

PLONOWANIE WYBRANYCH ROŚLIN UPRAWNYCH W WARUNKACH ZANIECZYSZCZENIA GLEBY KADMEM ORAZ STOSOWANIA SUBSTANCJI NEUTRALIZUJĄCYCH

Elżbieta Rolka

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Streszczenie. Celem podjętych badań była ocena wpływu zanieczyszczenia gleby wzrastającymi dawkami kadmu (0, 10, 20, 30 i 40 mg Cd·kg⁻¹ gleby) na plonowanie wybranych roślin testowych oraz próba złagodzenia tego oddziaływania poprzez aplikację substancji neutralizujących, takich jak: wapno, kompost, węgiel brunatny i bentonit. Podstawę badań stanowiły doświadczenia wazonowe, w których roślinami testowymi były: łubin żółty, kukurydza, rzodkiewka i facelia błękitna. Statystyczna analiza uzyskanych wyników dowiodła istnienia korelacji pomiędzy dawkami kadmu a wysokością uzyskanych plonów roślin, której kierunek był zależny od rodzaju substancji inaktywujących. Obliczony indeks tolerancji najniższy zakres przyjmował w przypadku łubinu (0,02–0,90) i rzodkiewki (0,05–1,15), nieco wyższy w doświadczeniu z facelią (0,45–1,38), a zdecydowanie najwyższy w doświadczeniu z kukurydzą (0,59–1,77).

Słowa kluczowe: kadm, zanieczyszczenie gleby, substancje neutralizujące, rośliny

WSTĘP

Kadm należy do grupy metali śladowych i charakteryzuje się dużą toksycznością dla organizmów żywych oraz mobilnością w środowisku przyrodniczym. Pierwiastek ten może wywierać negatywny wpływ na rozwój enzymów glebowych – dehydrogenaz [Kucharski i in. 2011] oraz stanowić potencjalne źródło zagrożenia dla roślin [Kaszubkiewicz i Kawalko 2009]. Wiele roślin charakteryzuje się znaczną tolerancją na wysoką zawartość kadmu w glebie i nie wykazuje wyraźnych objawów toksyczności, co może być związane m.in. z tworzeniem różnych związków białkowych, tzw. fitochelatyn, które wiążąc ten metal neutralizują jego fitotoksyczność [Siwek 2008]. Z kolei niektóre gatunki roślin, już przy lekko podwyższonej zawartości kadmu w podłożu, wykazują objawy choro-

Adres do korespondencji – Corresponding author: Elżbieta Rolka, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Katedra Chemii Środowiska, pl. Łódzki 4, 10-527 Olsztyn, e-mail: elzbieta.rolka@uwm.edu.pl

bowe, co może rzutować na obniżenie pozyskiwanych plonów [Ciećko i in. 2000a, b, Su i Wong 2004]. Fitotoksyczność kadmu może być związana z zakłóceniami procesów fizjologicznych na skutek zaburzeń w pobieraniu makro- i mikroelementów niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania [Badora i Kozłowska-Strawska 2011]. Jako charakterystyczne objawy toksyczności kadmu wymienia się najczęściej zahamowanie wzrostu, zaczerwienienie żyłek i chlorozę liści oraz zgrubienie i skrócenie korzeni. Fizjologiczny efekt nadmiaru kadmu w roślinach może wiązać się z zaburzeniami procesów fotosyntezy, oddychania i transpiracji [Schützendübel i Polle 2002]. To negatywne oddziaływanie kadmu może być łagodzone poprzez zmianę warunków podłoża, co często wiąże się z inaktywacją tego metalu w glebie. W zmniejszaniu aktywności kadmu dużą rolę odgrywają odczyn gleb [Ciećko i in. 2000a, b, Young i in. 2000, Basta i in. 2005, Puschenreiter i in. 2005] oraz zawartość substancji organicznej [Ciećko i in. 2001, Kwiatkowska-Malina i Maciejewska 2009, Gondek 2010]. Zabiegi inaktywacji kadmu nie prowadzą do zmniejszenia całkowitych jego zawartości w glebie, ale skutecznie ograniczają ryzyko ekologiczne [Karczevska i Kabała 2010].

Celem przeprowadzonych badań było określenie oddziaływania wzrastających dawek kadmu na plonowanie łubinu żółtego, kukurydzy, rzodkiewki i facelii błękitnej w warunkach stosowania substancji inaktywujących, takich jak: wapno, kompost, węgiel brunatny i bentonit.

