

Załącznik nr 2

**AUTOREFERAT
DOTYCZĄCY DZIAŁALNOŚCI NAUKOWO-
BADAWCZEJ**

Dr Renata Joanna Matraszek-Gawron

Katedra Fizjologii Roślin

Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Lublin 2017

Dr Renata Joanna Matraszek-Gawron

Katedra Fizjologii Roślin

Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

ul. Akademicka 15, 20-950 Lublin

email: renata.matraszek@up.lublin.pl

I. IMIĘ I NAZWISKO: Renata Joanna Matraszek-Gawron

II. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE:

- **2000 r. - stopień doktora nauk rolniczych w zakresie ogrodnictwa, specjalność: fizjologia roślin** uzyskałam na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „Fizjologiczno-morfologiczna reakcja na nikiel wybranych gatunków roślin”, wykonanej w Katedrze Fizjologii Roślin, Wydziału Ogrodniczego Akademii Rolniczej w Lublinie; promotor: *prof. dr hab. Maria Szymańska*.
- **1994 r. - tytuł magistra biologii, specjalność: mikrobiologia** uzyskałam na podstawie pracy magisterskiej pt.: „Ochrona żyta przed fuzariozą przez fluoryzujące *Pseudomonas* i mikroorganizmy chitynolityczne”, wykonanej w Zakładzie Mikrobiologii Środowiskowej, Wydziału Biologii i Nauk o Ziemi Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie; promotor: *prof. dr hab. Ewa Kurek*.

III. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH:

- **Adiunkt** (1 listopad 2000 – do chwili obecnej) – Katedra Fizjologii Roślin, Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie.
- **Asystent** (1 grudzień 1994 – 31 październik 2000) – Katedra Fizjologii Roślin, Wydział Ogrodniczy (obecnie Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu), Akademia Rolnicza w Lublinie (obecnie Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie).

Oprócz zatrudnienia w wymienionych powyżej jednostkach naukowych pracowałam również na stanowisku **laboranta** w Wojewódzkim Szpitalu Zespolonym im. Jana Bożego w Lublinie przy ulicy Mieczysława Biernackiego (obecnie Samodzielny Publiczny Szpital Wojewódzki im. Jana Bożego w Lublinie) (24 październik – 30 listopad 1994 r.)

IV. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO WYNIKAJĄCEGO Z ART. 16 UST. 2 USTAWY Z DNIA 14 MARCA 2003 R. O STOPNIACH NAUKOWYCH I TYTULE NAUKOWYM ORAZ STOPNIACH I TYTULE W ZAKRESIE SZTUKI (Dz. U. 2016 r. POZ. 882 ZE ZM. W Dz. U. 2016 r. POZ. 1311.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego:

Osiągnięciem stanowiącym podstawę do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego jest cykl siedmiu oryginalnych publikacji naukowych, ujętych pod wspólnym tytułem: „**Badania nad składem mineralnym roślin traktowanych niklem lub kadmem w warunkach intensywnego odżywiania siarką**”.

b) publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

O1. Matraszek R., Hawrylak-Nowak B., Chwil S., Chwil M. 2016. Macronutrient composition of nickel-treated wheat under different sulfur concentration in the nutrient solution. *Environmental Science and Pollution Research* 23(6): 5902-5914. doi: 10.1007/s11356-015-5823-6 (IF₂₀₁₆ = 2,741; 30 pkt. MNiSW*, 30 pkt. MNiSW**)

O2. Matraszek R., Hawrylak-Nowak B., Chwil S., Chwil M. 2016. Macroelemental composition of cadmium stressed lettuce plants grown under conditions of intensive sulphur nutrition. *Journal of Environmental Management* 180: 24-34. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.05-017 (IF₂₀₁₆ = 4,010; 35 pkt. MNiSW*, 35 pkt. MNiSW**)

O3. Matraszek R., Hawrylak-Nowak B., Chwil S., Chwil M. 2016. Interaction between cadmium stress and sulphur nutrition level on macronutrient status in *Sinapis alba* L. *Water, Air, & Soil Pollution* 227(9): 355. doi: 10.1007/s11270-016-3059-9 (IF₂₀₁₆ = 1,702; 25 pkt. MNiSW*, 25 pkt. MNiSW**)

O4. Matraszek R., Chwil S., Hawrylak-Nowak B., Kozłowska-Strawska J. 2017. Effect of sulphur and cadmium on macronutrient balance in spring wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences* 87(3): 927-936. doi: 10.1007/s40011-015-0658-y (0 pkt MNiSW*, 0 pkt. MNiSW**)

O5. Matraszek R., Hawrylak-Nowak B., Chwil M., Chwil S. 2017. The effect of sulphur and nickel interaction on micronutrient content in *Triticum aestivum* L. *Acta Agrophysica* 24(1): 85-100 (14 pkt. MNiSW*, 14 pkt. MNiSW**)

O6. Matraszek R., Hawrylak-Nowak B., Chwil S., Chwil M. 2017. Macronutrient balance of Ni-stressed lettuce plants grown under different sulphur levels. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48(6): 665-682. doi: 10.1080/00103624.2017.1298779 (IF₂₀₁₆ = 0,589; 15 pkt. MNiSW*, 15 pkt. MNiSW**)

O7. Matraszek R., Hawrylak-Nowak B., Chwil M., Chwil S., Rudaś M. 2017. Effect of the interaction of nickel stress and sulphur supplementation on the content and accumulation of macronutrients in white mustard (*Sinapis alba* L.). *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Agronomy*. 20(2): #01 Available Online: <http://www.ejpau.media.pl/volume20/issue2/art-01.html> (14 pkt. MNiSW*, 14 pkt. MNiSW**)

Łącznie dla ww. cyklu publikacji:

Sumaryczna ilość punktów MNiSW – 133* (133**)

Impact Factor (IF) – 9,042

Liczba cytowań - Web of Science (WoS) = 88 Scopus = 107

* wg załączników do komunikatu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego za odpowiedni rok (wg roku opublikowania; w przypadku publikacji z 2017 roku podano liczbę punktów zgodną z komunikatem MNiSW z dnia 9 grudnia 2016 r.)

** wg komunikatu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 9 grudnia 2016 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych wraz z liczbą punktów przyznawanych za publikacje w tych czasopismach
Impact Factor (IF) - zgodnie z rokiem opublikowania (w przypadku publikacji z 2017 roku uwzględniono ostatni dostępny IF)

We wszystkich publikacjach, które wchodziły w skład osiągnięcia naukowego, byłam autorką koncepcji badań, a także głównym wykonawcą doświadczeń wegetacyjnych i analiz laboratoryjnych (**zgodnie z Załącznikiem nr 6**). Oświadczenia współautorów prac, szczegółowo określające ich indywidualny wkład w powstanie ww. publikacji zamieszczone są w **Załączniku nr 5**.

c) omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

W latach 2008-2014 prowadziłam prace badawcze nad składem mineralnym traktowanej niklem lub kadmem pszenicy, sałaty i gorczycy w warunkach intensywnego odżywiania siarką siarczanową (S-SO₄). Uzyskane wyniki opracowałam i opublikowałam jako cykl siedmiu, powiązanych tematycznie, oryginalnych prac naukowych (O1-O7). Publikacje te uznaję za najważniejsze osiągnięcie w mojej dotychczasowej działalności naukowej i przedkładałam jako podstawę ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.

Wprowadzenie

Nasilające się zanieczyszczenie środowiska metalami śladowymi, w tym niklem i kadmem, stanowi problem globalny, który budzi powszechne zainteresowanie z uwagi na trwały charakter tego typu zanieczyszczeń, dużą mobilność i możliwość łatwego akumulowania się tych metali w roślinach uprawnych i wynikających stąd zagrożeń dla zwierząt i człowieka. Wzrost zawartości metalicznych pierwiastków śladowych w ekosystemach jest wynikiem zarówno 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, Harasim i Filipek 2015). Nikiel (Ni) jest pierwiastkiem niezbędnym dla roślin, zaangażowanym w wiele procesów biochemicznych i fizjologicznych, kluczowych dla prawidłowego wzrostu i rozwoju. Bierze udział w metabolizmie azotu i węgla, absorpcji żelaza, korzystnie wpływa na wigor nasion oraz jakość i wysokość plonu. Podobnie jak inne mikroelementy z grupy metali przejściowych, nikiel jest funkcjonalnym składnikiem układów enzymatycznych, a jego rola fizjologiczna jest związana przede wszystkim ze zmianą wartościowości i utrzymaniem prawidłowego statusu redox w komórkach (Fabiano i in. 2015). Z uwagi na bardzo niewielkie, niższe niż w przypadku innych mikroelementów, wymagania roślin na nikiel (poniżej 0,5 mg·kg⁻¹ suchej masy) znacznie częściej występuje jego toksyczność niż deficyt (Yusuf i in. 2011, Teixeira da Silva i in. 2012). Z kolei kadm (Cd) nie jest pierwiastkiem niezbędnym i nie pełni żadnych istotnych funkcji fizjologicznych w organizmach żywych z wyjątkiem jego biologicznej roli wykazanej w odniesieniu do fitoplanktonu, a zwłaszcza okrzemek. Jest powszechnie występującym, a jednocześnie jednym z najbardziej toksycznych metali, znacznie łatwiej ekstrahowanym ze środowiska niż inne metale ciężkie. Jest on

stosunkowo łatwo pobierany i akumulowany w roślinach uprawnych, wraz z którymi jest włączany w łańcuch troficzny stanowiąc zagrożenie dla wszystkich organizmów (Xiao i in. 2008). Nikiel i kadm, podobnie jak inne metale śladowe, zakłócają przebieg wielu procesów życiowych w roślinach, jednak za niezmiernie ważny mechanizm ich fitotoksyczności, obok indukcji stresu oksydacyjnego, uznano nieprawidłowości w gospodarce mineralnej (Chen i in. 2009, Tran i Popova 2013, Bhalerao i in. 2015, Jali i in. 2016). Metale te nie tylko zaburzają pobieranie, transport i dystrybucję składników mineralnych, ale również blokują ich biologiczne funkcje w roślinach, obniżając nie tylko wysokość, ale również jakość plonu. Zatem poznanie interakcji pomiędzy niklem lub kadmem a niezbędnymi składnikami mineralnymi stanowi kluczowy krok w stronę optymalizacji odżywiania roślin oraz łagodzenia fitotoksyczności tych metali. Ponadto informacje te mogą również wpływać na ulepszenie już istniejących lub opracowanie nowych, skuteczniejszych metod oczyszczania skażonego środowiska z wykorzystaniem zróżnicowanego odżywiania mineralnego.

Z jednej strony składniki mineralne mogą potęgować, a z drugiej ograniczać fitotoksyczność metali śladowych. Chociaż dane literaturowe dotyczące mechanizmów fitotoksyczności kadmu i niklu są dość liczne, jednak wiedza w tym zakresie nadal jest niepełna. Generalnie zarówno nikiel jak i kadm pozostają w stosunkach antagonistycznych z wapniem i fosforem, natomiast zależnie od genotypu i wzajemnych stosunków ilościowych z innymi pierwiastkami wykazują oddziaływanie antagonistyczne lub synergistyczne z cynkiem, miedzią oraz manganem. Ponadto nikiel pozostaje w relacji natury antagonistycznej z magnezem, sodem i żelazem, jednak niektóre badania wskazują również na synergistyczną interakcję niklu i żelaza. Z kolei kadm oddziałuje antagonistycznie z potasem. Dodatkowo sugeruje się antagonizm pomiędzy kadmem i amonową formą azotu ($N-NH_4^+$), a synergizm pomiędzy kadmem i azotanową formą azotu ($N-NO_3^-$). Ponadto obydwa metale (Ni i Cd) pozostają ze sobą w relacji antagonistycznej (Kabata-Pendias 2010). Dotychczasowe wyniki badań dotyczące wpływu niklu i kadmu na status mineralny roślin są rozbieżne. - Zawartość pierwiastków niezbędnych pod wpływem tych metali może ulegać zmiennym wahaniom w zależności od gatunku, stężenia metali w ryzosferze oraz innych warunków eksperymentalnych (Liu i in. 2003, Yusuf i in. 2011, Erdem i in. 2012, Przedpeńska-Wąsowicz i in. 2012, Rivelli i in. 2014, Li i in. 2016).

Niekorzystne zmiany w statusie mineralnym roślin skażonych niklem lub kadmem są dość dobrze udokumentowane, jednak mechanizm dotyczący nieprawidłowości w pobieraniu składników pokarmowych pod wpływem tych metali nie jest w pełni poznany (Chen i in. 2009, Przedpeńska-Wąsowicz i in. 2012, Tran i Popova 2013, Rivelli i in. 2014, Bhalerao i in.

2015). Przypuszcza się, że jest on związany ze zmniejszonym chelatowaniem i załadunkiem pierwiastków do ksylemu, ze zmianami konformacji oraz inhibicją pompy protonowej, jak również jest konsekwencją zmienionego składu oraz gradientu potencjału elektrochemicznego błon, a w rezultacie zaburzonej ich przepuszczalności. Ponadto niektóre składniki mineralne wpływają na dostępność kadmu i niklu na drodze pośredniej lub bezpośredniej. Pośredni wpływ polega na ograniczeniu fitodostępności tych metali poprzez ułatwioną precypitację i absorpcję czy współzawodnictwo o transportery jonowe. Może przejawiać się on również wyłączeniem pierwiastków niezbędnych, zwłaszcza mikroelementów, z ich funkcji fizjologicznych poprzez zastąpienie ich w metaloproteinach, wiązaniem do centrów katalitycznych niemetaloenzymów, jak również tzw. inhibicją allosterczną, czyli obniżeniem aktywności katalitycznej enzymu w wyniku zmiany jego konformacji. Z kolei efekt bezpośredni polega na zwiększeniu biomasy i w konsekwencji „rozcieńczeniu” toksycznych jonów, co łagodzi stres. Nie bez znaczenia dla pobierania pierwiastków niezbędnych w warunkach stresu wywołanego obecnością niklu i kadmu są również zaburzenia w procesie oddychania komórkowego i zmniejszonej zawartości fosforu w biomasie. W związku z tym spada podaż energii wymaganej do aktywnego pobierania i transportu jonów metali, jak również dochodzi do zburzenia stosunków wodnych w roślinie oraz indukcji stresu oksydacyjnego (Pinot i in. 2000, Liu i in. 2003, Yusuf i in. 2011, Erdem i in. 2012, Bhalerao i in. 2015, Li i in. 2016).

Mechanizm fitotoksyczności niklu i kadmu związany jest między innymi z zakłóceniem homeostazy pierwiastków niezbędnych, dlatego modyfikacja zawartości makro- i mikroelementów w podłożu może częściowo zapobiegać niektórym negatywnym skutkom stresu wynikającego z nadmiaru tych metali. Z tego względu w podjętych badaniach jako czynnik potencjalnie łagodzący fitotoksyczne oddziaływanie niklu oraz kadmu zastosowano wzmożone odżywanie siarką (S). Wciąż stosunkowo często pomijana jest kluczowa rola tego pierwiastka w aspekcie związku między plonami i ich jakością, wartością paszy dla zwierząt oraz dietą i zdrowiem człowieka (Jez 2008). Siarka, obok wapnia (Ca), jest makroelementem, który nie tylko jest wymagany do prawidłowego przebiegu wzrostu i rozwoju roślin, ale również odgrywa kluczową rolę w ich tolerancji na różnego rodzaju czynniki stresowe. Należy podkreślić, że zbyt niski poziom siarki w środowisku, a w konsekwencji obniżona wysokość i jakość plonu jest obecnie poważnym problemem globalnym. Niedobór siarki wynika z ciągłego ograniczania emisji do środowiska jej związków, powszechnego stosowania nawozów NPK, które nie mają w swoim składzie siarki oraz z intensyfikacji produkcji roślinnej. Ponadto ograniczona dostępność siarki dla roślin jest związana z faktem,

że jony siarczanowe łatwo łągają w głąb profilu glebowego i są relatywnie nieruchliwe w układzie gleba-roślina. Szacuje się, że także i w Polsce większość (nawet do 70%) gleb, zwłaszcza lżejszych gleb mineralnych, na ogół zakwaszonych, usytuowanych w dużej odległości od ośrodków przemysłowych, wykazuje niedostateczną dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin zawartość tego makroskładnika (Szulc 2008, Mašauskiene i Mašauskas 2012, Łuczkowska i in. 2015).

