

WPŁYW pH ORAZ JONÓW Cu^{2+} i Zn^{2+} NA ZAWARTOŚĆ WAPNIA
W ŻYCIU (*Secale cereale* L.)¹

Alicja Szatanik-Kloc¹, Zofia Sokołowska¹, Mieczysław Hajnos¹,
Tatiana Alekseeva², Andrej Alekseev²

¹Institut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: a.kloc@ipan.lublin.pl

²Institut Fizykochemicznych i Biologicznych Problemów w Gleboznawstwie RAN
Puszczino, Rejon Moskwa, Rosja

Streszczenie. Oznaczano zawartości cynku, miedzi i wapnia w ekstraktach z korzeni i części nadziemnych żyta ozimego odmiany Rostockie. Pomiary prowadzono z wykorzystaniem absorpcyjnego atomowego spektrometru ASA Perkin-Elmer 3300. Badane rośliny pochodziły z uprawy hydroponicznej. W fazie rozwoju strzelanie w źdźbło, do pożywki dodatkowo dodano Cu^{2+} w stężeniach 20, 50, 100 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ pożywki jako $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Do drugiej części pożywki zaaplikowano dodatkowo jony Zn^{2+} w stężeniach 20, 200, 400 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ pożywki jako ZnCl_2 . Zaobserwowano istotny wzrost zawartości miedzi i cynku zarówno w korzeniach, jak i częściach nadziemnych badanego żyta. Jednocześnie fitotoksyczne stężenia obu metali ciężkich w pożywce wpłynęły istotnie na obniżenie zawartości jonów wapnia w badanych korzeniach. W częściach nadziemnych roślin stresowanych jonami cynku, zawartość wapnia również zmniejszyła się. Natomiast w częściach nadziemnych roślin stresowanych miedzią, zawartość wapnia nie zmieniła się istotnie. Wysokie stężenia jonów miedzi w pożywce wpłynęły na zmniejszenie się zawartości cynku w korzeniach i częściach nadziemnych żyta.

Słowa kluczowe: cynk, wapń, miedź, żyto

WSTĘP

Według kryterium ilościowego, rośliny pobierają z podłoża pierwiastki, które określamy mianem makro i mikroelementów. Makroelementy występują w roślinach w ilości powyżej 0,1% suchej masy. Zawartość mikroelementów jest około

¹Część pracy wykonano w ramach Projektu Badawczego Nr 310 017 32/1297 finansowanego przez Ministerstwo Szkolnictwa Wyższego i Nauki ze środków na naukę w latach 2007-2010.

1000-krotnie mniejsza (Starck 2007). Wapń jest pierwiastkiem pobieranym przez rośliny jako makroelement. W roślinie pełni on funkcję regulatora aktywności wielu enzymów, między innymi ATPazy, fosfolipazy, amylazy. Wapń łatwo łączy się z cukrowcami, np. pektynami, tworząc pektyniany wapnia, które wpływają na stabilność apoplastycznej części komórek (ścianę komórkową). Wapń jest również stabilizatorem błon komórkowych, a także pełni rolę przekaźnika informacji w regulacji metabolizmu w kompleksie z kalmoduliną i innymi białkami (Szwejkowska 2000, Starck 2007). Widocznymi objawami deficytu wapnia jest zahamowanie wzrostu roślin, zamieranie wierzchołków pędów, śluzowacenie korzeni, deformacja i zasychanie liści. Miedź i cynk pobierane przez rośliny jako mikroelementy, wykorzystywane są w wielu reakcjach enzymatycznych. Do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin potrzebne są więc wszystkie trzy badane pierwiastki nie tylko w odpowiednich stężeniach, ale również we właściwej proporcji w stosunku do innych pierwiastków. Nadmiar jakiegokolwiek z mikroelementów i dodatkowo kwaśny odczyn podłoża może wpływać na ograniczone pobieranie jonów wapnia i tym samym zakłócać fizjologiczne funkcje roślin.

Celem niniejszych badań było określenie czy i w jaki sposób wysokie stężenia miedzi i cynku wpływają na pobieranie i transport jonów wapnia w życie.

