



Wpływ stymulacji laserowej nasion na bioakumulację metali ciężkich w wiechlinie łąkowej (*Poa pratensis* L.)

Beata Grygierzec
Uniwersytet Rolniczy, Kraków

1. Wstęp

Problem zanieczyszczenia roślin i gleb metalami ciężkimi występuje w Polsce lokalnie i dotyczy przede wszystkim obszarów uprzemysłowionych oraz zurbanizowanych. W miastach głównym źródłem skażenia środowiska są środki transportu. Pyły emitowane przez nie zawierają wiele niekorzystnych substancji, w tym metale ciężkie [3]. Zagrożenie stwarzane przez spaliny samochodów jest tym większe, że ich toksyczne składniki są wydalone do atmosfery, często na obszarach gęsto zaludnionych, gdzie zabudowa ogranicza naturalną wymianę powietrza [22]. W obszarach zurbanizowanych środowisko zanieczyszczane jest również pyłami emitowanymi przez zakłady przemysłowe, a w okresie zimowym poważnym źródłem zanieczyszczenia są lokalne kotłownie. Znaczna część emitowanych pyłów jest deponowana na powierzchni gruntów i roślin w pobliżu źródła emisji. Gleby sąsiadujące z ruchliwymi trasami komunikacyjnymi są szczególnie narażone na podwyższone stężenie pierwiastków śladowych [19]. Spośród nich na uwagę zasługują związki cynku, miedzi, ołowiu, niklu, a także chromu [2]. Nierzadko ilość metali ciężkich przekracza dopuszczoną prawem normę dla obszarów zurbanizowanych. Powodem przekraczania norm zawartości pierwiastków śladowych jest długotrwały proces ich kumulacji w glebie, zapewniony przez ciągłą emisję zanieczyszczeń w ruchu ulicznym. Jednak bez względu na źródło pochodzenia metale ciężkie w nadmiernych ilościach stwarzają poważne zagrożenie dla wszystkich organizmów ży-

wych [14]. Stąd też istnieje stała potrzeba monitorowania ich zawartości i poszukiwania nowych sposobów ograniczania zanieczyszczeń w terenach zurbanizowanych. Ważną rolę w oczyszczaniu środowiska odgrywają rośliny. Mogą one służyć jako filtr zanieczyszczonego powietrza (głównie drzewa oraz krzewy), przez co ograniczają rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń na większe odległości [9]. Rośliny pobierają w znacznych ilościach zanieczyszczenia zgromadzone w glebie. Metale z roztworu glebowego są pobierane wraz z wodą i substancjami odżywczymi [5, 25], przy czym niektóre gatunki roślin są bardziej efektywne od innych [17, 25]. Według Dobrzańskiego i in. [8] trawy, których używa się do badań ekotoksykologicznych są dobrym indykatorem skażenia środowiska. Bowiem gatunki występujące na trawnikach przyulicznych mogą pobierać znaczne ilości metali ciężkich [1, 13]. Z roślinności trawiastej wykorzystywanej do obsiewu poboczy, na szczególną uwagę zasługuje, ze względu na swoje właściwości – wiechlina łąkowa. Gatunek ten występuje pospolicie zarówno na skwerach miejskich, boiskach sportowych, polach golfowych, w parkach, miejscach ruderalnych, a także na trwałych użytkach zielonych. Mając na uwadze potrzebę ograniczania zanieczyszczeń w środowisku miejskim przeprowadzono badania dotyczące wykorzystania przedsewnej stymulacji materiału siewnego wiechliny łąkowej. Według Dobrowolskiego [7] szczególne znaczenie dla postępu w tych działaniach posiada zastosowanie stymulacji laserowej materiału biologicznego. Dotychczas przeprowadzone badania wykazały korzystny wpływ przedsewnego traktowania nasion promieniami laserowymi na stymulację kiełkowania, początkowy rozwój oraz plonowanie niektórych roślin zbożowych, okopowych i warzywnych. Jednak wciąż niewiele jest informacji o wpływie naświetlania światłem zielonym diodą laserową materiału siewnego traw na kumulowanie pierwiastków śladowych. Stąd też podjęto badania, których celem było określenie wpływu przedsewnej stymulacji nasion wiechliny łąkowej diodą laserową na zawartość metali ciężkich.