MATERIAŁ I METODY

W czterech doświadczeniach wazonowych uprawiano kukurydzę (odm. Scandia), łubin żółty (odm. Dragon), rzodkiewkę (odm. Saxa) i facelię błękitną (odm. Stala) w warunkach gleby zanieczyszczonej wzrastającymi dawkami kadmu (0, 10, 20, 30 i 40 mg Cd·kg⁻¹). Kadm został wprowadzony do gleby w postaci wodnego roztworu chlorku kadmu. W celu złagodzenia negatywnego oddziaływania badanego metalu na rośliny zastosowano substancje neutralizujące, takie jak: wapno, kompost, węgiel brunatny i bentonit. Wapno zastosowano w ilości 1 Hh, kompost i węgiel brunatny w ilości 4% do masy gleby w wazonie, a bentonit w ilości 4% w doświadczeniu z łubinem żółtym oraz 2% w przypadku kukurydzy, rzodkiewki i facelii. Skład chemiczny użytych materiałów inaktywujących przedstawiono w tabeli 1. Oprócz substancji neutralizujących zastosowano również nawożenie NPK w dawkach dostosowanych do wymagań pokarmowych wybranych roślin. Wszystkie komponenty (kadm, kompost, węgiel brunatny, bentonit, wapno i nawozy NPK) zostały dodane do gleby i dokładnie z nią wymieszane, a następnie przeniesione do odpowiednio oznaczonych wazonów Kick-Brauckamanna tuż przed siewem roślin. Każde z doświadczeń przeprowadzono w hali wegetacyjnej, utrzymując wilgotność gleby na poziomie 60% pojemności kapilarnej.

W doświadczeniach wykorzystano gleby brunatne, które zostały pobrane z poziomu orno-próchnicznego i charakteryzowały się składem granulometrycznym piasku słabogliniastego oraz zbliżonymi właściwościami fizykochemicznymi (tab. 2). Zawartość kadmu w glebach była niska i nie przekraczała standardów ustalonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 9 września 2002 roku [Dz.U. 02.165.1359] dla gleb użytkowanych rolniczo.

Tabela 1. Skład chemiczny materiałów użytych do inaktywacji kadmu (formy ogólne)

Table 1. Chemical composition materials used to inactivated cadmium (total forms)

Materiał – Material	P	K	Mg	Ca	Na	Cd
			[mg·g ⁻¹ s.m.] [mg·g ⁻¹ d.m.]			[mg·kg ⁻¹ s.m.] Cd [mg·kg ⁻¹ d.m.]
Kompost – Compost	2,41	1,58	1,56	16,00	0,14	0,39
Węgiel brunatny – Brown coal	0,13	0,19	4,63	31,52	0,25	0,04
Wapno – Lime	0,10	0,77	2,65	347,99	0,07	0,27
Bentonit – Bentonite	0,47	2,43	5,03	26,72	12,11	0,27

Tabela 2. Wybrane właściwości fizykochemiczne gleb użytych do doświadczeń

Table 2. Some physicochemical properties of soil used in experiment

Rodzaj doświadczenia Kind of experiment	pH H ₂ O	pH KCl	Kwasowość hydrolityczna [cmol(+)-kg ⁻¹ s.m.] Hydrolitic acidity [cmol(+)-kg ⁻¹ d.m.]	N ogólny N total	C org.	P	K	Mg
				[g·kg ⁻¹ s.m.] [g·kg ⁻¹ d.m.]		formy przyswajalne [mg·kg ⁻¹ s.m.] available forms [mg·kg ⁻¹ d.m.]		
Łubin żółty – Yellow lupine	5,86	4,50	32,57	0,65	5,30	4,90	8,80	3,30
Kukurydza – Maize								
Rzodkiewka – Radish	4,65	4,07	27,38	0,58	5,62	5,20	9,20	2,93
Facelia – Phacelia	6,07	5,91	19,50	0,61	5,01	5,32	9,45	3,40

Zbiór roślin łubinu żółtego i facelii dokonano w fazie kwitnienia, kukurydzy w początkowej fazie wysuwania wiech, a rzodkiewki w fazie dojrzałości zbiorczej korzenia. Po zbiorze roślin określono plon świeżej masy nadziemnej i korzeni odrębnie z każdego wazonu.

Metody obliczeniowe

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono indeks tolerancji (T_i), będący wskaźnikiem toksycznej dla roślin zawartości metali ciężkich w glebach [Spiak i in. 2000]. Wartość ta jest stosunkiem ilości plonu uzyskanego na glebie zanieczyszczonej kadmem do ilości plonu uzyskanego na obiekcie kontrolnym (bez kadmu). Indeks tolerancji (T_i) może przyjmować wartości mniejsze, równe i większe od jedności. Jeżeli $T_i < 1$ oznacza zahamowanie wzrostu roślin, $T_i = 1$ świadczy o braku wpływu podwyższonej koncentracji kadmu na plonowanie, a $T_i > 1$ mówi o pozytywnym oddziaływaniu tego pierwiastka na wzrost i rozwój roślin.

