

Katedra Fizjologii Roślin, Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, ul. Akademicka 15, 20-50 Lublin  
e-mail: barbara.nowak@up.lublin.pl

BARBARA HAWRYŁAK-NOWAK, RENATA MATRASZEK-GAWRON,  
KATARZYNA RUBINOWSKA, SŁAWOMIR MICHAŁEK

### **Wpływ kwasów organicznych na fitotoksyczność oraz akumulację kadmu przez rośliny słonecznika**

The impact of organic acids on the phytotoxicity and accumulation of cadmium  
by sunflower plants

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących wpływu niskocząsteczkowych kwasów organicznych na fitotoksyczność oraz efektywność pobierania i translokacji kadmu przez rośliny słonecznika (*Helianthus annuus* L.). Do skażonego kadmem podłoża ( $100 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) wprowadzano roztwory kwasów cytrynowego lub szczawiowego o stężeniu 25 lub  $50 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Stwierdzono, że obecność jonów kadmu w podłożu powodowała nieznaczne zmniejszenie biomasy pędów, jednak ich wzrost elongacyjny był istotnie ograniczony. Nie odnotowano wpływu zastosowanej dawki kadmu na zawartość barwników fotosyntetycznych w liściach. Wprowadzenie kwasów organicznych do skażonego substratu z reguły nie wpływało negatywnie na wzrost roślin i zawartość barwników fotosyntetycznych, natomiast skutkowało znacznym zmniejszeniem zawartości kadmu w pędach, szczególnie pod wpływem wyższej z zastosowanych dawek kwasów. Wykazano, że kwas szczawiowy skuteczniej ograniczał translokację kadmu do części nadziemnych słonecznika niż kwas cytrynowy.

**Słowa kluczowe:** kadm, kwas cytrynowy, kwas szczawiowy, *Helianthus annuus* L., barwniki fotosyntetyczne

#### WSTĘP

Metale śladowe stanowią istotną i specyficzną grupę zanieczyszczeń, które w istotny sposób wpływają na funkcjonowanie ekosystemów, jak również warunkują wysokość i jakość plonu. Nie podlegają one transformacji do mniej toksycznych form oraz charakteryzują się długą trwałością w środowisku [Kabata-Pendias i Mukherjee 2007]. Wzrost zawartości metalicznych pierwiastków śladowych w ekosystemach jest wynikiem zarów-

no procesów naturalnych (wietrzenie skał, erupcja wulkanów, pożary lasów), jak i działalności antropogenicznej (przemysł wydobywczy i przetwórczy rud metali, spalanie kopalin, odpady komunalne, rolnictwo) [Pinot i in. 2000]. Duża mobilność i możliwość łatwego akumulowania się tych metali w roślinach uprawnych stanowi znaczne zagrożenie dla zwierząt i człowieka. Kadm, obok ołowiu i rtęci, należy do trzech najbardziej szkodliwych metali. Został on sklasyfikowany na pozycji siódmej wśród dwudziestu najbardziej toksycznych substancji [Gill i Tuteja 2011]. Kadm nie pełni żadnych istotnych funkcji biologicznych w organizmach. Wykazuje za to silne działanie mutagenne, rakotwórcze, teratogenne, endokryne oraz upośledzające metabolizm komórkowy [Ostrowska 2008]. Ze względu na negatywne oddziaływanie tego metalu na organizmy, jego znaczną mobilność oraz zdolność do bioakumulacji uzasadnione jest poszukiwanie efektywnych metod ograniczenia możliwości włączania kadmu do łańcucha pokarmowego. Szczególna uwaga w tym względzie powinna być poświęcona organizmom roślinnym, które są pierwszym ogniwem w biologicznym obiegu kadmu w układzie: roślina – zwierzę – człowiek. Ponadto ze względu na stosunkowo dużą tolerancję większości gatunków roślin na kadm, mogą one być źródłem toksycznych ilości tego metalu dla ludzi i zwierząt [Kabata-Pendias i Mukherjee 2007].