2. Materiał i metody badań

Badania przeprowadzono w latach 2008–2010 w Krakowie. Doświadczenia usytuowano w pobliżu trzech ruchliwych ulic miasta: alei Mickiewicza, Igołomskiej oraz Lublańskiej. Aleje Mickiewicza zlokalizowane są w centrum Krakowa, ulica Igołomska znajduje się na obrzeżach

wschodniej części miasta, natomiast ulica Lublańska administracyjnie należy do śródmieścia, jednak położona jest w północnej części miasta i łączy się z głównym szlakiem komunikacyjnym wiodącym do Warszawy.

W każdym z miejsc ustawiono po 16 obiektów (2 warianty w 8 powtórzeniach). Obiektami doświadczalnymi były wazony z wiechliną łąkową, odmianą gazonową Alicja. Wczesną wiosną 2008 roku każdy wazon napełniono glebą (czarnoziemem zdegradowanym wytworzonym z lessu) w ilości 2 kg na wazon, pochodzącą z wierzchniej warstwy ornej gruntu rolnego od 0 do 10 cm. Właściwości chemiczne gleby przedstawiały się następująco: $\text{pH}_{\text{KCl}}=6,1$; przyswajalne P–35; K–49 i Mg–14 g/kg; N–organiczny 1,1; węgiel ogólny 9,2 g/kg gleby; Zn–79,56; Cu–8,15; Pb–24,39; Ni–2,01; Cr–10,43 mg/kg. Następnie wysiano nasiona wiechliny łąkowej w ilości po 10 na wazon. Do 24 wazonów wysiano nasiona wiechliny łąkowej naświetlone światłem zielonym o długości fali $\lambda=660$ nm i mocy 21,9 mW, w czasie 30 sekund, trzy razy. Naświetlanie ziarniaków wykonano w Katedrze Kształtowania i Ochrony Środowiska na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo–Hutniczej w Krakowie. Z kolei do pozostałych 24 wazonów wysiano materiał siewny wiechliny łąkowej bez wcześniejszego naświetlania. Po wykiełkowaniu nasion dokonano „przerywki” roślin pozostawiając w wazonach po trzy rośliny, a po rozkrzewieniu się roślin, w wazonie pozostawiono tylko jedną roślinę. Rozkrzewione rośliny eksponowano od maja 2008 roku do października 2010 roku wzdłuż trzech ruchliwych ulic Krakowa.

W sezonie wegetacyjnym roślinność ścinano 4–5 razy do wysokości około 5 cm nad powierzchnią gleby. W okresie letnim i dużej trwającej suszy roślinność w wazonach podlewano wodą destylowaną w ilości 0,5 l na wazon, co 3 dni. Łącznie w sezonie wegetacyjnym wszystkie wazony podlewano 30 razy, co na jeden wazon wynosiło dodatkowo (oprócz opadu atmosferycznego) 15 l wody. Wyjątkowo w trzecim roku badań (2010), ze względu na obfite opady atmosferyczne, nie podlewano roślin eksponowanych w wazonach.

W poszczególnych latach badań roczna temperatura powietrza kształtowała się na poziomie: 2008–9,1°C; 2009–7,5°C; 2010–5,4°C, a w okresie wegetacji odpowiednio: 15,1; 15,3; 13,2°C. Z kolei roczna suma opadów wynosiła: 2008–633,1 mm; 2009–568,1 mm; 2010–940,1 mm. Natomiast suma opadów w okresie wegetacji była równa: 2008–371,5 mm; 2009–359,6 mm; 2010–784,9 mm.

Przed analizą chemiczną materiał glebowy suszono w temperaturze pokojowej, następnie rozdrobniono, przesiano przez sito i oznaczono: skład granulometryczny metodą sitową, pH w 1 mol/dm³ KCl metodą potencjometryczną, zawartość: węgla ogólnego metodą Tiurina w modyfikacji Oleksynowej, azotu ogólnego metodą Kjeldahla, przyswajalnego fosforu metodą Egnera–Riehma kolorymetrycznie, przyswajalnego potasu metodą Egnera–Riehma fotometrycznie oraz przyswajalnego magnezu metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej AAS, po ekstrakcji w 0,0125 mol CaCl₂/dm³. Zawartość form całkowitych metali ciężkich w glebie: Zn, Cu, Pb, Ni, Cr oznaczono techniką AAS po mineralizacji próbek w wodzie królewskiej zgodnie z PN–ISO 11047 [20] i PN–ISO 11466 [21].