MATERIAŁ I METODY

Zwartość miedzi, cynku i wapnia oznaczano w korzeniach i częściach nadziemnych żyta (*Secale cereale L.*) formy ozimej odmiany Rostockie, uprawianego metodą hydroponiczną. Wzrost roślin odbywał się w pożywce przygotowanej według zmodyfikowanej pożywki Hoaglanda (uzupełnionej o pełny zestaw mikroelementów) z następujących odczynników o stopniu czystości cz.d.a.: makroelementy (w g dm⁻³ roztworu pożywki) – 0,95 Ca(NO₃)₂·4H₂O; 0,45 MgSO₄·7H₂O; 0,14 KH₂PO₄; 0,51 KNO₃; 0,21 NH₄H₂PO₄ oraz mikroelementy: 3,12 NaCl; 2,83 H₃BO₃; 0,28 ZnSO₄·7H₂O; 0,10 CuSO₄·5H₂O; 1,10 MnSO₄·4H₂O; 0,10 wersenian żelaza; 0,02 (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O. (Marschner 1986, Starck 2007). Ilość roztworu sporządzonego z mikroelementów dodana do pożywki wynosiła 1 ml·dm⁻³. W początkowej fazie wzrostu i rozwoju rośliny rosły w pożywce o pH 7, w cyklu dobowym 16 godzin (dzień) i 8 godzin (noc), w temperaturze 23°C (dzień) i 16°C (noc). Do oświetlenia roślin zastosowano lampy sodowe typu WLS 400. Nasiona żyta wysiano do 24 napowietrzanych, polietylenowych pojemników (5 dm³) zaopatrzonych w styropianowe wkładki z nawierconymi otworami. Spodnią stroną wkładki zabezpieczono siatką. Pomiedzy wkładką, a siatką umieszczono bibułę filtracyjną. Do każdego pojemnika wysiano po 80 nasion, a po skiełkowaniu pozostawiono po 40 roślin. Pozostawiono rośliny najsilniejsze i najbardziej jednorodne pod względem wyglądu. Na tym etapie usunięto także bibułę filtracyjną z pojemni-

ków. W fazie strzelania w źdźbło obniżono odczyn pożywki do pH 4,5 i do 6 pojemników dodano dodatkowo miedź w ilości 20, 50, 100 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, jako $\text{Cu}\cdot\text{SO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Do kolejnych 6 pojemników dodano dodatkowo cynk (ZnCl_2) w ilości 20, 200, 400 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Pozostała część roślin (próba kontrolna) rosła w pożywce takiej samej jak w początkowej fazie wzrostu, tj. w 6 pojemnikach przy pH 7 i w 6 pojemnikach przy pH 4,5 (bez dodatkowej aplikacji jonów Cu^{2+} i Zn^{2+}). Doświadczenia przeprowadzono w trzech powtórzeniach dla każdej serii. Zebrane korzenie żyta zostały przepłukane roztworem kwasu solnego o stężeniu $0,01\text{mol dm}^{-3}$ i trzykrotnie wodą destylowaną, w celu odmycia zaadsorbowanych wymiennie jonów powierzchniowych (standaryzacja próbki), a następnie oddzielone od części nadziemnych. Materiał roślinny suszono w 105°C przez 24 godziny, a następnie zmineralizowano na sucho.

Mineralizacja materiału roślinnego

W parownicach kwarcowych umieszczono po 0,5 g suchego, zmielonego materiału roślinnego. Należy dodać, że w roślinach pochodzących z naturalnego środowiska, zawartość miedzi i wapnia jest znacznie mniejsza, dlatego w standartowych procedurach mineralizacji na sucho masa roślin powinna wynosić 5-10 g. Materiał roślinny spalano na sucho w piecu muflowym FCF 12 SP w temperaturze 450°C przez 3-4 godziny. Po wyłączeniu pieca parownice pozostawiono do wystygnięcia. Następnie popiół (o barwie szarobiałej lub szarej) zwilżono odrobiną wody destylowanej i dodano 10 ml wody królewskiej (HCl i HNO_3 w stosunku 3:1) w celu rozłożenia węglanów. Ekstrakt przesączono przez twarde sączki, do kolb miarowych o pojemności 25 cm^3 i dopełniono wodą destylowaną do żądanej objętości. Równoległe przygotowano dwie próby kontrolne (bez popiołu) dodając do kwarcowych parownic jedynie wodę destylowaną i wodę królewską (Karczewska i Kabała 2005).