Kwasy organiczne, ze względu na swoją budowę chemiczną, mają zdolność wiązania metali ciężkich oraz zabezpieczają metal przed adsorpcją na ścianach komórkowych. Ponadto kwasy te, chelatując pierwiastki metaliczne, przekształcają bardziej toksyczne formy jonowe metali w formy skompleksowane, znacznie mniej szkodliwe dla roślin. Wiele badań wskazuje na istotną rolę, jaką kwasy organiczne odgrywają w utrzymaniu homeostazy jonów metali w komórkach roślinnych. Sugeruje się, że tolerancja roślin na kadm w dużej mierze związana jest właśnie z obecnością kwasów organicznych [Baranowska-Morek 2003, Olko 2009]. W poprzednich badaniach, dotyczących wpływu kwasów jabłkowego i octowego na fitotoksyczność i pobieranie kadmu przez rośliny słonecznika uprawiane w pożywce płynnej, Hawrylak-Nowak i in. [2015] wykazali istotny udział badanych kwasów, szczególnie jabłkowego, w redukcji toksyczności kadmu. Ponadto ich obecność w skażonym podłożu wpływała na pobieranie i translokację tego metalu z korzeni do pędów. Jednak doświadczenia przebiegające w pożywkach płynnych nie zawsze mają dobre odniesienie do warunków naturalnych oraz tak złożonego i dynamicznego podłoża, jakim jest gleba. Dlatego eksperymenty dotyczące wpływu egzogenicznie aplikowanych kwasów organicznych na fitoakumulację kadmu w częściach nadziemnych słonecznika zostały przeprowadzone w glebie, a ich wyniki prezentowane są w niniejszej pracy.

#### MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzono w kulturach wazonowych, gdzie jako podłoże zastosowano ziemię ogrodniczą przeznaczoną do pikowania i wysiewu nasion. Podłoże charakteryzowało się następującymi właściwościami:

- pH (CaCl<sub>2</sub>) – 5,5,
- zasolenie – 1 g · dm<sup>-3</sup>,
- zawartość składników odżywczych: N – 120 mg · dm<sup>-3</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 120 mg · dm<sup>-3</sup>, K<sub>2</sub>O – 140 mg · dm<sup>-3</sup>.

Substrat zróżnicowano pod względem zawartości kadmu (0 lub 100 mg Cd · kg<sup>-1</sup> podłoża). Kadm wprowadzano w formie wodnego roztworu CdCl<sub>2</sub>, który stopniowo mieszano z podłożem w celu równomiernego rozprowadzenia. Następnie w plastikowych doniczkach o pojemności 3 dm<sup>3</sup> umieszczono po 1,230 kg substratu i pozostawiono na 48 h w celu odpowiedniej sorpcji metalu. Po tym czasie do doniczek wysiewano po 15 nasion słonecznika (*Helianthus annuus* L.). Po 10–11 dniach od wysiewu nasion w doniczkach pozostawiono po 12 wyrównanych pod względem wielkości siewek, które następnie podlano 100 cm<sup>3</sup> roztworu kwasu cytrynowego lub szczawiowego o stężeniu 25 lub 50 mmol · dm<sup>-3</sup>. Rośliny z serii kontrolnej oraz rośliny z jednej serii zawierającej 100 mg Cd podlano w tym samym czasie tą samą objętością wody destylowanej. W konsekwencji doświadczenie obejmowało 6 następujących kombinacji:

- kontrola (0 mg Cd · kg<sup>-1</sup> podłoża),
- 100 mg Cd · kg<sup>-1</sup> podłoża,
- 100 mg Cd · kg<sup>-1</sup> podłoża + 25 mmol · dm<sup>-3</sup> kwasu cytrynowego,
- 100 mg Cd · kg<sup>-1</sup> podłoża + 50 mmol · dm<sup>-3</sup> kwasu cytrynowego,
- 100 mg Cd · kg<sup>-1</sup> podłoża + 25 mmol · dm<sup>-3</sup> kwasu szczawiowego,
- 100 mg Cd · kg<sup>-1</sup> podłoża + 50 mmol · dm<sup>-3</sup> kwasu szczawiowego.