Fizjologiczna rola siarki w roślinach wynika przede wszystkim z jej obecności w aminokwasach siarkowych, które odgrywają kluczową rolę jako składnik i czynnik warunkujący formowanie struktury I, II i III-rzędowej białek oraz jako związki pośrednie w metabolizmie. Siarka wchodzi również w skład niektórych wielocukrów (w postaci siarczanów), witamin (biotyna i tiamina) oraz kofaktorów (koenzym A – przenośnik grup acylowych i S-adenozylometionina – donator grup metylowych oraz prekursor etylenu). Makroelement ten jest zaangażowany w regulację przebiegu podstawowych procesów metabolicznych, jak oddychanie komórkowe czy fotosynteza. Wchodzi m.in. w skład układów oksydoredukcyjnych kontrolujących biosyntezę chlorofilu oraz ferredoksyny – białka zawierającego centrum żelazowo-siarkowe (Fe-S), które pełni rolę przenośnika elektronów w fazie fotosyntezy zależnej od światła. Ferredoksyna pełni również rolę przenośnika elektronów w procesie redukcji azotu atmosferycznego, oksydacyjnym transporcie elektronów oraz w wielu innych ważnych przemianach metabolicznych (Droux 2004, Jamal i in. 2010, Kozłowska-Strawska i Badora 2013). Siarka uczestniczy również w szlakach przemian metabolitów wtórnych, między innymi glukozyzolanów (GLS). Te roślinne glikozydy oraz produkty ich hydrolizy, identyfikowane przede wszystkim u przedstawicieli kapustowatych, odgrywają nie tylko istotną rolę w odpowiedzi roślin na stresy biotyczne, ale również postulowany jest ich udział w tolerancji na stresy abiotyczne. Być może glukozyzylany pełnią rolę sygnałową w odpowiedzi na stres abiotyczny, ponieważ ich poziom wykazuje wariacje dobowe, podobne do tych jakie wykazują inne molekuly roślinne w odpowiedzi na czynniki zewnętrzne i wewnętrzne (Variyar i in. 2014).

Plonotwórcze działanie siarki ma ścisły związek z gospodarką azotową roślin. Rośliny dobrze zaopatrzone w siarkę intensywniej pobierają i efektywniej przetwarzają pobrany azot na plon użytkowy. Nawożenie siarką zwiększa potencjał roślin do pobierania azotanów, a jednocześnie przyczynia się do zmniejszenia ich zawartości w roślinie, gdyż siarka odpowiada za przekształcenie prostych form azotu w białka. Zatem optymalny poziom siarki pozwala na zmniejszenie udziału niebiałkowych form azotu w roślinie, z uwagi na fakt, że obecność cysteiny warunkuje zwiększoną aktywność reduktazy azotanowej. Zaangażowanie

siarki w metabolizm azotowy wynika również z udziału tego makroskładnika w reakcjach enzymatycznych odpowiedzialnych za biologiczne wiązanie azotu atmosferycznego (De Bona i Monteiro 2010, Jamal i in. 2010, De Bona i in. 2011).

Korzystny wpływ siarki na jakość plonu wynika m.in. z jej obecności w lotnych związkach jak np. tioestry alifatyczne, polisiarczki czy sulfotlenki, które podnoszą walory smakowe i zapachowe niektórych produktów roślinnych. Oprócz GLS, z których na drodze hydrolizy enzymatycznej powstają lotne izocytryniany – związki kluczowe dla odporności na stresy biotyczne, również inne lotne związki siarkoorganiczne hamują rozwój patogennych mikroorganizmów, zwiększając odporność roślin na choroby i szkodniki (Prasad 2014). Siarka odgrywa także ważną rolę w odpowiedzi roślin na stres wynikający z nadmiaru pierwiastków śladowych. Powszechnie wiadomo, że ligandy zawierające grupy –SH, takie jak zredukowany glutation (GSH) oraz fitochelatyny (PC) tworzą stabilne, trwałe kompleksy z metalami śladowymi. Rola glutationu w tolerancji na stres wywołany nadmiarem metali śladowych polega nie tylko na tym, iż związek ten jest prekursorem syntezy PC, ale również na jego udziale w detoksykacji generowanych pod wpływem stresu wolnych rodników tlenowych poprzez cykl askorbinowo-glutationowy. Dowiedziono, że zwiększona biosynteza GSH powoduje podwyższenie tolerancji roślin na kadm i nikiel, pomimo zwiększenia akumulacji kadmu w częściach nadziemnych, jak również że poziom GSH, cysteiny oraz O-acetyol-L-seryny (OAS) w tkankach pędów jest ściśle skorelowany ze zdolnością do akumulacji metali śladowych, w tym niklu. Z kolei udział PC – bogatych w grupy tiolowe peptydów – w odporności na metale śladowe polega na kompleksowaniu wolnych jonów metali (szczególnie kadmu) i transporcie niskocząsteczkowych kompleksów metali do wakuoli. Tam tworzone są kompleksy wielkocząsteczkowe zawierające jony siarczkowe, które umożliwiają skompleksowanie większych ilości jonów metali i zwiększają stabilność tych kompleksów (Noctor i in. 2012).

Skrócone tło, cel i metodyka badań

Jednym ze skutków nadmiernej zawartości kadmu i niklu w podłożu (glebie, wodach, podłożach kontrolowanych) jest zburzenie składu mineralnego roślin. Pomimo licznych badań problematyka ta nadal pozostaje otwarta, zwłaszcza w zakresie wpływu tych metali na zawartość i dystrybucję makroelementów w roślinach oraz na proporcje ilościowe pomiędzy nimi. W bardzo znikomym stopniu jest też przebadany problem dotyczący wpływu odżywiania roślin makroskładnikami na poprawę ich składu mineralnego zaburzonego przez

nikiel lub kadm. Szczególnie bardzo słabo poznany jest wpływ dokarmiania siarką roślin rosnących w podłożach skażonych tymi metalami. Można założyć, że siarka może wpływać na gospodarkę mineralną roślin zarówno bezpośrednio i pośrednio. Jej wpływ bezpośredni wiąże się z interakcjami z innymi pierwiastkami na etapie pobierania i transportu w roślinie oraz ich funkcją fizjologiczną. Wpływ pośredni wiąże się natomiast z podniesieniem odporności roślin na toksyczność badanych metali m.in. poprzez zwiększenie puli związków (m.in. GSH i PC) pełniących ważne funkcje w detoksykacji tych metali *in vivo*. Rola siarki wiąże się więc z ochroną kompartmentu metabolicznego komórek przed toksycznym działaniem kadmu i niklu, a w konsekwencji z poprawą kondycji fizjologicznej rośliny, w tym związanej z jej gospodarką mineralną. Należy podkreślić, że dokarmianie siarką roślin rosnących w warunkach stresowych jest tym bardziej uzasadnione, gdyż pierwiastek ten znajduje się w ilościach deficytowych w glebie, a wskutek ograniczenia emisji tlenków siarki również w atmosferze.

Biorąc wszystkie te aspekty pod uwagę podjęłam badania, których wyniki przedstawiam jako osiągnięcie naukowe, a które miały na celu:

- określenie stopnia nasilenia skutków fitotoksycznego oddziaływania niklu i kadmu w oparciu o zmiany w składzie mineralnym oraz
- ocenę możliwości zastosowania intensywnego odżywiania siarką siarczanową (S-SO₄) dla poprawy statusu mineralnego wybranych gatunków roślin rosnących w warunkach skażenia podłoża niklem lub kadmem.

W powyższej ocenie uwzględniano zawartość, dystrybucję i bioakumulację składników mineralnych, zmiany stosunków ilościowych (masowych) pomiędzy makroelementami w roślinach, jak również fitoakumulację badanych metali śladowych.

Wybrane do badań gatunki: pszenica zwyczajna jara (*Triticum aestivum* L.) 'Zebra', sałata głowiasta masłowa (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) 'Justyna' i gorczyca biała (*Sinapis alba* L.) 'Rota' charakteryzowały się zróżnicowanym zapotrzebowaniem na siarkę oraz różną wrażliwością na zastosowane metale śladowe. Spośród badanych gatunków gorczyca ma największe, natomiast pszenica najmniejsze zapotrzebowanie na siarkę (Lakkineni i Abrol 1992, Cuppett i in. 1999, Jaga 2013). Ponadto gorczyca charakteryzuje się względnie wysoką, sałata średnią, a pszenica względnie niską tolerancją na metale śladowe. Gatunki te stanowią dobry model do identyfikacji czynników kontrolujących pobieranie pierwiastków śladowych oraz do eksperymentów związanych z ograniczaniem pobierania i akumulacji metali, zwłaszcza w częściach użytkowych (Tyksiński i Kurdubska 2005, Gvozdenec i in. 2013, Zorrig i in. 2013, Antonkiewicz i in. 2016).

Doświadczenia przeprowadzono w podłożu płynnym (pożywka Hoaglanda; pH = 5,8-6,0), zmodyfikowanym pod względem stężenia niklu lub kadmu oraz siarki. W badaniach zastosowano 4 stężenia niklu (0; 0,0004; 0,04 i 0,08 mM Ni w formie chlorku niklu II) lub kadmu (0; 0,0002; 0,02 i 0,04 mM Cd w formie chlorku kadmu II) w kombinacji z trzema poziomami siarki (w formie siarczanowej): 2 (dawka standardowa), 6 lub 9 mM S. Dawkę standardową siarki aplikowano w formie siarczanu magnezu ($MgSO_4$), a w seriach ze zwiększoną zawartością tego makroelementu, dawkę podstawową (2 mM) uzupełniano do odpowiedniego poziomu siarczanem sodu (Na_2SO_4), po czym we wszystkich seriach doświadczalnych wyrównano poziom sodu i chloru. W korzeniach i pędach traktowanych nikiem lub kadmem gatunków rosnących przy różnych poziomach siarki oznaczano zawartość makroelementów (N, P, K, Ca, Mg i S), a dodatkowo w biomacie skażonej nikiem pszenicy analizowano również zawartość mikroelementów (Fe, B, Cl, Cu, Mn, Mo i Zn). Najniższe zastosowane stężenie niklu (0,0004 mM) uznawane jest za najwyższe dopuszczalne stężenie tego metalu w wodach podziemnych i roztworze glebowym. Wartość ta około 8-krotnie przewyższa stężenie tła niklu w wodach gruntowych i jest około 1,3-razy większa niż średnia globalna (Lander 2003, Ahmad i in. 2011). Najniższe badane stężenie kadmu (0,0002 mM) mieściło się w zakresie wartości przyjętych dla środowisk nieskażonych (0,00004-0,00032 mM Cd), podczas gdy pozostałe dwie koncentracje (0,02 i 0,04 mM Cd) znacznie przekraczały krytyczną zawartość kadmu w roztworze glebowym (0,0008 mM) (De Vries 2003 i 2007). Zastosowany w badaniach podstawowy poziom siarki siarczanowej w pożywce (2 mM) jest uznawany za średni. Szacuje się, że koncentracja S- SO_4 w środowisku naturalnym, tj. nieskażonym metalami śladowymi roztworze glebowym, zawiera się w przedziale 0,16-7, na terenach suchych – 3-16, natomiast w roztworach glebowych, które zawierają pozostałości kopalń rud siarczkowych 13-110 mM (Ernst i in. 2008).

Omówienie wyników badań

Wpływ niklu i kadmu na zawartość i dystrybucję składników mineralnych w roślinach

Wyniki badań własnych przeprowadzonych na pszenicy (**O1; O4; O5**), sałacie (**O2; O6**) i gorczycy (**O3; O7**) wykazały, że obecność niklu lub kadmu w podłożu kontrolowanym na ogół wywoływała niekorzystne, różnokierunkowe zmiany w zawartości oraz wzajemnych proporcjach składników mineralnych (makroelementów) w biomacie roślin. Zmiany te

zależały nie tylko od rodzaju i stężenia metalu aplikowanego do podłoża, ale również od genotypu, a nawet organu rośliny.

Uzyskane rezultaty wskazują u pszenicy na antagonistyczne relacje pomiędzy niklem i potasem oraz niklem i wapniem, ponieważ w warunkach skażenia niklem zawartość tych makroelementów istotnie zmniejszała się w biomacie korzeni i pędów (**O1**). W obecności niklu również była redukowana zawartość azotu w korzeniach oraz fosforu, magnezu i siarki w organach nadziemnych. Jednocześnie poziom azotu w częściach nadziemnych zwiększał się w warunkach najniższej zawartości niklu w podłożu, nie zmieniał się przy średniej, a spadał przy największej koncentracji Ni (**O1**).

Przedstawionym powyżej zmianom w zawartości makroelementów w biomacie traktowanej niklem pszenicy z reguły towarzyszył spadek zawartości mikroelementów, tj. żelaza, boru, manganu, molibdenu i cynku w organach nadziemnych i korzeniach (**O5**). Natomiast w tych warunkach zawartość miedzi zwiększała się w korzeniach a obniżała w częściach nadziemnych. Zmiany te wskazują na antagonistyczne oddziaływanie niklu z Fe, B, Mn, Mo i Zn. Jednocześnie w biomacie pszenicy traktowanej niklem stwierdzono tendencje spadkowe w zawartości chloru, z wyłączeniem wyraźnego wzrostu poziomu tego mikroelementu w częściach nadziemnych przy najwyższej zastosowanej koncentracji Ni (**O5**). Ponadto pod wpływem niklu translokacja żelaza, miedzi i cynku z korzeni do części nadziemnych pszenicy ulegała zahamowaniu, a zwiększała się translokacja molibdenu. Nie stwierdzono natomiast wyraźnych zmian wartości współczynnika translokacji (TF) dla boru, chloru i manganu (**O5**).

Analiza zawartości makroelementów w biomacie pszenicy traktowanej kadmem wskazywała na antagonistyczne interakcje tego metalu z wapniem i magnezem. Ponadto w tych warunkach na ogół zawartość fosforu i potasu zwiększała się w korzeniach, a ulegała redukcji w częściach nadziemnych, co wskazuje na utrudnioną translokację tych pierwiastków w skażonych kadmem roślinach. Odnotowano jednocześnie spadek zawartości azotu i wzrost poziomu siarki w organach nadziemnych (**O4**).

W sałacie eksponowanej na nikiel w korzeniach zaznaczył się wyraźny wzrost, a w organach użytkowych spadek zawartości azotu, potasu i siarki. Stwierdzono jednocześnie wzrost koncentracji wapnia i fosforu w korzeniach, a w liściach spadek poziomu fosforu przy niskich, natomiast tendencję zwykłą przy wysokich stężeniach niklu. Podobnie jak w przypadku rosnącej w obecności kadmu pszenicy, zmiany te wskazują na indukowane niklem istotne zaburzenia translokacji makroelementów z korzeni do organów nadziemnych. Jedynie w przypadku magnezu nie odnotowano istotnych wahań w zawartości tego

pierwiastka pod wpływem niklu (**O6**). Stwierdzone w badaniach własnych zmiany w zawartości makroelementów w biomacie traktowanej kadmem sałaty świadczą o antagonistycznej interakcji tego metalu z azotem, fosforem, potasem i magnezem. Jednocześnie pod wpływem kadmu zwiększa się zawartość wapnia w częściach nadziemnych i siarki w korzeniach (**O2**).