Materiał roślinny wysuszono, zmielono, a następnie przeanalizowano na zawartość metali ciężkich Zn, Cu, Pb, Ni, Cr – techniką AAS po mineralizacji w wodzie królewskiej. Analizowaną próbę stanowił zbiorczy materiał roślinny z 8 powtórzeń, z każdego zbioru. Wyjątkiem pod tym względem był ostatni rok badań (2010), w którym roślinność zbierano 4-krotnie, przy czym roślinność z ostatniego zbioru nie łączono w próby zbiorcze, tylko odrębnie analizowano z każdego wazonu zarówno roślinny jak i glebę.

Na podstawie uzyskanych wyników obliczono dla poszczególnych pierwiastków medianę, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności – V (%).

W celu określenia fitotoksyczności badanych metali obliczono współczynniki bioakumulacji (BC). Parametr ten obliczono ze stosunku zawartości metalu w roślinie do jego poziomu w glebie [12].

Uzyskane wyniki poddano obliczeniom statystycznym, wykonując analizę wariancji. Do oceny różnic pomiędzy średnimi zastosowano test Studenta przy poziomie istotności $\alpha=0,05$. Analizę statystyczną wyników wykonano programem Statistica 8,0.

3. Omówienie i dyskusja wyników

Odczyn gleby jest jednym z najważniejszych czynników wpływających bezpośrednio na biodostępność metali i ich pobieranie przez rośliny. Gębski [11] podaje, że najbardziej podatny na zmianę odczynu jest Zn. Jego mobilność rośnie już przy spadku pH poniżej 6–6,5, natomiast Cu i Pb właściwość tę wykazują przy pH < 5,0. Tyler i Olsson

[24] stwierdzili dwa wysokie poziomy koncentracji Cu i Pb w roztworze glebowym. Jeden przy pH 5,2–6,5, drugi przy pH 7,5–7,8. Dzieje się tak najprawdopodobniej dlatego, że Cu i Pb wytwarzają w glebie stabilne kompleksy z różnymi ligandami, których rozpuszczalność związana jest z rozpuszczalnością substancji organicznej. Cu i Pb zostały zaliczone do grupy pierwiastków, których stężenie w roztworze glebowym jest „pozornie nieregularnie” związane z jego odczynem. Z kolei Blake i Goulding [4] informują, iż aktywność Zn, Ni, Cu rośnie przy pH 5,5–5,0, a Pb przy pH < 4,5. W glebach o odczynie kwaśnym wyraźnie zwiększa się mobilność pierwiastków i ich przyswajalność przez rośliny, z kolei w glebach o odczynie obojętnym, alkalicznym oraz w obecności węgla wapnia metale ciężkie są w małym stopniu przemieszczane do głębszych warstw [6].

Badane w doświadczeniu gleby miały odczyn obojętny, który mieścił się w zakresie pH od 6,05 do 6,73. Zatem ze względu na stosunkowo wysokie pH, odczyn nie był czynnikiem wpływającym na zwiększenie się mobilności metali w glebie.

Metale różnią się siłą, z jaką są związane przez kompleks sorpcyjny. Szereg wejść poszczególnych metali do kompleksu sorpcyjnego dla gleby lessowej przedstawia się w następujący sposób $Pb > Cu > Cr > Zn > Ni$ [10].

Po trzech latach badań gleba z wazonów z wiechliną łąkową (nie stymulowaną przedsewnie) zawierała następujące ilości metali ciężkich: 90,94–121,33 mg Zn; 10,72–13,06 mg Cu; 31,56–40,94 mg Pb; 3,28–4,22 mg Ni; 13,29–16,63 mg Cr/kg (tab. 1).

Mediany zawartości wymienionych pierwiastków wynosiły: 93,2 mg Zn; 11,1 mg Cu; 34,0 mg Pb; 3,49 mg Ni oraz 14,6 mg Cr/kg. Największą zawartość wszystkich analizowanych metali oznaczono w glebie wazonów eksponowanych przy alei Mickiewicza (I).

Najniższy współczynnik zmienności $V = 20,8\%$ obliczono dla miedzi, a najwyższy $V = 31,4\%$ dla niklu.