Oznaczenie miedzi, cynku i wapnia w ekstrakcie

Do oznaczenia zawartości badanych jonów wykorzystano absorpcyjną spektrometrię atomową, która uchodzi obecnie za najprostszą i najbardziej selektywną metodę analityczną stosowaną do oznaczania śladowych ilości metali w wielu materiałach. Polega ona na pomiarze monochromatycznego promieniowania pochłoniętego przez wolne atomy danej substancji. Metodą tą można oznaczać większą liczbę pierwiastków. Charakteryzuje się ona dużą czułością i specyficznością, która wynika między innymi z tego, że promieniowanie emitowane przez jedną lampę może być absorbowane wyłącznie przez atomy jednego pierwiastka. Przy wykorzystaniu lamp z katodą węgłową istnieje możliwość stosowania do oznaczania niektórych pierwiastków, lamp dwu- lub trój pierwiastkowych. Lampy z katodą węgłową dają najlepsze efekty

(jeżeli chodzi o czułość pomiaru) w oznaczaniu trudno wzbudających się pierwiastków, w analizie małych próbek, w analizie śladowej, oraz w oznaczaniu izotopów. Granica oznaczalności wielu metali leży pomiędzy 0,01 a 10 ppm, przy błędzie względnym precyzji 2% (Cygański 1993).

Zawartość miedzi, cynku i wapnia w badanym materiale roślinnym oznaczono przy wykorzystaniu absorpcyjnego atomowego spektrometru ASA Perkin Elmer 3300 z atomizerem płomieniowym typu powietrze-acetylen.

Do wyznaczenia krzywej wzorcowej sporządzono roztwory (woda redestylowana) z $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Krzywa wzorcowa składała się z 6 punktów o stężeniach jonów Cu^{+2} 0, 1, 2, 3, 4 i 5 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Miedź oznaczano przy długości fali 327,4 nm.

Krzywą wzorcową dla cynku sporządzono analogicznie jak dla miedzi – z 6 punktów o stężeniu cynku: 0, 0,4, 0,8, 1,2, 1,6 i 2,0 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ z ZnCl_2 . Cynk oznaczano przy długości fali 213 nm.

Wapń oznaczano w ekstrakcie roślinnym z dodatkiem 1% roztworu LaCl_3 . Dodatek chlorku lantanu uniemożliwia tworzenie trudno rozpuszczalnych soli wapnia. Krzywą wzorcową sporządzono z $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Maksymalny zakres stężeń wynosił 5 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Wapń oznaczano przy długości fali 422,2 nm.

WYNIKI I DYSKUSJA

Zawartość miedzi i wapnia w ekstraktach z korzeni i części nadziemnych badanego żyta przedstawiono tabeli 1.

Tabela 1. Zawartość wapnia i miedzi w korzeniach i częściach nadziemnych żyta stresowanych miedzią (średnia z 3 powtórzeń, \pm 95% ufność)

Table 1. Calcium and copper concentration in roots and upper parts of rye stressed with Cu (average value from 3 replicates, \pm 95% confidence)

| Wariant – Variant | Korzenie – Roots | | Cz. nadziemne – Upper parts | |
|-------------------|--|--|--|--|
| | Ca^{2+} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | Cu^{2+} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | Ca^{2+} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) | Cu^{2+} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) |
| pH7 | 9,4 \pm 0,8 | 0,05 \pm 0,02 | 6,1 \pm 1,2 | 0,02 \pm 0,004 |
| pH4,5 | 9,1 \pm 0,6 | 0,05 \pm 0,01 | 6,01 \pm 0,03 | 0,02 \pm 0,003 |
| pH4,5 + 20Cu* | 5,6 \pm 0,6 | 0,06 \pm 0,01 | 5,91 \pm 0,03 | 0,02 \pm 0,003 |
| pH4,5 + 50Cu* | 4,4 \pm 0,4 | 0,1 \pm 0,002 | 5,83 \pm 0,02 | 0,02 \pm 0,001 |
| pH4,5 + 100Cu* | 4,1 \pm 0,4 | 0,3 \pm 0,01 | 5,78 \pm 0,03 | 0,04 \pm 0,001 |

*Liczba przed symbolem pierwiastka oznacza stężenie jonów Cu^{+2} w pożywce ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) – Number in front of the element symbol means Cu^{+2} ions concentration in the nutrient solution ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$).