Zmiany w zawartości makroelementów w biomacie gorczycy skażonej nikiem wskazują na antagonizm pomiędzy nikiem i wapniem. Jednocześnie wykazano, że skażenie podłoża nikiem wpłynęło na spadek zawartości azotu w korzeniach i wzrost jego poziomu w częściach nadziemnych. Pod wpływem niklu z reguły obniżała się zawartość fosforu i magnezu w korzeniach oraz zwiększała zawartość potasu w pędach gorczycy. Nie notowano natomiast wyraźnych zmian w zawartości siarki (**O7**). U gorczycy, uprawianej w podłożu skażonym kadmem, w korzeniach z reguły zaznaczał się wzrost, natomiast w pędach spadek zawartości azotu i wapnia. Przy niższym poziomie skażenia w korzeniach tego gatunku zawartość magnezu i potasu nie wahała się znacząco, natomiast przy wyższym istotnie się obniżała. W organach nadziemnych eksponowanej na kadm gorczycy nie wykazano istotnych wahań zawartości magnezu, natomiast zawartość potasu w znacznym stopniu uzależniona była od stężenia Cd w podłożu. Z kolei poziom siarki w częściach nadziemnych i korzeniach gorczycy wykazywał tendencje spadkowe, szczególnie pod wpływem wysokich stężeń kadmu. Jednocześnie w biomacie gorczycy traktowanej kadmem na ogół nie wykazano istotnych wahań w zawartości fosforu (**O3**).

Zmiany stosunków masowych (ilościowych) pomiędzy makroelementami w roślinach pod wpływem niklu i kadmu

Stosunki pomiędzy pierwiastkami w biomacie informują o statusie odżywczym roślin oraz warunkują ich rozwój i determinują jakość biologiczną plonu. Dotyczy to zwłaszcza roślin paszowych i konsumpcyjnych, w których proporcje pomiędzy pierwiastkami determinują ich wartość użytkową. Z tego względu w roślinach testowych obliczono wzajemne stosunki ilościowe pomiędzy analizowanymi pierwiastkami.

U pszenicy, w odpowiedzi na wzrastające zawartości niklu w podłożu obniżała się wartość stosunku Ca:Mg w korzeniach, z wyjątkiem istotnego wzrostu stwierdzonego w warunkach średniej zawartości Ni (**O1**). W częściach nadziemnych tego gatunku zwiększała się wartość ilorazu Ca:P, a obniżała K:(Ca+Mg). Natomiast stosunek masowy N:S w biomacie zarówno organów nadziemnych jak i podziemnych pszenicy nie ulegał wyraźnym

wahaniom **(O1)**. Z kolei w biomacie pszenicy eksponowanej na kadm stosunek $K:(Ca+Mg)$ rozszerzał się, natomiast $N:S$ zawężał **(O4)**. Jednocześnie w korzeniach wartości ilorazów $Ca:Mg$ i $Ca:P$ wykazywały tendencję spadkową. Wartość obu tych ilorazów w biomacie części nadziemnych na ogół zmniejszała się przy najniższej i najwyższej, a wzrastała przy średniej zawartości niklu w podłożu **(O4)**.

Z uwagi na cenne walory smakowe i odżywcze sałaty oraz prozdrowotny wpływ tego warzywa stosunki pomiędzy makroskładnikami w jej biomacie mają szczególne znaczenie. Nikiel wpłynął na istotny wzrost w korzeniach a spadek w częściach użytkowych sałaty wartości ilorazów $N:Mg$, $K:Mg$ i $K:Ca$. W liściach pod wpływem niklu notowano obniżenie wartości stosunku $K:(Ca+Mg)$ oraz zwiększenie wartości ilorazu $100 P:K$. W korzeniach stwierdzono obniżenie wartości stosunku $Ca:Mg$. Jednocześnie wartości pozostałych ilorazów, tj. $N:P$, $P:Mg$, $K:N$, $Ca:P$, $10 Ca:K$, $10 Ca:N$ oraz $N:S$ w biomacie zarówno korzeni, jak i części użytkowych sałaty nie ulegały znaczącym wahaniom pod wpływem niklu **(O6)**.

Skażenie środowiska odżywczego sałaty kadmem na ogół powodowało istotne podwyższenie wartości stosunków $N:Mg$, $K:Mg$, $10 Ca:K$, $Ca:Mg$ i $10 Ca:N$ w biomacie badanych organów. Natomiast wartości ilorazów $K:Ca$, $K:(Ca+Mg)$ oraz $N:S$ zawężały się, przy jednocześnie niezmięniętej wartości stosunków $100 P:K$ i $K:N$. Ponadto traktowanie sałaty kadmem podwyższyło w korzeniach wartość ilorazu $P:Mg$, a w częściach użytkowych ilorazu $Ca:P$. Wykazano również, że niższe z zastosowanych w eksperymencie stężeń kadmu powodowało zawężenie a wyższe - rozszerzenie stosunku $N:P$ w liściach sałaty **(O2)**.

Fitoakumulacja niklu i kadmu a akumulacja makroelementów w roślinach

Jak należało się spodziewać wraz ze wzrostem koncentracji badanych metali w podłożu notowano ich zwiększoną akumulację w roślinach testowych. Zwłaszcza w obecności wysokich stężeń metali notowano wyraźnie przekroczenie przyjętych norm ich zawartości, przy czym ta zwykła tendencja zaznaczyła się zwłaszcza w częściach nadziemnych. Spośród wybranych do badań trzech gatunków roślin najwyższą fitoakumulacją, zarówno niklu jak i kadmu, charakteryzowała się gorczyca. Z kolei najmniej niklu akumulowała sałata, natomiast kadmu – pszenica. Jednak sałata akumulowała niewiele mniej kadmu niż gorczyca a znacznie więcej niż pszenica. W warunkach porównywalnego stężenia obu tych metali śladowych w podłożu kontrolowanym (0,04 mM), wszystkie trzy gatunki akumulowały znacznie więcej niklu niż kadmu **(O1-O4; O6; O7)**.

U pszenicy i sałaty eksponowanych na nikiel lub kadm, zaznaczył się wyraźny spadek akumulacji makroelementów (N, P, K, Ca, Mg i S), z nielicznymi wyjątkami (**O1; O2; O4; O6**). Mianowicie w pszenicy traktowanej niklem poziom magnezu wykazywał stosunkowo niewielkie wahania, natomiast w roślinach tego gatunku uprawianych w podłożu o małej zawartości kadmu (0,0002 mM) odnotowano wzrost akumulacji siarki (**O1; O4**). Z kolei u sałaty wyjątek stanowiły nieistotne zmiany w akumulacji makroelementów, oprócz wyraźnego spadku fosforu i potasu stwierdzonego wobec najniższej dawki niklu (0,0004 mM). Z kolei akumulacja makroelementów w biomacie gorczycy, znacznie wyraźniej niż u pszenicy i sałaty, zależała od koncentracji niklu i kadmu w podłożu (**O3; O7**). W warunkach skażenia niklem, przy najniższej koncentracji tego metalu w podłożu wykazano u gorczycy wzrost akumulacji fosforu i siarki w korzeniach oraz azotu w częściach nadziemnych, podczas gdy wysokie stężenie niklu w rizosferze powodowało redukcję akumulacji wszystkich makroelementów, zarówno w biomacie organów podziemnych jak i nadziemnych. Natomiast w środowisku zawierającym niskie stężenia kadmu stwierdzono wzrost, natomiast przy wysokim - spadek akumulacji makroelementów w korzeniach. W tych warunkach w częściach nadziemnych nastąpiła redukcja akumulacji wszystkich makroskładników, niezależnie od poziomu skażenia kadmem. Należy podkreślić, że w przeciwieństwie do sałaty, większe zmiany w akumulacji makroelementów (za wyjątkiem wapnia i magnezu) w traktowanej kadmem lub niklem gorczycy zaznaczyły w częściach nadziemnych niż korzeniach.

Pod wpływem niklu największe wahania w bioakumulacji makroelementów w biomacie pszenicy dotyczyły fosforu, a najmniejsze magnezu, natomiast pod wpływem kadmu - odpowiednio magnezu i siarki (**O1; O4; O5**). W traktowanej niklem sałacie największy spadek akumulacji, zarówno w korzeniach jak i liściach, zaznaczył się dla azotu, a najmniejszy dla magnezu. Z kolei w eksponowanej na kadm sałacie w największym stopniu zmniejszała się akumulacja azotu i fosforu, niezależnie od organu. Natomiast zmiany w akumulacji pozostałych makroelementów w roślinach tego gatunku uprawianego w podłożu skażonym Cd wykazywały różne tendencje w korzeniach i częściach użytkowych. - W liściach największej redukcji uległa akumulacja magnezu, a w korzeniach siarki i wapnia. W przypadku rosnącej w obecności niklu gorczycy wzrastająca koncentracja tego metalu w podłożu w największym stopniu przyczyniła się do zmian w akumulacji magnezu w korzeniach, a najmniejsze wahania odnotowano w przypadku potasu. Natomiast w częściach nadziemnych największe zmiany dotyczyły wapnia, a najmniejsze azotu, potasu i siarki (**O3; O7**).

Uwzględniając porównywalne dawki obu metali (0,04 mM), na podstawie zmian w zawartości i akumulacji makroelementów, wykazano znacznie większy niekorzystny wpływ kadmu niż niklu w odniesieniu do statusu mineralnego badanych gatunków roślin. Ponadto analizując zmiany w zawartości i akumulacji makroskładników potwierdzono tezę o wysokiej wrażliwości pszenicy, średniej sałaty, a najmniejszej gorczycy na badane metale śladowe, jak również wysoką ich akumulację w biomasie gorczycy i sałaty.

Wpływ intensywnego żywienia siarką na status mineralny roślin skażonych niklem lub kadmem

Wpływ intensywnego żywienia siarką roślin skażonych niklem lub kadmem na ich status mineralny zbadano u trzech gatunków o odmiennym zapotrzebowaniu fizjologicznym na ten makroelement. Wybór tych gatunków miał na celu zbadanie czy wpływ ten jest specyficzny czy niespecyficzny gatunkowo. W przeprowadzonych badaniach status mineralny roślin oceniono na podstawie zawartości i dystrybucji w roślinie składników mineralnych niezbędnych w ich rozwoju oraz stosunków ilościowych pomiędzy makroelementami. Wyniki badań wykazały, że reakcja roślin wszystkich trzech badanych gatunków traktowanych metalami na intensywne odżywianie siarką była na ogół korzystna, chociaż zakres i kierunek zmian w statusie mineralnym roślin były mniej lub bardziej specyficzne dla gatunku (**O1-O7**).

Status mineralny pszenicy

Spośród trzech badanych gatunków, pszenica (*Triticum aestivum* L.) jest gatunkiem o najmniejszych wymaganiach fizjologicznych względem siarki. Jednocześnie, jak wykazały badania własne, jest najbardziej wrażliwa na toksyczne działanie niklu i kadmu oraz najmniej podatna na ich akumulację. Pod wpływem niklu i kadmu jej status mineralny był zaburzany bardziej niż w przypadku sałaty i gorczycy, przy czym ta prawidłowość uwidacznia się w stopniu większym pod wpływem kadmu niż niklu.

Podwyższony poziom siarki w środowisku wzrostu **pszenicy odmiany Zebra**, w warunkach skażenia niklem lub kadmem, na ogół skutkowało podobnymi tendencjami w zmianach zawartości makroelementów w organach nadziemnych i korzeniach (**O1; O4**). Wzmoczona suplementacja S-SO₄ podłoża skażonego metalami wpływała na istotne zwiększenie zawartości azotu i wapnia zarówno w korzeniach, jak i organach nadziemnych pszenicy. Jedynie zmiany zawartości tych makroelementów w częściach nadziemnych pod

wpływem najwyższego poziomu siarki nie były istotne statystycznie. Jednocześnie zawartość fosforu i potasu wyraźnie zmniejszyła się w korzeniach a zwiększyła w częściach nadziemnych, co wskazuje na wzmożoną translokację tych pierwiastków z korzeni do pędów. W następstwie intensywnego odżywiania siarką, istotnie zwiększyła się zawartość siarki w biomacie korzeni i części nadziemnych pszenicy traktowanej niklem. Na ogół nie stwierdzono znaczących wahań zawartości magnezu w warunkach suplementacji siarczanami. Pod wpływem podwyższonego poziomu S-SO₄ w podłożu, zawartość siarki w biomacie pszenicy traktowanej niklem zwiększała się bardziej w częściach nadziemnych, natomiast kadmem w korzeniach.

Generalnie, w warunkach wzmożonego żywienia siarką pszenicy większe wahania w zawartości fosforu, potasu, wapnia i magnezu zaznaczyły się pod wpływem skażenia kadmem, natomiast azotu i siarki – niklem.

W warunkach skażenia kadmem najbardziej zmieniała się zawartość fosforu, a najmniej magnezu. Również pod wpływem niklu najmniejszym wahaniom ulegała zawartość magnezu. W tych warunkach w częściach nadziemnych najbardziej zmieniała się zawartość fosforu i siarki, natomiast w korzeniach azotu. Ponadto, niezależnie od rodzaju metalu, większe różnice w zawartości azotu stwierdzono w korzeniach niż w częściach nadziemnych, natomiast przeciwne tendencje zaznaczyły się w przypadku fosforu. Zawartość siarki w biomacie pszenicy traktowanej niklem i suplementowanej siarczanami, zmieniała się bardziej w częściach nadziemnych, natomiast w roślinach tego gatunku skażonych kadmem - w korzeniach. W tych warunkach odwrotne zależności wykazano dla potasu, wapnia i magnezu (**O1; O4**).

Opisanym powyżej zmianom zawartości makroelementów towarzyszył na ogół znaczący wzrost zawartości mikroelementów (żelaza, boru, chloru, miedzi, manganu i cynku) w organach nadziemnych i korzeniach pszenicy (**O5**). Zatem uzyskane wyniki wskazują na synergistyczne oddziaływanie siarki z analizowanymi mikroelementami. W warunkach podwyższonego poziomu tego makroelementu w środowisku zawierającym nikiel wzrost zawartości boru, chloru, manganu i cynku zaznaczył się bardziej w częściach nadziemnych, natomiast żelaza w korzeniach. Dodatkowo, zarówno w korzeniach jak i pędach, zawartość żelaza i chloru zmieniała się bardziej przy najwyższej (9 mM), natomiast boru przy średniej dawce siarki (6 mM). Wahania zawartości pozostałych mikroelementów w skażonej niklem pszenicy warunkowane były koncentracją siarki siarczanowej w podłożu. Mianowicie zawartość miedzi i cynku w korzeniach ulegała większym wahaniom przy średnim,

a manganu przy najwyższym poziomie tego pierwiastka.. Jednak w częściach nadziemnych tendencje te były odwrotne.