Według rozporządzenia Ministra Środowiska [23] dotyczącego standardów jakości gleby i jakości ziemi, dopuszcza się w wierzchnich poziomach terenów przemysłowych – komunikacyjnych (grupa C) następujące zawartości: 1000 mg Zn; 600 mg Cu; 600 mg Pb; 300 mg Ni i 1000 mg Cr/kg. W analizowanej glebie nie zostały przekroczone dopuszczalne normy dla zawartości wszystkich oznaczanych metali.

Tabela 1. Średnia zawartość metali w glebie
Table 1. Mean of the metals in soils

Wyszczególnienie Specification	Bez naświetlania Without irradiation				
	Zn	Cu	Pb	Ni	Cr
	mg/kg				
I	121,33	13,06	40,94	4,22	16,63
II	90,94	10,72	31,56	3,28	13,29
III	93,21	11,14	34,03	3,49	14,55
Średnia – Mean	101,8	11,6	35,5	3,66	14,8
Mediana	93,2	11,1	34,0	3,49	14,6
Sd	30,6	2,42	10,1	1,15	3,39
V (%)	30,1	20,8	28,3	31,4	22,9

I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Całkowita zawartość metali w glebie jest, obok odczynu, jednym z najważniejszych czynników wpływających na ich pobieranie oraz zawartość w roślinie [16].

Gleba z wazonów z wiechliną łąkową (przedsiewnie naświetlaną diodą laserową) zawierała: 82,75–103,58 mg Zn; 9,64–10,40 mg Cu; 26,28–35,60 mg Pb; 2,18–3,22 mg Ni; 11,93–14,50 mg Cr/kg (tab. 2). Mediany zawartości analizowanych pierwiastków wynosiły: 90,1 mg Zn; 10,2 mg Cu; 29,8 mg Pb; 3,09 mg Ni oraz 12,1 mg Cr/kg. Największą zawartością metali ciężkich odznaczała się gleba pochodząca z wazonów eksponowanych wzdłuż alei Mickiewicza (I). Współczynnik zmienności zawierał się w przedziale od 9,3% dla zawartości miedzi do 26,0% dla niklu.

Analiza zawartości metali ciężkich po trzech latach eksponowania wazonów wzdłuż wybranych ulic Krakowa wskazuje, że mniej zanieczyszczone były gleby, obsiane materiałem siewnym wiechliny łąkowej przedsiewnie stymulowanym diodą laserową.

Akumulacja metali w glebie i ich pobieranie przez rośliny zależy również od odległości od źródła emisji, im bliżej emitora, tym stężenia metali w glebie i w roślinności są wyższe [18]. W badaniach własnych obiekty doświadczalne usytuowane były w odległości około 5 m od jezdni.

Analiza zawartości metali ciężkich w wiechlinie łąkowej, której materiał siewny nie był poddany stymulacji światłem, pokazuje, że po trzech latach badań rośliny zawierały średnio następujące ilości metali

ciężkich: 23,12–68,05 mg Zn; 4,65–6,69 mg Cu; 0,93–1,76 mg Pb; 0,62–0,89 mg Ni; 0,69–1,26 mg Cr/kg (tab. 3).

Tabela 2. Średnia zawartość metali w glebie

Table 2. Mean of the metals in soils

Wyszczególnienie Specification	Z naświetlaniem diodą 3 x 30 s With irradiation by diode 3 x 30 s				
	Zn	Cu	Pb	Ni	Cr
	mg/kg				
I	103,58	10,40	35,60	3,22	14,50
II	82,75	9,64	29,81	2,18	12,11
III	90,07	10,15	26,28	3,09	11,93
Średnia – Mean	92,1	10,1	30,6	2,83	12,8
Mediana	90,1	10,2	29,8	3,09	12,1
Sd	19,5	0,93	7,21	0,73	1,85
V (%)	21,1	9,3	23,6	26,0	14,4

I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Tabela 3. Średnia zawartość metali w roślinach

Table 3. Mean of the metals in plants

Wyszczególnienie Specification	Bez naświetlania Without irradiation				
	Zn	Cu	Pb	Ni	Cr
	mg/kg				
I	68,05	6,69	1,76	0,89	1,26
II	23,12	4,65	0,93	0,64	0,96
III	30,58	5,59	1,25	0,62	0,69
Średnia – Mean	40,6	5,64	1,31	0,72	0,97
Mediana	30,6	5,59	1,25	0,64	0,96
Sd	22,0	1,11	0,41	0,17	0,29
V (%)	54,3	19,7	31,6	23,8	29,8

I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Mediany zawartości metali ciężkich w wiechlinie łąkowej ekspozowanej wzdłuż wybranych ulic Krakowa wynosiły: 30,6 mg Zn; 5,59 mg Cu; 1,25 mg Pb; 0,64 mg Ni oraz 0,96 mg Cr/kg.

