

WŁODZIMIERZ MAJTKOWSKI¹**PIOTR MIROSLAW SZULC**²**JERZY GACA**²**JAN MIKOŁAJCZAK**²¹ Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin — PIB, Krajowe Centrum Roślinnych Zasobów Genowych, Ogród Botaniczny w Bydgoszczy² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy

Ocena wykorzystania *Silphium perfoliatum* L. w fitoremediacji terenów zanieczyszczonych metalami ciężkimi

Assessment of the use of *Silphium perfoliatum* L. in phytoremediation of sites contaminated with heavy metals

W doświadczeniu vegetacyjnym założonym w hali vegetacyjnej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy badano możliwość wykorzystania roznika przerośniętego (*Silphium perfoliatum* L.) w fitoremediacji gleb zanieczyszczonych ołowiem i kadmem. Wykazano, iż roślina ta w czasie jednego roku vegetacji pobrała niewielkie ilości ołowiu oraz nie stwierdzono zmian w zawartości kadmu w roślinach w czasie trwania doświadczenia. Rożnik przerośnięty zakumulował w nadziemnych częściach vegetatywnych od 10,77 do 29,26 mg Pb·kg⁻¹ s.m. Zawartość ołowiu w badanych roślinach była istotnie wyższa niż w roślinach kontrolnych. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem dawki zastosowanego ołowiu i kadmu następowało istotne zmniejszenie plonu świeżej masy badanych roślin. Uzyskane wyniki wskazują na ograniczone możliwości wykorzystania badanej rośliny w procesie fitoremediacji, przy czym zebrany materiał roślinny może być wykorzystany do produkcji kiszzonek na biogaz.

Słowa kluczowe: *Silphium perfoliatum* L., doświadczenie wazonowe, fitoremediacja, Pb, Cd

In the experiment carried out in the vegetation hall the possibility of using *Silphium perfoliatum* L. in phytoremediation of soils contaminated with lead and cadmium was studied. It was shown that this species has taken up a small quantity of lead during one growing season and that there was no change in cadmium content in the plants throughout the experiment. *Silphium perfoliatum* accumulated from 10.77 to 29.26 mg Pb·kg⁻¹ d.m. in the aboveground vegetative parts. These values were significantly higher than those measured for plants used as the control. Significant decrease in the yield of plant fresh weight with increasing doses of lead and cadmium was recorded. The results indicate that usefulness of *Silphium perfoliatum* in the process of phytoremediation is rather limited.