Metody statystyczne

Uzyskane wyniki opracowano statystycznie z uwzględnieniem testu Anova przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$, wykorzystując program Statistica 9,0 [StatSoft 2009]. Współczynnik korelacji r pomiędzy analizowanymi czynnikami obliczono z użyciem programu Microsoft Excel [Microsoft 2002].

WYNIKI I DYKUSJA

Wyniki uzyskane w badaniach własnych wskazują na niekorzystny wpływ kadmu na plon masy nadziemnej łubinu żółtego (tab. 3). Średni plon świeżej masy łubinu był niski i wynosił od 48,7 g w serii bez dodatków do 60,1 g·wazon⁻¹ w serii z dodatkiem kompostu. Niezależnie od serii doświadczenia wykazano ujemną, a zarazem wysoce istotną korelację pomiędzy wzrastającymi dawkami kadmu a wielkością masy nadziemnej i korzeni łubinu. Wprowadzenie dodatków inaktywujących kadm wpłynęło na zmniejszenie redukcji plonu na skutek zanieczyszczenia gleby kadmem. W warunkach skażonego podłoża na poziomie 10 mg Cd·kg⁻¹ gleby najskuteczniej działał kompost, a przy wyższych dawkach kadmu bentonit.

Tabela 3. Plon świeżej masy nadziemnej i korzeni łubinu żółtego [g św. m.·wazon⁻¹]

Table 3. Yield of fresh aerial parts and roots of yellow lupine [g FM·pot⁻¹]

Dawka kadmu [mg Cd·kg ⁻¹ gleby] Cd dose [mg·kg ⁻¹ of soil]	Serie doświadczenia – Objects					Średnia Average
	bez dodatków without amendments	kompost compost	węgiel brunatny brown coal	wapno (CaO) lime (CaO)	bentonit bentonite	
Masa nadziemna – Aerial parts						
0	184,3	170,0	155,0	131,8	83,0	144,8
10	46,5	94,8	53,3	69,3	74,3	67,6
20	6,0	19,8	39,0	27,5	50,0	28,5
30	3,5	11,5	31,5	24,0	44,0	22,9
40	3,0	4,3	12,3	14,8	44,8	15,8
Średnia Average	48,7	60,1	58,2	53,5	59,2	55,9
<i>r</i>	-0,82**	-0,92**	-0,86**	-0,90**	-0,89**	-0,81**
NIR _{α=0,05} dla dawek Cd = 3,42; dla dodatków = 3,42; dla interakcji = 7,65 LSD _{α=0,05} for Cd soil pollution = 3.42; for amendments = 3.42; for interaction = 7.65						
Korzenie – Roots						
0	13,3	13,5	12,5	12,8	16,8	13,8
10	13,8	9,3	9,0	8,5	15,0	11,1
20	11,1	6,0	6,5	6,0	14,0	8,7
30	8,7	3,0	6,8	6,0	11,5	7,2
40	7,2	1,8	2,5	4,5	13,8	6,0
Średnia Average	10,8	6,7	7,5	7,6	14,2	9,4
<i>r</i>	-0,92**	-0,95**	-0,91**	-0,78**	-0,52*	-0,65**
NIR _{α=0,05} dla dawek Cd = 1,02; dla dodatków = 1,02; dla interakcji = 2,89 LSD _{α=0,05} for Cd soil pollution = 1.02; for amendments = 1.02; for interaction = 2.89						

* Współczynnik korelacji *r* istotny dla α = 0,05; ** Współczynnik korelacji *r* istotny α = 0,01.

* Correlation coefficient *r* significant for α = 0.05; ** Correlation coefficient *r* significant for α = 0.01.

Średni plon części nadziemnych kukurydzy mieścił się w zakresie od 156,6 g w obiektach z bentonitem do 313,1 g·wazon⁻¹ w serii z kompostem (tab. 4). W serii bez dodatków zanieczyszczenie gleby kadmem na poziomie dwóch niższych dawek skutkowało przyrostem masy nadziemnej kukurydzy. Istotną redukcję plonów w odniesieniu do obiektu kontrolnego tej serii wywołały dopiero dwie najwyższe dawki kadmu (30 i 40 mg Cd·kg⁻¹ gleby), a redukcję masy korzeni zaobserwowano po zastosowaniu dawki 10 mg Cd·kg⁻¹ gleby. W badaniach Ciećko i innych [2000b] spadek plonu kukurydzy wykazano już przy dawce równej 10 mg Cd·kg⁻¹ gleby. Badania własne wskazują na pozytywny wpływ dodatku kompostu na plon masy nadziemnej kukurydzy oraz ograniczenie redukcji plonu na skutek zanieczyszczenia podłoża kadmem. Obserwacje

