ (*ELYMUS ELONGATUS* VAR. *PONTICUS*) W OCZYSZCZANIU GLEB ZANIECZYSZCZONYCH MIEDZIĄ, OŁOWIEM I KADMEM

THE UTILITY OF *ELYMUS ELONGATUS* VAR. *PONTICUS* IN PHYTOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH COPPER, LEAD AND CADMIUM

Słowa kluczowe: miedź, ołów, kadm, fitoremediacja.

Key words: copper, lead, cadmium, phytoremediation.

*The experimental materials were the plant organs of *Elymus elongatus* var. *ponticus* from a pot experiment carried out during one growing season. Effects of the increased level of copper, lead and cadmium fertilization on the content of metals in plants were tested.*

*Increased copper content in soil caused a decrease in fresh weight yield of *Elymus elongatus* var. *ponticus*, and at the same time, an increase in the concentration of this metal in plants.*

Along with an increase of lead nitrate rate applied, a significant increase in lead concentration in plants was observed, whereas a growing lead content in soil did not affect significantly the height of fresh weight yield of the tested plants.

*Cadmium applied at a rate of 9 mg·kg⁻¹ soil resulted in a significant decrease in fresh weight yield of *Elymus elongatus* var. *ponticus*; therefore this plant should not be used in phytoremediation of soils contaminated with this metal.*

* Dr inż. Piotr Mirosław Szulc – Katedra Fizjologii i Podstaw Biotechnologii Roślin, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy, ul. Bernardyńska 6, 85-029 Bydgoszcz; tel.: 52 374 95 04; e-mail: szulc@utp.edu.pl

** Dr inż. Mirosław Kobierski – Katedra Gleboznawstwa i Ochrony Gleb, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. J.J. Śniadeckich w Bydgoszczy ul. Bernardyńska 6, 85-029 Bydgoszcz; tel.: 52 374 95 51; e-mail: kobierski@utp.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Większość gleb Polski charakteryzuje naturalna zawartość metali ciężkich, natomiast gleby zanieczyszczone tymi metalami stanowią zaledwie 0,15% użytków rolnych. Antropogeniczne źródła pierwiastków śladowych to przede wszystkim odpady przemysłowe, ścieki komunalne, nawozy i środki ochrony roślin, które w największym stopniu zanieczyszczają środowisko [Terelak i in. 2000]. Ze względu na brak bariery biologicznej mogą gromadzić się w roślinach, stanowiąc bezpośrednie zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt [Euripidou i Murray 2004]. Toksyczne działanie zanieczyszczeń powoduje często zawartość w nich jednocześnie kilku metali, ponieważ sumuje się ich szkodliwe oddziaływanie [Ranjard i in. 2006]. Wśród technik przeciwdziałających nadmiernemu włączaniu się metali ciężkich z zanieczyszczonych gleb do ogólnego obiegu w środowisku wskazać można wiele fizycznych i chemicznych metod rekultywacji.

W metodach tych wykorzystywane są różne postacie wapna, krzemianów i glinokrzemianów, polimerów i innych substancji dodawanych do gleby [Paluszek i Żembrowski 2008].

W pobieraniu składników pokarmowych, oprócz gatunku i odmiany rośliny, najważniejszą rolę odgrywają właściwości gleby (pH, zawartość próchnicy, pojemność sorpcyjna) oraz forma chemiczna i stężenie pierwiastka [Baran i in. 2002, Strączyński i Strączyńska 2004]. Zawartość metali ciężkich w glebach, szczególnie łatwo dostępnych dla roślin, może być przyczyną ich nadmiernej koncentracji w roślinach, co prowadzi do zaburzeń w ich wzroście i rozwoju [Ciećko i Wyszowski 1998].

W przypadku mniejszych stężeń metali ciężkich w glebie skuteczną metodą rekultywacji może być fitoremediacja [Susarla i in. 2002]. Jedną z najbardziej popularnych metod jest fitoekstrakcja, w której wykorzystuje się zdolność roślin, tzw. hiperakumulatorów, do gromadzenia szkodliwych zanieczyszczeń w swych organach nadziemnych. Wykorzystywana jest w tej metodzie zdolność niektórych gatunków roślin do pobierania dużych ilości zanieczyszczeń z gleby lub wody i gromadzenia w swych tkankach w znacznych ilościach [Ensley 2000, Maciejewska i Pusz 2003]. Do takich hiperakumulatorów należą:

- 1) gorczyca sarepska (*Brassica juncea*),
- 2) tobołki (*Thlaspi sp.*),
- 3) szarłat szorstki (*Amaranthus retroflexus*)
oraz
- 4) grubosz Helmsa *Crassula helmsii* [Salt i in. 1995, Mijovilovich i in. 2009].