Wysokie stężenie jonów miedzi w pożywce, na której rosły rośliny żyta ozimego jest dodatnio skorelowane z zawartością miedzi w jego korzeniach. Wraz ze wzrostem stężenia tego metalu ciężkiego w pożywce, wzrastała zawartość miedzi w korzeniach badanego żyta. Jednocześnie antagonistyczne oddziaływanie pomiędzy jonami miedzi i wapnia spowodowało znaczne zmniejszenie zawartości jonów wapnia (Ca^{2+}) w korzeniach.

W roślinach miedź aktywuje w roślinach wiele enzymów, między innymi jest składnikiem oksydazy katecholowej, p-dwufenolowej, askorbinowej, dysmutazy nadtlenowej, plastocyaniny, flawoproteidów miedziowych. Z dużym uproszczeniem można stwierdzić, że biochemiczne funkcje miedzi polegają na jej udziale w głównych procesach fotosyntezy, oddychania, w procesach powstawania białek, w przemianach związków azotowych, w transporcie węglowodanów oraz w metabolizmie błon komórkowych (miedź wpływa na ich przepuszczalność). Ponadto, miedź reguluje procesy powstawania DNA i RNA, wpływa więc na generatywną reprodukcję roślin. Niemniej jednak należy ona do tzw. mikroelementów i jest pobierana przez rośliny w śladowych ilościach. Gromadzi się głównie w korzeniach, ale w warunkach silnego zanieczyszczenia środowiska następuje wzrost jej zawartości również w częściach nadziemnych rośliny.

Podobnie jak w przypadku korzeni żyta wzrost stężenia miedzi w pożywce, wpłynął na wzrost jej zawartości także w częściach nadziemnych roślin, lecz nie wpłynął istotnie na zawartość jonów wapnia w częściach nadziemnych badanego żyta. Jak wiadomo, zawartość miedzi w roślinach jest bardzo zróżnicowana w zależności od części rośliny i stadium rozwojowego, od odmiany i gatunku. Średnia jej zawartość (fizjologiczna) w częściach nadziemnych wynosi od 5 do 30 ppm (dane ze środowiska naturalnego dla roślin o umiarkowanej wrażliwości na miedź). Średnią toksyczną zawartość miedzi w tych roślinach szacuje się na 20-100 ppm, przy czym w roślinach pochodzących z gleb silnie skażonych, zawartość miedzi może wynosić kilka tysięcy ppm (Kabata-Pendias i Pendias 1999).

W naszym doświadczeniu miedź w stężeniu $20 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ pożywki, wpłynęła na rośliny żyta toksycznie. Główną przyczyną obumierania roślin, w obecności fitotoksycznych stężeń Cu^{2+} , była przede wszystkim zmniejszona zawartość innych mikro i makroelementów i związane z tym zmiany w procesach metabolizmu badanych roślin.

Zawartość cynku i wapnia w ekstraktach z korzeni i części nadziemnych badanego żyta przedstawiono tabeli 2. Odnotowano wzrost zawartości jonów cynku w korzeniach i częściach nadziemnych badanego żyta wraz ze wzrostem stężenia cynku w pożywce. Jednocześnie w miarę nasilania się czynnika stresowego (stężenia cynku w pożywce), zmniejszała się zawartość jonów wapnia w korzeniach i częściach nadziemnych badanego żyta.

Tabela 2. Zawartość wapnia i cynku w korzeniach i częściach nadziemnych żyta stresowanego cynkiem (średnia z 3 powtórzeń, \pm 95% ufność)