Oprócz zmian w zawartości mikroelementów w pszenicy skażonej niklem zanotowano różnokierunkowe zmiany w ich translokacji z korzeni do części nadziemnych (**O5**). Nie stwierdzono istotnego wpływu suplementacji siarką traktowanej niklem pszenicy na translokację boru. Wykazano, że wyższy poziom siarki w warunkach niższych stężeń niklu (0,0004 i 0,04 mM) nie miał wpływu na wartość współczynnika translokacji (WT) żelaza, chloru i molibdenu. Natomiast przy najwyższym stężeniu niklu, pod wpływem intensywnego żywienia siarką, stwierdzono zwiększoną translokację żelaza i chloru oraz spadek translokacji molibdenu przy 6 mM S, a wzrost pod wpływem 9 mM S. W eksponowanej na nikiel pszenicy wykazano również przy 6 mM S ograniczoną translokację miedzi, natomiast w obecności 9 mM S podwyższoną wartość WT cynku. Z kolei WT molibdenu nie ulegał znaczącym zmianom pod wpływem 6 mM S. Natomiast w pożywce zawierającej 9 mM S i niższe stężenia niklu wartość WT molibdenu zwiększała się, a przy najwyższym stężeniu tego metalu ulegała redukcji. Odnotowana w badaniach większa od jedności wartość WT boru i molibdenu świadczy o efektywnej translokacji tych mikrośladników z korzeni do części nadziemnych pszenicy. Z kolei niższa od jedności wartość WT żelaza, chloru, miedzi, manganu i cynku wskazuje na ograniczoną translokację tych mikroelementów. W oparciu o wartość WT stwierdzono, że pszenica odmiany Zebra charakteryzuje się stosunkowo słabą zdolnością translokacji niklu z korzeni do części nadziemnych ($WT < 1$) przy niskich koncentracjach niklu (0,0004 mM) w podłożu oraz wysoką efektywnością translokacji tego metalu ($WT > 1$) w warunkach wysokiego stężenia tego metalu (0,04 i 0,08 mM).

W celu uzyskania pełniejszych informacji o stanie odżywienia pszenicy skażonej niklem lub kadmem w warunkach suplementacji siarką, oceniono nie tylko zmiany w zawartości i akumulacji makroelementów w roślinach, ale również analizowano stosunki ilościowe pomiędzy badanymi pierwiastkami. Intensywne żywienie siarką pszenicy, niezależnie od poziomu jej skażenia niklem, skutkowało podwyższeniem w korzeniach, a obniżeniem w częściach nadziemnych ilorazu Ca:P oraz N:S. W tych warunkach w korzeniach stwierdzono również zmniejszenie wartości stosunku K:(Ca:Mg) i wzrost ilorazu Ca:Mg (**O1**). Stwierdzone zmiany wartości stosunków K:(Ca+Mg), Ca:Mg oraz Ca:P w biomacie pszenicy, wywołane dodatkową aplikacją siarki do skażonego niklem podłoża, ulegały większym wahaniom w korzeniach niż częściach nadziemnych. Z kolei intensywne odżywianie siarką pszenicy eksponowanej na kadm na ogół zawężyło stosunek Ca:P, zarówno w częściach nadziemnych jak i korzeniach. W tych warunkach stosunek K:(Ca+Mg)

zmniejszył się w korzeniach, a podwyższył w pędach. Jednocześnie stosunek N:S w biomase pędów i korzeni ulegał rozszerzeniu przy 6 mM S, a zawężał się przy 9 mM S. Odwrotną zależność wykazano w odniesieniu do ilorazu Ca:Mg. W przeciwieństwie do ilorazu Ca:Mg, wartości stosunku K:(Ca+Mg) podlegały większym wahaniom w korzeniach niż w częściach nadziemnych, szczególnie pod wpływem 9 mM S (**O4**).

Stwierdzony w badaniach korzystny wpływ siarki, zwłaszcza w dawce 6 mM S, na skażoną nikiem pszenicę przejawiał się nie tylko wzrostem zawartości, ale także zwiększoną bioakumulacją składników mineralnych, korzystniejszymi stosunkami ilościowymi pomiędzy makroelementami oraz zwiększoną biomasą. Wzrost bioakumulacji makroelementów w skażonej nikiem pszenicy odnotowano pod wpływem 6 mM S, przy czym największe zmiany stwierdzono w odniesieniu do akumulacji fosforu, natomiast najmniejsze w stosunku do azotu i potasu. W warunkach skażenia nikiem i wysokiego poziomu siarki w podłożu (9 mM) wykazano wzrost akumulacji siarki, spadek akumulacji azotu i potasu oraz niewielkie wahania w akumulacji pozostałych makroelementów. Należy podkreślić, że pozytywny wpływ intensywnego żywienia siarką zastosowaną w dawce 6 mM na status mineralny pszenicy uprawianej w warunkach skażenia nikiem przejawiał się pomimo zwiększonej akumulacji tego metalu w roślinach, szczególnie w korzeniach. Z kolei pod wpływem 9 mM S stwierdzono wprawdzie spadek akumulacji niklu w częściach nadziemnych, ale jego zawartość wciąż przekraczała dopuszczalne normy (**O1**).

Odpowiedni poziom żywienia siarką niweluje również, przynajmniej częściowo, niekorzystne zmiany w składzie mineralnym pszenicy wynikające z obecności kadmu w środowisku jej wzrostu (**O4**). Intensywne żywienie siarką, zwłaszcza w stężeniu 6 mM, zwiększało akumulację makroelementów w eksponowanych na kadm roślinach. Największe zmiany w akumulacji makroelementów, niezależnie od poziomu siarki w podłożu, dotyczyły fosforu. Natomiast najmniejsze wahania przy 6 mM S stwierdzono dla siarki, a w obecności 9 mM S dla azotu i magnezu. Na uwagę zasługuje fakt, że siarka w zastosowanych w eksperymentach dawkach powodowała zwiększenie akumulacji kadmu, przede wszystkim w częściach nadziemnych, przy czym biokoncentracja tego metalu zwiększyła się wyraźniej pod wpływem 6 niż 9 mM S. Jednak zwiększona akumulacja kadmu, jako wypadkowa produktywności roślin i stężenia tego metalu w ich biomase, w tym przypadku nie oznaczała równocześnie wzrostu, a wręcz przeciwnie - spadek zawartości tego metalu w roślinach (dane własne niepublikowane).

Status mineralny sałaty

Sałata (*Lactuca sativa* L.) jest gatunkiem o średnim zapotrzebowaniu fizjologicznym na siarkę. Wyniki badań własnych wykazały, że jej status mineralny był zaburzany pod wpływem niklu i kadmu w stopniu umiarkowanym. Jest więc gatunkiem o średniej wrażliwości na toksyczność tych metali, pomimo dużej (porównywalnej z gorczycą) podatności na ich akumulację.

Suplementacja S-SO₄ sałaty odmiany **Justyna** uprawianej w obecności kadmu lub niklu wpływała na status mineralny tej rośliny, przy czym wpływ ten był różnokierunkowy i zależał od rodzaju i stężenia metalu oraz poziomu siarki w podłożu. W warunkach skażenia niklem, w przeciwieństwie do skażenia kadmem, suplementacja siarką powodowała wzrost w korzeniach, a obniżenie w częściach nadziemnych zawartości azotu (**O2; O6**). Ponadto wykazano, że podwyższony poziom siarki w podłożu wpłynął na znaczną redukcję zawartości fosforu, potasu i wapnia w korzeniach i częściach nadziemnych sałaty eksponowanej na nikiel. Natomiast w warunkach skażenia kadmem intensywne żywienie S-SO₄ wpływało na podwyższenie zawartości potasu w korzeniach oraz na obniżenie zawartości wapnia i potasu w częściach nadziemnych. Jednocześnie w tych warunkach koncentracja fosforu nie ulegała istotnym wahaniom. Z kolei zawartość magnezu wyraźnie zwiększała się w korzeniach eksponowanej na kadm lub nikiel sałaty intensywnie odżywianej siarczanami, nie ulegając wahaniom w częściach nadziemnych. Zawartość siarki w korzeniach traktowanej niklem sałaty zwiększała się przy 6 mM S, natomiast ulegała redukcji przy 9 mM S, podczas gdy w częściach nadziemnych stwierdzono odmienne tendencje. Z kolei w sałacie eksponowanej na kadm podwyższenie poziomu siarczanów w podłożu z reguły nie powodowało zmian zawartości tego makroelementu. W warunkach skażenia niklem, w odpowiedzi na podwyższony poziom siarki, na ogół większe zmiany w zawartości wapnia i potasu notowano w częściach nadziemnych niż korzeniach, natomiast dla azotu, fosforu, magnezu i siarki w korzeniach niż pędach. W roślinach traktowanych kadmem i suplementowanych siarką, zawartość azotu, potasu i magnezu, w przeciwieństwie do wapnia i siarki, wykazywała większe wahania w korzeniach niż częściach nadziemnych. Generalnie podwyższony poziom siarki skutkował większymi zmianami zawartości azotu, magnezu i potasu w sałacie skażonej kadmem, natomiast siarki, wapnia i fosforu - traktowanej niklem (**O2; O6**).

Z uwagi na przydatność konsumpcyjną oraz cenne walory odżywcze i zdrowotne sałaty szczegółowej ocenie poddano wzajemne stosunki ilościowe pomiędzy analizowanymi

pierwiastkami, bowiem ich wartości są wyznacznikiem jakości uzyskanego plonu. Wykazano, że intensywne odżywanie siarką traktowanej niklem sałaty, niezależnie od poziomu tego metalu w podłożu, podwyższyło w częściach nadziemnych wartość ilorazu N:P, jednocześnie obniżając stosunek Ca:P, 10 Ca:N i N:S. Ponadto w tych warunkach stwierdzono zawężenie w korzeniach, a rozszerzenie w liściach stosunku N:Mg i Ca:Mg. Z kolei stosunek K:N rozszerzał się w korzeniach i zawężał w częściach użytkowych. Z drugiej strony intensywne żywienie S-SO₄ skażonej niklem sałaty nie wpłynęło istotnie na zmiany ilorazu 100 P:K, P:Mg, K:Ca, K:(Ca+Mg) oraz 10 Ca:K. Ponadto wartość stosunku K:Mg w liściach sałaty traktowanej niklem zwiększyła się przy 6 mM S, a zmniejszyła przy 9 mM S (**O6**). Podwyższony poziom siarki w warunkach skażenia sałaty kadmem, podobnie jak u roślin skażonych niklem, skutkowało istotnym wzrostem wartości ilorazu N:P w korzeniach oraz zawężeniem w korzeniach a rozszerzeniem w częściach nadziemnych stosunku N:Mg (**O2**). Ponadto dodatkowa aplikacja siarki, w warunkach skażenia kadmem, w korzeniach zmniejszyła wartość stosunku 100:P, P:Mg oraz 10 Ca:K, natomiast podwyższyła wartość ilorazu K:(Ca+Mg) oraz N:S. Tymczasem w częściach nadziemnych zaznaczył się wzrost wartości stosunku K:Mg. Jednocześnie w tych warunkach, w korzeniach oraz częściach użytkowych, wartości ilorazów Ca:Mg oraz 10 Ca:N obniżyły się, a ilorazy K:N, K:Ca oraz Ca:P nie ulegały istotnym wahaniom.

W celu oceny statusu odżywczego roślin, uzyskane wartości dotyczące koncentracji i wzajemnych stosunków ilościowych pomiędzy makroelementami porównano z normami DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System), które ustanowiono w oparciu o kombinację analizy podłoża, w tym różnych typów gleb, i materiału roślinnego (Sanchez i in. 1991, Hartz i in. 2007). W częściach użytkowych sałaty traktowanej niklem i suplementowanej siarką zawartość azotu na ogół była niższa, natomiast siarki wyższa niż rekomendowane normy DRIS, podczas gdy poziom fosforu, potasu, magnezu i wapnia mieścił się w przyjętych standardach. Podobnie wartości stosunków pomiędzy makroelementami z reguły nie odbiegały od zalecanych wartości, poza znacząco niższym stosunkiem N:S, który jest powszechnie uznawany za wyznacznik zaopatrzenia roślin w siarkę (**O6**). Z rezultatów badań wynika, że skażenie kadmem, w warunkach podstawnego poziomu siarki, na ogół wpłynęło na obniżenie zawartości fosforu, potasu, wapnia i magnezu poniżej rekomendowanych norm. Natomiast intensywne odżywanie siarką skutkowało wzrostem koncentracji tych makroelementów do poziomu optymalnego. Jedynie stężenie fosforu i magnezu w warunkach najwyższego stężenia kadmu wciąż kształtowało się poniżej przyjętych norm. Jednocześnie wartości stosunków N:P, K:Ca, 10 Ca:N i N:S mieściły się

poniżej, K:N, Ca:P i Ca:Mg powyżej, natomiast N:Mg, 100 P:K, K:Mg, P:Mg, i 10 Ca:K w zakresie zalecanych norm (**O2**).

Intensywne odżywanie siarką sałaty traktowanej niklem wydaje się nie mieć pozytywnego wpływu na poziom makroskładników w biomacie tego gatunku (**O6**). Stwierdzono mianowicie, że dodatkowa aplikacja siarki do skażonego niklem podłoża, niezależnie od poziomu tego metalu, na ogół skutkowałą obniżoną akumulacją wszystkich makroelementów w częściach nadziemnych. Jednocześnie w korzeniach pod wpływem 9 mM S zaznaczył się spadek akumulacji azotu, fosforu potasu i wapnia. Ponadto suplementacja siarką eksponowanej na nikiel sałaty powodowała w korzeniach zwiększenie, natomiast w liściach zmniejszenie akumulacji niklu. Jednak pomimo odnotowanego spadku, zawartość niklu w częściach użytkowych wciąż przekraczała dopuszczalne normy do konsumpcji, co potwierdza doniesienia o wysokiej podatności tego gatunku na akumulację niklu.

W przeciwieństwie do suplementacji siarką sałaty traktowanej niklem, stwierdzono pozytywne zmiany w statusie mineralnym tego gatunku w warunkach dodatkowej aplikacji tego makroelementu do podłoża skażonego kadmem (**O2**). Szczególnie efektywna w tym względzie okazała się dawka 6 mM S. Akumulacja składników mineralnych w eksponowanych na kadm roślinach suplementowanych siarką wydaje się być bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia rolnictwa i ogrodnictwa. Wynika to między innymi z faktu, że pierwiastki te mają odmienny wpływ na produkcję biomasy, jak również na pobieranie, translokację i zawartość składników mineralnych, co powoduje różnokierunkowe zmiany w ich całkowitej akumulacji. Ponadto koncentracja siarki oraz pozostałych makroelementów w roślinach determinuje dynamikę wzrostu i rozwoju, jak również odgrywa kluczową rolę w tolerancji stresów środowiskowych, w konsekwencji decydując o jakości plonu. Z przeprowadzonych badań wynika, że wzmożone odżywanie siarką eksponowanej na kadm sałaty na ogół znacząco ograniczało akumulację fosforu w korzeniach oraz zwiększało akumulację pozostałych makroskładników (**O2**). Jednocześnie w tych warunkach w liściach zaznaczył się spadek akumulacji azotu i wzrost akumulacji fosforu. Natomiast akumulacja siarki ulegała jedynie nieznacznym wahaniom. Z kolei akumulacja fosforu w liściach traktowanej kadmem sałaty znacząco zwiększyła się przy 6 mM S, a pozostała niezmienną przy 9 mM S. Fitoakumulacja wapnia i magnezu nie podlegała znaczącym wahaniom w roślinach suplementowanych 6 mM S, ulegając obniżeniu w obecności 9 mM S. Podwyższony poziom siarki w podłożu w warunkach skażenia kadmem powodował redukcję akumulacji tego metalu w liściach sałaty, a zwiększenie w korzeniach. Jednak pomimo

zmniejszonej akumulacji kadmu w częściach użytkowych, jego zawartość wciąż przekraczała dopuszczalne normy określone przez DRIS.