Rośliny umieszczono w klimatyzowanym fitotronie w następujących warunkach: temperatura 24/20°C (dzień/noc), 14-godzinny fotoperiod, PPFD na poziomie wierzchołków roślin 150–170 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>. Od momentu wysiewu nasion, a następnie przez cały okres wegetacji roślin podłoże nawadniano wodą destylowaną, w odstępach dwudniowych, utrzymując jego wilgotność na poziomie 65–70% połowej pojemności wodnej. Po upływie 7 dni od wprowadzenia kwasów organicznych oznaczono zawartość barwników fotosyntetycznych, powierzchnię blaszek liściowych oraz określono długość i biomasa części nadziemnych. Po wysuszeniu materiału roślinny poddano analizie na zawartość kadmu.

W celu oznaczenia świeżej masy poszczególnych organów części nadziemne odcinano od korzeni, a następnie ważono na wadze analitycznej. Równocześnie mierzono długość pędów roślin kontrolnych oraz rosnących w środowisku skażonym kadmem. Powierzchnię liści (2. liść właściwy od dołu) oznaczono za pomocą laserowego skanera do pomiaru powierzchni liści firmy CID Bio-Science (model CID-202).

Zawartość barwników fotosyntetycznych (chlorofil *a*, chlorofil *b*, karotenoidy) oznaczono metodą Lichtenthalera i Wellburna [1983]. Materiał do badań pobierano z drugiego liścia właściwego od dołu. Chlorofil i karotenoidy ekstrahowano poprzez rozcieranie materiału z 80% (v/v) wodnym roztworem acetonu. Homogenat przenoszono ilościowo na sącdek sprzężony z pompą próżniową. Otrzymany ekstrakt przenoszono do kolb miarowych i uzupełniano acetonem do objętości 25 cm<sup>3</sup>. Następnie odczytywano ekstynkcję roztworu przy długości fali 663, 646 oraz 470 nm, wykorzystując spektrofotometr Cecil CE 9500.

Oznaczenia zawartości kadmu w biomacie części nadziemnych dokonano w rozdrobionym, wysuszonym w temperaturze 105°C materiale roślinnym, który mineralizowano za pomocą mieszaniny kwasów (HNO<sub>3</sub> : HClO<sub>4</sub>; 4 : 1; v/v) z użyciem energii mikrofalowej. Oznaczenia zawartości kadmu w uzyskanym mineralizacie dokonano metodą atomowej spektrometrii absorpcyjnej z atomizacją w piecu grafitowym (GF-AAS) zgodnie z normą PN-EN 14084:2004. Do walidacji metody używano certyfikowanego materiału odniesienia (wątroba bydlęca 1577c – National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD).

Każda z 6 kombinacji doświadczalnych zawierała po 4 powtórzenia (po 12 roślin w każdym), a eksperyment przeprowadzono w 2 niezależnych powtórzeniach w czasie. Dane liczbowe otrzymane z poszczególnych oznaczeń poddano jednoczynnikowej analizie wariancji (ANOVA) z wyznaczeniem średnich arytmetycznych oraz najmniejszej istotnej różnicy (NIR) Tukeya dla par średnich przy poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