Table 2. Calcium and zinc concentration in roots and upper parts of Zn-stressed rye (average value from 3 replicates, \pm 95% confidence)

| Wariant Variant | Korzenie – Roots | | Cz. Nadziemne – Upper parts | |
|--------------------|--|--|--|--|
| | Ca ²⁺ (g·kg ⁻¹) | Zn ²⁺ (g·kg ⁻¹) | Ca ²⁺ (g·kg ⁻¹) | Zn ²⁺ (g·kg ⁻¹) |
| pH7 | 9,4 \pm 0,8 | 0,05 \pm 0,02 | 6,1 \pm 1,2 | 0,02 \pm ,004 |
| pH4,5 | 9,1 \pm 0,6 | 0,04 \pm 0,01 | 6,01 \pm 0,03 | 0,02 \pm 0,003 |
| pH4,5 + 20Zn* | 6,8 \pm 0,6 | 0,2 \pm 0,006 | 5,7 \pm 0,9 | 0,04 \pm 0,003 |
| pH4,5 + 200Zn* | 5,8 \pm 0,02 | 0,5 \pm 0,003 | 5,3 \pm 0,8 | 0,3 \pm 0,04 |
| pH4,5 + 400Zn* | 5,5 \pm 0,02 | 0,6 \pm 0,004 | 4,93 \pm 0,8 | 0,3 \pm 0,02 |

* Liczba przed symbolem pierwiastka oznacza stężenie jonów Zn⁺² w pożywce (mg·dm⁻³) – Number in front of the element symbol means Zn⁺² ions concentration in the nutrient solution (mg dm⁻³).

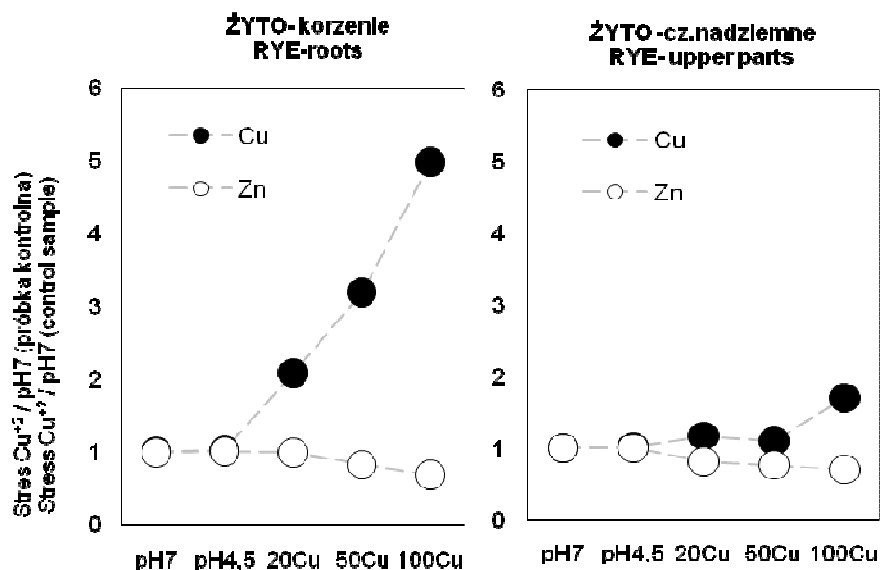
Cynk również spełnia ważną rolę w życiu roślin. Cynk w roślinach aktywuje wiele enzymów. Od obecności jonów cynku zależy między innymi, aktywność anhidrazy węglanowej, dehydrogenazy alkoholowej i dehydrogenazy zredukowanego NAD (dwunukleotyd nikotynamido-deninowy) i NADP (fosforan dwunukleotydu nikotynamido-adeninowy)². Cynk reguluje także proporcje składników na poziomie komórki, co wpływa na przepuszczalność błon komórkowych.

Cynk reguluje także proporcje składników na poziomie komórki, co wpływa na przepuszczalność błon komórkowych. Jony cynku determinują również procesy powstawania rybosomów. Brak tego pierwiastka upośledza syntezę tryptofanu, co bezpośrednio wpływa na produkcję auksyn, pośrednio zaś prowadzi do ograniczenia szybkości wzrostu rośliny. Zarówno jego niedobór jak i nadmiar wpływa na rośliny negatywnie. Na przyswajanie jonów cynku wpływa między innymi, odczyn i stosunek jonów Ca⁺²/Zn⁺² w roztworze glebowym. Kwaśny odczyn podłoża sprzyja wzrostowi zawartości tego mikroelementu w roślinach, jednocześnie ograniczając dostępność wapnia. Nadmierne ilości cynku gromadzą się zazwyczaj w korzeniach i liściach. W korzeniach cynk gromadzi się w zewnętrznych warstwach – w ryzodermie i komórkach kory pierwotnej, przy czym cynk jest obecny głównie w ścianach komórkowych i w wakuoli (Wierzbicka 1995, Baranowska-