Spośród badanych metali najmniejszym zróżnicowaniem odznaczała się miedź (V – 19,7%), następnie nikiel (V – 23,8%), chrom (V – 29,8%), ołów (V – 31,6%), a największym cynk (V – 54,3%).

Wiechlina łąkowa przedsięwzięcie stymulowana diodą laserową eksponowana wzdłuż trzech ulic Krakowa gromadziła średnio: 28,24–87,89 mg Zn; 6,01–7,07 mg Cu; 1,28–2,53 mg Pb; 0,62–1,10 mg Ni oraz 0,75–1,86 mg Cr/kg (tab. 4).

Tabela 4. Średnia zawartość metali w roślinach

Table 4. Mean of the metals in plants

Wyszczególnienie Specification	Z naświetlaniem diodą 3 x 30 s With irradiation by diode 3 x 30 s				
	Zn	Cu	Pb	Ni	Cr
	mg/kg				
I	87,89	7,07	2,53	1,10	1,86
II	28,24	6,01	1,28	0,62	1,01
III	41,09	6,69	1,50	0,83	0,75
Średnia – Mean	52,4	6,59	1,77	0,85	1,21
Mediana	41,1	6,69	1,50	0,83	1,01
Sd	27,4	0,93	0,64	0,25	0,51
V (%)	52,2	14,1	36,2	29,9	42,4

I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Mediany zawartości metali ciężkich w roślinach przedsięwzięcie stymulowanych światłem zielonym i eksponowanych wzdłuż trzech ulic Krakowa wynosiły: 41,1 mg Zn; 6,69 mg Cu; 1,50 mg Pb; 0,83 mg Ni oraz 1,01 mg Cr/kg.

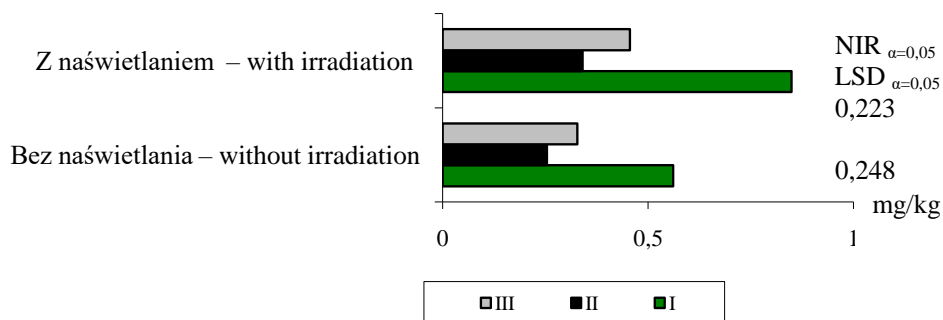
Współczynnik zmienności zawartości analizowanych pierwiastków śladowych mieścił się w granicach od 14,1% (dla miedzi) do 52,2% (dla cynku).

W celu ustalenia fitotoksyczności analizowanych metali obliczono współczynnik bioakumulacji (BC). Jego wartość odzwierciedla zdolność roślin do pobierania składników zawartych w glebie oraz informuje o wielkości i szybkości przemieszczania się metali z roztworu glebowego do części nadziemnych roślin [15].