Tabela 4. Plon świeżej masy nadziemnej i korzeni kukurydzy [g św. m.·wazon⁻¹]Table 4. Yield of fresh aerial parts and roots of maize [g FM·pot⁻¹]

Dawka kadmu [mg Cd·kg ⁻¹ gleby] Cd dose [mg·kg ⁻¹ of soil]	Serie doświadczenia – Objects					Średnia Average
	bez dodatków without amendments	kompost compost	węgiel brunatny brown coal	wapno (CaO) lime (CaO)	bentonit bentonite	
Masa nadziemna – Aerial parts						
0	315,5	328,5	237,5	284,5	187,5	270,7
10	316,0	345,5	278,0	283,0	151,5	274,8
20	332,0	294,0	258,5	283,0	165,0	266,5
30	303,5	309,5	266,5	207,0	150,0	247,3
40	284,5	288,0	235,5	187,0	129,0	224,8
Średnia Average	310,3	313,1	255,2	248,9	156,6	256,8
<i>r</i>	–0,53*	–0,70**	n.i.; n.s.	–0,88**	–0,85**	–0,27*
NIR _{α=0,05} dla dawek Cd = 6,71; dla dodatków = 6,71; dla interakcji = 14,99 LSD _{α=0,05} for Cd soil pollution = 6.71; for amendments = 6.71; for interaction = 14.99						
Korzenie – Roots						
0	32,0	19,5	35,0	25,0	38,5	30,0
10	19,0	34,5	38,5	34,0	41,5	33,5
20	24,5	21,0	36,5	35,5	40,5	31,6
30	27,5	33,8	35,5	37,5	42,0	35,3
40	39,5	28,5	28,0	34,5	44,0	34,9
Średnia Average	28,5	27,5	34,7	33,3	41,3	33,1
<i>r</i>	n.i. – n.s.	n.i. – n.s..	n.i. – n.s.	n.i. – n.s.	n.i. – n.s.	n.i. – n.s.
NIR _{α=0,05} dla dawek Cd = 3,28; dla dodatków = 3,28; dla interakcji = 7,34; LSD _{α=0,05} for Cd soil pollution = 3.28; for amendments = 3.28; for interaction = 7.34						

* Współczynnik korelacji *r* istotny dla α = 0,05; ** Współczynnik korelacji *r* istotny α = 0,01; n.i. – nieistotny.

* Correlation coefficient *r* significant for α = 0.05; ** Correlation coefficient *r* significant for α=0.01; n.s. – not significant.

te jednak nie znajdują potwierdzenia w analizie statystycznej. Zwiększenie plonu roślin na skutek dodatku materii organicznej do gleby odnotowali Ciećko i inni [2001] oraz Krzywy-Gawrońska [2011]. Z kolei dodatek do gleby węgla brunatnego, wapna i bentonitu obniżył plon kukurydzy. Reakcję w postaci obniżenia plonowania kukurydzy na skutek wapnowania gleby potwierdzają również badania Ciećko i innych [2000b].

Wzrastające zanieczyszczenie gleby kadmem wysoce istotnie oddziaływało na obniżenie plonu masy nadziemnej rzodkiewki (tab. 5). Najniższy średni plon korzeni i masy nadziemnej rzodkiewki odnotowano w serii bez dodatków i wynosił on odpowiednio 11,7 i 25,8 g·wazon⁻¹. Najwyższy plon korzeni (108,9 g) odnotowano w serii z dodatkiem bentonitu, a masy nadziemnej (78,5 g) w serii z kompostem. Na plon korzeni niekorzystny wpływ miały trzy najwyższe dawki kadmu, z kolei dawka w ilości

Tabela 5. Plon świeżej masy nadziemnej i korzeni rzodkiewki [g św. m.·wazon⁻¹]

Table 5. Yield of fresh aerial parts and roots of radish [g FM·pot⁻¹]