Key words: *Silphium perfoliatum* L., pot experiment, phytoremediation, Pb, Cd

WSTĘP

Postęp cywilizacyjny przyczynił się do nieodwracalnych zmian środowiska przyrodniczego. Znacznie zwiększyła się zawartość metali ciężkich, które dostają się do gleby i wód powierzchniowych, głównie na skutek: przemysłowej emisji gazów, pyłów, spalania paliw kopalnych w elektrociepłowniach i ciepłowniach, gromadzenia odpadów komunalnych i przemysłowych, emisji spalin z pojazdów samochodowych oraz ze stosowanych w rolnictwie nawozów sztucznych i środków ochrony roślin (Kabata-Pendias i Pendias, 1999; Susarla i in., 2002; Gwóźdź i Kopyra, 2003). Akumulacja metali ciężkich w glebach, szczególnie w formie łatwo dostępnej dla roślin, prowadzi do zaburzeń w ich wzroście i rozwoju. Powoduje to obniżenie plonu roślin uprawnych i warzyw (Ciećko i Wyszowski, 1998; Terelak i in., 2000; Su i Wong, 2004; Szulc i in., 2008). Jednocześnie szereg roślin jest wykorzystywanych do usuwania z gleby lub detoksykacji metali ciężkich i innych substancji chemicznych w procesie fitoremediacji, tj. biologicznej metody oczyszczania środowiska glebowego. W tej metodzie wykorzystana zostaje zdolność niektórych gatunków roślin do pobierania metali ciężkich i gromadzenia ich w tkankach w ilościach wielokrotnie przekraczających typowe zawartości w tkankach innych roślin (Kucharski i in., 1999; Ensley, 2000; Pulford i in., 2002; Gwóźdź i Kopyra, 2003; Maciejewska i Pusz, 2003). W zależności od środowiska i charakteru procesu można wyróżnić kilka technologii fitoremediacyjnych. W oczyszczaniu gleb z metali ciężkich za najbardziej popularną metodę uznaje się fitoekstrakcję wykorzystującą zdolność roślin (tzw. hiperakumulatorów) do gromadzenia szkodliwych zanieczyszczeń w organach nadziemnych. Za hiperakumulatory uważa się rośliny zdolne do szczególnie efektywnego pobierania metali ciężkich z gleby. Rośliny te charakteryzują się dużym przyrostem biomasy oraz wytrzymałością na niekorzystne warunki środowiska. Do grupy najbardziej wydajnych hiperakumulatorów zaliczyć należy gorczycę sarepską (*Brassica juncea*), tobołki (*Thlaspi sp.*) zwłaszcza tobołki alpejskie (*Thlaspi caerulescens*), szarłat szorstki (*Amaranthus retroflexus*), wierzbę (*Salix spp.*) oraz grubosz Helmsa (*Crassula helmsii*) (Salt i in., 1995; Kärenlampi i in., 2000; Pulford i in., 2002; Gwóźdź i Kopyra, 2003; Mijovilovich i in., 2009; Küpper i in., 2009). W wielu ośrodkach badawczych prowadzone są badania nad nowymi gatunkami roślin, które mogą być wykorzystane w fitoremediacji (Prasad, 2003; Szulc i in., 2008). Jednym z takich gatunków może być różnik przerośnięty (*Silphium perfoliatum*) ze względu na niewielkie wymagania glebowe oraz relatywnie wysoki plon, wynoszący 100-120 t·ha⁻¹ świeżej masy, który uzyskuje się w warunkach odpowiedniej wilgotności gleby i optymalnego nawożenia (Puia i Szabo, 1985; Stanford, 1990; Wolski i in., 1999; Kowalski, 2004).

Celem niniejszych badań była ocena możliwości wykorzystania *Silphium perfoliatum* w fitoremediacji gleb zanieczyszczonych kadmem i ołowiem.

MATERIAŁ I METODY

W hali wegetacyjnej Wydziału Rolnictwa i Biotechnologii Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy założono w czterech powtórzeniach, w

układzie całkowicie losowym, wazonowe doświadczenie wegetacyjne. Wazonów wypełniono 10 kg podłoża glebowego pobranego z poziomu orno-próchnicznego czarnej ziemi, której właściwości przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Wybrane właściwości chemiczne gleby
Chosen chemical properties of soil

pH w 1N KCl	Zawartość wybranych składników w glebie Content of particular nutrients in soil									
	C (g·kg ⁻¹)	N (g·kg ⁻¹)	C/N	NaCl (g·dm ⁻³)	Cu (mg·kg ⁻¹)	Zn (mg·kg ⁻¹)	Mn (mg·kg ⁻¹)	Fe (mg·kg ⁻¹)	Pb (mg·kg ⁻¹)	Cd (mg·kg ⁻¹)
6,2	21,0	1,8	11,7	0,96	16,23	21,50	456,00	5997,10	20,75	0,73

Podłoże to w losowo wybranych wazonach zanieczyszczano przez wprowadzenie badanych soli metali ciężkich. W doświadczeniu zastosowano: sole ołowiu w postaci Pb(NO₃)₂ w ilości 300,0; 600,0 i 900,0 mg·kg⁻¹ gleby oraz 3,0; 6,0 i 9,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby w postaci CdCl₂·2H₂O. Kontrolę stanowiła gleba w wazonach, do których nie dodano badanych metali. Po upływie dwóch tygodni od przygotowania podłoża do każdego wazonu wysadzono siewkę *Silphium perfoliatum* wyhodowaną w warunkach kultur *in vitro*, z nasion otrzymanych z Ogrodu Botanicznego Krajowego Centrum Roślinnych Zasobów Genowych IHAR w Bydgoszczy. W okresie wegetacji roślin zastosowano nawadnianie, utrzymując połowę pojemność wodną podłoża (mierzoną za pomocą tensjometrów) na poziomie 70%. Po 129 dniach ścięto nadziemną część roślin. Zebrany materiał zważono na wadze analitycznej, następnie wysuszono do powietrznie suchej masy, a w dalszej kolejności materiał roślinny suszono w temperaturze 105°C do uzyskania stałej suchej masy. Tak przygotowany materiał roślinny rozdrobniono, zhomogenizowano i poddano dygestii mikrofalowej w roztworze 65% HNO₃. Całkowitą zawartość ołowiu i kadmu oznaczono metodą atomowej spektrometrii emisyjnej z indukcyjnie sprzężoną plazmą (ICP).