W wielu ośrodkach badawczych prowadzone są także badania nad nowymi gatunkami roślin, które mogą być wykorzystane w fitoremediacji [Szulc i in. 2008, Küpper i in. 2009]. Jedną z takich roślin może być *Elymus elongatus* var. *ponticus*, która jest wieloletnią silnie rosnącą trawą kępową, dającą wysoki plon, wynoszący 10–15 ton·ha⁻¹s.m. Duża zawartość włókna surowego, wynosząca 40,71% w suchej masie, może znacząco wpływać na zdolność pobierania metali ciężkich [Majtkowski i Piłat 2009].

Celem niniejszych badań była ocena przydatności wydmuchrzycy pontyjskiej do fitoremediacji gleb zanieczyszczonych miedzią, kadmem i ołowiem. Roślinę tę cechuje duża tolerancja na okresowy niedobór wody w glebie, może być zatem uprawiana na glebach suchych i lekko zasolonych [Duke 1983].

2. MATERIAŁ I METODY BADAŃ

W hali wegetacyjnej przeprowadzono w 2008 r. wazonowe doświadczenie w czterech powtórzeniach, w układzie losowym. Wazony wypełniono 10 kg gleby, pobranej z poziomu orno-próchnicznego czarnej ziemi. Do gleby wprowadzono sole następujących metali ciężkich:

- 1) miedzi w formie $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, w dawkach: 300,0; 600,0 i 900,0 mg $\text{Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby oraz
- 2) ołowiu w postaci $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ w dawkach: 300,0; 600,0 i 900,0 mg $\text{Pb} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby, a także
- 3) kadmu w dawkach 3,0; 6,0 i 9,0 mg $\text{Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ gleby w postaci $\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Kontrolę stanowiły wazony z glebą niezanieczyszczoną metali ciężkimi. Po upływie dwóch tygodni do każdego z wazonów wysiano 10 nasion wydmuchrzycy pontyjskiej (*Elymus elongatus* var. *Ponticus*). Połowa pojemność wodna gleby, mierzona tensjometrycznie, utrzymywana była na poziomie 70% przez cały okres wegetacji roślin.

Po upływie 130 dni ścięto część nadziemną roślin, a zebrany materiał zważono, a następnie wysuszone do powietrznie suchej masy. W dalszej kolejności materiał roślinny suszono w temperaturze 105°C, aż do uzyskania stałej suchej masy.

Przygotowany materiał do badań, po rozdrobieniu i homogenizacji, poddano dygestii mikrofalowej (stężony HNO_3). Po całkowitym roztworzeniu oznaczono w poszczególnych próbkach zawartość miedzi, ołowiu i kadmu metodą atomowej spektrometrii emisyjnej, z indukcyjnie sprzężoną plazmą (ICP).

Podstawowe analizy gleb wykonano zgodnie z obowiązującymi metodami. Całkowitą zawartość metali oznaczono po mineralizacji w kwasach HF i HClO_4 [Crock i Severson 1980]. Zawartość form DTPA ekstrahowanych metali ciężkich oznaczono metodą Lindsay'a i Norvell'a [1978]. Zawartość poszczególnych pierwiastków po ekstrakcji oznaczono metodą atomowej spektroskopii absorpcyjnej ASA – spektrometrem Philips PU 9100X. Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej. Ocenę istotności różnic między średnimi obiektowymi wykonano z zastosowaniem testu Tukey'a (STATISTICA 8.0).

3. WYNIKI

Gleba użyta w doświadczeniu wazonowym to piasek gliniasty o odczynie obojętnym, zasobna w składniki pokarmowe dla roślin. Całkowita zawartość metali oraz ich form eks-

trahowanych roztworem DTPA była typowa dla gleb niezanieczyszczonych metalami ciężkimi (tab. 1a, 1b).