#### WYNIKI I DYSKUSJA

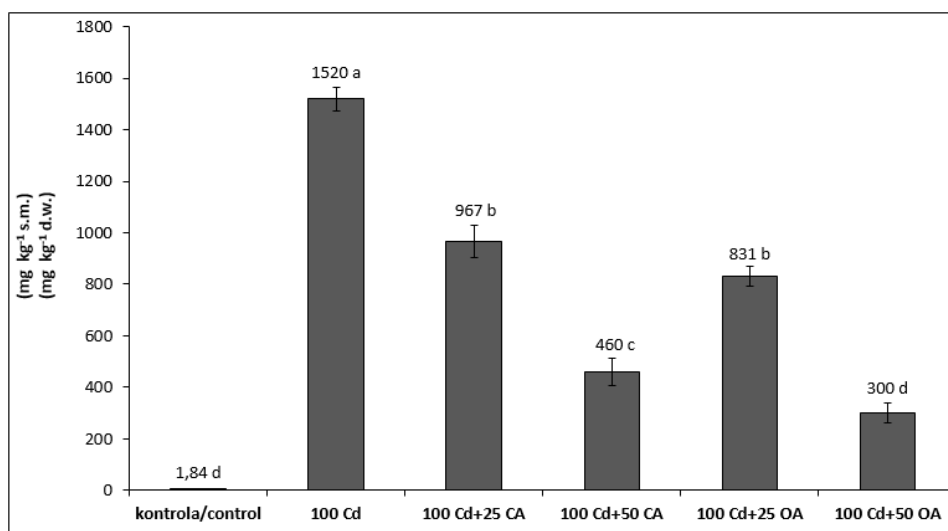
Po 7 dniach od momentu wprowadzenia kwasów organicznych do skażonego podłoża dokonano obserwacji morfologii części nadziemnych słonecznika. Zarówno rośliny kontrolne, jak i te rosnące w podłożu skażonym kadmem nie wykazywały wyraźnych objawów chorobowych w postaci ograniczenia wzrostu czy zmian chlorotycznych lub nekrotycznych na liściach. W tabeli 1 przedstawiono wyniki dotyczące parametrów biometrycznych. Stwierdzono, że obecność kadmu w dawce  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  podłoża spowodowała niewielki spadek (o 8%) świeżej masy tych organów w porównaniu z roślinami kontrolnymi, jednak redukcja ta nie była istotna statystycznie. Skażenie kadmem nie wywarło również wpływu na powierzchnię liści oraz zawartość barwników fotosyntetycznych. Natomiast długość pędów słonecznika w obecności aplikowanej dawki kadmu była istotnie mniejsza (o 18%) w odniesieniu do roślin kontrolnych, co wskazuje na zahamowanie elongacji pędów pod wpływem tego pierwiastka.

Wprowadzenie kwasów organicznych do podłoża skażonego kadmem na ogół nie wpłynęło w sposób istotny na biomasa części nadziemnych oraz powierzchnię liści w stosunku do roślin rosnących tylko w obecności kadmu. Wyjątek stanowił wzrost świeżej masy pędów roślin traktowanych kadmem, których podłoże wzbogacono  $25 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$  kwasu szczawiowego (tab. 1). Aplikacja kwasów organicznych do zanieczyszczonego metalem podłoża nie prowadziła do istotnych zmian długości części nadziemnych, które nadal były niższe niż osobniki w serii kontrolnej (tab. 1). W badaniach Baran i in. [2008], dotyczących reakcji lnu, grochu, wyki i gorczycy na różne stężenia kadmu w glebie, znaczne zmniejszenie plonu w stosunku do roślin kontrolnych odnotowano przy stężeniu wynoszącym  $10 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Wraz ze wzrostem dawki soli tego metalu obserwowano dalsze zmniejszenie biomasy badanych gatunków, jednak ekspozycja na kadm wynosiła 30 dni i była znacznie dłuższa niż w prezentowanych doświadczeniach, dlatego efekt fitotoksyczny mógł być bardziej wyraźny. W doświadczeniu mającym na celu ocenę przydatności wydmuchrzyca pontyjskiej do usuwania z gleby niektórych metali ciężkich Szulc i Kobierski [2010] wykazali, że gatunek ten charakteryzował się dość dużą wrażliwością na kadm. Zastosowana w tych doświadczeniach dawka kadmu ( $9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  podłoża) spowodowała istotne zmniejszenie plonu. Na tle wymienionych powyżej gatunków słonecznik wydaje się rośliną mało wrażliwą na obecność kadmu w podłożu, co może być związane ze stosunkowo krótkim czasem ekspozycji na metal w przeprowadzonym doświadczeniu. Ponadto wiele danych literaturowych potwierdza znaczną odporność słonecznika na toksyczne stężenia metali śladowych i sugeruje użyteczność tego gatunku w celach fitoremediacyjnych [Adesodun i in. 2010, Niu i in. 2012, Hawrylak-Nowak i in. 2015].

