

JÓZEFA WIATER

Katedra Technologii w Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku Politechnika Białostocka, e-mail: j.wiater@pb.edu.pl

**BIOAKUMULACJA WYBRANYCH METALI CIĘŻKICH
W KUKURYDZY UPRAWIANEJ NA PASZĘ**

Celem badań była ocena bioakumulacji wybranych metali ciężkich w roślinach kukurydzy, która jest uprawiana na coraz większym areale gruntów. Celem uprawy jest głównie pasza dla bydła mlecznego, którego hodowla stała się dominującym kierunkiem rozwoju rolnictwa na Podlasiu. Badania wykonano w oparciu o próbki gleb lekkich i średnich oraz próbki uprawianej kukurydzy. W próbkach gleb oznaczono zawartość ogólną kadmu, ołowiu, niklu, miedzi i cynku, oznaczono zawartość tych samych metali w roślinach. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono współczynniki bioakumulacji w/w metali w roślinach kukurydzy. Stwierdzono, że gleby na których uprawiano kukurydzę w większości charakteryzowały się zawartością metali ciężkich na poziomie tła geochemicznego. Niewielkich część była zanieczyszczona kadmem na I poziomie wg liczb IUNG. Kukurydza ze względu na zawartość metali ciężkich spełniała wymogi opracowane dla roślin paszowych. Współczynniki bioakumulacji metali w kukurydzy były najczęściej niskie i adekwatne do niskiej ich zawartości w glebach, choć w przypadku kadmu i ołowiu wskazują na źródło poza glebowe.

Słowa kluczowe: metale ciężkie, gleby, rośliny, bioakumulacja

I. WSTĘP

Termin „metale ciężkie” odnosi się do grupy metali i metaloidów których gęstość przekracza $4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ lub pięć razy i więcej gęstość wody, które są toksyczne lub trujące nawet w niewielkich ilościach. Jednak najważniejszym czynnikiem decydującym o przynależności danego pierwiastka do grupy metali ciężkich nie jest gęstość, lecz jego właściwości chemiczne. Do metali ciężkich można zaliczyć np. ołów (Pb), kadm (Cd), cynk (Zn), rtęć (Hg), arsen (As), srebro (Ag), chrom (Cr), miedź (Cu), żelazo (Fe) oraz platynowce [Hawkes 1997, Duruibe i in. 2007].

Metale nie są biodegradowalne i kumulują się w środowisku, choć wiele metali i metaloidów jest niezbędnych do rozwoju życia biologicznego (np. Cu, Co, Mn, Fe, Ni, Se, Mo i Zn) i dlatego ich obecność w otaczającym środowisku jest niezbędna. Bioakumulacja w/w pierwiastków jest naturalnym procesem niezbędnym żywym organizmom do metabolizmu i wzrostu. Wiele organizmów rozwinęło efektywne metody regulowania zawartości niezbędnych metali w wąskim zakresie (homeostaza). Mechanizmy te odgrywają znaczną rolę w detoksykacji metali zbędnych, takich jak np. Pb, Cd i Hg. Istnieje optymalny zakres zawartości dla każdego niezbędnego pierwiastka, który pozwala na prawidłowy metabolizm.

DOI: [10.15584/pjds.2020.24.1.13](https://doi.org/10.15584/pjds.2020.24.1.13)