Tabela 1a. Wybrane właściwości gleby kontrolnej przed doświadczeniem

Table 1a. Chosen properties of control soil before experiments

pH KCl	C	N	C/N	Całkowita zawartość						Ekstrahowane roztworem DTPA				
				Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb
	g·kg ⁻¹			mg·kg ⁻¹						mg·kg ⁻¹				
6,2	21,0	1,8	11,7	11,2	39,8	348,2	8679,3	19,6	0,3	1,9	3,2	26,5	55,4	0,2

Tabela 1b. Wybrane właściwości gleby kontrolnej po przeprowadzeniu doświadczenia

Table 1b. Chosen properties of control soil after experiments

pH KCl	C	N	C/N	Całkowita zawartość						Ekstrahowane roztworem DTPA				
				Cu	Zn	Mn	Fe	Pb	Cd	Cu	Zn	Mn	Fe	Pb
	g·kg ⁻¹			mg·kg ⁻¹						mg·kg ⁻¹				
6,0	20,0	1,6	12,6	10,9	40,4	345,1	8789,2	19,7	0,3	1,6	3,0	23,9	49,4	0,2

Wyniki wszystkich oznaczeń uśredniono z czterech powtórzeń poszczególnych wazonów. Zaobserwowano, że wzrastające dawki miedzi powodowały zwiększenie jej zawartości w nadziemnych częściach roślin. Największą zawartość miedzi, wynoszącą 26,4 mg·kg⁻¹ s.m., stwierdzono w wydmuchrzyce zebranej z podłoża, do którego dodano 900,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby (tab. 2). Najmniejsza zawartość miedzi, tj. 13,3 mg Cu·kg⁻¹ s.m., charakteryzowała rośliny z wazonów, do których dodano 300,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby. Zawartość ta była nieistotna w porównaniu z roślinami kontrolnymi, które zawierały 11,9 mg Cu·kg⁻¹ s.m.

Tabela 2. Zawartość metali w roślinach *Elymus elongatus* var. *ponticus* z wazonów

Table 2. Concentration of metals in plants *Elymus elongatus* var. *ponticus* with the pots

Parametr	Gleba kontrolna			Dawki metali ciężkich (mg·kg ⁻¹ gleby)								
	Cu	Pb	Cd	Cu			Pb			Cd		
				300,0	600,0	900,0	300,0	600,0	900,0	3,0	6,0	9,0
zawartość (mg·kg ⁻¹) s.m./d. m.	11,9	<0,2	<0,2	13,3	18,6	26,4	18,5	19,3	23,7	<0,2	<0,2	6,1
NIR _{0,05}				3,08			1,94			0,77		

Stwierdzono, że dawki 600,0 i 900,0 mg Cu·kg⁻¹ miedzi powodowały istotne zwiększenie zawartości tego metalu w roślinach w porównaniu do stężenia miedzi w wydmuchrzyce z wazonów kontrolnych i nawożonych 300,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby (tab. 2). Zastosowane dawki 300,0 i 600,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby nie wpłynęły na plon świeżej masy badanej trawy. Dawka 900,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby spowodowała natomiast istotne zmniejszenie plonu części nadziemnych wydmuchrzyce – uzyskany plon był mniejszy o 29,4 mg·kg⁻¹s.m. (tab. 3).

Tabela 3. Świeża masa części nadziemnych *Elymus elongatus* var. *ponticus* z wazonów**Table 3.** The amount of green tops of *Elymus elongatus* var. *ponticus* with the pots

Parametr	Gleba kontrolna	Dawki metali ciężkich (mg·kg ⁻¹ gleby)								
		Cu			Pb			Cd		
		300,0	600,0	900,0	300,0	600,0	900,0	3,0	6,0	9,0
Świeża masa (g·wazon ⁻¹)	49,9	51,3	44,8	20,5	57,9	56,7	53,3	49,9	48,8	41,9
NIR _{0,05}		21,85			n.i.			7,97		

Wzrastające dawki ołowiu w istotny sposób wpływały na akumulację metalu w nadziemnych częściach *Elymus elongatus* var. *ponticus*. Największą zawartość ołowiu, tj. 23,7 mg·kg⁻¹ s.m. stwierdzono w roślinach z podłoża, do którego dodano 900,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby. Zawartość ta była istotnie większa od zawartości tego pierwiastka w częściach nadziemnych roślin w wazonach z dawkami 300,0 i 600,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby. W wydmuchrzycy z wazonów kontrolnych zawartość ołowiu była bardzo mała (tab. 2). Zastosowane w doświadczeniu dawki ołowiu powodowały zmniejszenie masy części nadziemnych wydmuchrzycy, jednakże był on nieistotny. Najwyższy plon świeżej masy roślin uzyskano przy dawce 300,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby (tab. 3).