Obliczone wartości wskaźników bioakumulacji (BC) metali ciężkich przez wiechlinę łąkową, której materiał siewny nie był stymulowany

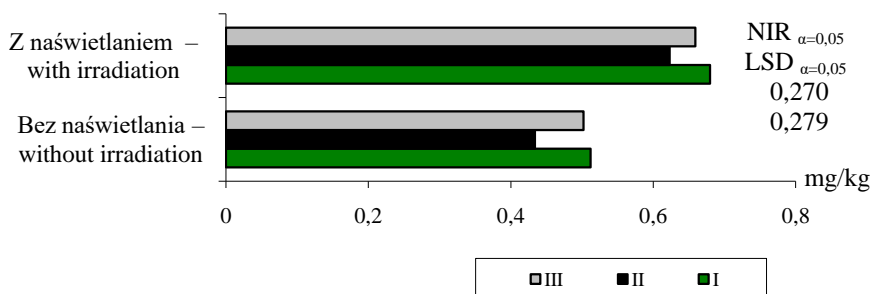
światłem zielonym, mieściły się w przedziałach: 0,254–0,561 mg Zn; 0,434–0,512 mg Cu; 0,029–0,043 mg Pb; 0,178–0,211 mg Ni; 0,047–0,076 mg Cr/kg (rys. 1–5).

Wiechlina łąkowa przedsięwnie stymulowana diodą laserową kumulowała wyższe ilości analizowanych metali ciężkich. Obliczone współczynniki bioakumulacji (BC) były wyższe, niż u roślin nie stymulowanych przedsięwnie, zawierając się w granicach: 0,341–0,849 mg Zn; 0,623–0,680 mg Cu; 0,043–0,071 mg Pb; 0,269–0,341 mg Ni; 0,063–0,128 mg Cr/kg.



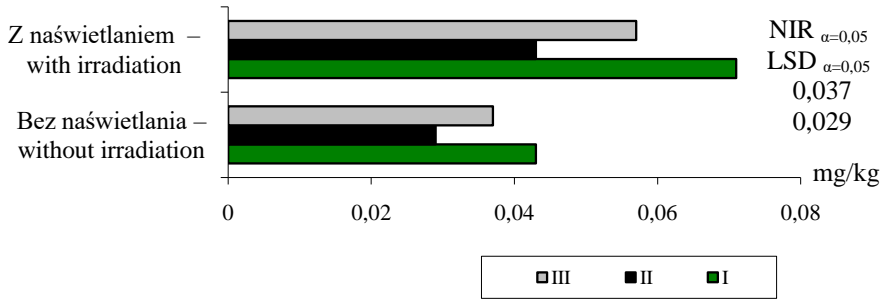
I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Rys. 1. Średnie wskaźniki bioakumulacji (BC) Zn w wiechlinie łąkowej
Fig. 1. Average bioaccumulation (BC) coefficient of Zn in kentucky-bluegrass



I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

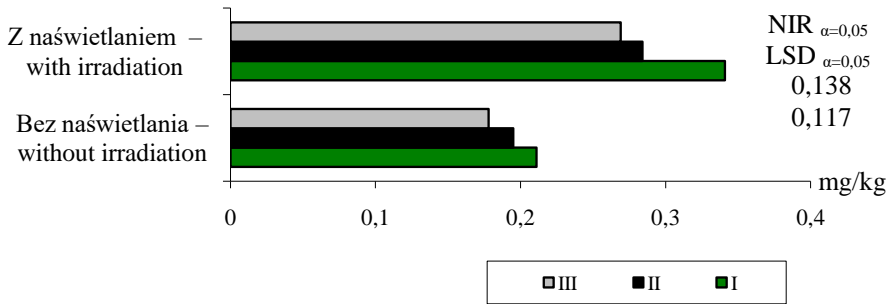
Rys. 2. Średnie wskaźniki bioakumulacji (BC) Cu w wiechlinie łąkowej
Fig. 2. Average bioaccumulation (BC) coefficient of Cu in kentucky-bluegrass



I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Rys. 3. Średnie wskaźniki bioakumulacji (BC) Pb w wiechlinie łąkowej

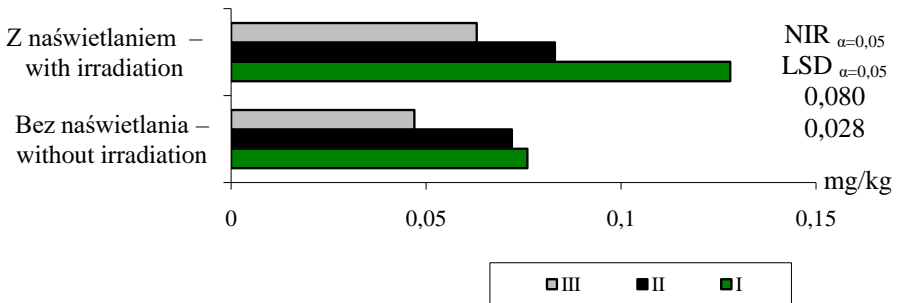
Fig. 3. Average bioaccumulation (BC) coefficient of Pb in kentucky-bluegrass



