

Ewa Stanisławska-Glubiak, Jolanta Korzeniowska, Anna Kocóń

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

REAKCJA WIERZBY I KUKURYDZY NA OBECNOŚĆ METALI CIĘŻKICH W GLEBIE Z UWZGLĘDNIENIEM REMEDIACJI PRZY POMOCY TORFU*

Słowa kluczowe: metale ciężkie, gleba piaskowa, gleba lessowa, współczynnik bioakumulacji, współczynnik translokacji, remediacja, torf

Wstęp

Wiele prac badawczych poświęcono poszukiwaniu gatunków roślin przydatnych do oczyszczania gleby z nadmiaru metali ciężkich (20, 23, 31). Proces fitoekstrakcji metali może być efektywny w przypadku roślin charakteryzujących się zdolnością gromadzenia bardzo dużych ilości metalu w częściach nadziemnych, na poziomie tzw. hiperakumulacji, wytwarzających jednocześnie dużą ilość biomasy. Znalezienie takich gatunków roślin w naturze jest dość trudne, jednak stosowanie metod inżynierii genetycznej pozwala przypuszczać, że w przyszłości pojawią się nowe gatunki i odmiany roślin o zdolności do efektywnej fitoekstrakcji pierwiastków śladowych z zanieczyszczonego środowiska. Z metodą fitoekstrakcji wiąże się jednak dotychczas nierozwiązany problem sposobu zagospodarowania skażonej części nadziemnej roślin i opracowania technologii ewentualnego odzysku metali ze skażonej biomasy. Dlatego obecnie spośród technik fitoremediacyjnych najczęściej znajduje zastosowanie metoda fitostabilizacji, która polega na zasiedlaniu terenów zanieczyszczonych roślinami tolerującymi wysokie stężenia substancji toksycznych, np. metali ciężkich. Celem tej metody nie jest usunięcie metali z gleby, lecz obniżenie ich bioprzyswajalności, zabezpieczenie skażonej gleby przed degradacją wskutek erozji i przenoszeniem zanieczyszczeń na tereny sąsiednie oraz ograniczenie ryzyka bezpośredniego kontaktu zwierząt i człowieka z zanieczyszczeniami. Rośliny użyte do fitostabilizacji, oprócz tolerancji na nadmierne zawartości metali w glebie, powinny charakteryzować się dużym współczynnikiem ich bioakumulacji w korzeniach i nieznacznym ich transportem do organów nadziemnych (4).

* Problematyka prezentowana w trakcie XII Sympozjum "Trace elements in the environment", zorganizowanego w ramach zadania 1.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

W grupie roślin przydatnych do fitostabilizacji wymienia się rośliny uprawiane do celów energetycznych, przeznaczone do bezpośredniego spalania, jak wierzba, topola, ślazier czy miskant oraz przetwarzane na paliwa, jak rzepak czy kukurydza.

Wielu autorów badało przydatność wierzby wiciowej (*Salix viminalis*) do rekultywacji gleb zanieczyszczonych różnymi metalami. Na ogół jednak prace te dotyczą procesu fitoekstrakcji i często prowadzone są na siewkach w kulturach wodnych lub w wazonach (1, 16, 26, 27, 30).

W szerokim opracowaniu autorstwa K a b a ł y i i n . (17) dokonano przeglądu aktualnego stanu wiedzy na temat przydatności najważniejszych gatunków roślin energetycznych do rekultywacji gleb zdegradowanych chemicznie. Pod uwagę wzięto tolerancję na zanieczyszczenie metalami ciężkimi oraz zdolność ich akumulacji przez wierzbę, topolę, miskant, ślazier i topinambur. Według tego opracowania większość roślin odznacza się zdolnością akumulacji cynku i kadmu w biomase części nadziemnych oraz gromadzenia miedzi i ołowiu w korzeniach. Na glebach słabo zanieczyszczonych możliwa jest uprawa wszystkich roślin energetycznych, w tym miskanta i ślazier, pod warunkiem zapewnienia odpowiedniej zasobności podłoża w składniki nawozowe oraz wilgotności. Do uprawy na glebach średnio i silnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi zalecane są wybrane klony wierzby wiciowej, o relatywnie dużej tolerancji na zanieczyszczenie, dużych zdolnościach fitoekstrakcji metali oraz zadowalająco wysokim plonie biomasy. Uważa się, że plantacje topoli powinny być stosowane przede wszystkim do fitostabilizacji ołowiu, miedzi i kadmu.

W badaniach K o r z e n i o w s k i e j i i n . (21) wierzba wiciowa (*Salix viminalis*) w porównaniu z mozgą trzcinową (*Phalaris arundinacea*) i kukurydzą (*Zea mays*) wykazywała większą tolerancję na powierzchniowe skażenie gleby zarówno miedzią, niklem, jak i cynkiem, co predysponuje ją do fitostabilizacji terenów skażonych badanymi metalami. Jednak gromadzenie znacznych ilości niklu i cynku w liściach powoduje pewne ryzyko rozprzestrzenienia się tych zanieczyszczeń w środowisku. Autorzy stwierdzili również, że mozga trzcinowa nie nadaje się do fitostabilizacji terenów zanieczyszczonych cynkiem. Wykazywała ona znacznie mniejszą tolerancję na ten pierwiastek niż wierzba i kukurydza. Roślina ta może być stosowana w przypadku skażenia gleby miedzią i niklem. Kukurydza natomiast nie powinna być uprawiana jako roślina fitostabilizacyjna na terenach skażonych niklem, może być jednak przydatna do uprawy na terenach zanieczyszczonych cynkiem i miedzią. Wszystkie badane rośliny gromadziły miedź i nikiel głównie w korzeniach a nie w częściach nadziemnych, co jest korzystne z punktu widzenia procesu fitostabilizacji. Wyjątkiem były liście wierzby, które wykazywały taki sam poziom niklu jak jej korzenie.