Przy dawkach kadmu 3,0 i 6,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby nie stwierdzono jego akumulacji w nadziemnych częściach wegetatywnych *Elymus elongatus* var. *ponticus*. Rośliny z wazonów kontrolnych nie zawierały kadmu. Po zastosowaniu dawki 9,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby stwierdzono natomiast istotne zwiększenie zawartości kadmu, do 6,1 mg·kg⁻¹ s.m. Zastosowana dawka kadmu spowodowała istotny zmniejszenie plonu roślin.

4. DYSKUSJA

Wydmuchrzyca pontyjska (*Elymus elongatus* var. *ponticus*) tolerowała zanieczyszczenie podłoża glebowego miedzią do poziomu 600,0 mg·kg⁻¹ gleby. Dawka 900,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby powodowała istotne zmniejszenie plonu roślin. Badana roślina była jednakże bardziej odporna na zanieczyszczenie gleby miedzią niż ślazowiec pensylwański, którego plon świeżej masy ulegał istotnemu zmniejszeniu po zastosowaniu 300,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby [Jasiewicz i Antonkiewicz 2000a]. Zmniejszenie plonu konopi natomiast zaobserwowano już przy zawartości 40,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby [Jasiewicz i Antonkiewicz 2000b].

Zawartość miedzi w organach nadziemnych *Elymus elongatus* var. *ponticus* zwiększała się wraz z poziomem zanieczyszczenia podłoża tym pierwiastkiem. U roślin zebranych z wazonów, do których dodano dawki 600,0 i 900,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby stwierdzono wyższe stężenie miedzi niż zawartość naturalna tego metalu, która mieści się w przedziale od 3,0 do 15,0 mg·kg⁻¹s.m. [Kabata-Pendias i Pendias 1999]. Ilość miedzi, jaką zakumulowały części nadziemne roślin, była jednak znacznie mniejsza od tej, jaką zaobserwowali Kitczak i in. [2003] i Masojć i in. [2003], badając zawartość miedzi w kupkówce pospolitej, wrotyczu pospolitym, tymotce łąkowej, życicy trwałej czy wiechlinie łąkowej.

Zawartość miedzi w badanej wydmuchrzycy była porównywalna ze stężeniem tego metalu w krwawniku pospolitym i rajgrasie wyniosłym. Wskazuje to, że o intensywności pobierania metali decyduje w dużej mierze gatunek rośliny, co opisywali Maciejewska i Ociepa [2002].

W prezentowanych w pracy badaniach nie wykazano zależności pomiędzy spadkiem plonu roślin a zawartością miedzi w podłożu. Istotny spadek plonu części nadziemnych wydmuchrzycy zaobserwowano po zastosowaniu 900,0 mg Cu·kg⁻¹ gleby. Podobną zależność dotyczącą reakcji roślin na wysokie stężenie miedzi w glebie stwierdzono w odniesieniu do pszenicy, koniczyny i kukurydzy [Korzeniowska i Stanisławska-Glubiak 2002] oraz jęczmienia, owsa i żyta. Zależność ta jest prawdopodobnie związana z rolą systemu korzeniowego w dystrybucji i akumulacji miedzi w roślinie. Rossi i in. [2004] wykazali, że korzenie rzepaku gromadzą wielokrotnie większe ilości miedzi niż lodygi.

W niniejszym opracowaniu, w omawianym doświadczeniu, stwierdzono, że ołów zastosowany w formie azotanowej Pb(NO₃)₂, w każdej z zastosowanych dawek powodował wzrost plonu *Elymus elongatus* var. *ponticus*. Małysowa i in. [1989] oraz Ciećko i Wyszkowski [1998] stwierdzili wzrost plonu świeżej masy roślin po zastosowaniu ołowiu w formie azotanowej, co do pewnego poziomu zanieczyszczenia podłoża niweluje niekorzystny wpływ ołowiu. Wskazuje na to istotne zmniejszenie plonu wydmuchrzycy po zastosowaniu dawki 900,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby. Ołów zastosowany w tej formie jest łatwo przyswajalny przez rośliny, o czym świadczy zwiększenie jego zawartości w analizowanym materiale roślinnym wraz ze wzrostem dawki zastosowanego metalu. Istotnie najwyższą zawartość ołowiu stwierdzono w częściach nadziemnych roślin zebranych z wazonów zanieczyszczonych dawką 900,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby. Podobnie, jak w przypadku miedzi wzrost zawartości ołowiu w materiale roślinnym nie był proporcjonalny w stosunku do zastosowanej dawki metalu, ponieważ większość pobranego metalu mogła zostać zakumulowana przez korzenie [Mical i in. 1997, Marchiol i in. 2004].