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej. Zastosowano układ całkowicie losowy jednoczynnikowy. Ocenę istotności różnic między średnimi obiektowymi wykonano z zastosowaniem testu Tukeya.

WYNIKI

W opisywanym doświadczeniu zastosowano ołów w dawkach 300,0; 600,0 i 900,0 mg·kg⁻¹ gleby oraz kadm w dawkach 3,0; 6,0 i 9,0 mg·kg⁻¹ gleby. Zaobserwowano, że wzrastające dawki ołowiu w podłożu glebowym powodują istotny wzrost jego zawartości w nadziemnych organach wegetatywnych *Silphium perfoliatum*. Najwyższą zawartość ołowiu tj. 29,26 mg Pb·kg⁻¹ s.m. stwierdzono w roślinach nawożonych dawką 900,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby. Zawartość ta była istotnie wyższa w porównaniu do koncentracji tego pierwiastka w częściach nadziemnych roślin rosnących w wazonach, do których dodano 300,0 i 600,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby (tab. 2). Analizując wpływ badanego pierwiastka na plon świeżej masy stwierdzono istotny spadek świeżej masy roślin po skażeniu podłoża dawkami

600,0 i 900,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby w porównaniu do plonu roślin z wazonów kontrolnych. Najniższy plon zebrano z wazonów, do których wprowadzono 900,0 mg Pb·kg⁻¹ gleby. Zebrany plon wynosił 14,83 g i był niższy o 28,28 g niż uzyskany z wazonów kontrolnych (tab. 3).

W przypadku zastosowanych dawek kadmu nie stwierdzono dla dawek 3,0; 6,0; i 9,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby akumulacji tego metalu w nadziemnych organach wegetatywnych *Silphium perfoliatum*. Podobnie rośliny zebrane z wazonów kontrolnych nie zawierały kadmu (tab. 2). Analizując wpływ kadmu na plon świeżej masy zaobserwowano istotne jego zmniejszenie po zastosowaniu dawki 6,0 i 9,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby w porównaniu do najniższej dawki pierwiastka oraz kontroli. Najniższy plon roślin *Silphium perfoliatum*, wynoszący 29,35 g świeżej masy, zebrano z wazonów wypełnionych podłożem skażonym 6,0 mg Cd·kg⁻¹ gleby, natomiast najwyższy, tj. 45,48 g, gdy podłoże w wazonie wegetacyjnym było skażone najniższą badaną dawką kadmu (tab. 3).

Tabela 2

Wpływ skażenia podłoża metalami ciężkimi na ich zawartość w częściach nadziemnych *Silphium perfoliatum* (mg·kg⁻¹ sm.)
The effect of soil contamination with heavy metals on their content in the aboveground parts of *Silphium perfoliatum* (mg·kg⁻¹ d.m.)

Badana cecha Testet feature	Rodzaj i dawka zastosowanych metali ciężkich (mg·kg ⁻¹ gleby) Type and dose of applied heavy metals (mg·kg ⁻¹ soil)							
	zawartość w kontroli content in control		Pb			Cd		
	Pb	Cd	300,0	600,0	900,0	3,0	6,0	9,0
Zawartość metali ciężkich (mg·kg ⁻¹ s.m.) Content of heavy metals (mg·kg ⁻¹ d.m.)	0	0	10,77	18,31	29,26	0	0	0
NIR _{0,05} LSD _{0,05}	X	X	2,68			n.i. — n.s.		