Poniżej tego optymalnego poziomu, toksyczność pojawia się jako skutek niedoboru, powyżej tego poziomu - toksyczność jest skutkiem nadmiaru. Niektóre organizmy regulują stężenie pierwiastków, które nie są niezbędne, do poziomu tła geochemicznego [Kabata-Pendias, Pendias 1999]. Kiedy poziom ten zostanie przekroczony pojawia się toksyczność. Pobieranie z gleby i bioakumulacja pierwiastków śladowych przez rośliny są istotnym elementem ich obiegu przyrodniczego [Kabata-Pendias i Szteke 2006]. Skład chemiczny wielu roślin odzwierciedla występowanie pierwiastków w podłożu, co m.in. wykorzystuje się w bioindykacji zanieczyszczenia środowiska. Rośliny pobierają pierwiastki głównie przez korzenie (aktywnie i biernie). Natomiast pewna ich część przenika do wnętrza rośliny poprzez nadziemne części roślin (głównie liście). Wśród roślin konsumpcyjnych, największa zawartość pierwiastków śladowych charakteryzuje warzywa liściowe, nieco mniejsze ilości znajdują się w roślinach kapustnych i korzeniowych, a najmniej zawierają warzywa, których częścią jadalną są owoce [Miclean i in. 2008]. Wśród roślin, szczególną grupę stanowią tzw. hyperakumulatory. Są to rośliny, które gromadzą w tkankach swoich części nadziemnych wyjątkowo duże ilości metali ciężkich, przykładowo: ponad 10 000 mg Zn lub Mn, czy ponad 1000 mg Ni, Cu, Co, Cr i Pb na 1kg suchej masy pędu. Znanych jest ponad 400 gatunków hyperakumulatorów. Najwięcej roślin hyperakumuluje nikiel, a najmniej najbardziej toksyczne pierwiastki balastowe, takie jak kadm i ołów [Baranowska-Morek 2003]. Głównym źródłem skażenia roślin uprawnych metalami ciężkimi (na obszarach wolnych od istotnych źródeł zanieczyszczeń atmosferycznych) jest gleba, a ich zawartość w niej zależy od koncentracji metali w skale macierzystej, przebiegu procesów glebotwórczych [Gruca-Królikowska i Waclawek 2006], a także sposobu nawożenia. Bioprzyswajalność dla roślin pierwiastków zawartych w glebie zależy od jej odczynu, warunków oksydoredukcyjnych, składu granulometrycznego, zawartości substancji organicznej, wodorotlenków Fe, Mn, Al i mikroorganizmów, interakcji pomiędzy pierwiastkami, a także formy występowania pierwiastka oraz jego podatności do przechodzenia z fazy stałej do fazy ciekłej gleby. Pobranie pierwiastków, czy związków chemicznych przez rośliny z roztworu glebowego zależy również od pewnych czynników związanych z samą rośliną. Należą do nich: procesy fizyczne, takie jak penetracja profilu glebowego przez system korzeniowy, zmiany zawartości wody i jonów oraz związek tego procesu z kinetyką rozpuszczalności metali w glebie; parametry biologiczne, takie jak kinetyka transportu przez membrany, interakcje jonów, przeznaczenie metaboliczne pobranych jonów, czy zdolność roślin do adaptowania się do zmian narażenia na metale w środowisku [Baranowska-Morek 2003].

Celem badań była ocena bioprzyswajalności wybranych metali ciężkich w roślinach kukurydzy uprawianej na około 30% areалу gruntów w Polsce, z przeznaczeniem na pasze dla bydła głównie mlecznego.

II. MATERIAŁ I METODY

Badania wykonano w oparciu o próbki pobrane z gleb uprawnych w 14 punktach jednej z gmin woj. podlaskiego. Wybrano po siedem gleb o kategorii agronomicznej lekkich i średnich, na których uprawiano kukurydzę na paszę. Gleby lekkie i średnie występują w przewadze wśród gleb woj. podlaskiego. Gleby były oddalone od zewnętrznych źródeł zanieczyszczeń, jak drogi czy zakłady przemysłowe. Próbki pobrano z warstwy uprawnej, określonej na głębokość 0-30 cm, po zbiorze roślin uprawnych.

W próbkach gleb oznaczono zawartość ogólną następujących metali, które zalicza się do ciężkich: kadmu, ołowiu, niklu, cynku i miedzi, po ich mineralizacji w wodzie królewskiej, metodą spektrometrii atomowej w płomieniu. W próbkach roślin oznaczono zawartość metali, po mineralizacji na sucho i roztworzeniu popiołu w kwasie azotowym. Stan zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi oceniono wg kryteriów ustalonych przez IUNG [Kabata-

Pendias i in. 1993]. Na podstawie wyników zawartości metali w glebach i roślinach obliczono współczynniki bioakumulacji jako stosunek zawartości metalu w roślinie, do ogólnej zawartości w glebie. Wykonano oznaczenie składu granulometrycznego gleb za pomocą laserowego miernika wielkości cząstek Analysette 22 NanoTec. W glebach oznaczono podstawowe właściwości: pH, zawartość węgla organicznego (analizator TOC multi NC 3100), fosforu, potasu (metoda Egnera-Riehma) i magnezu przyswajalnego (Schachtschabela).

III. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Wśród gleb bardzo lekkich i lekkich przeważały piaski gliniaste i piaski słabo gliniaste, a wśród gleb średnich gliny piaszczyste. Zawartość frakcji spławianej w glebach bardzo lekkich i lekkich wahała się od 5 do 19%, średnio 10,2%, a w glebach średnich udział frakcji spławianych wynosił średnio 22%, przy zakresie 20-28% (tab. 1).