Dawka kadmu [mg Cd·kg ⁻¹ gleby] Cd dose [mg·kg ⁻¹ of soil]	Serie doświadczenia – Objects					Średnia Average
	bez dodatków without amendments	kompost compost	węgiel brunatny brown coal	wapno (CaO) lime (CaO)	bentonit bentonite	
Masa nadziemna – Aerial parts						
0	66,5	87,5	89,0	83,5	86,0	82,5
10	40,0	77,0	89,5	79,5	87,0	74,6
20	9,5	65,5	78,0	74,5	71,0	59,7
30	8,5	33,0	76,5	55,5	72,5	49,2
40	4,3	22,5	59,5	32,0	71,0	37,9
Średnia Average	25,8	57,1	78,5	65,0	77,5	60,8
<i>r</i>	-0,92**	-0,97**	-0,82**	-0,92**	-0,67**	-0,60**
NIR _{α = 0,05} dla dawek Cd = 3,24; dla dodatków = 3,24; dla interakcji = 7,26; LSD _{α = 0,05} for Cd soil pollution = 3.24; for amendments = 3.24; for interaction = 7.26						
Korzenie – Roots						
0	24,5	83,5	88,0	99,5	105,5	80,2
10	25,5	96,0	96,0	106,0	121,0	88,9
20	3,8	80,5	99,0	80,0	116,0	75,9
30	3,5	36,0	85,5	56,5	116,5	59,6
40	1,3	14,0	64,5	23,5	85,5	37,8
Średnia Average	11,7	62,0	86,6	73,1	108,9	68,5
<i>r</i>	-0,88**	-0,89**	-0,65**	-0,94**	-0,48*	-0,41**
NIR _{α = 0,05} dla dawek Cd = 2,11; dla dodatków = 2,11; dla interakcji = 4,72 LSD _{α = 0,05} for Cd soil pollution = 2.11; for amendments = 2.11; for interaction = 4.72						

* Współczynnik korelacji *r* istotny dla α = 0,05; ** Współczynnik korelacji *r* istotny α = 0,01.

* Correlation coefficient *r* significant for α = 0.05; ** Correlation coefficient *r* significant for α = 0.01.

10 mg Cd·kg⁻¹ gleby nieznacznie zwiększyła plon korzeni. W wyniku aplikacji do podłoża dodatków inaktywujących obserwowano zwiększenie plonu korzeni i masy nadziemnej rzodkiewki. Badania Kwiatkowskiej-Maliny i Maciejewskiej [2009] potwierdzają pozytywną rolę węgla brunatnego w kształtowaniu plonów rzodkiewki. Ponadto w badaniach własnych dodatek bentonitu wpływał na zwiększenie plonów rzodkiewki i zdecydowane zahamowanie tendencji do ich obniżania na skutek rosnących dawek kadmu.

Aplikacja do gleby wzrastających dawek kadmu istotnie oddziaływała na obniżenie plonu masy nadziemnej facelii (tab. 6). Jednak redukcja plonu masy nadziemnej i korzeni facelii pod wpływem wzrastających dawek kadmu, w serii bez dodatków, nie

Tabela 6. Plon świeżej masy nadziemnej i korzeni facelii [g św. m.·wazon⁻¹]Table 6. Yield of fresh aerial parts and roots of phacelia [g FM·pot⁻¹]

Dawka kadmu [mg Cd·kg ⁻¹ gleby] Cd dose [mg·kg ⁻¹ of soil]	Serie doświadczenia – Objects					Średnia Average
	bez dodatków without amendments	kompost compost	węgiel brunatny brown coal	wapno (CaO) lime (CaO)	bentonit bentonite	
Masa nadziemna – Aerial parts						
0	268,5	293,3	274,0	288,5	251,0	275,1
10	217,5	282,0	274,0	287,0	250,0	262,1
20	150,8	291,5	257,0	233,5	249,0	236,8
30	123,5	259,5	237,5	224,0	250,0	218,9
40	120,5	236,0	197,0	158,0	248,0	191,9
Średnia Average	176,2	272,5	247,9	238,2	249,6	237,0
<i>r</i>	–0,95**	–0,85**	–0,91**	–0,95**	n.i. – n.s.	–0,59**
NIR _{α=0,05} dla dawek Cd = 4,68; dla dodatków = 4,68; dla interakcji = 10,47 LSD _{α=0,05} for Cd soil pollution = 4.68; for amendments = 4.68; for interaction = 10.47						
Korzenie – Roots						
0	12,3	26,0	14,5	23,0	29,0	21,0
10	11,0	24,9	15,0	16,8	29,1	19,4
20	9,9	24,0	19,3	15,1	29,3	19,5
30	9,6	22,5	20,0	14,5	30,3	19,4
40	6,1	21,3	9,8	13,9	27,0	15,6
Średnia Average	9,8	23,7	15,7	16,7	28,9	19,0
<i>r</i>	–0,83**	–0,70**	n.i. – n.s.	–0,82**	n.i. – n.s.	n.i. – n.s.
NIR _{α=0,05} dla dawek Cd = 1,13; dla dodatków = 1,13; dla interakcji = 2,53 LSD _{α=0,05} for Cd soil pollution = 1.13; for amendments = 1.13; for interaction = 2.53						