Zmiany stężenia barwników fotosyntetycznych stanowią czuły wskaźnik toksyczności metali, ponieważ ich nadmiar bardzo często prowadzi do bezpośredniego zahamowania aktywności enzymów zaangażowanych w biosyntezę tych barwników [Myśliwa-Kurdziel i Strzałka 2002]. W przeprowadzonych badaniach zanieczyszczenie podłoża kadmem spowodowało nieznaczny spadek zawartości chlorofilu *a* i *b* oraz karotenoidów w liściach słonecznika, o odpowiednio 9, 12 i 8% w odniesieniu do kontroli, jednak zmiany te nie były istotne statystycznie. Natomiast wprowadzenie  $25 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$  kwasu cytrynowego do skażonego substratu wzrostowego przyczyniło się do istotnego zmniejszenia zawartości tych barwników, ale jedynie w odniesieniu do kontroli. Również aplikacja kwasu szczawiowego w obu dawkach spowodowała zmniejszenie zawartości barwników, jednak tylko w przypadku wyższego z zastosowanych stężeń kwasu redukcja ta była istotna w odniesieniu do roślin skażonych kadmem i wynosiła 25%. Jedynie wprowadzenie do podłoża  $50 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$  kwasu cytrynowego miało pozytywny wpływ na akumulację chlorofilu *a* i *b* oraz karotenoidów w stosunku do serii zawierającej tylko kadm. Zawartość barwników była wówczas zbliżona do wartości notowanych w roślinach kontrolnych, ale analiza statystyczna nie wykazała istotności tych zmian (tab. 1). W poprzednich badaniach Hawrylak-Nowak i in. [2015] również odnotowali wpływ kwasów organicznych na zawartość barwników fotosyntetycznych w liściach skażonego kadmem słonecznika, przy czym oddziaływanie to było ewidentnie pozytywne. Jednak należy podkreślić, że eksperymenty te przeprowadzono w podłożu płynnym, co miało kluczowy wpływ na biodostępność i fitotoksyczność kadmu.

Jednym z głównych założeń prezentowanych badań była ocena wpływu aplikacji do podłoża kwasów organicznych na translokację kadmu do części nadziemnych słonecznika. Najwyższą akumulacją kadmu w pędach charakteryzowały się rośliny uprawiane w podłożu skażonym tym metalem, ale niewzbogaconym w kwasy organiczne (rys. 1). Wprowadzenie kwasu cytrynowego lub szczawiowego w stężeniu  $25 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$  powodowało zmniejszenie zawartości tego metalu, o odpowiednio 36 i 45%. Dwukrotnie wyższe stężenie kwasów organicznych przyczyniło się do dalszej redukcji zawartości kadmu w organach nadziemnych. Zawartość tego metalu była ponad 3-krotnie i 5-krotnie mniejsza w obecności  $50 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$  odpowiednio kwasu cytrynowego oraz szczawiowego w porównaniu z roślinami rosnącymi w podłożu skażonym kadmem, ale niezawierającym egzogennych kwasów (rys. 1). Analogiczne rezultaty odnośnie do wpływu kwasu cytrynowego na akumulację kadmu w częściach nadziemnych słonecznika uzyskali Turgut i in. [2004]. Również Chen i in. [2003], badając wpływ organicznych chelatorów na akumulację metali ciężkich przez rzodkiewkę, odnotowali, że zastosowanie wzrastających stężeń kwasu cytrynowego przyczyniło się do zmniejszenia zawartości ołowiu i kadmu w pędach roślin, przy czym efekt oddziaływania kwasu cytrynowego był silniejszy dla kadmu niż ołowiu. Zawartość ołowiu spadła odpowiednio o 2 i 4%, natomiast kadmu o 25 i 44%, w porównaniu z serią, w której nie użyto środka kompleksującego. Z kolei Hawrylak-Nowak i in. [2015] wykazali, że aplikacja kwasu jabłkowego lub octowego do pożywki płynnej zawierającej kadm przyczyniała się do znacznego wzrostu zawartości tego metalu w systemie korzeniowym słonecznika, jednocześnie nie wpływając na jego zawartość w częściach nadziemnych, co w konsekwencji przyczyniło się do spadku współczynnika translokacji kadmu.