Większą skuteczność procesu fitostabilizacji można uzyskać, wprowadzając do gleby substancje blokujące metale ciężkie poprzez zmianę odczynu gleby lub zwiększenie jej kompleksu sorpcyjnego. Jest to korzystne szczególnie w przypadku gleb kwaśnych i o małej pojemności sorpcyjnej, np. gleb piaszczystych. W celu ograniczenia mobilności metali w glebie i ich pobierania przez rośliny najczęściej stosuje się wapno

i różnego rodzaju dodatki organiczne w postaci kompostów, węgla organicznego, kory drzewnej, trocin, nawozów zielonych, osadów ściekowych, a także torfu (10, 22, 34). Metale można również unieruchomić w glebie, wykorzystując tzw. sorpcję chemiczną, poprzez stosowanie fosforytów czy innych materiałów zawierających fosforany (5, 25, 33).

Prowadzono wiele testów laboratoryjnych nad właściwościami sorpcyjnymi torfu, w których wykazano jego zdolność do immobilizacji metali (7, 12, 15, 19, 24), a także detoksykacji zanieczyszczeń organicznych (9). Badania prowadzone nad możliwością wykorzystania torfu do remediacji wód zanieczyszczonych metalami ciężkimi potwierdziły zdolność torfu do wychwytywania metali i składników pokarmowych ze środowiska wodnego. Stwierdzono zdolność torfu do usuwania z wody Cd (11), Cr (32), Cu (8, 11), Ni (11, 13), a także Pb i Zn (11). Naukowcy dowiedli, że istnieją różne mechanizmy sorbowania metali przez torf, które zależą od rodzaju torfu i jego postaci (mniej lub bardziej rozłożony), rodzaju metalu i jego stężenia. Za najbardziej powszechny mechanizm uważa się wymianę jonową (6, 13, 14). Dowiedzono również, że torf sorbuje metale przez kompleksację, adsorpcję powierzchniową (3, 11, 13) i sorpcję chemiczną (31). *B r a w n i i n . (2)* donoszą, na podstawie prac różnych autorów, że kluczową rolę w sorpcji jonów metali przez torf odgrywa pH. Optymalne pH torfu dla sorpcji metali zależy od rodzaju metalu, ale generalnie zawiera się w przedziale 3.5-6.5. Z badań różnych autorów cytowanych przez *B r a w n a i i n . (2)* wynika, że dla torfu kolejność wiązania metali na drodze wymiany jonowej jest następująca: $Pb > Cu > Cd > Zn > Ni$. Właściwości sorpcyjne torfu pod kątem ich potencjalnego wykorzystania do remediacji gleb zanieczyszczonych Pb, Cu i Zn zostały potwierdzone w badaniach *N w a c h u k w u i P u l f o r d (28)*.

Celem niniejszych badań była ocena tolerancji wierzby i kukurydzy na łączne zanieczyszczenie gleby kadmem, ołowiem i cynkiem, jak również ocena skuteczności remediacyjnej torfu stosownego na glebie zanieczyszczonej tymi pierwiastkami.

Metodyka

Przeprowadzono 2-letnie doświadczenie z wierzbą wiciową oraz 2 jednoroczne doświadczenia z kukurydzą w układzie kompletnej randomizacji, w 4 powtórzeniach. Wykorzystano obetonowane mikropoletka o wymiarach 1 x 1,2 x 1m, wypełnione glebami piaskową i lessową, które 10 lat wcześniej były symulacyjnie zanieczyszczone metalami do głębokości 20 cm (tab. 1). Zawartość metali w glebie piaskowej była wielokrotnie niższa, niż w glebie lessowej, choć obie według klasyfikacji *K a b a t y - P e n d i a s i i n . (18)* były zanieczyszczone wszystkimi metalami w stopniu średnim (III^o), z wyjątkiem zanieczyszczenia gleby piaskowej Cd, które sklasyfikowano jako słabe (II^o). Jednocześnie Zawartości Pb i Zn w obu glebach oraz Cd w glebie lessowej wielokrotnie przekraczały poziom dopuszczalny określony w Rozporządzeniu Ministra Środowiska (29).

Na każdej z dwu gleb porównywano następujące obiekty: 1. Kontrola; 2. Torf w dawce pojedynczej (T1); 3. Cd + Pb + Zn (MC); 4. MC + T1; 5. MC + T2 (torf w dawce podwójnej). Zastosowano torf ogrodniczy o ciężarze właściwym 0,25 kg/l, pH-6.5. OM-45.2%, CEC- 52.1 cmol kg⁻¹, N-2.3%, C-30.0%, C/N-13.0. Torf wymieszano z glebą na głębokość 20 cm jesienią 2010 roku w dawkach 20 i 40 l/poletko.

Tabela 1

Właściwości fizykochemiczne górnej warstwy (0-20 cm) gleb doświadczalnych

Gleba	C org.	SF I	SF II	SF III	T mmol (+) kg ⁻¹	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Cd*	Pb*	Zn*
	%											
Piaskowa	0,53	90	8	2	6,8	5,6	135	34	33	1,91	338	691
Lessowa	0,78	27	63	10	32,4	5,4	144	96	77	8,46	1083	3455

SF I-frakcja 2,0-0,05 mm, SF II-frakcja 0,05-0,002 mm, SF III -frakcja <0,002 mm.

* Zawartości Cd, Pb i Zn odnoszą się do obiektu zanieczyszczonego metalami (MC).

Wierzbę posadzono w kwietniu 2008 roku w ilości 9 szt./poletko, a po 3 miesiącach dokonano przerywki do 5 szt/poletko. Zbiór prowadzono jesienią (listopad) w roku 2010, określając plon łądyg i korzeni. Kukurydzę wysiano w maju 2011 i 2012 roku, pozostawiając po przerywce po 8 roślin na każdym poletku. Zbierano w obu latach w fazie dojrzałości woskowej w podziale na łądygi wraz z liśćmi, osadki, ziarno oraz korzenie.