W doświadczeniu wykazano dużą wrażliwość *Elymus elongatus* var. *ponticus* na obecność kadmu w podłożu. Zastosowana dawka 9,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby spowodowała istotne zmniejszenie plonu tych roślin. Wójcik i Tukiendorf [2005] oraz Antonkiewicz [2007] nie stwierdzili natomiast zmniejszenia plonu świeżej masy kukurydzy i kostrzewy łąkowej nawet przy stężeniu miedzi 10,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby.

5. WNIOSKI

1. Zwiększona zawartość miedzi w podłożu powodowała zmniejszenie plonu świeżej masy *Elymus elongatus* var. *ponticus*, przy jednoczesnym zwiększeniu stężenia metalu w roślinach.
2. Wraz ze wzrostem dawki zastosowanego azotanu ołowiu zaobserwowano istotne zwiększenie stężenia ołowiu w roślinach, wzrastająca zawartość ołowiu w glebie nie wpłynęła natomiast w istotny sposób na wysokość plonu badanych roślin.

3. Kadm zastosowany w dawce 9,0 mg·kg⁻¹ gleby powodował istotne zmniejszenie plonu *Elymus elongatus* var. *ponticus*, dlatego też roślina ta nie powinna być wykorzystywana w fitoremediacji gleb zanieczyszczonych tym metalem.

PIŚMIENNICTWO

- ANTONKIEWICZ J. 2007. Zawartość metali ciężkich w kostrzewie łąkowej uprawianej na glebie z dodatkiem popiołu i kadmu. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 31: 302–310.
- BARAN S., WÓJCIKOWSKA-KAPUSTA A., ŻUKOWSKA G. 2002. Pobieranie miedzi przez różne gatunki roślin uprawnych z gleby lekkiej użyźnionej osadem ściekowym. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 484, 1: 37–44.
- CIEĆKO Z., WYSZKOWSKI M. 1998. Reakcja rzepaku jarego na skażenie gleby ołowiem. *Zesz. Nauk. Komitetu "Człowiek i Środowisko" PAN* 21: 289–294.
- CROCK J.G., SEVERSON R. 1980. Four reference soil and rock samples for measuring element availability in the western energy regions. U.S. Geological Survey circular 841: 16.
- DUKE J. 1983. Handbook of energy crops. www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/dukeindex.html
- ENSLEY B.D. 2000. Rationale for use of phytoremediation. In: *Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment*. Raskin I., Ensley B.D. (eds.). John Wiley & Sons, New York: 3–12.
- EURIPIDOU E., MURRAY V. 2004. Public health impacts of floods and chemical contamination. *J. of Public Health* 26, 4: 376–383.
- JASIEWICZ CZ., ANTONKIEWICZ J. 2000a. Ekstrakcja metali ciężkich przez rośliny z gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Cz. I. Ślązowiec pensylwański. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 472: 323–330.
- JASIEWICZ CZ., ANTONKIEWICZ J. 2000b. Ekstrakcja metali ciężkich przez rośliny z gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Cz. II. Konopie siewne. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 472: 331–339.
- KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H. 1999. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. PWN, Warszawa.
- KITCZAK T., CZYŻ H., KIEPAS-KOKOTA A. 2003. Zdolność roślinności użytków zielonych do kumulacji metali ciężkich. *Obieg Pierwiastków w Przyrodzie, T. II*: 254–258.
- KORZENIOWSKA J., STANISŁAWSKA-GLUBIAK E. 2002. Współczesne kryteria oceny zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi. *Postęp. Nauk Roln.* 5: 29–46.
- KÜPPER H., GÖTZ B., MIJOVILOVICH A., KÜPPER F.C., MEYER-KLAUCKE W. 2009. Complexation and toxicity of copper in higher plants. I. Characterization of copper accumulation, speciation, and toxicity in *Crassula helmsii* as a new copper accumulator. *Plant Physiology* 151: 702–714.