* Współczynnik korelacji *r* istotny dla α = 0,05; ** Współczynnik korelacji *r* istotny α = 0,01; n.i. – nieistotny

* Correlation coefficient *r* significant for α = 0.05; ** Correlation coefficient *r* significant for α = 0.01; n.s. – not significant

przekraczała 55% i nie była tak drastyczna jak w przypadku łubinu czy rzodkiewki. Najniższy średni plon części nadziemnych facelii równy 176,2 g odnotowano w serii bez dodatków neutralizujących, a najwyższy – 272,5 g·wazon⁻¹ – w serii z kompostem. Dodatek substancji neutralizujących przyczynił się do istotnego wzrostu średniego plonu masy nadziemnej i korzeni facelii. Pozytywną rolę węgla brunatnego w odniesieniu do plonów facelii podkreślają również Kwiatkowska-Malina i Maciejewska [2009]. Z kolei Krzywy-Gawrońska [2011] w trzyletnim doświadczeniu polowym wykazała dodatni wpływ stosowania popiołu z węgla brunatnego na średni plon roślin miskanta cukrowego. Dodatki inaktywujące zastosowane w doświadczeniu z facelią pozytywnie wpływały na łagodzenie skutków szkodliwego działania wzrastających dawek kadmu. Najskuteczniej redukcję plonu masy nadziemnej facelii na tle rosnącego zanieczyszczenia gleby kadmem hamował dodatek bentonitu.

Potwierdzeniem obserwowanych korelacji pomiędzy wysokością uzyskanych plonów a rozpatrywanymi w badaniach czynnikami jest obliczony indeks tolerancji (tab. 7). W przypadku roślin łubinu żółtego dla wszystkich obiektów doświadczalnych indeks ten kształtował się poniżej 1, w przedziale od 0,02 do 0,90, przy czym najniższe wartości odnotowano w serii bez dodatków (0,02–0,70), a najwyższe w serii z bentonitem (0,53–0,90). Podobnie w przypadku roślin rzodkiewki, dla której indeks ten w 75% obiektów był niższy od jedności i przybierał wartości od 0,05 do 1,15. Wartości indeksu tolerancji były również niekorzystne dla roślin facelii, w doświadczeniu tym 78% obiektów to $Ti < 1$, jednak wartości dla Ti mieściły się w przedziale od 0,45 do 1,38. W doświadczeniu tym również najniższe wartości dla Ti odnotowano w serii bez dodatków, a najwyższe w serii z węglem brunatnym (0,68–1,38) i bentonitem (0,93–1,04). Zdecydowanie najwyższe wartości indeksu tolerancji (0,59–1,77) obliczono dla roślin kukurydzy, dla których $Ti < 1$ nie przekraczało 50% obiektów doświadczalnych. W doświadczeniu tym najwyższe wartości dla Ti uzyskano w obiektach z dodatkiem kompostu (0,88–1,77).

WNIOSKI

1. W serii bez dodatków aplikacja kadmu do gleby w dawkach równych 20, 30 i 40 mg Cd·kg⁻¹ powodowała wyraźne zmniejszenie plonu masy nadziemnej oraz korzeni łubinu żółtego i rzodkiewki, a znacznie mniejszy spadek plonu części nadziemnych facelii, który mieścił się w przedziale 44–55% w odniesieniu do kontroli. Redukcja plonów części użytkowych kukurydzy była powodowana tylko dwiema najwyższymi dawkami kadmu i nie przekraczała 10%.

2. Zastosowane materiały do inaktywacji kadmu w postaci kompostu, węgla brunatnego, wapna i bentonitu wpłynęły pozytywnie na zwiększenie średniego plonu części użytkowych łubinu, facelii i rzodkiewki. Z kolei średni plon masy nadziemnej kukurydzy był pozytywnie stymulowany tylko przez aplikację do gleby kompostu.

3. Dodatki inaktywujące z reguły wpływały na zmniejszenie redukcji plonów roślin na tle wzrastających dawek kadmu. Bentonit w największym stopniu ograniczał redukcję plonu masy nadziemnej łubinu żółtego i facelii błękitnej oraz korzeni rzodkiewki, a kompost części nadziemnych kukurydzy.