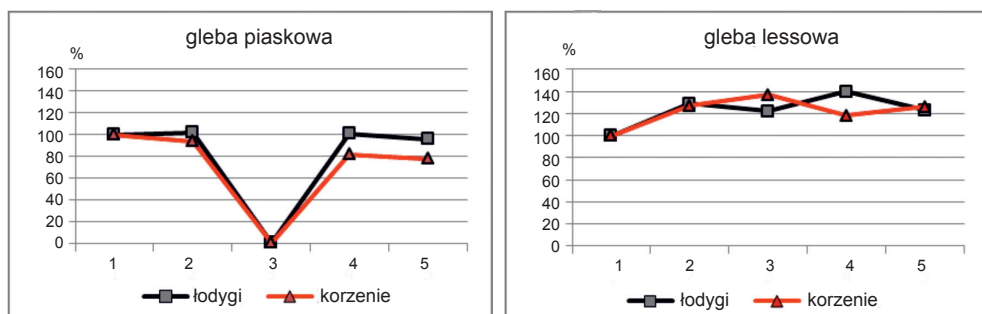
Zawartość Cd, Pb i Zn w glebie oznaczano metodą spektrometrii absorpcji atomowej z atomizacją w płomieniu (FAAS) po ekstrakcji w wodzie królewskiej, a w materiale roślinnym po mineralizacji w piecu muflowym w temperaturze 500° i roztworzeniu w 20% kwasie azotowym.

Wyniki

1. Wzrost roślin

1.1. Wierzba

Reakcja wierzby na metale ciężkie zależała od rodzaju gleby. Rośliny rosące na zanieczyszczonej glebie piaskowej reagowały drastyczną obniżką plonu. Już w początkowym okresie wegetacji niektóre rośliny zginęły, a pozostałe charakteryzowały się ograniczonym wzrostem. Po 2 latach uprawy wierzby na glebie piaskowej uzyskano skrajnie niski plon łądyg i korzeni, podczas gdy na lessie wierzba plonowała porównywalnie z obiektem kontrolnym (rys. 1).



łodygi	b	b	a	b	b	łodygi	a	a	a	a	a
korzenie	b	b	a	b	b	korzenie	a	a	a	a	a

Te same litery w wierszach oznaczają brak różnic między obiektami wg testu Tukeya ($P < 0.05$).
 Obiekty: 1 - Kontrola; 2 -T1; 3 - MC; 4- MC+ T1; 5- MC + T2

Rys. 1. Plon względny łodyg i korzeni wierzby

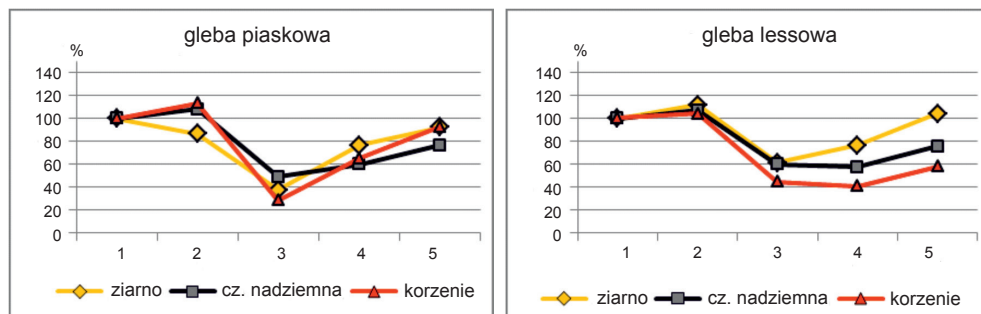
Dodatek torfu do zanieczyszczonej metalami gleby piaskowej spowodował znaczącą wyższą plonu łodyg i korzeni w stosunku do obiektu bez torfu (MC). Uzyskany plon był porównywalny z uzyskanym na kontroli, przy czym podwójna dawka torfu nie wpływała na dalszy wzrost plonów w stosunku do dawki pojedynczej (rys. 1). W przypadku gleby lessowej dodanie torfu, niezależnie od wysokości jego dawki, nie spowodowało istotnej wyższej plonu w stosunku do obiektu kontrolnego.

1.2. Kukurydza

Obniżka plonu kukurydzy wynikająca z nadmiaru metali ciężkich w podłożu była większa na glebie piaskowej, niż lessowej (rys. 2).

Dotyczyło to zwłaszcza plonu korzeni i ziarna, a w mniejszym stopniu łodyg wraz z liśćmi i osadkami określonych jako część nadziemna. Plon korzeni kukurydzy na glebie piaskowej był niższy w porównaniu z kontrolą o około 70%, podczas gdy na glebie lessowej tylko o około 55%, a plon ziarna odpowiednio o 60% i 35%.

Zastosowanie torfu jako materiału remediacyjnego spowodowało wzrost biomasy roślin w stopniu zależnym od gleby, dawki torfu oraz części rośliny. Generalnie dużo większy efekt remediacyjnego działania obu dawek torfu obserwowano na glebie piaskowej, niż na lessowej (rys. 2). Na glebie piaskowej plon biomasy, zwłaszcza korzeni i ziarna, wzrósł w wyniku zastosowania torfu do poziomu, jaki uzyskano na obiekcie bez zanieczyszczeń. Na glebie lessowej efekt działania torfu stwierdzono jedynie w przypadku ziarna i to po zastosowaniu podwójnej dawki. Plon korzeni i biomasy części nadziemnej nie zmienił się istotnie.



ziarno	b	b	a	b	b	ziarno	b	b	a	ba	b
cz. nadz.	b	b	a	b	b	cz. nadz.	b	b	a	a	ba
korzenie	b	b	a	b	c	korzenie	b	b	a	a	a

Te same litery w wierszach oznaczają brak różnic między obiektami wg testu Tukeya ($P < 0.05$).