Tabela 1 - Table 1

Właściwości fizyko-chemiczne gleb / *Physico-chemical properties of soils*

Materiał badawczy <i>Research material</i>		pH	C-organiczny <i>C-organic</i> [g kg ⁻¹]	Frakcja spławialna <i>Navigable fraction</i> [%]	Fosfor przyswajalny <i>Available phosphorus</i> [P ₂ O ₅ /100g]	Potas przyswajalny <i>Availabe potassium</i> K ₂ O [mg/100g]	Magnez przyswajalny <i>Availabe magnesium</i> [mg/100g]
gleby lekkie <i>light soils</i>	min - max	4,0 - 7,6	6-37	4-19	4,3-44,0	2,5-29,0	0,7-15,0
	\bar{x}		17	12	15,7	10,5	4,7
gleby średnie <i>medium soils</i>	min - max	4,1 - 7,8	7-42	20-28	2,2-42,0	3,2-48,4	1,7-22,6
	\bar{x}		24	22	13,7	13,5	9,6

Odczyn gleb był mało zróżnicowany i przeważały gleby kwaśne. Gleby średnie charakteryzowały się nieco większym pH. Badane gleby są charakterystyczne dla regionu Podlasia, gdzie większość gleb to gleby lekkie i średnie. Zawartość węgla organicznego w obu grupach gleb była zróżnicowana i w glebach bardzo lekkich i lekkich wynosiła średnio 17 g·kg⁻¹, a w glebach średnich było nieco więcej węgla - 24 g·kg⁻¹. Obie grupy gleb charakteryzowały się zbliżoną zawartością fosforu przyswajalnego, natomiast w glebach średnich było nieco więcej przyswajalnych form potasu i magnezu.

Zawartość ogólna kadmu w analizowanych glebach uprawnych wahała się w zakresie od 0,25 mg·kg⁻¹ s.m. gleby do ponad 1 mg·kg⁻¹ (tab. 2). W czterech glebach zawartość kadmu była nieco wyższa niż 1 mg i gleby te można już sklasyfikować jako zanieczyszczone w I stopniu. Mocek [2002] podaje że, średnia zawartość kadmu w polskich glebach uprawnych wynosi 0,21 mg·kg⁻¹ przy zakresie od 0,03 do 1,35 mg·kg⁻¹.

Średnia zawartość ołowiu w badanych glebach wynosiła ponad 8 mg·kg⁻¹. Wszystkie gleby były nie zanieczyszczone ołowiem. W polskich glebach użytkowanych rolniczo zawartość ołowiu wynosi średnio 13,6 mg·kg⁻¹ przy zakresie od 3,6 do 42 mg·kg⁻¹ [Mocek

2002]. Badania z roku 1999 [Raport 2000] wykazały podwyższoną zawartość Pb (I° zanieczyszczenia wg IUNG) w odniesieniu do 2% badanych gleb z regionu zachodniego kraju. W regionie północnym i północno-wschodnim wszystkie gleby wykazywały naturalną zawartość Pb. Badania analizowanych gleb wykonane obecnie są zbieżne z wynikami zawartymi w Raporcie [2000].

Tabela 2 - Table2

Zawartość ogólna metali w glebach $mg \cdot kg^{-1} s.m.$ / *Total metals in soils $mg \cdot kg^{-1} dm$*

Nr próbki <i>Sample No</i>	Cd	Pb	Ni	Cu	Zn
<i>Gleby lekkie / Light soils</i>					
1	1,00	9,12	5,38	10,41	35,9
2	1,04	7,25	4,12	11,11	31,0
3	0,66	8,50	8,62	16,20	32,0
4	0,44	9,50	7,12	9,36	49,5
5	0,25	11,90	5,62	19,29	52,5
6	1,03	6,62	6,38	14,20	27,8
7	1,10	6,25	9,12	9,56	28,2
\bar{x}	0,63	8,44	6,62	12,87	36,7
Min	0,25	6,25	4,12	9,36	27,8
Max	1,10	11,90	9,12	19,29	49,5
<i>Gleby średnie / Medium soils</i>					
1	0,40	8,50	7,62	14,30	37,4
2	0,36	10,10	7,38	11,22	38,5
3	0,42	7,12	6,12	13,53	37,9
4	0,36	3,75	6,62	24,74	24,5
5	1,12	8,00	8,75	9,57	35,0
6	0,64	6,88	7,88	13,33	38,5
7	0,24	14,20	8,88	11,30	49,9
\bar{x}	0,51	8,36	7,04	13,99	37,4
Min	0,24	3,75	6,12	9,57	24,5
Max	1,12	14,20	8,88	24,74	49,9