Status mineralny gorzycy

Gorzycyca (*Sinapis alba* L.), podobnie jak inne gatunki z rodziny *Brassicaceae*, ma bardzo duże wymagania fizjologiczne względem siarki. Charakteryzuje się dużą podatnością na akumulację niklu i kadmu, chociaż jest mało wrażliwa na ich toksyczne działanie. Jej status mineralny był w stopniu mniejszym zaburzany niż sałaty i pszenicy. Wyniki badań własnych wykazały, że intensywne odżywianie siarką **gorzycy odmiany Rota** na ogół korzystnie wpłynęło na jej status mineralny. Podwyższona koncentracja S-SO₄ w środowisku wzrostu gorzycy eksponowanej na nikiel lub kadm skutkowałą sukcesywnym wzrostem zawartości siarki w biomacie tego gatunku (**O3**; **O7**). Wykazano, że w częściach nadziemnych tej rośliny traktowanej nikiem i suplementowanej siarką obniżała się zawartość fosforu a podwyższała azotu, potasu i magnezu. Natomiast w korzeniach zawartości tych makroelementów nie ulegały istotnym wahaniom. Ponadto intensywne żywienie S-SO₄ traktowanej nikiem gorzycy powodowało znaczące obniżenie (przy 6 mM S) lub podwyższenie (przy 9 mM S) zawartości wapnia w korzeniach. Jednocześnie zawartość tego makroskładnika w pędach nie zmieniła się istotnie. Można stwierdzić, że podwyższone stężenie S-SO₄ w podłożu z dodatkiem niklu z reguły powodowało wzrost zawartości i akumulacji wszystkich makroelementów w korzeniach tego gatunku, przy czym tendencja ta na ogół była bardziej wyraźna przy 9 niż przy 6 mM S (**O7**). Chociaż intensywna suplementacja S-SO₄ w pewnym stopniu poprawiała zaopatrzenie w makroelementy eksponowanej na nikiel gorzycy, to jednak fitoakumulacja niklu utrzymywała się na względnie stałym poziomie. Z uwagi na wysoką akumulację niklu, stwierdzoną we wszystkich seriach eksperymentalnych, z wyjątkiem najniższego zastosowanego stężenia tego metalu, gorzycyca nie jest bezpiecznym i odpowiednim gatunkiem do uprawy w podłożu zanieczyszczonym nikiem, natomiast z powodzeniem może być wykorzystana do celów fitoremediacji, jak to sugerują Singh i in. (2012) i Kaur i in. (2015).

W warunkach skażenia kadmem dodatkowa aplikacja siarki wpłynęła na istotne podwyższenie zawartości potasu w korzeniach i częściach nadziemnych. Ponadto stwierdzono wzrost poziomu azotu w korzeniach oraz spadek zawartości azotu i magnezu w częściach nadziemnych. Odnotowano również wyraźne podwyższenie zawartości fosforu i wapnia w korzeniach przy najwyższej zastosowanej koncentracji siarki (9 mM). Jednocześnie poziom

fosforu istotnie obniżał się w częściach nadziemnych przy średniej koncentracji siarki (6 mM) (O3). Analizując fitoakumulację makroelementów w gorczycy rosnącej w warunkach skażenia podłoża kadmem stwierdzono, że intensywne żywienie siarką, na ogół wpływało na zwiększenie akumulacji azotu w korzeniach. Bioakumulacja pozostałych makroelementów oraz kadmu na ogół zwiększała się, przy czym wzrost akumulacji fosforu, magnezu i siarki, w przeciwieństwie do potasu, zaznaczył się przede wszystkim w korzeniach, natomiast wzrost akumulacji wapnia w organach nadziemnych i podziemnych był porównywalny (O3). Analogicznie jak w przypadku niklu, również w obecności kadmu jego zawartość w biomacie gorczycy przekraczała dopuszczalne normy.

Z reguły większe wahania zawartości analizowanych makroelementów w warunkach intensywnego żywienia siarką roślin skażonych niklem zaznaczyły się w korzeniach niż częściach nadziemnych. Jedynie zawartość siarki zwiększyła się wyraźniej w korzeniach niż częściach nadziemnych, zarówno pod wpływem niklu, jak i kadmu. Natomiast stwierdzone zmiany zawartości azotu i magnezu, w przeciwieństwie do fosforu, potasu i siarki, zaznaczyły się wyraźniej w częściach nadziemnych niż korzeniach gorczycy rosnącej w obecności kadmu i suplementowanej siarką. Ponadto pod wpływem intensywnego żywienia S-SO₄ większe wahania poziomu wszystkich badanych makroelementów w korzeniach stwierdzono w warunkach skażenia niklem niż kadmem. W tych warunkach w częściach nadziemnych zawartość azotu, potasu, wapnia, magnezu i siarki także zmieniała się bardziej pod wpływem niklu niż kadmu (O3; O7).

Reasumując, rezultaty przeprowadzonych badań wskazują na możliwość, przynajmniej w pewnym stopniu, poprawy statusu mineralnego roślin skażonych metalami śladowymi z grupy niezbędnych (nikiel) oraz balastowych (kadmu) poprzez intensyfikację odżywiania S-siarczanową. Jakkolwiek nie stwierdzono obniżenia bioakumulacji niklu i kadmu poniżej dopuszczalnych norm, niemniej jednak dodatkowa aplikacja siarczanów do skażonego tymi metalami podłoża wpłynęła na lepsze zaopatrzenie w niezbędne składniki mineralne (zawartość, akumulacja oraz stosunki ilościowe) gatunków roślin charakteryzujących się różną wrażliwością na Ni i Cd oraz różnym zapotrzebowaniem na siarkę. Można zatem z dużym prawdopodobieństwem przypuszczać, że poprawa statusu mineralnego może być jednym z czynników determinujących zwiększoną odporność na metale śladowe roślin dodatkowo suplementowanych siarką.

Najważniejsze osiągnięcia oraz znaczenie prezentowanych badań

1. Szczegółowa analiza składu mineralnego biomasy gatunków roślin o różnej wrażliwości na nikiel i kadm, wykazała niekorzystne, chociaż różnokierunkowe, zmiany w zawartości, akumulacji i dystrybucji w roślinach pierwiastków z grupy makro- i mikroelementów oraz wzajemnych proporcji ilościowych pomiędzy nimi. Zatem przeprowadzone badania przyczyniły się do poznania kierunku i zakresu zmian w statusie mineralnym roślin w odpowiedzi na stres wynikający z nadmiaru ww. metali śladowych, z uwzględnieniem różnic międzygatunkowych oraz różnic w reakcji określonego gatunku na badane metale.
2. W prezentowanych badaniach po raz pierwszy szczegółowo przeanalizowano reakcję roślin na intensywne żywienie siarką w warunkach nadmiaru niklu i kadmu w oparciu o zmiany w ich składzie mineralnym. Bardzo cenne w prezentowanym osiągnięciu jest wykazanie podobieństw i różnic dotyczących zmian w zawartości i akumulacji składników mineralnych w biomase części nadziemnych i korzeni skażonych nikiem lub kadmem gatunków roślin charakteryzujących się nie tylko różną wrażliwością na badane metale śladowe, ale również różnym zapotrzebowaniem na siarkę. Wykazano możliwość przynajmniej częściowej poprawy statusu mineralnego roślin rosnących w podłożu skażonym nikiem lub kadmem poprzez intensywne ich żywienie siarką. Wykazano, że spośród stosowanych w doświadczeniach poziomów siarki, najbardziej efektywnie fizjologicznie był poziom umiarkowany S-SO₄ (6 mM).
3. Pomimo uzyskanych dość obiecujących rezultatów dotyczących wpływu intensywnego odżywienia siarką na zawartość i akumulację składników mineralnych w biomase traktowanych metalami śladowymi gatunków roślin, bioakumulacja kadmu i niklu nadal utrzymywała na podwyższonym poziomie, przekraczającym akceptowane normy. Ponadto w przypadku sałaty rosnącej w warunkach skażenia nikiem intensywne odżywianie siarką wydaje się nie mieć wyraźnego pozytywnego wpływu na poziom makroskładników w biomase tego gatunku, jak wykazano to w odniesieniu do roślin skażonych kadmem.
4. Cenne uzupełnienie rezultatów prezentowanych badań odnośnie statusu mineralnego roślin, w aspekcie jakości uzyskanego plonu, oprócz zawartości i akumulacji pierwiastków niezbędnych, stanowi oszacowanie stosunków między makroelementami w biomase eksponowanej na nikiel lub kadm sałaty i pszenicy dodatkowo suplementowanej siarczanami. Zawartości i stosunki ilościowe między

- makroelementami w biomase sałaty porównano z rekomendowanymi normami (Diagnosis and Recommendation Integrated System; DRIS), ustanowionymi w oparciu o analizę pierwiastkową biomasy różnych typów sałaty uprawianej na różnych rodzajach podłoża.
5. Rola siarki w łagodzeniu skutków toksyczności metali śladowych wiąże się z korzystnym oddziaływaniem tego makroelementu na gospodarkę mineralną roślin, bowiem suplementacja siarki w warunkach skażenia niklem lub kadmem, niezależnie od ich zapotrzebowania na ten makroelement, przynajmniej częściowo poprawia ich status mineralny, a tym samym wpływa korzystnie na jakość plonu. Poznanie interakcji pomiędzy niklem lub kadmem a niezbędnymi składnikami mineralnymi stanowi kluczowy krok w stronę optymalizacji odżywiania roślin w celu łagodzenia fitotoksyczności tych metali.
 6. Przeprowadzone badania, oprócz charakteru poznawczego, mają również aspekt aplikacyjny. Mogą być bardzo pomocne w opracowaniu podstawowych wytycznych dotyczących odżywiania siarką w celu poprawy statusu mineralnego roślin rosnących w warunkach skażenia metalami śladowymi, z dalszą perspektywą zastosowania tej metody w praktyce rolniczej i ogrodniczej. Wyniki tych badań mogą być wykorzystane także w opracowaniach metod fitoremediacji gleby zanieczyszczonej kadmem i/lub niklem.

Literatura

- Antonkiewicz J., Jasiewicz Cz., Koncewicz-Baran M., Sendor R. 2016. **Nickel bioaccumulation by the chosen plant species**. Acta Physiologiae Plantarum 38(40): #11
- Ahmad M.S.A., Ashraf M. 2011. **Essential roles and hazardous effects of nickel in plants**. Reviews of Environmental and Contamination Toxicology 214: 125-167.
- Bhalerao S.A., Sharma A.S., Poojari A.C. 2015. **Toxicity of nickel in plants**. International Journal of Pure & Applied Bioscience 3(2): 345-355.
- Chen C., Huang D., Liu J. 2009. **Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects**. Clean - Air, Soil, Water 37(4-5): 304-313.
- Cuppert S.L., McVey Meckyskey M., Pappozzi E.T., Parkhurst A. 1999. **Nitrogen and sulfur effects on leaf lettuce quality**. Journal of Food Quality 22(4): 363-373.
- Teixeira da Silva J.A, Naeem M., Idrees M. 2012. **Beneficial and toxic effects of nickel in relation to medicinal and aromatic plants**. Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology. 6(1): 94-104.

De Bona F.D., Fedoseyenko D., von Wirén N., Monteiro F.A. 2011. **Nitrogen utilization by sulfur-deficient barley plants depends on the nitrogen form.** Environmental and Experimental Botany 74: 237-244.

De Bona F.D., Monteiro F.A. 2010. **Nitrogen and sulfur fertilization and dynamics in a Brazilian Entisol under pasture.** Soil Science Society of America Journal 74(4): 1248-1258.

De Vries W., Lofts S., Tipping E., Meili M., Groenenberg J.E., Schütze G. 2007. **Impact of soil properties on critical concentrations of cadmium, lead, copper, zinc, and mercury in soil and soil solution in view of ecotoxicological effects.** Reviews of Environmental Contamination and Toxicology 191: 47-89.

De Vries W., Schütze G., Lofts S., Meili M., Römkens P.F.A.M., Farret R., De Temmerman, L., Jakubowski M. 2003. **Critical limits for cadmium, lead and mercury related to ecotoxicological effects on soil organisms, aquatic organisms, plants, animals and humans.** In: Proceedings expert meeting on critical limits for heavy metals and methods for their application. Berlin, December 2-4, 2002. Umweltbundesamt, Texte no.47-3, pp.29-78.

Droux M. 2004. **Sulfur assimilation and the role of sulfur in plant metabolism: a survey.** Photosynthesis Research 79(3): 331-348.

Erdem H., Ahmet K., Mehmet O., Tutus Y. 2012. **Effect of cadmium stress on growth and mineral nutrient composition of two tobacco cultivars.** Journal of Food Agriculture and Environment 10(1): 965-969.

Ernst W.H.O., Krauss G.J., Verkleij J.A.C., Wesenberg D. 2008. **Interaction of heavy metals with the sulphur metabolism in angiosperms from an ecological point of view.** Plant, Cell & Environment 31(1): 123-143.

Fabiano C.C., Tezotto T., Favarin J.L., Polacco J.C., Mazzafera P. 2015. **Essentiality of nickel in plants: a role in plant stresses.** Frontiers in Plant Science 6: 754.

Gvozdenc S., Indić D., Vuković S., Bursić V. 2013. **Cu and Cd tolerance of barley and white mustard: Potential indicators of water contamination with these heavy metals.** Research Journal of Agricultural Science 45(2):118-126.

Harasim P., Filipek T. 2015. **Nickel in environment.** Journal of Elementology 20(2): 525-534.

Hartz T.K., Johnstone P.R., Williams E., Smith R.F. 2007. **Establishing lettuce leaf nutrient optimum ranges through leaf analysis.** HortScience 42(1): 143-146.

Jaga P.K. 2013. **Comparative response to sulphur application in mustard (*Brassica juncea* L.) and wheat (*Triticum aestivum*).** Innovare Journal of Agricultural Science 1(1): 4-6.

Jali P., Pradhan C., Das A.B. 2016. **Effect of cadmium toxicity in plants: a review article.** Scholars Academic Journal of Biosciences 4(12): 1074-1081.

Jamal A., Moon Y.S., Abdin M.Z. 2010. **Sulphur - a general overview and interaction with nitrogen.** Australian Journal of Crop Science 4(7): 523-529.

Jez J.M. 2008. **Sulfur: a missing link between soils, crops, and nutrition.** Agronomy Monograph 50, United States of American Society of Agronomy, Crop Science of America, Soil Science Society of America ASA, CSSA, and SSSA, Madison, pp. 335.