Obiekty: 1 - Kontrola; 2 -T1; 3 - MC; 4- MC+ T1; 5- MC + T2

Rys. 2. Plon względny kukurydzy (średnia z 2 lat)

2. Zawartość metali w roślinach

2.1. Wierzba

Tabela 2

Zawartość Cd, Pb i Zn w dojrzałych do zbioru roślinach wierzby w II roku uprawy

Część rośliny; Obiekt	Zawartość metali (mg kg^{-1})					
	Cd		Pb		Zn	
	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa
Liście						
K	0,53 a	1,68 a	0,76 a	0,68 a	414 a	886 a
T1	0,70 a	1,49 a	0,76 a	0,72 a	541 b	615 a
MC	-	4,08 c	-	0,72 a	-	341 a
MC+T1	0,71 a	3,8 bc	0,76 a	0,6 a	387 a	363 a
MC+T2	1,62 b	3,15 b	0,76 a	0,6 a	805 c	522 a
Łodygi						
K	0,56 a	0,84 a	0,17 a	0,29 a	244 a	254 a
T1	0,49 a	0,60 a	0,37 ab	0,29 a	225 a	212 a
MC	6,92 c	3,40 d	14,2 d	0,68 b	1072 b	179 a
MC+T1	0,77 ab	3,10 c	0,48 b	0,60 b	254 a	189 a
MC+T2	1,11 b	2,85 b	0,99 c	0,80 b	274 a	250 a
Korzenie						
K	0,50 a	0,78 a	3,40 a	4,92 a	225 a	234 b
T1	0,43 a	0,66 a	3,01 a	4,33 a	221 a	191 a
MC	12,0 c	3,73 d	126,0 d	32,2 c	1570 b	292 c
MC+T1	1,14 ab	3,13 c	20,2 c	22,3 b	284 a	264 bc
MC+T2	1,33 b	2,67 b	16,9 b	22,9 b	289 a	288 c

Te same litery w kolumnach oznaczają brak różnic między obiektami wg testu Tukeya ($P < 0.05$).

Obiekty: 1 - Kontrola; 2 -T1; 3 - MC; 4- MC+ T1; 5- MC + T2

Po 2 latach uprawy wierzby na zanieczyszczonej metalami glebie piaskowej stwierdzono od kilkunastu do kilkudziesięciu razy większą koncentrację Cd, Pb i Zn w łodygach i korzeniach w porównaniu z wierzbą uprawianą w warunkach kontrolnych. Zawartość tych metali w korzeniach była kilkukrotnie wyższa niż w łodygach (tab. 2).

Na glebie lessowej zawartość metali w korzeniach i łodygach była dużo niższa w porównaniu z glebą piaskową. Stwierdzono najwyżej kilkukrotne przekroczenia poziomu kontrolnego, głównie w korzeniach. Dodatek torfu do gleby piaskowej spowodował znaczne obniżenie zawartości metali, głównie w łodygach, ale i w korzeniach, przy czym koncentracja Zn i Cd obniżyła się do poziomu bliskiego zawartościom stwierdzonym na kontroli. Dodatek torfu do gleby lessowej w dużo mniejszym stopniu wpływał na zmianę koncentracji metali w roślinach, niż to obserwowano na glebie piaskowej.

2.2. Kukurydza

Tabela 3

Zawartość Cd, Pb i Zn w różnych częściach kukurydzy- średnia z 2 lat

Część rośliny; Obiekt	Zawartość metali (mg kg ⁻¹)					
	Cd		Pb		Zn	
	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa
Ziarno						
K	0,05 a	0,05 a	0,28 a	0,34 a	38,4 a	29,7 a
T1	0,05 a	0,05 a	0,34 a	0,34 a	33,2 a	30,4 a
MC	0,05 a	0,06 a	0,34 a	0,34 a	46,1 a	41,5 a
MC+T1	0,05 a	0,05 a	0,34 a	0,34 a	42,2 a	37,4 a
MC+T2	0,05 a	0,04 a	0,34 a	0,34 a	40,5 a	41,3 a
Osadki						
K	0,04 a	0,05 a	0,68 a	0,30 a	147 a	102 a
T1	0,06 a	0,06 a	-	0,37 a	133 a	121 a
MC	0,11 b	0,34 b	1,20 a	0,54 a	253 c	181 b
MC+T1	0,07 ab	0,16 ab	0,88 a	0,47 a	192 b	175 b
MC+T2	0,07 ab	0,12 a	0,71 a	0,71 a	198 b	190 b
Łodygi						
K	0,16 a	0,09 a	3,17 a	1,92 a	436 a	181 a
T1	0,10 a	0,12 a	3,26 a	1,44 a	299 a	170 a
MC	0,43 b	1,52 b	10,9 b	8,15 b	556 b	504 b
MC+T1	0,46 b	0,99 ab	12,4 b	8,86 b	712 c	534 b
MC+T2	0,52 b	0,84 ab	11,4 b	6,52 b	703 c	642 b
Korzenie						
K	0,62 a	0,39 a	15,6 a	12,4 a	518 a	273 a
T1	0,34 a	0,48 a	14,9 a	14,3 a	434 a	276 a
MC	4,01 b	10,2 c	203 b	140 b	1700 c	1958 b
MC+T1	2,31 ab	5,80 b	89,1 ab	104 b	1083 b	1698 b
MC+T2	2,25 ab	4,55 b	117 ab	95,4 b	969 b	1645 b

Te same litery w kolumnach oznaczają brak różnic między obiektami wg testu Tukeya ($P < 0.05$)

Obiekty: 1 - Kontrola; 2 - T1; 3 - MC; 4- MC+ T1; 5- MC + T2

W kukurydzy rosnącej na zanieczyszczonej glebie zarówno piaskowej, jak i lessowej zawartość wszystkich 3 metali w tkankach wzrosła, w największym stopniu w korzeniach, następnie w łodygach i osadkach, podczas gdy w ziarnie zawartość ta pozostała na niezmiennym poziomie (tab. 3).