Zawartość niklu w glebach uprawnych Polski wynosiła średnio $6,2 mg \cdot kg^{-1}$ [Mocek 2002], przy zakresie od $0,4$ do $46,5 mg \cdot kg^{-1}$ [Raport 2000]. Najwięcej niklu stwierdzano w regionie południowo-wschodnim Polski, gdzie 6% gleb użytkowanych rolniczo wykazuje I° zanieczyszczenia. Zawartość Ni w tym regionie była blisko dwukrotnie wyższa w porównaniu do regionu północnego i zachodniego kraju. W badaniach własnych, przeprowadzonych na glebach lekkich, było średnio ponad $6 mg \cdot kg^{-1}$ niklu, a w średnich ponad $7 mg \cdot kg^{-1}$.

Średnia zawartość miedzi w glebach uprawnych Polski wynosi $6,5 mg \cdot kg^{-1}$ przy zakresie od $1,3$ do $48,2 mg \cdot kg^{-1}$ [Mocek 2002]. Wg badań z 1999 roku podwyższoną zawartość Cu (I°) wykazywało tylko 1% badanych gleb (najwięcej spośród nich znajdowało się w zachodnim regionie kraju – 3%) [Raport 2000]. Najmniej miedzi w Polsce zawierają gleby piaszczyste biellicowe, a najwięcej ciężkie gleby gliniaste, co jest zgodne z uzyskanymi wynikami. Więcej

miedzi było w glebach średnich niż w lekkich. Miedź związana jest z substancją organiczną gleb, a w glebach średnich było więcej węgla niż w lekkich.

Zawartość cynku w badanych glebach w niewielkim stopniu była zróżnicowana w obu rodzajach gleb. Zależność między całkowitą zawartością cynku, a koloidalnymi częściami gleby wykazują Dąbkowska-Naskręt i Różański [2009], co trudno jednoznacznie stwierdzić w przypadku badanych gleb. Całkowita zawartość cynku w analizowanych glebach jest zbliżona do naturalnej zawartości tego pierwiastka w glebach Polski [Kabata-Pendias i Pendias 1999]. Wyniki zawartości całkowitej cynku w analizowanych glebach są podobne do uzyskanych przez Skorbiłowicz i in. [2002]. Podają oni, że zawartość ogólnego cynku wahała się w zakresie od 13,2 do 54,8 mg·kg⁻¹ w glebach kwaśnych Podlasia.

Gleby uprawne w naszym kraju charakteryzują się najczęściej naturalną zawartością metali ciężkich, co już w roku 2000 podano w Raporcie [2000]. Stanowiły one 97% badanych gleb. W woj. podlaskim gleby użytkowane rolniczo badane przed rokiem 2000 przez Terelaka i in. [2000] w 96,91% posiadały naturalną zawartość metali ciężkich, 3,06% mieściła się w I^o zanieczyszczenia, a tylko 0,03% gleb można było zakwalifikować do II^o zanieczyszczenia. Badacze ci nie stwierdzili gleb o wyższych stopniach zanieczyszczenia [Terelak i in. 2000], co zgodne jest z przedstawionymi obecnie wynikami. Zawartość metali w roślinach kukurydzy przedstawiono w tabeli 3, a współczynniki ich akumulacji w tabeli 4.

Tabela 3 - Table 3

Zawartość metali w roślinach kukurydzy w mg·kg⁻¹ s.m / *Metal content in maize plants in mg·kg⁻¹ d.m.*