Tabela 7. Indeks tolerancji łubinu żółtego, kukurydzy, rzodkiewki i facelii

Table 7. Tolerance index for yellow lupine, maize, radish and phacelia

Dawka kadmu [mg Cd·kg ⁻¹ gleby] Cd dose [mg·kg ⁻¹ of soil]	Serie doświadczenia – Objects									
	bez dodatków without amendments		kompost compost		węgiel brunatny brown coal		wapno (CaO) lime (CaO)		bentonit bentonite	
	masa nadziemna above-ground parts	korzenie roots	masa nadziemna above-ground parts	korzenie roots	masa nadziemna above-ground parts	korzenie roots	masa nadziemna above-ground parts	korzenie roots	masa nadziemna above-ground parts	korzenie roots
Łubin żółty – Yellow lupine										
10	0,25	0,70	0,56	0,69	0,34	0,72	0,53	0,66	0,90	0,89
20	0,03	0,19	0,12	0,44	0,25	0,52	0,21	0,47	0,60	0,83
30	0,02	0,11	0,07	0,22	0,20	0,54	0,18	0,47	0,53	0,68
40	0,02	0,08	0,03	0,13	0,08	0,20	0,11	0,35	0,54	0,82
Średnia Average	0,08	0,27	0,19	0,37	0,22	0,50	0,26	0,49	0,64	0,81
Kukurydza – Maize										
10	1,00	0,59	1,05	1,77	1,17	1,10	0,99	1,36	0,81	1,08
20	1,05	0,77	0,89	1,08	1,09	1,04	0,99	1,42	0,88	1,05
30	0,96	0,86	0,94	1,73	1,12	1,01	0,73	1,50	0,80	1,09
40	0,90	1,23	0,88	1,46	0,99	0,80	0,66	1,38	0,69	1,14
Średnia Average	0,98	0,86	0,94	1,51	1,09	0,99	0,84	1,42	0,79	1,09
Rzodkiewka – Radish										
10	0,60	1,04	0,88	1,15	1,01	1,09	0,95	1,07	1,01	1,15
20	0,14	0,16	0,75	0,96	0,88	1,13	0,89	0,80	0,83	1,10
30	0,13	0,14	0,38	0,43	0,86	0,97	0,66	0,57	0,84	1,10
40	0,06	0,05	0,26	0,17	0,67	0,73	0,38	0,24	0,83	0,81
Średnia Average	0,23	0,35	0,57	0,68	0,85	0,98	0,72	0,67	0,88	1,04
Facelia – Pfacelia										
10	0,81	0,89	0,96	0,96	1,00	1,03	0,99	0,73	1,00	1,00
20	0,56	0,80	0,99	0,92	0,94	1,33	0,81	0,66	0,99	1,01
30	0,46	0,78	0,88	0,87	0,87	1,38	0,78	0,63	1,00	1,04
40	0,45	0,50	0,80	0,82	0,72	0,68	0,55	0,60	0,99	0,93
Średnia Average	0,57	0,74	0,91	0,89	0,88	1,11	0,78	0,66	0,99	1,00