Zastosowanie torfu na glebie piaskowej, niezależnie od jego dawki, obniżyło zawartość Cd w korzeniach i osadkach, choć nie udowodniono tego statystycznie. Na glebie lessowej obie dawki torfu istotnie zmniejszyły zawartość Cd w korzeniach, a podwójna dawka torfu (T2) obniżała tę zawartość również w osadkach. Ponadto zaobserwowano nieudowodniony statystycznie wpływ dodatku torfu do gleby piaskowej na obniżenie zawartości Pb, ale tylko w korzeniach, natomiast na glebie lessowej nie stwierdzono wpływu remediacji gleby torfem na obniżenie zawartości Pb w poszczególnych organach kukurydzy. Na glebie piaskowej torf istotnie obniżał zawartość Zn w korzeniach i osadkach, przy czym dawka T2 nie była skuteczniejsza niż T1. Jednocześnie nastąpił wzrost zawartości Zn w łodygach. Na glebie lessowej natomiast rośliny nie zareagowały obniżeniem zawartości Zn w tkankach wskutek zastosowanego torfu.

3. Akumulacja i dystrybucja metali w roślinach

W celu oceny możliwości pobierania poszczególnych metali przez rośliny z 2 różnych gleb oraz zdolności ich gromadzenia i dystrybucji w roślinach, wyliczono dwa parametry: współczynnik bioakumulacji (BF) oraz współczynnik translokacji (TF), które wyrażają się następującymi wzorami:

$$BF = \frac{\text{zawartość metalu w roślinie [mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]}}{\text{zawartość metalu w glebie [mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]}}$$

$$TF = \frac{\text{zawartość metalu w części rośliny [mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]}}{\text{zawartość metalu w korzeniach [mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]}} * 100$$

3.1. Wierzba

Wyginięcie wierzby na glebie piaskowej zanieczyszczonej metalami było efektem zbyt dużej ich koncentracji w tkankach roślinnych. Na podstawie współczynnika BF stwierdzono, że rośliny pobierały i gromadziły metale w tkankach znacznie łatwiej z gleby piaskowej niż z lessowej (tab. 4). Wszystkie wartości BF były nawet kilkakrotnie wyższe dla gleby piaskowej w porównaniu z lessową. Na obu glebach metale były akumulowane głównie w korzeniach w kolejności: Cd>Zn>Pb.

Tabela 4

Współczynniki bioakumulacji metali (BF) w łodygach i korzeniach wierzby

Część rośliny; Obiekt	Cd				Pb				Zn			
	gleba piaskowa		gleba lessowa		gleba piaskowa		gleba lessowa		gleba piaskowa		gleba lessowa	
	BF	%*	BF	%	BF	%*	BF	%	BF	%*	BF	%*
Łodygi												
MC	3,8	100	0,4	100	0,04	100	0,00	100	1,69	100	0,05	100
MC+T1	0,4	11	0,4	100	0,00	0	0,00	100	0,37	22	0,06	120
MC+T2	0,5	13	0,3	75	0,00	0	0,00	100	0,38	22	0,08	160
Korzenie												
MC	6,5	100	0,4	100	0,34	100	0,03	100	2,5	100	0,1	100
MC+T1	0,6	9	0,4	100	0,05	15	0,02	67	0,4	16	0,1	100
MC+T2	0,6	9	0,3	75	0,05	15	0,02	67	0,4	16	0,1	100

* BF w odniesieniu do obiektu skażonego metalami (MC), gdzie BF przyjęto za 100%

Obiekt: MC- Cd+Pb+Zn; MC+T1- Cd+Pb+Zn + pojedyncza dawka torfu; MC+T2- Cd+Pb+Zn + podwójna dawka torfu.

Wprowadzenie torfu do zanieczyszczonej gleby piaskowej wpłynęło na zmniejszenie wartości współczynników BF, co świadczy o ograniczeniu ich pobierania przez wierzbę na obiektach remediowanych (tab. 4). Torf wprowadzony do gleby piaskowej powodował zmniejszenie akumulacji wszystkich 3 metali w korzeniach i łodygach o około 80-90% w stosunku do obiektu zanieczyszczonego (MC), przy czym podwójna dawka torfu nie była bardziej efektywna w ograniczaniu pobierania metali przez wierzbę, niż dawka pojedyncza. Zastosowanie torfu na zanieczyszczonej glebie lessowej obniżyło wartości współczynników BF w bardzo niewielkim stopniu. Obserwowano zmniejszoną o 25% akumulację Cd w łodygach i korzeniach oraz około 30% mniejszą akumulację Pb w korzeniach. Nie stwierdzono natomiast zmniejszonej akumulacji Zn, a w łodygach wystąpiła nawet tendencja wzrostowa.

Na obiekcie zanieczyszczonym metalami na obu glebach obserwowano stosunkowo łatwe przemieszczanie się cynku z korzeni wierzby do części nadziemnej i bardzo małą ruchliwość ołowiu, przy czym współczynniki TF były niższe dla lessu, szczególnie w przypadku ołowiu (tab. 5). Na glebie lessowej jednak uwagę zwraca bardzo duży transfer kadmu w porównaniu z glebą piaskową.

Na obiektach remediowanych przy pomocy torfu oprócz zmniejszonej akumulacji metali w roślinach wierzby, stwierdzono również zmiany w ich rozmieszczeniu w roślinie. Na glebie z dodatkiem torfu, zwłaszcza podwójnej jego dawki, obserwowano większe przemieszczanie się metali z korzeni do łodyg i liści. Generalnie zmiany te były większe na glebie piaskowej niż na lessowej.