I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Rys. 4. Średnie wskaźniki bioakumulacji (BC) Ni w wiechlinie łąkowej

Fig. 4. Average bioaccumulation (BC) coefficient of Ni in kentucky-bluegrass



I – al. Mickiewicza, II – ul. Igołomska, III – ul. Lublańska

Rys. 5. Średnie wskaźniki bioakumulacji (BC) Cr w wiechlinie łąkowej

Fig. 5. Average bioaccumulation (BC) coefficient of Cr in kentucky-bluegrass

5. Wnioski

1. Po trzech latach ekspozycji wiechliny łąkowej wzdłuż wybranych ulic Krakowa stwierdzono mniejsze zanieczyszczenie metalami ciężkimi gleb w wazonach obsianych materiałem siewnym przedsewnie stymulowanym diodą laserową.
2. Obliczone wartości wskaźników bioakumulacji (BC) wskazały, że wiechlina łąkowa przedsewnie stymulowana diodą laserową kumulowała wyższe ilości wszystkich analizowanych metali ciężkich, niż rośliny przedsewnie niestymulowane.

Literatura

1. **Albasel N., Cottenie A.:** *Heavy metal contamination near major highways, industrial and urban areas in Belgian grassland.* Water, Air, and Soil Pollution 24, 103–109 (1985).
2. **Antonkiewicz J., Macuda J.:** *Zawartość metali ciężkich i węglowodorów w gruntach przylegających do wybranych stacji paliw w Krakowie.* Acta Sci. Pol., Formatio Circumiustus 4 (2), 31–36 (2005).
3. **Ariola V., D'Alessandro A., Lucarelli F., Marcazzan G., Mazzei F., Nava S., Garcia-Orellana I., Prati P., Valli G., Vecchi R., Zucchiatti A.:** *Elemental characterization of PM10, PM2.5 and PM1 in the town of Genoa (Italy).* Chemosphere 62(2), 226–232 (2006).
4. **Blake L., Goulding K.W.T.:** *Effects of atmospheric deposition, soil pH and acidification on heavy metal contents in soils and vegetation of semi-natural ecosystems at Rothamsted Experimental Station, UK.* Plant and Soil 240, 235–251 (2002).
5. **Buszewski B., Jastrzębska A., Kowalkowski T., Górna-Binkul A.:** *Monitoring of selected heavy metals uptake by plants and soils in the area of Toruń, Poland.* Polish Journal of Environmental Studies 9(6), 511–515 (2000).
6. **Czarnowska K.:** *Metale ciężkie w glebach zieleńców Warszawy.* Roczn. Gleb., L, ½, 31–39 (1999).

7. **Dobrowolski J.W.:** *Biotechnologia proekologiczna kluczem do unowocześnienia inżynierii środowiska.* Inżynieria Środowiska, Wyd. AGH, t. 6, z. 2, 259–272 (2001).
8. **Dobrzański Z., Kołacz R., Lewiński J., Mizera A.:** *Wpływ składowania odpadów poftlotacyjnych rud miedzi na zawartość metali ciężkich w niektórych paszach roślinnych.* Arch. Ochr. Środ., 3–4, 135–142 (1992).
9. **Dzierżanowski K., Popek R., Gawrońska H., Sæbø A., Gawroński S.W.:** *Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species.* International Journal of Phytoremediation 13, 1037–1046 (2011).
10. **Gąszczuk R., Muszyński P., Paszko T.:** *Wpływ metali ciężkich na sorpcję kadmu w glebach mineralnych.* Kadm w środowisku – problemy ekologiczne i metodyczne. Zesz. Nauk. Kom. „Człowiek i Środowisko” PAN. 26, 93–99 (2000).
11. **Gębski M.:** *Czynniki glebowe oraz nawozowe wpływające na przyswajanie metali ciężkich przez rośliny.* Post. Nauk Roln. 5, 3–16 (1998).
12. **Gorlach E.:** *Metale ciężkie jako czynnik zagrażający żyzności gleby.* Zesz. Prob. PNR, 321, 113–122 (1995).
13. **Grygierzec B., Gowin K.:** *Wpływ stymulacji laserowej nasion na bioakumulację metali ciężkich w kostrzewie czerwonej Festuca rubra L.* Łąkarstwo w Polsce, Poznań, nr 13, 45–55 (2010).
14. **Järup L.:** *Hazards of heavy metal contamination.* British Medical Bulletin 68, 167–182 (2003).
15. **Jasiewicz Cz., Antonkiewicz J.:** *Ekstrakcja metali ciężkich przez rośliny z gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Cz. II Konopie siewne.* Zesz. Prob. PNR, 472, 331–339 (2000).
16. **Jung M.C., Thornton I.:** *Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine, Korea.* Appl. Geochem. 11, 53–59 (1996).
17. **Kabata-Pendias A., Krakowiak A.:** *Useful phytoindicator (dandelion) for trace metal pollution.* [w:] Andren, A.W., Bober T.W. (red.). The 5th international conference proceedings: transport, fate and effects of silver in the environment, 145–150 (1997).
18. **Martley E., Gulson B.L., Pfeifer H.R.:** *Metal concentrations in soils around the copper smelter and surrounding industrial complex of Port Kembla. NSW, Australia.* Sci. Tot. Environ. 325, 113–127 (2004).
19. **Plak A., Bartmiński P., Dębicki R.:** *Wpływ transportu publicznego na zawartość wybranych metali ciężkich w glebach sąsiadujących z ulicami Lublina.* Proceedings of ECOpole 4(1), 167–171 (2010).