Nr próbki <i>Sample No</i>	Cd	Pb	Ni	Cu	Zn
<i>Gleby lekkie / Light soils</i>					
1	1,455	1,91	5,35	4,25	48,33
2	0,132	0,92	4,70	3,28	29,72
3	0,131	0,22	5,98	4,08	16,71
4	0,157	0,14	3,20	3,45	31,42
5	0,245	0,81	5,85	6,35	47,37
6	0,256	0,52	4,29	5,40	29,58
7	0,105	0,26	4,88	4,83	34,19
\bar{x}	0,396	0,75	4,89	4,47	33,85
Min.	0,105	0,14	3,20	3,28	16,71
Max	1,455	1,91	5,98	6,35	48,33
<i>Gleby średnie / Medium soils</i>					
1	0,112	0,32	5,90	4,85	24,03
2	0,280	0,16	8,43	3,85	22,83
3	0,253	1,01	4,55	3,25	24,76
4	0,667	0,67	7,03	5,03	32,29
5	0,330	0,33	6,78	5,03	12,88
6	0,257	0,23	2,80	2,55	28,38
7	0,264	0,50	3,98	3,88	28,30
\bar{x}	0,309	0,46	7,06	4,06	24,78
Min	0,112	0,16	2,80	2,55	12,88
Max	0,667	1,01	8,43	5,03	32,29

Zawartość kadmu w roślinach kukurydzy z gleb lekkich była wyższa niż w roślinach z gleb średnich. W kukurydzy gleb lekkich większość roślin zawierała więcej niż 0,5 mg·kg⁻¹ s.m. kadmu, a z gleb średnich były to dwie rośliny. Kadm, pomimo że nie jest niezbędny roślinom do rozwoju, jest pobierany przez nie zarówno przez korzenie, jak i liście. Pierwiastek ten jest łatwo wchłaniany przez rośliny ze wszystkich elementów środowiska (gleba, woda, powietrze) [Węglarzy 2007]. Potwierdzają to wysokie współczynniki przenikania w układzie gleba-roślina: warzywa - 0,05÷0,12 [Moćko i Waclawek 2004] oraz 0,03÷14 [Kachenko i Singh 2006]; 0,11÷0,73 (pszenica), 0,66÷0,95 (szpinak) [Maciejewska i Kwiatkowska 2007]; 0,96÷1,7 w roślinach z rodziny *Umbelliferae* [Pueyo i in. 2003]. Wyliczone współczynniki bioakumulacji dla tego pierwiastka w większości nie odbiegają od podanych w literaturze (tab. 4).

Tabela 4 - Table 4

Współczynnik bioakumulacji metali dla kukurydzy / *Bioaccumulation factor in maize*

Nr próbki <i>Sample No</i>	Cd	Pb	Ni	Cu	Zn
<i>Gleby lekkie / Light soils</i>					
1	1,46	0,21	0,99	0,41	1,35
2	0,13	0,13	1,14	0,30	0,96
3	0,20	0,03	0,69	0,25	0,52
4	0,36	0,01	0,45	0,37	0,63
5	0,97	0,07	1,04	0,33	0,90
6	0,25	0,08	0,67	0,38	1,06
7	0,11	0,04	0,53	0,58	1,21
\bar{x}	0,45	0,08	0,62	0,37	0,95
Min.	0,13	0,01	0,45	0,25	0,52
Max	1,46	0,21	1,14	0,58	1,35
<i>Gleby średnie / Medium soils</i>					
1	0,28	0,04	0,77	0,34	0,64
2	0,77	0,02	1,14	0,34	0,59
3	0,61	0,14	0,74	0,24	0,65
4	1,85	0,18	1,06	0,20	1,31
5	0,29	0,04	0,77	0,52	0,53
6	0,40	0,02	0,36	0,19	0,74
7	1,10	0,04	0,45	0,34	0,57
\bar{x}	0,76	0,06	0,76	0,31	0,72
Min	0,28	0,02	0,36	0,20	0,57
Max	1,85	0,18	1,14	0,52	1,31

W trzech próbkach roślin stwierdzono większy od 1 współczynnik akumulacji, w tym 2 z gleb lekkich, a jedna ze średnich. Wysokość współczynnika bioakumulacji świadczy o innym źródle kadmu niż gleba. Nawet w niewielkich dawkach, kadm jest toksyczny dla zwierząt i ludzi, tak więc jego przenikanie do łańcucha pokarmowego jest bardzo niebezpieczne [Tomócsik i in. 2006]. Metal ten zaburza syntezę RNA (inhibuje działanie rybonukleazy), gospodarkę wodną w roślinie i fotosyntezę, zmniejsza absorpcję azotanów i ich transport z korzeni do części nadziemnych rośliny poprzez inhibicję reduktazy azotanowej, poza tym

inhibituje on fosforylację oksydacyjną, zmniejsza aktywność ATPazy w błonie plazmatycznej oraz aktywność kilku enzymów, m.in.: dehydrogenazy glukozy-6-fosforanowej, dehydrogenazy izocytrynianowej, RuBisCO i anhidrazy węglanowej [Pavlíková i in. 2006].