Tabela 5

Współczynniki translokacji metali (TF) z korzeni do części nadziemnych wierzby

Obiekt	Cd		Pb		Zn	
	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa
Liście						
MC	x	109	x	2,2	x	117
MC+T1	62,3	121	3,8	2,7	136	138
MC+T2	122	118	4,5	2,6	278	181
Łodygi						
MC	57,7	91,2	11,3	2,1	68,3	61,3
MC+T1	67,5	99,0	2,4	2,7	89,4	71,6
MC+T2	83,5	107	5,9	3,5	94,8	86,8

Obiekt: MC- Cd+Pb+Zn; MC+T1- Cd+Pb+Zn + pojedyncza dawka torfu; MC+T2- Cd+Pb+Zn + podwójna dawka torfu.

3.2. Kukurydza

Kukurydza, podobnie jak wierzba, akumulowała metale w większej ilości z gleby piaskowej niż z lessowej, co potwierdzają znacznie wyższe wartości BF dla gleby piaskowej (tab. 6). Na obu glebach metale z obiektu zanieczyszczonego (MC) były akumulowane według szeregu: $Zn > Cd > Pb$, przy czym dla korzeni współczynniki BF były kilkukrotnie wyższe w porównaniu z łodygami i kilkudziesięciokrotnie wyższe, niż w przypadku osadek i ziarna.

Dodatek torfu do skażonej metalami gleby piaskowej powodował ograniczenie akumulacji w korzeniach wszystkich 3 metali na podobnym poziomie, co wyrażało się redukcją współczynników BF o około 50-60% w stosunku do obiektu MC. Zmniejszenie pobierania metali z gleby piaskowej znalazło również odzwierciedlenie w zmniejszonych wartościach BF dla osadek: Pb (70%), Cd (50%) i Zn (40%). Natomiast ziarno i słoma charakteryzowały się mniejszymi zmianami współczynników bioakumulacji, które dotyczyły tylko Cd i Zn, a nie dotyczyły Pb. Stwierdzono również, że na glebie piaskowej wpływ podwójnej dawki torfu na ograniczenie akumulacji metali nie był większy niż dawki pojedynczej.

Na glebie lessowej w korzeniach kukurydzy, w wyniku zastosowania podwójnej dawki torfu (T2), zmniejszyła się akumulacja Cd o około 60%, oraz Pb i Zn odpowiednio o 27% i 20%. Dawka T2 efektywniej niż T1 zmniejszała akumulację Cd w korzeniach. Na T2 zmniejszył się również współczynnik bioakumulacji Cd dla osadek o 70%, słomy o 54% oraz ziarna o 41%. Natomiast BF Pb pozostał niezmienny, z wyjątkiem niewielkiej obniżki dla łodyg (około 20%). Ponadto zastosowanie podwójnej dawki torfu spowodowało wzrost bioakumulacji Zn w łodygach, a zmiany w osadkach i ziarnie były nieznaczące.

Tabela 6

Współczynniki bioakumulacji metali (BF) w częściach nadziemnych i korzeniach kukurydzy

Część rośliny; Obiekt	Cd				Pb				Zn			
	gleba piaszkowa		gleba lessowa		gleba piaszkowa		gleba lessowa		gleba piaszkowa		gleba lessowa	
	BF	%*	BF	%*	BF	%*	BF	%*	BF	%*	BF	%*
Ziarno												
MC	0,04	100	0,009	100	0,001	100	0,000	100	0,10	100	0,01	100
MC+T1	0,03	78	0,007	76	0,001	100	0,000	100	0,07	70	0,01	100
MC+T2	0,03	78	0,005	59	0,001	100	0,000	100	0,07	70	0,01	100
Osadki												
MC	0,08	100	0,05	100	0,007	100	0,001	100	0,53	100	0,06	100
MC+T1	0,04	50	0,02	40	0,002	33	0,001	100	0,31	58	0,06	100
MC+T2	0,04	50	0,02	40	0,002	28	0,001	100	0,32	60	0,06	100
Łodygi												
MC	0,32	100	0,22	100	0,03	100	0,009	100	1,18	100	0,18	100
MC+T1	0,27	84	0,13	58	0,03	100	0,009	100	1,16	98	0,18	100
MC+T2	0,29	93	0,10	46	0,03	100	0,007	81	1,13	95	0,21	116
Korzenie												
MC	2,82	100	1,48	100	0,57	100	0,15	100	3,51	100	0,68	100
MC+T1	1,31	46	0,74	50	0,23	40	0,11	73	1,75	50	0,58	85
MC+T2	1,23	44	0,57	38	0,32	56	0,11	73	1,54	44	0,54	80

* BF w odniesieniu do obiektu skażonego metalami (MC), gdzie BF przyjęto za 100%

Obiekt: MC- Cd+Pb+Zn; MC+T1- Cd+Pb+Zn + pojedyncza dawka torfu; MC+T2- Cd+Pb+Zn + podwójna dawka torfu.

Dystrybucja metali pomiędzy organami kukurydzy rosnącej na obiekcie MC zależała od metalu i rodzaju gleby, o czym świadczą wartości TF (tab. 7).

Na obu glebach największy transfer metali z korzeni do części nadziemnych dotyczył Zn, jednakże na glebie piaskowej współczynniki TF były wyższe. Drugim w kolejności metalem pod względem łatwości przemieszczania się z korzeni do części nadziemnych był Cd, przy czym wyższe wartości TF stwierdzono dla gleby lessowej. Wyjątkiem było ziarno, które na lessie było lepiej chronione przed nadmiarem Cd, niż na glebie piaskowej. Transport Pb z korzeni do części nadziemnych kukurydzy był najmniejszy i na podobnym poziomie dla obu gleb.

Dodatek torfu do obu gleb wpłynął na zwiększenie wartości TF dla łodyg. Dotyczyło to zarówno Zn, jak i w podobnym stopniu Cd i Pb. Bardzo niewielkie zmiany TF stwierdzono dla ziarna i osadek. Generalnie większe zmiany w dystrybucji metali w kukurydzy, pod wpływem zastosowanego torfu, wystąpiły na glebie piaskowej, niż na lessowej. Porównując natomiast działanie dawek torfu, stwierdzono

tendencję do większego transportu Zn i Cd z korzeni do części nadziemnych kukurydzy na dawce podwójnej, niż pojedynczej.