Kabata-Pendias A. 2010. **Trace elements in soils and plants**, 4th edn. CRC Press, Taylor & Francis, Boca Raton, pp. 548

- Kaur L., Gadgil K., Sharma S. 2015. **Phytoextraction based on indian mustrd (*Brassica juncea arwali*) planted on spiked soil aliquot amount of lead and nickel.** EQA – Environmental Quality 17(2015): 13-23.
- Kozłowska-Strawska J., Badora A. 2013. **Selected problems of sulfur management in crops.** Polish Journal of Natural Sciences 28(3): 309-316.
- Lakkineni K.C., Abrol Y.P. 1992. **Sulphur requirement of rapeseed-mustard, groundnut and wheat: a comparative assessment.** Journal of Agronomy and Crop Science 169(4): 281-285.
- Lander M.S. 2003. **Evaluation of selected heavy metal concentrations in soils of an urban stormwater retention basin.** MS thesis, University of Florida. pp. 145.
- Li X., Zhou Q., Sun X., Ren W. 2016. **Effects of cadmium on uptake and translocation of nutrient elements in different welsh onion (*Allium fistulosum* L.) cultivars.** Food Chemistry 194: 101-110.
- Liu J., Li K., Xu J., Liang J., Lu X., Yang J., Zhu Q. 2003. **Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes.** Field Crops Research 83(3): 271-281.
- Łuczowska D., Cichy B., Nowak M., Paszek A. 2015. **Liquid nitrogen-sulphur fertilizers – answer on sulphur deficiency in soil.** Chemik 69(9): 557-583
- Mašauskiene A., Mašauskas V. 2012. **Soil sulphur problems and management.** In: Ch. Jakobsson (ed.). Sustainable Agriculture Ecosystem Health and Sustainable Agriculture, Baltic University Press: Uppsala, 113-145.
- Noctor G., Mhamdi A., Chaouch S., Neukermans J., Marquez-Garcia B., Queval G., Foyer C.H. 2012. **Glutathione in plants: an integrated overview.** Plant, Cell & Environment 35: 454-484
- Pinot F., Kreps S., Bachelet M., Hainaut P., Bakonyi M., Polla B. 2000. **Cadmium in the environment: sources, mechanisms of biotoxicity, and biomarkers.** Reviews of Environmental Health 15(3): 299-323.
- Prasad R. 2014. **Major sulphur compounds in plants and their role in human nutrition and health - and overview.** Proceedings of the National Academy of Sciences 80(5): 1045-1054.
- Przedpeńska-Wąsowicz E., Polatajko A., Wierzbicka M. 2012. **The influence of cadmium stress on the content of mineral nutrients and metal-binding proteins in *Arabidopsis halleri*.** Water, Air, and Soil Pollution 223(9): 5445-5458.
- Rivelli, A.R., Puschenreiter M., De Maria S. 2014. **Assessment of cadmium uptake and nutrients content in sunflower plants grown under Cd stress.** Plant Soil and Environment 60(2): 80-86.
- Sanchez C.A., Snyder G.H., Burdine H.W. 1991. **DRIS evaluation of the nutritional status of crisphead lettuce.** HortScience 26(3): 274-276.
- Singh S., Zacharias M., Kalpana S., Mishra S. 2012. **Heavy metals accumulation and distribution pattern in different vegetable crops.** Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology 4(10): 170-177.
- Szulc W. 2008. **Potrzeby nawożenia roślin siarką oraz metody ich wyznaczenia.** Rozprawy Naukowe i Monografie – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego. Wydawnictwo SGGW Warszawa. 332: 97.
- Tran T.A., Popova L.P. 2013. **Functions and toxicity of cadmium in plants: recent advances and future prospects.** Turkish Journal of Botany 37: 1-13.

Tyksiński W., Kurdubka J. 2005. **Difference in cadmium and lead accumulation by lettuce (*Lactuca sativa* L.) depending on the cultivar.** Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus 4(1): 77-83.

Variyar P.S., Banerjee A., Akkarakaran Jincy J., Suprasanna P. 2014. **Role of glucosinolates in plant stress tolerance.** In: Ahmad P., Rasool S. (eds.). Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance. Elsevier Inc., Academic Press: Tom 1 Biological Techniques. 12: 271-291.

Yusuf M., Fariduddin Q., Hayat S., Ahmad A. 2011. **Nickel: An overview of uptake, essentiality and toxicity in plants.** Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 86(1): 1-17.

Xiao X., Tongbin C., Zhizhuang A., Mei L. 2008. **Potential of *Pteris vittata* L. for phytoremediation of sites co-contaminated with cadmium and arsenic: The tolerance and accumulation.** Journal of Environmental Sciences. 20: 62-67.

Zorrig W., El Khouni A., Ghnaya T., Davidian J.C., Abdely C., Berthomieu P. 2013. **Lettuce (*Lactuca sativa* L.): a species with a high capacity for cadmium (Cd) accumulation and growth stimulation in the presence of low Cd concentrations.** The Journal of Horticultural Science and Biotechnology 88(6): 783-789.

V. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO - BADAWCZYCH

a) przebieg pracy naukowo - badawczej przed uzyskaniem stopnia doktora

Działalność naukową rozpoczęłam w 1994 roku wraz z podjęciem zatrudnienia na Wydziale Ogrodniczym (obecnie Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu) Akademii Rolniczej w Lublinie (obecnie Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie). Jako asystent uczestniczyłam w pracach badawczych zespołu Katedry Fizjologii Roślin, kierowanego przez prof. dr hab. Marię Szymańską, zajmującego się m.in. problematyką biologicznej aktywności pierwiastków śladowych oraz zagadnieniami dotyczącymi mechanizmów tolerancji i sposobów łagodzenia skutków stresów abiotycznych w roślinach uprawnych. Wcześniej przedmiotem moich zainteresowań badawczych były stesy biotyczne roślin oraz możliwości ograniczenia ich negatywnych skutków, co wynikało z tematyki podjętej przeze mnie w pracy magisterskiej pt.: „Ochrona żyta przed fuzariozą przez fluoryzujące *Pseudomonas* i mikroorganizmy chitynolityczne”, którą wykonałam w Zakładzie Mikrobiologii Środowiskowej UMCS. Jestem również autorką artykułu przeglądowego z zakresu biologicznej ochrony roślin przed patogenami grzybowymi (II.B.1).

Badania, które przeprowadziłam w ramach pracy doktorskiej w latach 1994-2000, dotyczyły biologicznej aktywności niklu w sześciu gatunkach roślin uprawnych (kukurydza cukrowa, fasola zwykła, cukinia, szpinak zwyczajny, sałata siewna, gorczyca biała).

W badaniach tych szczególnie nacisk położyłam na:

- obserwację i rejestrację morfologicznych symptomów fitotoksyczności niklu na różnych etapach rozwoju roślin;
- określenie i porównanie tolerancji badanych gatunków roślin na nikiel w oparciu o ich produktyjność, analizę wzrostu wyrażoną indeksem tolerancji, aktywność absorpcyjną korzeni, zawartość, gromadzenie i wykorzystanie wybranych makroelementów oraz niklu w biomacie poszczególnych organów; zmiany w zawartości barwników fotosyntetycznych;
- wpływ intensywnego odżywiania żelazem lub wapniem na aktywność biologiczną niklu w aspekcie możliwości jego detoksykacji poprzez jony Fe^{2+} lub Ca^{2+} .

Uzyskane wyniki złożyły się na moją rozprawę doktorską zatytułowaną: „Fizjologiczno-morfologiczna reakcja na nikiel wybranych gatunków roślin”, którą obroniłam we wrześniu 2000 roku.

Mój dorobek naukowy przed uzyskaniem stopnia doktora obejmuje: **4** artykuły naukowe (II.B.2., II.B.3., II.B.4, II.B.5)*, **1** artykuł popularno-naukowy (II.B.1) oraz **14** komunikatów konferencyjnych. Sumaryczna liczba punktów MNiSW tych prac, zgodnie z rokiem opublikowania, wynosi **7**.

b) przebieg pracy naukowo - badawczej po uzyskaniu stopnia doktora

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk rolniczych w zakresie ogrodnictwa, już jako adiunkt, kontynuowałam moją główną problematykę badawczą dotyczącą biologicznej aktywności pierwiastków śladowych w roślinach, kładąc szczególny nacisk na zagadnienia związane z wykorzystaniem zróżnicowanego odżywiania mineralnego (siarka, żelazo, wapń, selen, substraty jonitowe) w łagodzeniu stresów abiotycznych (skażenie metalami śladowymi, zasolenie, stres niskotemperaturowy). Jako czynniki potencjalnie łagodzące skutki stresów zastosowano również związki organiczne (kwasy organiczne, hydrolizat proteinowy). Zaangażowałam się również w badania z zakresu mikromorfologii i histochemii włosków wydzielniczych oraz fitotoksycznego działania olejków eterycznych roślin leczniczych, jak również w badania ekologiczne dotyczące biomonitoringu zanieczyszczenia środowiska atmosferycznego w aglomeracjach miejskich.

Mój dorobek naukowy po uzyskaniu stopnia doktora obejmuje **31** oryginalnych prac naukowych, w tym **18** opublikowanych w czasopismach z bazy JCR (łącznie IF, zgodny z rokiem opublikowania – **23,538**; sumaryczna liczba punktów MNiSW, zgodnie z rokiem

* w nawiasach podano numery prac umieszczonych w wykazie opublikowanych prac naukowych (Załącznik nr 6)

opublikowania – 447). Ponadto wyniki badań zostały zaprezentowane w formie 38 komunikatów konferencyjnych na konferencjach krajowych i międzynarodowych oraz w raporcie końcowym z realizacji projektu badawczego, którego byłam głównym wykonawcą (projekt badawczy nr N N310 430939).

Spośród prac naukowych, opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora, 7 oryginalnych prac eksperymentalnych stanowi osiągnięcie naukowe, będące przedmiotem postępowania habilitacyjnego.

c) główne kierunki prowadzonych badań

Oprócz badań stanowiących osiągnięcie naukowe, w oparciu o które ubiegam się o nadanie stopnia doktora habilitowanego, prowadziłam samodzielnie lub w zespole także inne badania naukowe. Profil moich zainteresowań badawczych jest ukierunkowany głównie na zagadnienia związane z żywieniem mineralnym roślin ogrodniczych, ze szczególnym uwzględnieniem biologicznej aktywności pierwiastków śladowych. Najważniejszy aspekt mojej działalności naukowej dotyczy możliwości ograniczenia niekorzystnych skutków stresów abiotycznych poprzez zróżnicowane żywienie mineralne. Prowadzone przeze mnie badania koncentrują się wokół następujących zagadnień naukowych:

Biologiczna aktywność niklu w roślinach

Nikiel, wprowadzany do gleb wraz z odpadami pochodzenia przemysłowego, komunalnego i rolniczego jest łatwo przyswajalny przez rośliny i akumulowany zarówno w nadziemnych organach wegetatywnych i generatywnych, jak i w korzeniu. Korzeń jest organem, który jako pierwszy wchodzi w kontakt z metalami śladowymi znajdującymi się w podłożu. Ograniczenie pobierania i unieruchamianie metali śladowych w komórkach korzenia odgrywa bardzo ważną rolę w odporności na metale. Jednocześnie nadmiar metali śladowych zaburza pobieranie i transport pierwiastków niezbędnych lub też „wylacza” je z funkcji fizjologicznych, co w konsekwencji powoduje zmiany w ich zawartości i dystrybucji w poszczególnych organach. Zaburzenia w gospodarce mineralnej stanowią jeden z ważniejszych skutków fitotoksyczności metali śladowych. Dlatego analizowano wpływ różnych dawek niklu (1, 5 lub 10 mg Ni-dm⁻³) na zawartość i rozmieszczenie wapnia, magnezu, potasu oraz niklu w trzech częściach korzenia (wierzchołkowej, środkowej i proksymalnej) gorczyicy białej (II.B.3). Wzrastające stężenie niklu w podłożu ograniczało

akumulację i transport szczególnie wapnia, w mniejszym stopniu magnezu, a najmniejszym potasu. Największy spadek zawartości potasu odnotowano w części wierzchołkowej, natomiast wapnia i magnezu w części proksymalnej. Z kolei najmniejsze zawartości niklu stwierdzono w części proksymalnej, a największe w wierzchołkowej. W warunkach zwiększonej akumulacji niklu w tkankach korzenia obserwowano liczne anomalie rozwojowe i symptomy uszkodzeń (m.in. wakuolizacja oraz degradacja komórek, zaburzenia reakcji geotropicznej).

W dalszym etapie kontynuowano badania nad składem mineralnym części użytkowych roślin skażonych niklem wykorzystując: sałatę, szpinak, cukinię i fasolę (II.B.8). Wykazano niekorzystny wpływ niklu (10, 40 i 60 mg·kg⁻¹ podłoża) na skład mineralny roślin, a w następstwie wzajemne proporcje analizowanych pierwiastków. W traktowanej niklem sałacie zaznaczały się tendencje zwykłe zawartości fosforu, potasu i wapnia. Z kolei w liściach szpinaku, pod wpływem niklu, odnotowano wzrost zawartości fosforu, a spadek potasu i magnezu. W obecności 10 mg Ni·kg⁻¹ stwierdzono spadek zawartości fosforu i potasu w owocach cukinii i fasoli, jak również redukcję poziomu magnezu w jagodach pomidora i wzrost zawartości tego makroelementu w strąkach fasoli. Natomiast w warunkach wyższych stężeń niklu nie uzyskano plonu owoców. Nikiel zastosowany w stężeniach powyżej 10 mg·kg⁻¹ wywoływał spadek zawartości żelaza w liściach sałaty i szpinaku oraz owocach cukinii i fasoli. Wzrastająca zawartość niklu w podłożu wpłynęła na sukcesywny spadek plonu oraz wzrost akumulacji tego metalu w organach konsumpcyjnych badanych gatunków. Jednak odnotowane zawartości niklu mieściły się w zakresie przyjętym dla roślin rosnących w środowisku naturalnym (nieskażonym).

W ramach problematyki dotyczącej aktywności biologicznej niklu podjęłam również badania, których celem było określenie reakcji słonecznika na nikiel w zależności od stężenia i drogi wnikania tego metalu (II.B.13). Nikiel wprowadzano do pożywki w stężeniach 35, 100 lub 200 μM Ni (aplikacja dokorzeniowa), natomiast aplikację dolistną wykonano stosując oprysk roztworem niklu o stężeniu 5 lub 10 μM. Stwierdzono, że rośliny traktowane niklem dokorzeniowo charakteryzowały się znacznie wyższą zawartością niklu w korzeniach, natomiast dolistnie – w częściach nadziemnych. Ponadto wykazano, że niezależnie od drogi wnikania, wzrastające stężenia niklu wpłynęły na spadek parametrów fizjologicznej aktywności korzeni, tj. ogólnej i aktywnej powierzchni adsorpcyjnej oraz powierzchni aktywnej 1 cm³, przy czym większy spadek analizowanych wskaźników stwierdzono po dokorzeniowej niż dolistnej aplikacji tego metalu. Skażenie niklem powodowało także spadek koncentracji chlorofilu, przy czym aplikacja dolistna, w przeciwieństwie do dokorzeniowej,

wpłynęła na większy spadek chlorofilu *b* niż *a*. Oznaczano również zawartość siarki siarczanowej (S-SO₄) – formy siarki mającej kluczowe znaczenie dla odporności roślin na czynniki stresowe. Zawartość S-SO₄ w biomacie słonecznika zależała od drogi wnikania niklu – dolistna aplikacja wpłynęła na wyraźny wzrost koncentracji S-SO₄ we wszystkich analizowanych organach (liściach, łodygach i korzeniach), natomiast aplikacja dokorzeniowa powodowała zwiększenie zawartości S-SO₄ w korzeniach i łodygach, a zmniejszenie w liściach. Biologiczną aktywność niklu, w zależności od drogi wnikania, na przykładzie słonecznika rozpatrywano również w aspekcie wpływu tego metalu na translokację i metabolizm węglowodanów. Rezultaty przeprowadzonych badań wykazały, że wyższą zawartością cukrów redukujących charakteryzowały się rośliny traktowane niklem dokorzeniowo niż dolistnie (II.B.12). Stwierdzono również, że wzrastające stężenia niklu na ogół powodowały zwiększenie zawartości cukrów redukujących w liściach, natomiast obniżenie w łodygach i korzeniach. Wyniki badań wskazują na ścisły związek zmian zawartości węglowodanów w poszczególnych organach z zawartością niklu w ich tkankach.