²NAD i NADP(w chloroplastach) pełnią rolę donorów elektronów w jednym ze sposobów syntezy glutaminianu – będącego głównym donorem grup aminowych dla większości syntetyzowanych organicznych związków azotowych (Szwejkowska 2000)

Morek 2003, Abratowska 2006). Jony cynku w porównaniu z jonami miedzi wykazują znacznie większą zdolność przemieszczania się do części nadziemnych, stąd też w badanych roślinach fitotoksyczne stężenia cynku w pożywce istotnie wpłynęły również na zwiększenie się ich zawartości w częściach nadziemnych żyta. Jednocześnie w obecności wysokich stężeń cynku, w większym stopniu niż dla fitotoksycznych stężeń miedzi, zmniejszyła się zawartość wapnia w częściach nadziemnych roślin. Wynika z tego, że jony miedzi zdecydowanie bardziej niż jony cynku kumulują się w korzeniach roślin.

W literaturze przedmiotu odnotowano również antagonistyczne oddziaływanie pomiędzy jonami miedzi i cynku (Ruszkowska i Wojcieszka-Wyskupajtyś 1996, Kabata-Pendias i Pendias 1999, Lombnaes i Singh 2003, Lipoth i Schoenau 2007). Zbadano zatem także wpływ wysokich stężeń miedzi na zawartość cynku w roślinach. Na rysunku 1 przedstawiono względne zmiany zawartości cynku i miedzi w życie stresowanym miedzią w odniesieniu do roślin rosnących bez dodatkowej aplikacji miedzi w pożywce.



Rys. 1. Względne zmiany zawartości cynku w korzeniach i częściach nadziemnych żyta stresowanego miedzią, w stosunku do zawartości cynku w korzeniach i częściach nadziemnych roślin kontrolnych (pH7). Liczba przed symbolem pierwiastka oznacza stężenie jonów Cu^{+2} w pożywce ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$)

Fig. 1. Relative values of the concentration of zinc in the roots and upper parts of Cu-stressed rye to the concentration of zinc in the roots and upper parts of control plants (pH7). – Number in front of the element symbol means Cu^{+2} ions concentration in the nutrient solution ($\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$)

Zawartość miedzi i cynku w korzeniach i częściach nadziemnych roślin rosnących bez dodatkowej aplikacji miedzi w pożywce przyjęto jako 1 (próba kontrolna = pH7). Względne zmiany zawartości miedzi i cynku w roślinach żyta przedstawiono jako stosunek zawartości tych jonów w próbkach stresowanych do zawartości badanych metali w korzeniach i częściach nadziemnych żyta rosnącego bez dodatkowo dodanych do pożywki jonów miedzi i cynku (próby kontrolne). Fitotoksyczne stężenia jonów miedzi w pożywce wpłynęły na zmniejszenie się zawartości jonów cynku w korzeniach i częściach nadziemnych badanego żyta ozimego odmiany Rostockie.

Nie odnotowano wyraźnego wpływu kwaśnego odczynu pożywki (pH4,5) na zmianę zawartość jonów wapnia, miedzi i cynku w badanych roślinach. W literaturze przedmiotu co prawda niejednokrotnie donoszono, że kwaśny odczyn gleby wpływał na rozpuszczalność, migrację i przyswajalność badanych pierwiastków (Alcantara i in. 2001, Kabata-Pendias i Pendias 1999). Wiąże się to przede wszystkim z przechodzeniem z kompleksu sorpcyjnego gleby do roztworu glebowego (środowiska rzeczywistego korzeni roślin), form łatwo wymiennych a więc łatwo przyswajalnych dla roślin, natomiast pożywka na, której rosły badane rośliny jest odpowiednikiem roztworu glebowego, tak więc odczyn pożywki nie musiał wpłynąć na zawartość w roślinach badanych jonów Ca^{+2} , Cu^{+2} i Zn^{+2} .