Tabela 7

Współczynniki translokacji metali (TF) z korzeni do części nadziemnych kukurydzy

Obiekt	Cd		Pb		Zn	
	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa	gleba piaskowa	gleba lessowa
Łodygi						
MC	10,7	14,9	5,4	5,8	32,7	25,8
MC+T1	20,1	17,1	13,9	8,5	66,2	31,4
MC+T2	22,9	18,5	9,7	6,8	72,5	39,1
Osadki						
MC	2,6	3,3	1,2	0,4	14,9	9,2
MC+T1	3,0	2,8	1,0	0,5	17,8	10,3
MC+T2	2,9	2,6	0,6	0,7	20,4	11,6
Ziarno						
MC	1,2	0,6	0,2	0,2	2,7	2,1
MC+T1	2,2	0,9	0,4	0,3	3,9	2,2
MC+T2	2,2	0,9	0,3	0,4	4,2	2,5

Obiekt: MC- Cd+Pb+Zn; MC+T1- Cd+Pb+Zn + pojedyncza dawka torfu; MC+T2- Cd+Pb+Zn + podwójna dawka torfu.

Wnioski

- Wierzba uprawiana na bardzo lekkiej glebie piaskowej, zanieczyszczonej łącznie ołowiem i cynkiem w stopniu średnim (III^o) oraz kadmem w stopniu słabym (II^o), zareagowała na nadmiar metali w podłożu prawie całkowitą redukcją biomasy części nadziemnej i korzeni. Na tej samej glebie większą tolerancję na metale wykazała uprawiana po wierzbie kukurydza, której plon obniżył się w zależności od części rośliny o 60-70% w stosunku do obiektu bez zanieczyszczeń.
- Zanieczyszczenie gleby lessowej kadmem, ołowiem i cynkiem w stopniu średnim (III^o) nie powodowało zahamowania przyrostów biomasy wierzby, natomiast kukurydza reagowała obniżką plonu, chociaż w mniejszym stopniu niż na glebie piaskowej, bo w granicach 35-55% w porównaniu z obiektem bez zanieczyszczeń.
- Rośliny obu gatunków pobierały i gromadziły metale w tkankach znacznie łatwiej z gleby piaskowej niż z lessowej, przy czym wierzba w kolejności Cd>Zn>Pb, a kukurydza według szeregu Zn>Cd>Pb.
- Niezależnie od rodzaju gleby kilkukrotnie większą akumulację metali stwierdzono w korzeniach roślin, niż w częściach nadziemnych, przy czym ich transfer z korzeni do części nadziemnych zachodził w większym stopniu u wierzby niż u kukurydzy.

- Dodatek torfu do zanieczyszczonej metalami gleby piaskowej powodował radykalny wzrost plonu korzeni i łądy wierzby oraz w znacznie mniejszym stopniu wzrost plonów kukurydzy. Zastosowanie pojedynczej dawki torfu było równie efektywne, jak dawki podwójnej.
- Torf dodany do zanieczyszczonej gleby lessowej nie powodował zmian w poziomie plonowania wierzby, wpłynął natomiast na wzrost plonu ziarna kukurydzy, ale tylko po zastosowaniu podwójnej jego dawki.
- Zastosowanie torfu jako materiału remediacyjnego na obu glebach powodowało obniżenie poziomu akumulacji metali w roślinach. Jednocześnie obserwowano zmiany w ich dystrybucji pomiędzy korzeniami a częściami nadziemnymi roślin.

Literatura

1. Bissonnette L., St-Arnaud M., Labrecque M.: Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi during the second year of a field trial. *Plant Soil*, 2010, **332**: 55-67.
2. Brawn P.A., Gill S.A., Allen S.J.: Metal removal from wastewater using peat. *Water Res*, 2000, **34(16)**: 3907-3916.
3. Chen X-H., Gosset T., Thevenot D.R.: Batch copper ion binding and exchange properties of peat. *Water Res*, 1990, **24(12)**: 1463-1471.
4. Cheraghi M., Lorestani B., Khorasani N., Yousefi N., Karami M.: Findings on the phytoextraction and phytostabilization of soils contaminated with heavy metals, *Biological Trace Element Research*, 2011, **144(1-3)**: 1133-1141.
5. Cotter-Howells J.D., Caporn S.: Remediation of contaminated land by formation of heavy metal phosphates. *Appl Geochem*, 1996, **11**: 335-342.
6. Crist R.H., Martin J.R., Chonko J., Crist D.R.: Uptake of metals on peat moss: An ion-exchange process. *Environ Sci Technol*, 1996, **30(8)**: 2456-2461.
7. Fisher K.: Removal of heavy metals from soil components and soil by natural chelating agents. Part I: Displacement from clay minerals and peat by L-cysteine and L-penicillamine. *Water Air Soil Poll*, 2002, **137**: 267-286.
8. Gardea-Torresday J.L., Tang L., Salvador J.M.: Copper adsorption by esterified and unesterified fractions of Sphagnum peat moss and its different humic substances. *J Hazard Mat*, 1996, **48**: 191-206.
9. Ghaly R.A., Pyke J.B., Ghaly A.E., Ugursal V.I.: Remediation of Diesel-Oil-Contaminated Soil Using Peat. *Energ Source*, 1999, **21(9)**: 785-799.
10. Gondek K.: Zinc content in maize (*Zea mays* L.) and soils fertilized with sewage sludge and sewage sludge mixed with peat. *Pol J Environ Stud*, 2009, **18(3)**: 359-368.
11. Gosset T., Trancart J-L., Thevenot D.R.: Batch metal removal by peat. Kinetics and thermodynamics. *Water Res*, 1986, **20(1)**: 21-26.
12. Gupta B.S., Curran M., Hasan S., Ghosh T.K.: Adsorption characteristics of Cu and Ni on Irish peat moss. *J Environ Manage*, 2009, **90(2)**: 954-960.
13. Ho Y.S., Wase D.A.J., Forster C.F.: Batch nickel removal from aqueous solution by sphagnum moss peat. *Water Res*, 1995, **29(5)**: 1327-1332.