Tabela 3

Wpływ skażenia podłoża metalami ciężkimi na zebraną świeżą masę części nadziemnych *Silphium perfoliatum* L. (g·wazon⁻¹)
The effect of soil contamination with heavy metals on the amount of harvested fresh mass of aboveground parts of *Silphium perfoliatum* L. (g·pot⁻¹)

Badana cecha Tested feature	Rodzaj i dawka zastosowanych metali ciężkich (mg·kg ⁻¹ gleby) Type and dose of applied heavy metals (mg·kg ⁻¹ soil)						
	kontrola control	Pb			Cd		
		300,0	600,0	900,0	3,0	6,0	9,0
Świeża masa (g·wazon ⁻¹) Fresh mass (g·pot ⁻¹)	43,21	30,70	23,25	14,83	45,48	29,35	32,98
NIR _{0,05} LSD _{0,05}	X	16,34			8,56.		

DYSKUSJA

Większość gleb uprawnych Polski (97%) charakteryzuje się naturalną zawartością metali ciężkich. Gleby zanieczyszczone stanowią zaledwie 0,15% użytków rolnych (Terelak i in., 2000). W przypadku niższej koncentracji metali ciężkich w glebie skuteczną metodą ich rekultywacji może okazać się fitoremediacja. Jest to metoda korzystna z ekonomicznego punktu widzenia ponieważ można ją stosować do oczyszczania większych powierzchni skażonych metalami ciężkimi (Pulford i in., 2002). Jedną z wykorzystywanych w fitoremediacji roślin może być *Silphium perfoliatum*, uznawana za roślinę o niewielkich wymaganiach siedliskowych (Wolski i in., 1999).

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano negatywny wpływ ołowiu i kadmu na wzrost i rozwój *Silphium perfoliatum*. Wszystkie analizowane w niniejszym doświadczeniu dawki ołowiu powodowały zmniejszenie plonu świeżej masy części nadziemnej roślin w porównaniu do plonu zebranego z wazonów kontrolnych. Istotne zmniejszenie plonu zaobserwowano dla dwóch najwyższych zastosowanych dawek metalu. Natomiast w przypadku najniższej dawki kadmu stwierdzono niewielki wzrost plonu świeżej masy w porównaniu do plonu świeżej masy roślin zebranych z wazonów kontrolnych. Antonkiewicz i Jasiewicz (2002, 2003) wykazali istotne zmniejszenie plonu rożnika przerośniętego, topinamburu i ślazuowca pensylwańskiego po zastosowaniu dawek ołowiu i kadmu, zbliżonych do zastosowanych w niniejszym doświadczeniu. Ciećko i in. (2000) stwierdzili niewielki spadek plonu naci marchwi jadalnej wraz ze wzrostem zawartości kadmu w glebie.

W niniejszym doświadczeniu stwierdzono, iż wraz ze wzrostem zastosowanych dawek ołowiu istotnie zwiększyła się zawartość badanego pierwiastka w częściach nadziemnych *Silphium perfoliatum*. Stwierdzona zawartość ołowiu była znacznie wyższa od tej, jaką zaobserwowali Antonkiewicz i Jasiewicz (2003) w częściach nadziemnych rożnika przerośniętego, która wahała się od 0,77 do 3,92 mg·kg⁻¹ s.m. Zawartość ołowiu w częściach nadziemnych topinamburu wahała się od 0,58 do 6,12 mg·kg⁻¹ s.m., a ślazuowiec pensylwański zakumulował od 4,26 do 8,92 mg·kg⁻¹ s.m. (Antonkiewicz i Jasiewicz, 2002).

W doświadczeniu przeprowadzonym w hali wegetacyjnej UTP w Bydgoszczy nie zaobserwowano akumulacji kadmu w analizowanym materiale roślinnym. Jednakże nawet niska koncentracja tego metalu w glebie powodowała istotny spadek plonu świeżej masy *Silphium perfoliatum*. Na tej podstawie można wnioskować, że roślina ta nie powinna być wykorzystywana w fitoremediacji gleb skażonych tym pierwiastkiem. Jednak ze względu na niską zawartość ołowiu i kadmu w analizowanej świeżej masie organów nadziemnych *Silphium perfoliatum*, ewentualny plon rośliny może być wykorzystany do produkcji biomasy na cele energetyczne lub paszowe.