Duarte i in. [2007], badając wpływ egzogenego kwasu cytrynowego na pobieranie kadmu przez rośliny z gatunku *Halimone portulacoides*, odnotowali istotny wzrost absorpcji tego metalu pod wpływem cytrynianu, szczególnie w korzeniach. Autorzy ci sugerowali, że wzrost akumulacji kadmu w obecności cytrynianu jest prawdopodobnie skutkiem obniżenia odczynu pożywki, co w konsekwencji prowadziło do wzrostu mobilności kadmu i jego przemiany w mniej fitotoksyczne formy chemiczne. W badaniach tych wykazano, że wraz ze wzrostem stężenia kwasu cytrynowego w podłożu znacznie wzrastała zawartość kadmu w korzeniach oraz w mniejszym stopniu w częściach nadziemnych. Aplikacja kwasu cytrynowego spowodowała także pogorszenie translokacji kadmu z korzeni do pędów, jednak tylko wówczas gdy związek ten był aplikowany w stosunkowo wysokich stężeniach. Mogło to być spowodowane tym, że większe ilości kwasu czynią kadm bardzo łatwo dostępnym, dlatego nie jest on tak efektywnie transportowany do organów nadziemnych, co może stanowić jeden z mechanizmów tolerancji roślin na kadm. U gatunków odpornych na ten metal współczynnik jego translokacji na ogół nie jest wysoki. Ponadto podwyższone pobieranie kadmu w obecności związków chelatujących, takich jak kwasy organiczne, może być spowodowane tym, że kadm jest pierwiastkiem zbędnym, potrzeba więc chelatorów, aby rośliny mogły pobierać go w większych ilościach [Turgut i in. 2004]. Z kolei Chen i in. [2003] postulują, że korzystny wpływ kwasów organicznych na skażone rośliny może wynikać z przekształcenia tego pierwiastka w mniej toksyczne i bardziej dostępne formy, które są łatwiej transportowane do części nadziemnych, a powstałe kompleksy kwas-metal są w większym stopniu absorbowane przez rośliny.



Rys. 1. Zawartość kadmu w częściach nadziemnych słonecznika w warunkach zróżnicowanej zawartości kadmu oraz kwasów cytrynowego (CA) lub szczawiowego (OA) w podłożu  
 Fig. 1. The content of cadmium in the aboveground parts of sunflower under different content of cadmium and citric (CA) or oxalic (OA) acid in the substrate

Tabela 1. Wybrane parametry biometryczne oraz zawartość barwników fotosyntetycznych w roślinach słonecznika w warunkach zróżnicowanej zawartości kadmu oraz kwasów cytrynowego (CA) lub szczawiowego (OA) w podłożu

Table 1. Selected biometric parameters and photosynthetic pigment content in sunflower under different contents of cadmium and citric acid (CA) or oxalic (OA) in the substrate