Wszystkie próbki kukurydzy spełniały kryteria roślin paszowych ze względu na zawartość w nich ołowiu. Tylko w dwóch próbkach roślin ołowiu było ponad $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. Ołów należy do grupy bardzo toksycznych pierwiastków. Na jego działanie najbardziej wrażliwe są warzywa i zboża. Największe ilości tego pierwiastka stwierdza się w sałacie i liściach buraków. Intensywniej kumulują Pb rośliny dwuliścienne (np. warzywa), a wolniej jednoliścienne (zboża). Udział części nadziemnych w pobieraniu Pb jest niewielki, a barierą dla wnikania tego pierwiastka do roślin jest kutykula oraz warstwa wosków. System korzeniowy roślin pobiera Pb w sposób bierny i proporcjonalny do zawartości form rozpuszczalnych w podłożu. Czynniki wyraźnie zwiększającymi jego fitoprzyswajalność jest kwaśny odczyn gleby i wysoka temperatura otoczenia. Akumulacja ołowiu w roślinach, w porównaniu do innych metali ciężkich, następuje bardzo wolno. Świadczą o tym niskie wartości współczynnika przenikania w układzie gleba-roślina (stosunek zawartości metalu w roślinie do ogólnej zawartości w glebie), przykładowo: 0,01 w przypadku warzyw (burak ćwikłowy, pietruszka, marchew, cebula) [Moćko i Waclawek 2004]; $0,005\div 0,057$ (pszenica) [Maciejewska i Kwiatkowska 2007]; $0,0002\div 0,004$ dla roślin z rodziny *Umbelliferae* [Pueyo i in. 2003]; 0,0072 (pomidory) i 0,0058 (marchew) [Miclean i in. 2008]. Współczynniki bioakumulacji ołowiu w badanych roślinach były na poziomie 0,01 do 0,21. Były one wyższe niż podają w/w autorzy. Ołów jest przypuszczalnie pobierany przez rośliny zarówno z podłoża, jak i z pyłu atmosferycznego [Gruca-Królikowska i Waclawek 2006]. Szacuje się, że 73÷95% całkowitej zawartości ołowiu w roślinach to ołów dostający się z pyłami z atmosfery [Kabata-Pendias i Pendias 1999].

Próbki kukurydzy zawierały mniej niklu niż $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. i wszystkie spełniały kryterium dla roślin paszowych. Nie stwierdzono zanieczyszczenia niklem tych roślin. Do momentu osiągnięcia pewnej koncentracji Ni w tkance roślinnej, absorpcja jest dodatnio skorelowana z zawartością Ni w glebie [Kabata-Pendias i Szeke 2006]. Współczynnik bioakumulacji w układzie gleba-roślina dla niklu zawiera się w przedziale $0,1\div 1$. Nikiel przemieszcza się w roślinie z dużą łatwością, przez co istnieje realne zagrożenie związane z akumulacją tego pierwiastka w roślinach uprawnych z obszarów zanieczyszczonych. Większość badanych roślin miało współczynnik bioakumulacji w zakresie podanym przez Klokego, tylko 4 rośliny miały nieco podwyższony. Podobnie jak w przypadku innych metali, dostępność Ni jest większa w glebach lekkich o dużej wilgotności, z niską zawartością materii organicznej i niskim pH roztworu glebowego [Pinel 2003].

Miedź jest pierwiastkiem niezbędnym do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin. Bierze udział w wielu procesach fizjologicznych, gdyż może istnieć na wielu stopniach utlenienia *in vivo*. Zawartość Cu w roślinach zależy nie tylko od zawartości w glebach tego metalu, ale także od gatunku i części rośliny [Kabata-Pendias i Szeke 2006]. Ogólnie można stwierdzić, iż miedź jest mało mobilna w glebach, a zatem mało dostępna dla roślin. Zawartość miedzi w badanej kukurydzy była na poziomie kilku $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. Średnia dla roślin jednoliściennych na terenie Polski wynosi od 5 do 20 mg, a przy zawartości jej poniżej $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ stwierdza się objawy jej niedoboru. Sześć próbek kukurydzy zawierało miedzi mniej niż $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Wyniki te świadczą o małej mobilności tego metalu w glebach. Pomimo nieznacznej mobilności Cu w glebach, rośliny potrafią akumulować jej znaczne ilości, o czym świadczą wysokie współczynniki przenikania w układzie gleba-roślina, np.: dla warzyw - $0,17\div 0,33$ [Moćko i Waclawek 2004] oraz $0,03\div 7,91$ [Kachenko i Singh 2006]; $0,1\div 0,13$ w przypadku roślin z rodziny *Umbelliferae* [Pueyo i in. 2003].