- LINDSAY W., NORVELL W. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, copper. *Soil Sci. Soc. J.* 42: 421–428.
- MACIEJEWSKA A., OCIEPA E. 2002. Bioakumulacja metali ciężkich w różnych gatunkach roślin. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* 5, 1: 45–54.
- MACIEJEWSKA A., PUSZ A. 2003. Problematyka rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi w świetle literatury. *Obieg Pierwiastków w Przyrodzie* 2: 539–550.
- MAJTKOWSKI W., PIŁAT J. 2009. Wykorzystanie roślin wydmuchrzy cy pontyjskiej *Elymus elongatus* var. *Ponticus* (Podp.) Dorn jako źródło energii odnawialnej. *Biuletyn Instytutu Hodowli i aklimatyzacji Roślin* 253: 323–329.
- MAŁYSOWA E., KAROŃ B., KOZŁOWSKI T., PATORCZYK B. 1989. Wpływ ołowiu na wzrost roślin oraz ich skład chemiczny. *Prace Komitetu Nauk PTG* 110: 66–73.
- MARCHIOL L., ASSOLARI S., SACCO P., ZERBI G. 2004. Phytoextraction of heavy metals by canola (*Brassica napus*) and radish (*Raphanus sativus*) grown on multicontaminated soil. *Environ. Pollution* 132: 21–27.
- MASOJĆ P., CHUDECKA J., ORECKI A., RADZIO A. 2003. Ocena możliwości fitoremediacji gleb zanieczyszczonych Cu, Zn, Ni, Cd i Pb przy użyciu traw: życicy trwałej, kostrzewy czerwonej, kupkówki pospolitej, wiechlimy łąkowej i tymotki łąkowej. *Rekultywacja terenów zdegradowanych. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna*, Szczecin: 93–101.
- MICAL A.H., CZERPAK R., KROTKE A. 1997. Wpływ ołowiu na niektóre procesy metaboliczne roślin. *Problemy Nauk Biolog.* 46, 2: 277–282.
- MIJOVILOVICH A., LEITENMAIER B., MEYER-KLAUCKE W., KRONECK P.M.H., GÖTZ B., KÜPPER H. 2009. Complexation and toxicity of copper in higher plants. II. Different mechanisms for copper versus cadmium detoxification in the copper-sensitive cadmium/zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (Ganges Ecotype)^[OA]. *Plant Physiology* 151: 715–731.
- PALUSZEK J., ŻEMBROWSKI W. 2008. Ulepszanie gleb ulegających erozji w krajobrazie lessowym. *Acta Agrophysica* 4, 164: 160.
- RANJARD L., LIGNIER L., CHAUSSOD R. 2006. Cumulative effects of short-term polymetal contamination on soil bacterial community structure. *Appl. Environ. Microb.* 72, 2: 1684–1687.
- ROSSI G., FIGLIOLIA A., SOCCIARELLI S. 2004. Zinc and copper bioaccumulation in *Brassica napus* at flowering and maturation. *Engin. Life Sci.* 4, 3: 271–275.
- SALT D.E., BLAYLOCK M., KUMAR N.P.B.A., DUSHENKOV V., ENSLEY B.D., CHET I., RASKIN I. 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Nature Biotechnology* 13: 468–474.
- STRĄCZYŃSKI S., STRĄCZYŃSKA S. 2004. Bioakumulacja pierwiastków śladowych w rzepaku ozimym uprawianym w rejonie zanieczyszczonym przez hutnictwo miedzi. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.* 501: 425–433.

- SUSARLA S., MEDINA V.F., MCCUTCHEON S.C. 2002. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. *Ecological Engineering* 18: 647–658.
- SZULC P.M., KOBIERSKI M., ZAMORSKI R., PIŁAT J., MIKOŁAJCZAK J., GACA J. 2008. Effects of heavy metals on the yield and application of oilseed rape seeds for animal feeding. 13th International Conference Forage Conservation, Production of forage crops and climatic changes, Nitra, Slovak Republic: 60–61.
- TERELAK H., MOTOWICKA-TERELAK T., STUCZYŃSKI T., PIETRUCH C. 2000. Pierwiastki śladowe (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) w glebach użytków rolnych Polski. IOŚ, Warszawa. 35.
- WÓJCIK M., TUKIENDORF A. 2005. Cadmium uptake, localization and detoxification in *Zea mays*. *Biology Plantarum* 49, 2: 237–245.