WNIOSKI

1. Wykazano, iż *Silphium perfoliatum* L. może być wykorzystana w fitoremediacji gleb o niskiej zawartości ołowiu. Badana roślina w pierwszym roku uprawy akumuluje

niewielkie ilości tego metalu. Wysoka koncentracja ołowiu w podłożu glebowym powodowała spadek plonu świeżej masy.

2. *Silphium perfoliatum* L. jest rośliną o bardzo ograniczonej przydatności w procesie rekultywacji gleb zanieczyszczonych kadmem. W badanym zakresie stężeń kadmu roślina nie zakumulowała tego pierwiastka w nadziemnych organach wegetatywnych, a zawartość kadmu w zakresie 6,0–9,0 mg·kg⁻¹ gleby powodowała istotne zmniejszenie plonu świeżej masy rośliny.

LITERATURA

- Antonkiewicz J., Jasiewicz Cz. 2002. Ocena przydatności różnych gatunków roślin do fitoremediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. *Acta Scientiarum Polonorum, Formatio Circumiectus* 1–2: 119 — 130.
- Antonkiewicz J., Jasiewicz Cz. 2003. Effect of soil contamination with heavy metals on element contents in *Silphium perfoliatum* L. *Chemia i Inżynieria Ekologiczna* 10 (3–4): 199 — 210.
- Ciećko Z., Wyszowski M. 1998. Reakcja rzepaku jarego na skażenie gleby ołowiem. *Zeszyty Naukowe Komitetu "Człowiek i Środowisko" PAN* 21: 289 — 294.
- Ciećko Z., Rzoska R., Rolka E., Harnisz M. 2000. Wpływ zanieczyszczenia gleby kadmem na plonowanie i skład chemiczny marchwi. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* 471: 889 — 894.
- 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.
- Gwóźdź E. A., Kopyra M. 2003. Reakcja komórek roślinnych na metale ciężkie — aspekty biotechnologiczne. *Biotechnologia* 3 (62): 107 — 123.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 1999. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. PWN Warszawa.
- Kowalski R., 2004. Growth and development of *Silphium integrifolium* in the first 3 years of cultivation. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 32: 389 — 395.
- Kucharski R., Sas-Nowosielska A., Pogrzeba M., Kryński K., Malkowski E. 1999. Perspektywy stosowania metody fitoekstrakcji do oczyszczania gleb w warunkach polskich. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 18: 60 — 67.
- Kärenlampi S., Schat H., Vangronsveld J., Verkleij J. A. C., van der Lelie D., Mergeay M., Tervahauta A. I. 2000. Genetic engineering in the improvement of plants for phytoremediation of metal polluted soils. *Environmental Pollution* 107: 225 — 231.
- 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.
- Maciejewska A., Pusz A. 2003. Problematyka rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi w świetle literatury. *Obieg Pierwiastków w Przyrodzie*, t. 2: 539 — 550.
- 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.
- Prasada M. N. V. 2003. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: Hype for commercialization. *Russian Journal of Plant Physiology* 50 (5): 686 — 700.
- Puia I., Szabo A. T. 1985. Experimental cultivation of a new type of forage. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 15: 15 — 20.
- Pulford D., Riddell-Black D., Stewart C. 2002. Heavy metal uptake by Willow clones from sewage sludge-treated soil: The potential for phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation* 4 (1): 59 — 72.
- 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.

- Stanford G. 1990. *Silphium perfoliatum* (cup plant) as a new forage. Proceedings of the twelfth North American prairie conference 1990: 33 — 38.
- Su D. C., Wong J. W. C. 2004. Selection of mustard oilseed rape (*Brassica juncea* L.) for phytoremediation of cadmium contaminated soil. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 72: 991 — 998.
- 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, 3–5 September 2008: 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.
- Wolski T., Kowalski R., Mardarowicz M., Weryszko-Chmielewska E. 1999. Rożnik przerośnięty (*Silphium perfoliatum* L.) nowa roślina alternatywna. Cz. 2. Badania fitochemiczne. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych 468: 507 — 517.