Współczynniki bioakumulacji miedzi dla kukurydzy wynosiły od 0,20 do 0,52 i były zbliżone do podanych przez w/w autorów.

Zawartość cynku była zróżnicowana w obrębie badanych próbek kukurydzy i średnia zawartość wynosiła 33,85 mg·kg⁻¹ s.m. w przypadku próbek z gleb lekkich, a ze średnich była niższa średnio o 5 mg·kg⁻¹ s.m. Cynk należy do pierwiastków niezbędnych roślinom do prawidłowego rozwoju. Jest on składnikiem wielu enzymów, bierze udział w metabolizmie węglowodanów, białek i związków fosforowych, reguluje procesy powstawania rybosomów, wpływa na przepuszczalność błon komórkowych i syntezę auksyn, a także zwiększa odporność roślin na suszę i choroby [Kabata-Pendias i Pendias 1999]. Dostępność dla roślin cynku zawartego w glebie zależy od: pH, zawartości ogólnej Zn, zawartości materii organicznej i węglanu wapnia, warunków redoks, aktywności mikrobiologicznej w ryzosferze, wilgotności gleby, zawartości w glebie innych metali śladowych i makroelementów (zwłaszcza fosforu), a także od warunków klimatycznych [Maciejewska i Kwiatkowska 2007]. Rośliny pobierają cynk poprzez korzenie i liście (w mniejszym stopniu) w formie jonów Zn²⁺, jonów uwodnionych oraz chelatów organicznych. Pierwiastek ten jest często pobierany przez rośliny w nadmiernych ilościach (pobranie jest z reguły proporcjonalne do zawartości w glebie) i wykazuje wtedy działanie toksyczne. O dużej łatwości, z jaką rośliny pobierają Zn świadczą wysokie współczynniki przenikania tego metalu w układzie gleba-roślina, np.: warzywa - 0,08÷0,18 [Moćko i Waclawek 2004] 0,31÷0,67 (szpinak), 0,53÷0,74, 0,2÷1,1 w roślinach z rodziny *Umbelliferae* [Pueyo i in. 2003]. Średnie współczynniki akumulacji cynku w badanej kukurydzy nie przekraczają 1 i są wyższe dla roślin z gleb lekkich, ale zbliżone do pszenicy podawane przez Maciejewską i Kwiatkowską [2007].

IV. WNIOSKI

1. Gleby na których uprawiano kukurydzę w większości charakteryzowały się zawartością metali ciężkich na poziomie tła geochemicznego. Niewielka część była zanieczyszczona kadmem na I poziomie wg kryteriów IUNG.
2. Kukurydza ze względu na zawartość metali ciężkich spełniała wymogi stawiane roślinom paszowym.
3. Wartości współczynników bioakumulacji metali w kukurydzy były najczęściej niskie i w większości są adekwatne do niskiej ich zawartości w glebach.

BIBLIOGRAFIA

1. Baranowska-Morek A. 2003. Roślinne mechanizmy tolerancji na toksyczne działanie metali ciężkich. Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych. 52. 283-298.
2. Dąbkowska-Naskręt H., Róžański S. 2009. Całkowita zawartość oraz fitodostępność Zn, Cu, Mn, Fe w wybranych glebach uprawnych pojezierza gnieźnieńskiego. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln. 541. 97-104.
3. Duruibe J.O., Ogwuegbu M.O.C., Ekwurugwu J.N. 2007. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. Int. J. Phys. Sci. 2. 112-118.
4. Gruca-Królikowska S., Waclawek W. 2006. Metale w środowisku. Cz. II. Wpływ metali ciężkich na rośliny. Chemia-Dydaktyka-Ekologia-Metrologia. 11. 41-56.
5. Hawkes J.S. 1997. What is a heavy metal? J. Chem. Educat. 74. 1374-1378.
6. Kabata-Pendias A. Pendias H. 1999. Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wyd. nauk. PWN. Warszawa.
7. Kabata-Pendias A., Szteke B. 2006. Pierwiastki śladowe w układzie gleba-roślina. Inż. Ekol. 16. 28-29.