14. Horacek J., Soukupova L., Puncochar M., Slezak J., Drahos J., Yoshida K., Tsutsumi A.: Purification of waste waters containing low concentrations of heavy metals. *J Hazard Mat*, 1994, **37**: 69-76.
15. Hu L., Diez-Rivas C., Hasan A.R., Solo-Gabriele H., Fieber L., Cai Y.: Transport and interaction of arsenic, chromium, and copper associated with CCA-treated wood in columns of sand and sand amended with peat. *Chemosphere*, 2010, **78(8)**: 989-995.
16. Jensen J.K., Holm P.E., Nejrup J., Larsen M.B., Borggaard O.K.: The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soil. *Environ Poll*, 2009, **157**: 931-937.
17. Kabała C., Karczewska A., Kozak M.: Przydatność roślin energetycznych do rekultywacji i zagospodarowania gleb zdegradowanych, *Zesz Nauk UP Wroc, Rol*, 2010, **576**: 97-118.
18. Kabata-Pendias A., Motowicka-Terelak T., Piotrowska M., Terelak H., Witek T.: Ocena stopnia zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi i siarką. *Ramowe wytyczne dla rolnictwa*, Wyd. IUNG, Puławy, 1993, **P(53)**: 1-20.
19. Kiikkilä O., Pennanen T., Perkiomäki J., Derome J., Fritze H.: Organic material as a copper immobilising agent: a microcosm study on remediation. *Basic Appl Ecol*, 2002, **3**: 245-253.
20. Keller C., Hammer D., Kayser A., Richner W., Brodbeck M., Sennhauser M.: Root development and heavy metal phytoextraction efficiency: comparison of different plant species in the field. *Plant and Soil*, 2003, **249**: 67-81.
21. Korzeniowska J., Stanisławska-Głubiak E., Igras J.: Applicability of energy crops for metal phytostabilization of soils moderately contaminated with copper, nickel and zinc. *J Food Agric Environ*, 20011, **9(3-4)**: 693-697.
22. Kumpiene J., Lagerkvist A., Maurice Ch.: Stabilization of Pb- and Cu-contaminated soil using coal fly ash and peat. *Environ Pollut*, 2007, **145**: 365-373.
23. Lai H.Y., Lee D.Y., Chung R.S., Chen Z.S.: Large area phytoremediation experiment to study the uptake of metals by twelve plant species growing in the contaminated site of central Taiwan. In: *Biogeochemistry of trace elements: environmental protection, remediation and human health*. Tsinghua University Press, Beijing 2007, China: 188-189.
24. Lee S-J., Lee M-E., Chung J.W., Park J.H., Huh K.Y., Jun G-I.: Immobilization of lead from Pb-contaminated soil amended with peat moss. *Journal of Chemistry*, 2013, 1-6. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/509520>.
25. Ma Q.Y., Logan T.J., Traina S.J.: Lead immobilization from aqueous solutions and contaminated soils using phosphate rock. *Environ Sci Technol*, 1995, **29**: 1118-1126.
26. Meers E., Vandecasteele B., Ruttens A., Vangronsveld J., Tack F.M.G.: Potential of five willow species (*Salix* Spp.) for phytoextraction of heavy metals. *Environ. Exp. Bot.*, 2007, **60**: 57-68.
27. Młeczek M., Rutkowski P., Rissman I., Kaczmarek Z., Golinski P., Szentner K., Strażyńska K., Stachowiak A.: Biomass productivity and phytoremediation potential of *Salix alba* and *Salix viminalis*. *Biom. Bioener.*, 2010, **34**: 1410-1418.
28. Nwachukwu O.I., Pulford I.D.: Comparative effectiveness of selected adsorbant materials as potential amendments for the remediation of lead-, copper- and zinc-contaminated soil. *Soil Use Manage*, 2008, **24**: 199-207.
29. Rozporządzeniu Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi z dnia 9 września 2002 roku. *Dz.U.02.165.1359*.
30. Sell J., Kayser A., Schulin R., Brunner I.: Contribution of ectomycorrhizal fungi to cadmium uptake of poplars and willows from a heavily polluted soil. *Plant Soil*, 2005, **277**: 245-253.

31. Sęka A., Poniedziałek M., Ciura J., Jedraszczyk E.: Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: Implications for phytoremediation. *Pol J Environ Stud*, 2005, **14(4)**: 509-516.
 32. Sharma D.C., Forster C.F.: Removal of hexavalent chromium using sphagnum moss peat. *Water Res*, 1993, **27(7)**: 1201-1208.
 33. Waterlot Ch., Pruvot Ch., Ciesielski H., Douay F.: Effects of a phosphorus amendment and the pH of water used for watering on the mobility and phytoavailability of Cd, Pb and Zn in highly contaminated kitchen garden soils. *Ecol Eng*, 2011, **37**: 1081-1093.
 34. Wróbel S., Nowak-Winiarska K.: Interaction of liming and earthworm humus in detoxification of soil contaminated with excess copper. *Pol J Environ Stud*, 2011, **20**: 1611-1616.
-

Adres do korespondencji:

*dr hab. Ewa Stanisławska-Głubiak, prof. nadzw.
Zakład Herbologii i Technik Uprawy Roli
IUNG-PIB*

*ul. Orzechowa 61
50-540 Wrocław*

tel. (71) 36 38 707 w. 114

e-mail: e.głubiak@iung.wroclaw.pl