Zaangażowałam się również w badania nad wpływem niklu (0,4; 40 lub 80 μM) na aktywność reduktazy azotanowej (RA) w warzywach liściowych (szpinak nowozelandzki, sałata) korzystających z różnych form azotu (NO₃⁻-N, NH₄⁺-N, NH₄NO₃) (II.A.1). Nikiel bierze udział w metabolizmie azotowym i z tego względu włączony został do grupy mikroelementów. Wyniki moich badań wskazują, że nikiel w niskich koncentracjach (0,4 μM) nie wpływał na aktywność RA w korzeniach i liściach sałaty korzystającej z azotanowej (NO₃⁻-N) i mieszanej (NH₄-NO₃) formy azotu. Natomiast w liściach szpinaku nowozelandzkiego pod wpływem 0,4 μM Ni aktywność RA spadała w warunkach żywienia roślin NO₃⁻-N, a wzrastała w warunkach żywienia NH₄⁺-N. Zastosowanie wyższych stężeń niklu (40 lub 80 μM) skutkowało spadkiem aktywności RA w liściach i korzeniach szpinaku nowozelandzkiego korzystającego z NO₃⁻-N i NH₄-NO₃. W tych warunkach w częściach użytkowych sałaty aktywność RA zmniejszyła się, natomiast w korzeniach nie ulegała znaczącym wahaniom. Przy wzrastających stężeniach niklu zastosowanie formy amonowej (NH₄⁺-N), jako jedyne źródła azotu, powodowało u sałaty zwiększenie aktywności RA zarówno w liściach, jak i w korzeniach. W tych warunkach nie stwierdzono natomiast znaczących zmian aktywności tego enzymu u szpinaku. Należy zaznaczyć, że niezależnie od dawki niklu, aktywność RA w korzeniach szpinaku korzystającego wyłącznie z NH₄⁺ jako źródła azotu, była wyższa niż w liściach i przewyższała wartości uzyskane dla roślin korzystających z azotanowej i mieszanej formy azotu. Stwierdzone u szpinaku nowozelandzkiego, a rzadko spotykane zjawisko większego indukowania RA przez jony

NH_4^+ niż NO_3^- może dotyczyć również innych gatunków, co świadczy o różnorodności procesów zaangażowanych w regulację aktywności RA.

Ocena możliwości łagodzenia skutków stresów abiotycznych z wykorzystaniem zróżnicowanego żywienia mineralnego

Wpływ intensywnego odżywiania żelazem oraz wapniem na fitotoksyczność niklu

Jednym z charakterystycznych wizualnych symptomów fitotoksyczności niklu są chlorotyczne i nekrotyczne uszkodzenia liści będące następstwem deficytu żelaza. Wprawdzie żelazo nie wchodzi w skład chlorofilu, lecz jest wymagane do biosyntezy tego barwnika, a ściślej do metabolizmu RNA w chloroplastach, jak również jest niezbędne do syntezy karotenoidów. W doświadczeniach z wykorzystaniem bobu analizowano w jakim stopniu zintensyfikowane żywienie żelazem w formie cytrynianu Fe^{2+} (23 mg $\text{Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża – dawka podstawowa i 70 mg $\text{Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża – dawka wzmożona), w warunkach zróżnicowanego poziomu niklu (13 lub 40 mg $\text{Ni}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża), wpływa na wzajemne oddziaływanie tych metali (II.B.2). Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na antagonistyczne relacje między niklem i żelazem. Obecność niklu, w warunkach podstawowego odżywiania żelazem, wyraźnie ograniczała zawartość żelaza, szczególnie w częściach nadziemnych. Wzmożone żywienie żelazem traktowanego niklem bobu, wpłynęło na zwiększoną koncentrację żelaza w organach nadziemnych, natomiast niklu w korzeniach. Niezależnie od poziomu żelaza oraz niklu w podłożu, większą zdolność do akumulacji żelaza wykazywały organy nadziemne, natomiast niklu – korzenie. Ograniczenie pobierania żelaza w warunkach nadmiaru niklu w ryzosferze, jak również zmniejszona akumulacja niklu w roślinach w warunkach intensywnego odżywiania żelazem wynika z faktu, że w pobieraniu oraz transporcie tych pierwiastków przez błony uczestniczą te same transportery.

Przeprowadzono także badania nad zmianami fizjologicznej aktywności korzeni traktowanej niklem cukinii i kukurydzy w warunkach intensywnego odżywiania wapniem (250 – dawka podstawowa i 400 mg $\text{Ca}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża – dawka wzmożona) (II.B.9). Zastosowane dawki niklu (10, 20 lub 60 mg $\text{Ni}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża), w warunkach podstawowego poziomu wapnia, obniżyły wartości fizjologicznych wskaźników korzeni (objętość, ogólna i aktywna powierzchnia adsorpcyjna oraz powierzchnia aktywna 1 cm^3) badanych gatunków, jak również zwiększyły zawartość wapnia w korzeniach cukinii, a zredukowały –

w korzeniach kukurydzy. Zmiany wskaźników korzeni pod wpływem intensywnego nawożenia wapniem uzależnione były od dawki niklu i gatunku rośliny. Wzmoczone odżywianie wapniem, w warunkach skażenia niklem, nie wpłynęło na wskaźniki korzeni kukurydzy, natomiast u cukinii zwiększyło powierzchnię adsorpcyjną tych organów. Ponadto zwiększona zawartość wapnia, w warunkach najwyższej z zastosowanych dawek niklu ($60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża), wpłynęła na redukcję zawartości niklu w korzeniach obu badanych gatunków.

Rezultaty badań z wykorzystaniem wapnia (270 lub $400 \text{ mg Ca}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża) oraz żelaza (10 lub $20 \text{ mg Fe}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża) wskazują na korzystny wpływ podwyższonego poziomu tych składników mineralnych na szpinak i kukurydzę rosnące w środowisku skażonym niklem (40 lub $60 \text{ mg Ni}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża) (II.A.5). Wzmoczone żywienie żelazem i wapniem, w warunkach skażenia niklem, wpłynęło korzystnie na biomasę kukurydzy, powodowało obniżenie zawartości niklu w częściach nadziemnych obu badanych gatunków, a także skutkowało podwyższeniem stężenia zarówno wolnych jonów wapnia, jak i wapnia związanego w częściach użytkowych oraz korzeniach szpinaku. W tych warunkach u kukurydzy odnotowano podwyższenie poziomu wapnia związanego w korzeniach roślin suplementowanych żelazem lub wapniem oraz w częściach nadziemnych roślin intensywnie odżywianych wapniem. Wzmoczone żywienie żelazem wpływało także na wzrost jego zawartości w częściach nadziemnych i korzeniach szpinaku traktowanego niklem. Natomiast w organach nadziemnych kukurydzy wzrost bioakumulacji żelaza stwierdzono w warunkach intensywnego odżywiania zarówno wapniem, jak i żelazem. Zatem, w warunkach skażenia niklem, intensywne odżywianie żelazem lub wapniem może być wykorzystane do promowania wzrostu roślin oraz redukcji translokacji niklu z korzeni do pędów.

Prowadzono także eksperymenty, w których wykorzystano żelazo ($0,05$ lub $0,1 \text{ mM}$) oraz wapń ($0,5$; $0,75$ lub 1 mM) do ograniczenia fitotoksyczności niklu ($0,03$ lub $0,06 \text{ mM}$). Badano gorczycę, sałatę, szpinak, cukinię, fasolę i kukurydzę we wczesnych fazach ich rozwoju (II.B.6). Określona w oparciu o indeks tolerancji wrażliwość badanych gatunków na nikiel przedstawiała się następująco: cukinia > sałata > gorczyca > szpinak = kukurydza > fasola. Zastosowanie podwyższonych dawek żelaza ($0,1 \text{ mM}$), niezależnie od poziomu skażenia niklem, wpłynęło korzystnie na wzrost elongacyjny kukurydzy, a u gorczycy i fasoli podobną zależność stwierdzono tylko przy stężeniu $0,06 \text{ mM Ni}$. W redukcji toksycznego wpływu niklu na rośliny na ogół bardziej skuteczna była dawka wapnia $0,75 \text{ mM}$ niż 1 mM .

Analizowano również reakcję gorczycy traktowanej niklem na różne zawartości żelaza w podłożu na podstawie fizjologicznych, morfologicznych i anatomicznych zmian

w korzeniach (II.B.4). Wzajemne oddziaływanie niklu ($1, 5, 20$ lub $40 \text{ mg Ni} \cdot \text{dm}^{-3}$) i żelaza (6 lub $12 \text{ mg Fe} \cdot \text{dm}^{-3}$) w środowisku wzrostu wyraźnie wpływało na koncentrację tych metali w korzeniach. Im stosunek żelaza do niklu w podłożu był szerszy, tym zawartość niklu w korzeniach była niższa. Wzrastające skażenie środowiska odżywczego niklem powodowało zmniejszenie zawartości żelaza w biomase korzeni, nawet w warunkach wysokiej koncentracji tego mikroelementu w ryzosferze. Już najmniejsza z zastosowanych dawek niklu ($1 \text{ mg Ni} \cdot \text{dm}^{-3}$) zakłócała reakcję geotropiczną korzenia i powodowała nierównomierne zgrubienia stożka wzrostu, a w obecności $5 \text{ mg Ni} \cdot \text{dm}^{-3}$ wystąpiły wyraźne uszkodzenia komórek epiblemy i pęknięcia w zewnętrznej warstwie kory pierwotnej. Liczne wyróżnicowane zawiązki korzeni bocznych szybko ulegały deformacji, a ich wzrost elongacyjny był hamowany już w obszarze kory pierwotnej. Silne symptomy uszkodzeń (wakuolizacja, duże zróżnicowanie i degradacja komórek kory pierwotnej) zaobserwowano, gdy stosunek zawartości żelaza do niklu w podłożu wynosił 1:2 lub 1:4. Najkorzystniejszy w niwelowaniu fitotoksycznego wpływu niklu okazał się stosunek Fe:Ni jak 5-6:1. Prawidłowy stosunek żelaza do niklu w podłożu może prowadzić do fizjologicznego unieczynnienia niklu i w konsekwencji utrzymania funkcji korzenia w środowisku skażonym tym metalem.

Oceniano także oddziaływanie niklu (30 lub $60 \text{ mg Ni} \cdot \text{dm}^{-3}$) na wczesne fazy rozwojowe soi warzywnej w warunkach różnych koncentracji wapnia w środowisku ($150, 300$ lub $400 \text{ mg Ca} \cdot \text{dm}^{-3}$) (II.G.7). Rośliny z rodziny bobowatych, do których należy soja, odznaczają się wysoką tolerancją na nikiel. Wzmoczone żywienie wapniem istotnie obniżało powodowaną przez nikiel ($30 \text{ mg Ni} \cdot \text{dm}^{-3}$) redukcję żywotności zarodków, jak również zwiększało energię i zdolność kiełkowania nasion. Wysoki poziom wapnia w podłożu nie znosił jednak hamującego wpływu niklu ($60 \text{ mg Ni} \cdot \text{dm}^{-3}$) na kiełkowanie nasion. W obecności niklu elongacja korzeni była ograniczona, nawet przy wysokim poziomie wapnia, a przy najwyższej zastosowanej dawce wapnia i niklu stwierdzono całkowite zahamowanie wzrostu hypokotylu. Liczba kielków uszkodzonych, niezdolnych do dalszego rozwoju, uzyskanych z nasion roślin traktowanych niklem, w warunkach podstawowego żywienia wapniem, była nawet o połowę wyższa od ilości kielków uszkodzonych, jaką uzyskano z nasion roślin eksponowanych na nikiel, ale dodatkowo suplementowanych wapniem.

Reasumując, uzyskane wyniki badań dotyczących znoszenia fitotoksyczności niklu w warunkach suplementacji podłoża żelazem i wapniem wyraźnie wskazują na antagonistyczne oddziaływanie jonów niklu i żelaza oraz dowodzą, że zwiększenie zawartości

żelaza w skażonym niklem środowisku indukuje wzrost tolerancji roślin na nikiel. Również dobre zaopatrzenie eksponowanych na nikiel roślin w wapń przynosi korzystne rezultaty w łagodzeniu fitotoksyczności tego metalu.

Wpływ selenu na przebieg wybranych procesów fizjologicznych oraz tolerancję roślin na stresy abiotyczne

Oprócz biologicznej aktywności metali śladowych w roślinach oraz ich interakcji ze składnikami mineralnymi, włączyłam się również w prace badawcze nad wzbogaceniem roślin w selen oraz udziałem tego pierwiastka w odporności roślin na wybrane stresy abiotyczne. Część z tych badań została zrealizowana w ramach projektu badawczego pt.: „Biofortyfikacja wybranych warzyw w selen w aspekcie wzrostu ich odporności na zasolenie lub metale ciężkie” (N N310 430939).

Selen jest pierwiastkiem niezbędnym dla ludzi, zwierząt oraz niektórych mikroorganizmów. Chociaż dotychczas nie potwierdzono jego niezbędności dla roślin, jednak wraz z glinem, kobaltem, krzemem i wanadem selen zaliczono do grupy pierwiastków poświadczonych. W przeprowadzonych badaniach analizowano wpływ dwóch nieorganicznych form selenu (seleninu i selenianu) na wzrost, wybrane parametry fizjologiczne i akumulację makroskładników u ogórka (II.A.9). Próg toksyczności seleninu i selenianu dla tego gatunku wynosił odpowiednio 20 i 80 μM . Uzyskane rezultaty potwierdziły tezę, że selen w relatywnie małych koncentracjach (6 μM dla seleninu i 6-20 μM dla selenianu) ma korzystny wpływ na rośliny jako czynnik antyoksydacyjny i promujący wzrost. Ponadto wskazano zróżnicowaną bioakumulację selenu w poszczególnych organach ogórka pod wpływem zastosowanych form chemicznych tego pierwiastka. W warunkach niskich stężeń selenu w podłożu (<10 μM) jego akumulacja w częściach nadziemnych w obecności obu form tego pierwiastka była jednakowa, natomiast przy wyższych stężeniach (> 10 μM Se) akumulacja selenu w pędach była wyższa u roślin traktowanych selenianem niż seleninem. Stwierdzony wzrost aktywności systemu korzeniowego pod wpływem wzrastających dawek seleninu, wskazuje na nadregulację aktywności dehydrogenaz mitochondrialnych w komórkach strefy merystematycznej korzeni, co w następstwie indukuje nieprawidłowości w przebiegu procesów oddechowych, a w połączeniu z wysoką bioakumulacją selenu w tych organach może wpływać na większą toksyczność seleninu niż selenianu. Selenin miał zróżnicowany wpływ na peroksydację lipidów błon komórkowych w tkankach korzeni: w niskich stężeniach (<10 μM) hamował ten proces, natomiast zastosowany w wyższych

stężeniach ($>20 \mu\text{M}$) nasilał akumulację szkodliwych produktów peroksydacji. Z kolei selenian na ogół obniżał poziom peroksydacji lipidów. Dodatkowo, pod wpływem stężeń selenu przekraczających $10 \mu\text{M}$, stwierdzono niekorzystne zmiany koncentracji makroelementów w biomacie, szczególnie potasu, fosforu i siarki siarczanowej, natomiast zawartość azotu utrzymywała się na stałym poziomie w szerokim zakresie stężeń selenu. Obie formy selenu, aplikowane do pożywki płynnej w stężeniach poniżej progu ich toksyczności, mogą zostać potencjalnie wykorzystane w celu biofortyfikacji ogórka tym pierwiastkiem. Jednak z uwagi na stwierdzone wahania w poziomie makroelementów w częściach nadziemnych roślin, za bezpieczne należałoby uznać stężenia $<10 \mu\text{M Se}$.