8. Kabata-Pendias A., Motowicka-Terelak H., Piotrowska M., Terelak M., Witek T., 1993. Ocena stopnia zanieczyszczenia gleb i roślin metalami ciężkimi i siarką. IUNG, Puławy, R. 53.
9. Kachenko A. G., Singh B. 2006. Heavy metals contamination in vegetables grown in urban and metal smelter contaminated sites in Australia. *Water Air Soil Poll.* 169. 101-123.
10. Maciejewska A., Kwiatkowska J. 2007. Migracja cynku, ołowiu i kadmu w układzie gleba-roślina. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych.* 31. 183-187.
11. Miclean M., Roman C., Levei E., Senila M., Abraham B., Cordos E. 2008. Heavy metals availability for plants in a mining area from North-Western Romania. *Proceedings of the 15th International Congress of ISCO.* 18-23 May. Budapest. 330-333.
12. Mocek A. 2002. Stopnie skażenia gleb Polski metalami ciężkimi. *J. Res. Appl. Agr. Eng.* 47. 29-34.
13. Moćko A., Waclawek W. 2004. Three-step extraction procedure for determination of heavy metals availability to vegetables. *Anal. Bioanal. Chem.* 380. 813-817.
14. Pavlíková, D., Pavlík M., Vokáč K., Staszková L., Balík J., Száková J., Tlustoš P. 2006. The effect of cadmium on plant metabolism. *Proceedings of the International Symposium on Trace Elements in the Food Chain.* Budapest. Hungary. May 25-27. 256-260.
15. Pinel F., Leclerc-Cessac E., Staunton S. 2003. Relative contributions of soil chemistry, plant physiology and rhizosphere induced changes in speciation on Ni accumulation in plant shoots. *Plant Soil* 255. 619-629.
16. Pueyo M., Sastre J., Hernandez E., Vidal M., Lopez-sanchez J. F., Rauret G. 2003. Prediction of trace element mobility in contaminated soils by sequential extraction. *J. Environ. Qual.* 32. 2054-2066.
17. Raport z badań monitorowych nad jakością gleb, roślin, produktów rolniczych i spożywczych w 1999. Michna W. (red.). Warszawa. 2000.
18. Skorbilowicz M., Skorbilowicz E., Wiater J. 2002. Zawartość cynku w wybranych glebach województwa podlaskiego. *Zesz. Nauk Kom. „Człowiek i Środowisko”.* PAN 33. 123-128.
19. Terelak H., Motowicka-Terelak T., Stuczyński T., Pietruch Cz. 2000. Pierwiastki śladowe (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) w glebach użytków rolnych Polski. *Inspekcja Ochrony Środowiska. Biblioteka Monitoringu Środowiska.* Warszawa.
20. Tomócsik A., Makádi M., Bogdányi Z., Orosz V., Márton Á. 2006. Effect of composted sewage sludge on the toxic element content of the soil and plants. *Proceedings of the International Symposium on Trace Elements in the Food Chain.* Budapest. Hungary. May 25-27. 215-219.
21. Węglarzy K. 2007. Metale ciężkie – źródła zanieczyszczeń i wpływ na środowisko. *Wiadomości Zootechniczne.* 3. 31-38.

BIOACCUMULATION OF SELECTED HEAVY METALS IN MAIZE GROWN FOR FODDER

Summary

The aim of the study was to assess the bioaccumulation of selected heavy metals in corn plants grown on the increasing area of land used for fodder for cattle, mainly dairy cattle, whose breeding has become the dominant direction of agricultural development in Podlasie

region. The study was carried out on the basis of light and medium soils samples and maize samples grown for fodder for dairy cows. The total content of cadmium, lead, nickel, copper and zinc was determined in soil samples as well as in plants. On the basis of the obtained results, the bioaccumulation coefficients of the above-mentioned metals in maize plants were calculated. It was found that the soils, on which maize was grown, were mostly characterized by the content of heavy metals at the level of geochemical background. A small part was contaminated with cadmium on the first level according to JUNG numbers. Maize, due to its heavy metal content, met the requirements for fodder plants. The bioaccumulation coefficients of metals in maize were most often low and adequate to their low content in soils, although in the case of cadmium and lead they indicate an off-soil source.

Key words: heavy metals, soil, plants, bioaccumulation