20. PN-ISO 11047: *Jakość gleby – Oznaczanie kadmu, chromu, kobaltu, miedzi, ołowiu, manganu, niklu i cynku w ekstraktach gleby wodą królewską – Metody płomieniowej i elektrotermicznej absorpcyjnej spektrometrii atomowej*. 2001.
21. PN-ISO 11466: *Jakość gleby – Ekstrakcja pierwiastków śladowych rozpuszczalnych w wodzie królewskiej*. 2002.
22. **Pyłka-Gutowska E.:** *Ekologia z ochroną środowiska*. Wyd. Oświata, Warszawa, 320 (2004).
23. Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. *W sprawie standardów jakości gleb oraz standardów jakości ziemi*. Dz. U., nr 165, poz. 1359.
24. **Tyler G., Olsson T.:** *Concentrations of 60 elements in the soil solution as related to the soil acidity*. *Europ. J. Soil Scie.* 52, 151–165 (2001).
25. **Yun-Guo L., Hui-Zhi Z., Guang-Ming Z., Bao-Rong H., Xin L.:** *Heavy metal accumulation in plants on Mn mine tailings*. *Pedosphere* 16(1), 131–136 (2006).

Effect of Laser Stimulation of Seeds on Heavy Metals Bio-accumulation by Kentucky-bluegrass (*Poa pratensis* L.)

Abstract

The research was conducted in 2008–2010 in Krakow. The experiments were located close to three busy streets of the city: Mickiewicz, Igołomska and Lublanska Avenue. 16 objects were set up at each location (2 variants in 8 replications). The experimental objects were pots with kentucky–bluegrass, Alicja c.v. 24 pots contained the plants which before sowing were stimulated with a green light emitted by the laser diode, three times for 30 seconds, whereas the remaining 24 pots were sown with red fescue sowing material without previous irradiation.

The experiment aimed at determining the effect of pre–sowing stimulation of kentucky–bluegrass seeds with a laser diode on heavy metal contents.

After three years of kentucky–bluegrass exposure along the streets in Krakow a smaller soil pollution with heavy metals was assessed in the pots sown with the grass sowing material which was pre–sowing stimulated with the laser diode.

Computed bioaccumulation coefficients (BC) revealed that the kentucky–bluegrass which was pre–sowing stimulated with the laser diode accumu-

lated higher quantities of all analyzed heavy metals than the plants which were not stimulated before sowing.

Bioaccumulation coefficients (BC) calculated for plants not stimulated pre-sowing included in the range: 0.254–0.561 Zn, 0.434–0.512 Cu, 0.029–0.043 Pb, 0.178–0.211 Ni and 0.047–0.076 Cr, while for plants stimulated pre-sowing laser diode ranged: 0.341–0.849 Zn, 0.623–0.680 Cu, 0.043–0.071 Pb, 0.269–0.341 Ni, 0.063–0.128 Cr.