LITERATURA

- Badora A., Kozłowska-Strawska J., 2011. Wybrane wskaźniki jakości roślin uprawnych. Ochr. Środ. i Zasob. Natur. 48, 439–452.
- Basta N.T., Ryan J.A., Chaney R.L., 2005. Trace element chemistry in residual-treated soil: Key concepts and metal bioavailability. J. Environ. Qual. 34, 49–63.
- Ciećko Z., Rzoska R., Rolka E., Harnisz M., 2000a. Wpływ zanieczyszczenia gleby kadmem na plonowanie i skład chemiczny marchwi. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 471(2), 889–894.
- Ciećko Z., Wyszowski M., Żołnowski A., Kozon E., 2000b. Plonowanie i skład chemiczny kukurydzy uprawianej na glebie zanieczyszczonej kadmem. Zesz. Nauk. Kom. „Człowiek i środowisko” PAN 26, 253–257.
- Ciećko Z., Wyszowski M., Krajewski W., Zabielska J., 2001. Effect of organic matter and liming on the reduction of cadmium uptake from soil by triticale and spring oilseed rape. Sci. Total Environ. 281, 37–45.
- Gondek K., 2010. Zinc and cadmium accumulation in maize (*Zea Mays* L.) and the concentration of mobile forms of these metals in soil after application of farmyard manure and sewage sludge. J. Elem. 15(4), 639–652.
- Karczewska A., Kabała C., 2010. Gleby zanieczyszczone metalami ciężkimi i arsenem na Dol. Śląsku – potrzeby i metody rekultywacji. Zesz. Nauk. UP Wroc. Rol. XCVI, 576, 59–79.
- Kaszubkiewicz J., Kawałko D., 2009. Zawartość wybranych metali ciężkich w glebach i roślinach na terenie powiatu jeleniogórskiego. Ochr. Środ. i Zasob. Natur. 40, 177–189.
- Krzywy-Gawrońska E., 2011. Ocena wielkości plonu oraz wartości opałowej miskanta cukrowego (*Miscanthus sacchariflorus*) pod wpływem nawożenia kompostem wyprodukowanym metodą GWDA i wysokowapniowym popiołem z węgla brunatnego. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln. 565, 175–184.
- Kucharski J., Wieczorek K., Wyszowska J., 2011. Aktywność dehydrogenaz w glebach zanieczyszczonych cynkiem, miedzią, niklem i kadmem. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln. 567, 139–148.
- Kwiatkowska-Malina J., Maciejewska A., 2009. Wpływ materii organicznej na pobieranie metali ciężkich przez rzodkiewkę i facelię. Ochr. Środ. i Zasob. Natur. 40, 217–223.
- Microsoft 2002. Microsoft Excel, [www: http://www.microsoft.com](http://www.microsoft.com) (data dostępu: 10.02.2014).
- Puschenreiter M., Horak O., Friesl W., Hartl W., 2005. Low-cost agricultural measures to reduce heavy metal transfer into food chain – a review. Plant, Soil and Environ. 51, 1–11.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dz.U. Nr 165, poz. 1359).
- Schützendübel A., Polle A., 2002. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. J. Exp. Bot. 53, 1351–1365.
- Siwek M., 2008. Rośliny w skażonym metalami ciężkimi środowisku przemysłowym. Część II. Mechanizmy detoksykacji i strategie przystosowania roślin do wysokich stężeń metali ciężkich. Wiad. Bot. 52(3/4), 7–23.
- Spiak Z., Romanowska M., Radola J., 2000. Toksyczna zawartość cynku w glebach dla różnych gatunków roślin uprawnych. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln. 471(2), 1125–1134.
- StatSoft 2009. Statistica StatSoft Inc., 2009, wersja 9.0, www.statsoft.com.
- Su D., Wong J.W.C., 2004. Selection of mustard oilseed rape (*Brassica juncea* L.) for phytoremediation of cadmium contaminated soil. B. Environ. Contam. Tox. 72, 991–998.
- Young D.S., Tye A., Carstensen A., Resende L., Crout N., 2000. Methods for determining labile cadmium and zinc in soil. Europ. J. Soil Sci. 51(1), 129–136.

THE YIELDS OF SELECTED CROPS ON SOILS CONTAMINATED BY CADMIUM AND SUPPLIED NEUTRALIZING SUBSTANCES

Summary. The purpose of the study has been to examine the effect of soil contamination by incremental doses of cadmium on yield of several crops grown in soil ameliorated with such inactivating substances as lime, compost, brown coal and bentonite. The research consisted of four pot experiments, in which yellow lupine, maize, radish and blue phacelia. Cadmium was introduced to soil in the form of aqueous solution of cadmium chloride, in doses of 0, 10, 20, 30 and 40 mg Cd·kg⁻¹. Lime was applied in doses corresponding to 1 Hh; doses of compost and brown coal equaled 4% of the soil mass in a pot, while the amount of bentonite reached 4% in pots with yellow lupine and 2% in pots with maize, radish and phacelia. The substrate was composed of brown soil, sampled from the arable and humic horizon, with the texture of slightly loamy sand. The soil under yellow lupine, maize and radish was very acid, while that under phacelia was slightly acid in reaction. After harvest, fresh aerial and roots mass yields were determined for each pot separately. The results were analyzed statistically with an Anova test at $\alpha = 0.05$, using the Statistica 9.0 software, while the *r* correlation coefficient between the analyzed factors was calculated with a Microsoft Excel package.

The direction of the correlation between cadmium doses and yields depended on the species of plant and type of inactivating substance. In a series without neutralizing substances, the soil contamination with the cadmium doses of 20, 30 and 40 mg Cd·kg⁻¹ had a strong adverse effect on the yield of yellow lupine aerial parts and the yield of radish roots and aerial parts, which declined by 84–98% versus the control. The same doses of cadmium caused much smaller loss of phacelia yields, which ranged between 44 and 55% relative to the control. In turn, the yield of useful parts of maize was depressed by the highest cadmium contamination levels, never exceeding 10% compared to the control. Compost, brown coal, lime or bentonite added to soil to alleviate the effect of cadmium pollution produced positive effects, such as higher average yields of lupine and phacelia aerial organs as well as radish roots. In the experiment on maize, the mean aerial yield was higher only in the series with compost. The inactivating substances led to another result, such as smaller yield reductions of all the crops exposed to increasing doses of cadmium in soil. Bentonite was most effective in reducing yield losses of yellow lupine and blue phacelia aerial mass as well as radish roots, while compost was best at limiting the yield loss of maize aerial organs.

Key words: cadmium, soil contamination, neutralizing substances, crops