WNIOSKI

1. Dodanie jonów miedzi i cynku do pożywki wpłynęło na wzrost zawartości tych metali w korzeniach i częściach nadziemnych badanego żyta.
2. Jony cynku wpłynęły na obniżenie zawartości wapnia zarówno w korzeniach jak i częściach nadziemnych badanych roślin.
3. Pod wpływem wysokich stężeń miedzi w pożywce zmniejszyła się zawartość jonów wapnia w korzeniach, przy czym nie odnotowano wyraźnych zmian zawartości wapnia w częściach nadziemnych badanych roślin.
4. Fitotoksyczne stężenia miedzi w pożywce ograniczyły pobierane jonów cynku przez korzenie żyta, a tym samym wpłynęły na zmniejszenie się zawartości cynku w korzeniach i częściach nadziemnych roślin.

PIŚMIENNICTWO

- Abratowska A., 2006. *Armeria Maritima* – Gatunek roślin przystosowany do wzrostu na glebach skażonych metalami ciężkimi. *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych*, T.55, Nr 2-3, 217-227.
- Alcantara A., Ginhaus A. M., Ojeda M. A., Benitez M. J., Benloch M., 2001. Metal accumulation by different plant species grown in contaminated media. W.J. Horst *et. al.* (Eds.) *Plant nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems*, 460-46.

- Baranowska-Morek A., 2003. Roślinne mechanizmy tolerancji na toksyczne działanie metali ciężkich. Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych, T.52, Nr 2-3, 283-298.
- Cygański A. 1993. Metody spektroskopowe w chemii analitycznej. Wydawnictwo Naukowo- Techniczne, Warszawa.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 1999. Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wydawnictwo Naukowe PAN, Warszawa.
- Karczewska A., Kabała C., 2005. Metody analiz laboratoryjnych gleb i roślin. AR we Wrocławiu. Instytut Gleboznawstwa i Ochrony Środowiska Rolniczego. Zakład ochrony środowiska, Wrocław.
- Marschner H., 1986. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
- Lipoth S.L., Schoenau J.J., 2007. Copper, zinc and cadmium accumulation in two prairie soils and crops as influenced by repeated applications of manure. J. Plant Nutr. Soil Sci., 170, 378-386.
- Lombnaes P., Singh Bal ram., 2003. Varietal tolerance to Zinc deficiency in wheat and barley grown in chelator- buffered nutrient solution and its effect on uptake of Cu, Fe and Mn. J. Plant Nutr. Soil Sci 166, 76-83.
- Ruszkowska M., Wojcieszka-Wyskupajtyś U., 1996. Mikroelementy- fizjologiczne i ekologiczne aspekty ich niedoboru i nadmiaru. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 434, 1-11.
- Starck Z., 2007. Gospodarka mineralna roślin. (w. „Fizjologia Roślin”, red. Kopcewicz J., Lewak S., Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa).
- Szwejkowska A., 2000. Fizjologia Roślin. Wydawnictwo naukowe UAM, Poznań.
- Wierzbicka M., 1995. Oddziaływanie metali ciężkich na rośliny. Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych, 44, 639-651.

EFFECT pH AND Cu^{2+} AND Zn^{2+} IONS ON CONCENTRATION OF CALCIUM IN RYE (*Secale cereale* L.)

Alicja Szatanik-Kloc¹, Zofia Sokołowska¹, Mięczysław Hajnos¹,
Tatiana Alekseeva², Andrej Alekseev²

¹Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin
e-mail: a.kloc@ipan.lublin.pl

²Institute of Physical-Chemical and Biological Problems in Soil Science, RAS
Pusthino, Moscow Region, Russia

Abstract. Winter rye (*Secale cereale* L) variety Rostockie was studied. Using AAS Perkin Elmer 3300 apparatus, the amounts of copper, zinc and calcium in the roots and upper parts of rye plants were investigated. The plants grew in a nutrient solution at pH 7, and after reaching the shooting stage the pH of the solution was adjusted to pH = 4.5 and various zinc (ZnCl_2) amounts (Zn 20, 200, 400 mg dm^{-3}) and copper ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) amounts (Cu 20, 50, 100 mg dm^{-3}) were added. The content of copper and zinc ions increased in rye roots and upper parts. At higher concentrations of copper and zinc, content of calcium ions in the roots decreased. On the other hand, calcium ions content decreased in the upper parts during the zinc stress. Influence of higher copper concentrations on calcium ions concentration in the upper parts was not significant. Zinc ions concentrations in the roots and upper parts of rye under copper stress conditions decreased.

Keywords: calcium, copper, zinc, rye