Serie eksperymentalne Experimental series	Biomasa pędów (g na roślinę) Shoot biomass (g per plant)	Długość pędów (cm) Shootlength (cm)	Powierzchnia liści (cm <sup>2</sup> ) Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Zawartość barwników fotosyntetycznych (mg · g <sup>-1</sup> św.m.) Photosynthetic pigments content (mg · g <sup>-1</sup> f.w.)		
				chl. <i>a</i>	chl. <i>b</i>	kar. car.
Kontrola / Control	3,154ab*	13,80a	19,05	1,549a	0,331a	0,305a
100 mg Cd	2,892b	11,35b	19,05	1,415ab	0,292ab	0,281ab
100 mg Cd + 25 mmol · dm <sup>-3</sup> CA	2,960ab	11,09b	18,96	1,245bc	0,259bc	0,239bc
100 mg Cd + 50 mmol · dm <sup>-3</sup> CA	3,078ab	9,72b	19,94	1,573a	0,320a	0,299ab
100 mg Cd + 25 mmol · dm <sup>-3</sup> OA	3,395a	11,07b	18,38	1,289b	0,281b	0,279ab
100 mg Cd + 50 mmol · dm <sup>-3</sup> OA	2,717b	11,60b	19,20	1,051c	0,222c	0,234c
NIR/ LSD	0,500	1,916	2,236	0,218	0,052	0,043

\* Średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie na poziomie  $\alpha = 0,05$ / Means followed by the same letter do not differ significantly at  $\alpha = 0.05$

Najnowsze badania Wang i in. [2017] dotyczące wpływu kwasu cytrynowego na pobieranie i akumulację kadmu przez dwa gatunki traw wskazują, że sposób oddziaływania kwasów organicznych na bioprzyswajalność i translokację tego metalu może być w znacznym stopniu zróżnicowany gatunkowo. Autorzy ci wykazali, że aplikacja kwasu cytrynowego powodowała znaczny wzrost bioakumulacji kadmu w korzeniach i częściach nadziemnych kostrzewy trzcinowej, podczas gdy u wiechliny łąkowej stwierdzono wzrost zawartości kadmu w korzeniach, ale zmniejszenie jego akumulacji w częściach nadziemnych. Wyniki te mogą częściowo wyjaśniać występowanie znacznych rozbieżności związanych z wpływem kwasów organicznych na zawartość i translokację metali śladowych u różnych gatunków roślin.

#### WNIOSKI

1. Wprowadzenie do podłoża kadmu w dawce  $100 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$  wywołuje zahamowanie wzrostu elongacyjnego pędów, jednak nie wpływa istotnie na biomasę, zawartość barwników fotosyntetycznych i powierzchnię liści słonecznika.
2. Aplikacja kwasów organicznych (cytrynowego lub szczawowego) w stężeniu 25 lub  $50 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$  do skażonego kadmem substratu powoduje znaczne zmniejszenie zawartości tego pierwiastka w częściach nadziemnych słonecznika, wprost proporcjonalnie do zastosowanej dawki kwasów.
3. W obecności kwasu szczawowego zawartość kadmu w częściach nadziemnych słonecznika jest mniejsza niż w obecności kwasu cytrynowego.

#### PIŚMIENNICTWO

- Adesodun J.K., Atayese M.O., Agbaje T.A., Osadiaye B.A., Mafe O.F., Soretire A.A., 2010. Phytoremediation potentials of sunflowers (*Tithonia diversifolia* and *Helianthus annuus*) for metals in soils contaminated with zinc and lead nitrates. *Water Air Soil Pollut.* 207, 195–201.
- Baran A., Jasiewicz C., Klimek A., 2008. Reakcja roślin na toksyczną zawartość cynku i kadmu w glebie. *Proc. ECOpole* 2(2), 417 – 422.
- Baranowska-Morek A., 2003. Roślinne mechanizmy tolerancji na toksyczne działanie metali ciężkich. *Kosmos* 52, 283–298.
- Chen Y.X., Lin Q., Luo Y.M., He Y.F., Zhen S.J., Yu Y.L., Tian G.M., Wong M.H., 2003. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere* 50, 807–811.
- Duarte B., Delgado M., Cacador I., 2007. The role of citric acid in cadmium and nickel uptake and translocation, in *Halimione portulacoides*. *Chemosphere* 69, 836–840.
- Gill S.S., Tuteja N., 2011. Cadmium stress tolerance in crop plants – probing the role of sulphur. *Plant Signal. Behav.* 6, 215–222.
- Hawrylak-Nowak B., Dresler S., Matraszek R., 2015. Exogenous malic and acetic acids reduce cadmium phytotoxicity and enhance cadmium accumulation in roots of sunflower plants. *Plant Physiol. Biochem.* 94, 225–234.
- Kabata-Pendias A., Mukherjee A.B., 2007. Trace Elements from Soil to Human. Springer, Berlin–Heidelberg.
- Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R., 1983. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 603, 591–592.



- Myśliwa-Kurdziel B., Strzałka K., 2002. Influence of metals on biosynthesis of photosynthetic pigments. W: M.N.V. Prasad, K. Strzałka (red.), Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants. Springer, Dordrecht, 201–227.
- Niu Z.X., Li X.D., Sun L.N., Sun T.H., 2012. Changes of three organic acids in the process of Cd and Pb phytoextraction by *Helianthus annuus* L. Plant Soil Environ. 58, 487–494.
- Olko A., 2009. Fizjologiczne aspekty tolerancji roślin na metale ciężkie. Kosmos 58, 221–228.
- Ostrowska P., 2008. Kadm – występowanie, źródła zanieczyszczeń, metody recyklingu. Gosp. Surowc. Min. 24, 255–260.
- Pinot F., Kreps S., Bachelet M., Hainaut P., Bakonyi M., Polla B., 2000. Cadmium in the environment: sources, mechanisms of biotoxicity, and biomarkers. Rev. Environ. Health 15, 299–323.
- Szulc P.M., Kobierski M., 2010. Przydatność wydmuchrzycy pontyjskiej (*Elymus elongatus* var. *ponticus*) w oczyszczaniu gleb zanieczyszczonych miedzią, ołowiem i kadmem. Ochr. Środ. Zasob. Natur. 43, 71–79.
- Turgut C., Pele M.K., Cutright T.J., 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr and Ni from soil using *Helianthus annuus*. Environ. Pollut. 131, 147–154.
- Wang S., Dong Q., Wang Z., 2017. Differential effects of citric acid on cadmium uptake and accumulation between tall fescue and Kentucky bluegrass. Ecotox. Environ. Saf. 145, 200–206.

**Źródło finansowania:** Badania zostały sfinansowane ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego jako część działalności statutowej Katedry Fizjologii Roślin Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie.

**Summary.** The paper presents results of a study on the impact of low molecular organic acids on phytotoxicity and efficiency of cadmium uptake and translocation by sunflower plants (*Helianthus annuus* L.). The cadmium-contaminated substrate ( $100 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) was treated with solutions of citric or oxalic acid at concentrations of 25 or 50  $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ . It was found that the presence of cadmium ions in the substrate caused a slight reduction in the biomass of shoots, but their elongation growth was strongly limited. There was no significant effect of the applied cadmium dose on the content of photosynthetic pigments in the leaves. Application of organic acids to the contaminated substrate did not usually have a negative effect the growth of plants and the level of photosynthetic pigments, but resulted in a significant reduction of cadmium content in shoots, especially under the influence of a higher dose of acids used. It was shown that oxalic acid was more effective in reducing the translocation of cadmium to the aboveground parts of sunflower than citric acid.

**Key words:** cadmium, citric acid, oxalic acid, *Helianthus annuus* L., photosynthetic pigments

Otrzymano/ Received: 28.09.2017  
Zaakceptowano/ Accepted: 29.12.2017