Wpływ selenu (5 lub $20 \mu\text{M}$), aplikowanego w formie seleninu, na rośliny traktowane nikiem ($50 \mu\text{M}$) analizowano na przykładzie sałaty (II.A.3, II.B.15). Skażenie pożywki nikiem wpłynęło na znaczną redukcję biomasy, natomiast wprowadzenie selenu do zawierającego nikiel podłoża częściowo ograniczało fitotoksyczność tego metalu, co przejawiało się stymulacją wzrostu roślin oraz zwiększoną akumulacją barwników fotosyntetycznych. Efektywna w tym względzie okazała się tylko niższa z zastosowanych dawek selenu ($5 \mu\text{M}$). Z drugiej strony aplikacja $5 \mu\text{M Se}$ do skażonego nikiem środowiska, wpłynęła na zwiększenie zawartości niklu, w odniesieniu do roślin niesuplementowanych selenem, jak również wzrost zawartości selenu oraz siarki siarczanowej (S-SO_4) w częściach użytkowych. Wzrost akumulacji S-SO_4 stwierdzono również w suplementowanych selenem roślinach nieeksponowanych na nikiel. Z kolei selen aplikowany w stężeniu $20 \mu\text{M}$ wpłynął na obniżenie zawartości S-SO_4 w liściach traktowanej nikiem sałaty. Stwierdzone wahania poziomu S-SO_4 , warunkowane obecnością selenu w podłożu, wynikają prawdopodobnie z podobnych mechanizmów asymilacji obu tych pierwiastków.

Ponadto wykazano, że selen i nikiel aplikowane oddzielnie, wpływały na redukcję akumulacji makroelementów w liściach sałaty. Stwierdzono korzystne oddziaływanie niższej koncentracji selenu ($5 \mu\text{M}$) na traktowaną nikiem sałatę, które przejawiało się wyższą plonowania i wzrostem akumulacji makroelementów w biomacie. W obecności $20 \mu\text{M Se}$ nie odnotowano korzystnego wpływu selenu na akumulację makroelementów w odniesieniu do roślin traktowanych wyłącznie nikiem, za wyjątkiem wzrostu akumulacji siarki ogólnej. Wzrost stężenia selenu w pożywce do $20 \mu\text{M}$ wywierał niekorzystny wpływ na poziom makroskładników w sałacie rosnącej w obecności $50 \mu\text{M Ni}$, pogłębiając na ogół obniżenie ich bioakumulacji. Zatem można przypuszczać, że korzystny wpływ selenu zastosowanego w stężeniu $5 \mu\text{M}$ na skażoną nikiem sałatę może, przynajmniej częściowo, wynikać z oddziaływania selenu na gospodarkę mineralną oraz wiązać się z lepszym statusem

zaopatrzenia roślin w makroelementy. Natomiast wpływ selenu na pobieranie i translokację niklu w roślinach nie był jednoznaczny, gdyż przy niższym stężeniu metalu (50 μM Ni) obecność selenu powodowała wzrost (5 μM Se) lub nie wywierała wpływu (20 μM Se) na zawartość niklu, a w obecności 100 μM Ni wprowadzenie selenu wpływało na znaczne ograniczenie zawartości tego metalu w organach nadziemnych. Uzyskane wyniki potwierdzają hipotezę, że obecność w podłożu innych pierwiastków modyfikuje fitotoksyczność metali przy czym, zależnie od zastosowanego stężenia oraz formy chemicznej, pierwiastki te mogą mieć korzystny lub negatywny wpływ na rośliny.

Podjęto również badania nad wykorzystaniem selenu w łagodzeniu skutków stresu niskotemperaturowego (II.A.4). Stres niskotemperaturowy drastycznie obniża plony roślin wrażliwych na chłód w wyniku zakłóceń procesów metabolicznych. Do badań nad wpływem selenu na tolerancję roślin na stres niskotemperaturowy wybrano ogórek, jako gatunek ciepłolubny, a jednocześnie będący ważną rośliną uprawną. W eksperymencie zastosowano różne stężenia selenu w formie selenianu (Na_2SeO_4): 2,5; 5; 10 lub 20 μM Se. Rośliny ogórka, rosnące początkowo w warunkach optymalnej temperatury (25/20°C; dzień/noc), poddano działaniu krótkotrwałego stresu chłodu: 10/5 °C (dzień/noc) przez 24 h, a następnie 20/15 °C przez kolejne 24 h. Po oddziaływaniu obniżonej temperatury rośliny przetrzymywano przez następne 7 dni w temperaturze optymalnej. Wykazano, że biomasa korzeni i pędów nie ulegała znaczącym wahaniom pod wpływem selenu w zakresie stężeń 2,5-10 μM Se, natomiast obniżała się w obecności 20 μM Se. Wzbogacone selenem rośliny charakteryzowały się wyższym poziomem proliny, zarówno bezpośrednio po stresie, jak i po 7 dniach po ustąpieniu stresu, przy czym poziom tego aminokwasu był dużo wyższy bezpośrednio po oddziaływaniu chłodu. Biorąc pod uwagę, że prolina przejawia właściwości antyoksydacyjne oraz bierze udział m. in. w dostosowaniu osmotycznym, stabilizacji białek i błon komórkowych stwierdzony wzrost poziomu tego aminokwasu indukowany obecnością selenu, może potencjalnie przyczyniać się do wzrostu tolerancji ogórka na chłód. Na funkcjonowanie takiego mechanizmu wskazuje zmniejszona w odniesieniu do kontroli peroksydacja lipidów w korzeniach roślin suplementowanych selenem (2,5-10 μM Se) stwierdzona zwłaszcza bezpośrednio po stresie. Niezależnie od obecności selenu, bezpośrednio po oddziaływaniu chłodu nasilenie zjawiska peroksydacji lipidów było znacznie wyższe niż w okresie późniejszym, co pośrednio potwierdza indukowany niską temperaturą stres oksydacyjny i związane z tym uszkodzenia systemu błon komórkowych u gatunków ciepłolubnych, takich jak ogórek. Wprowadzenie selenu aplikowanego w zakresie stężeń 2,5-10 μM modyfikowało fizjologiczną odpowiedź ogórka na stres niskotemperaturowy, powodując

wzrost poziomu proliny w liściach oraz ograniczając peroksydację lipidów w korzeniach, ale jednocześnie nie stwierdzono wyraźnie wyższej odporności tego gatunku na chłód, bowiem zarówno biomasa wzbogaconych selenem roślin, jak i poziom barwników fotosyntetycznych nie różniły się istotnie w odniesieniu do roślin niewzbogaconych tym pierwiastkiem.

Reasumując, pozytywny wpływ selenu na rośliny rosnące w warunkach stresowych wynika głównie z jego zdolności do redukcji niekorzystnego zjawiska peroksydacji lipidów błon komórkowych, powodującego utratę ich integralności oraz selektywnej przepuszczalności, co bez wątplenia przyczynia się także do zachowania prawidłowych funkcji błon tylakoidów i znajdujących się w nich barwników fotosyntetycznych. Ponadto, w warunkach skażenia niklem, korzystny wpływ selenu może wiązać się z jego oddziaływaniem na gospodarkę mineralną i lepszym statusem zaopatrzenia roślin w makroelementy.

Wykorzystanie substratów jonitowych typu BIONA w ograniczaniu szkodliwego oddziaływania abiotycznych czynników stresowych

Ważnym etapem mojej działalności naukowej było zagadnienie dotyczące zastosowania substratów jonitowych typu BIONA w celu łagodzenia toksyczności niklu oraz skutków stresu solnego. Substraty jonitowe typu BIONA zostały przygotowane w Instytucie Chemii Fizycznej i Organicznej Białoruskiej Akademii Nauk w Mińsku na bazie sztucznych jonitów wysyconych składnikami odżywczymi i naturalnego zeolitu (klinoptylolit). Optymalne wysycenie składnikami mineralnymi pozwala na utrzymanie stanu równowagi jonowej zarówno roztworu glebowego, jak i pożywki płynnej. Wykorzystana przeze mnie w badaniach BIONA 312 jest jednym z najefektywniejszych substratów typu BIONA. Podłoża jonowymienne mają wszechstronne zastosowanie np., w odniesieniu do roślin rosnących w małych autonomicznych biosystemach, w adaptacji kultur komórkowych, jak również rozmnażaniu roślin. Rokują one także obiecująco jako nawozy w procesie w rekultywacji terenów wyjałowionych i zdegradowanych.

Przeprowadzono badania mające na celu oszacowanie możliwości wykorzystania substratu jonitowego BIONA 312 w łagodzeniu fitotoksyczności niklu w odniesieniu do ogórka na etapie rozwoju generatywnego (II.B.10 i II.B.11). Wykazano wysoką wrażliwość tego gatunku na nikiel. Wraz ze wzrostem zawartości niklu w podłożu (30 lub 75 mg Ni·dm⁻³) zwiększał się poziom tego metalu w biomacie, zwłaszcza korzeni. Jednocześnie ulegała redukcji objętość tych organów i zmniejszał się współczynnik masy organicznej. Nikiel

w stężeniu $30 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$ wywoływał spadek liczby kwiatów męskich i żeńskich, a w konsekwencji wpłynął na spadek plonu owoców. Natomiast przy stężeniu $75 \text{ mg Ni} \cdot \text{dm}^{-3}$ nie stwierdzono kwitnienia, a w rezultacie owocowania. Aplikacja BIONY 312 w ilości 2 lub 5% do skażonego niklem środowiska istotnie zmniejszyła zawartość niklu w biomacie ogórka, głównie w korzeniach, równocześnie zwiększając udział korzeni w produkcji masy organicznej. Ponadto wykazano, że dodatek substratu jonitowego do skażonego niklem podłoża wpłynął na zwiększenie biomasy korzeni, pędów, liści i owoców, objętości korzeni, długości pędu głównego, liczby pędów bocznych, wzrost zawartości chlorofilu, jak również na zwiększenie liczby kwiatów i owoców. Uzyskane wyniki wskazują na pozytywny wpływ BIONY 312 w warunkach skażenia podłoża niklem, przy czym bardziej skuteczna w łagodzeniu fitotoksycznego wpływu niklu okazała się wyższa z zastosowanych dawek substratu jonitowego (5%).

W dalszych badaniach wykorzystano pomidora gruntowego. Skuteczność substratu jonitowego BIONA 312 (2 lub 5%) w ograniczaniu toksycznego oddziaływania niklu (40 lub $100 \text{ mg Ni} \cdot \text{kg}^{-1}$ podłoża) oceniano w oparciu o kwitnienie i owocowanie, produktywność i zawartość wybranych makroelementów (II.A.2 i II.B.14). Z uzyskanych rezultatów wynika, że ogórek był bardziej wrażliwy na stres wynikający ze skażenia niklem niż pomidor. Większa toksyczność niklu w odniesieniu do ogórka przejawiała się m.in. zhamowaniem kwitnienia, a w rezultacie brakiem owoców przy najwyższej zastosowanej dawce niklu. Zastosowane dawki niklu wpłynęły na spadek produktywności, zmiany w zawartości makroelementów, opóźnienie terminu kwitnienia i owocowania, spadek liczby zawiązków kwiatowych, a w rezultacie zmniejszony plon owoców. Suplementacja skażonego niklem podłoża substratem jonitowym zwiększyła biomasę organów wegetatywnych oraz owoców obu badanych gatunków. Zawartość wybranych makroelementów była zróżnicowana w zależności od fazy wzrostu, poziomu niklu i dawki nawozu. Przykładowo aplikacja BIONY-312 do skażonego niklem podłoża zwiększyła zawartość azotu w organach wegetatywnych i owocach pomidora, podczas gdy zawartość tego makroelementu w biomacie ogórka ulegała redukcji przy $40 \text{ mg Ni} \cdot \text{kg}^{-1}$ lub wzrastała w warunkach $100 \text{ mg Ni} \cdot \text{kg}^{-1}$. Pomidor akumulował więcej niklu niż ogórek. Wzbogacenie skażonego tym metalem podłoża BIONĄ powodowało redukcję zawartości niklu w biomacie obu gatunków. Po suplementacji BIONĄ skażone niklem rośliny szybciej i obficie zakwitły, a owoce wcześniej się zawiązywały, dając znacznie wyższy plon w odniesieniu do roślin traktowanych tylko niklem, a nawet kontrolnych, tj. rosnących bez dodatku niklu i substratu jonitowego. Skuteczniejsza w łagodzeniu toksycznego wpływu tego metalu na rośliny pomidora i ogórka okazała się 5%

niż 2% dawka BIONY 312, a korzystniej na wzbogacenie substratem jonitowym reagowały skażone nikiem rośliny ogórka niż pomidora. Dlatego wydaje się, że optymalne zaopatrzenie roślin w składniki pokarmowe przyczynia się do zwiększenia ich odporności na obecność metali śladowych w środowisku. Stwierdzono również pozytywny wpływ BIONY 312 w odniesieniu do roślin kontrolnych (nietraktowanych nikiem). Wzbogacenie podłoża 2 lub 5% dawką BIONY 312 wyraźnie podwyższyło plon, jak również zwiększyło zawartość azotu, fosforu i potasu, równocześnie obniżając zawartość magnezu i wapnia w biomacie pomidora i ogórka, zarówno w fazie kwitnienia jak i owocowania (II.A.2).

Zasolenie gleb uprawnych stanowi bardzo poważny problem środowiskowy. Zjawisko to dotyczy również rabatek i przyulicznych kwietników i jest następstwem stosowania NaCl do usuwania śniegu i lodu ze szlaków komunikacyjnych. Niekorzystny wpływ zasolenia na rośliny wynika z kombinacji różnych rodzajów stresów: stresu suszy, stresu jonowego, stresu oksydacyjnego oraz specyficznego wpływu jonów Na^+ + Cl^- . W podjętych badaniach określano wpływ zasolenia jonami Na^+ i Cl^- na walory dekoracyjne żeniszka meksykańskiego oraz możliwość neutralizacji skutków stresu solnego poprzez wprowadzenie do podłoża sorbentu jonitowego BIONA 311 (II.B.7). Eksperyment zróżnicowano pod względem zasolenia stosując dawkę NaCl generującą wartość przewodowości elektrolitycznej $2,83 \text{ dS m}^{-1}$ i 3% poziom substratu jonitowego. Żeniszek meksykański okazał się gatunkiem wrażliwym na stres solny. Zastosowany poziom zasolenia spowodował spadek parametrów morfometrycznych i fizjologicznych, decydujących o walorach dekoracyjnych, tj. liczby kwiatostanów, wysokości łodygi, liczby liści oraz zawartości chlorofilu. Równocześnie stwierdzono wzrost zawartości sodu i chloru oraz spadek zawartości wapnia we wszystkich analizowanych organach (liście, łodygi, kwiaty, korzenie). Z kolei zmiany w zawartości potasu, wynikające z wpływu zasolenia, były zróżnicowane – w korzeniach i liściach wykazano wzrost, natomiast w łodygach i kwiatach spadek zawartości tego makroelementu. Korzystny wpływ aplikacji BIONY 111 do zasolonego podłoża przejawiał się poprawą walorów dekoracyjnych, tj. zwiększeniem liczby i lepszym wybarwieniem liści oraz większą obfitością kwitnienia i lepszym wybarwieniem kwiatostanów. Ponadto substrat jonitowy ograniczał dostępność jonów Na^+ i Cl^- , powodując równocześnie wzrost bioakumulacji potasu oraz wapnia. Dlatego wydaje się, że BIONA 111 może być dobrym komponentem gleb zasolonych w uprawie żeniszka meksykańskiego.

Stężenie roztworu odżywczego jest jednym z ważnych czynników wpływających na plonowanie. Nadmierne lub niezbalansowane nawożenie solami, zawierającymi pierwiastki niezbędne, wywołuje efekt stresu solnego i w rezultacie redukuje wysokość i jakość plonu.

Dlatego też, oprócz stresu solnego indukowanego NaCl, analizowałam również możliwość łagodzenia skutków zasolenia wynikającego z nadmiernej koncentracji składników pokarmowych w ryzosferze przez substraty jonowymienne typu BIONA (II.A.8 i II.A.14). Wykazano, że BIONA 312 jest dobrym komponentem środowiska niezasolonego ($EC\ 2,41-2,47\ dS\ m^{-1}$) i zasolonego ($EC\ 6,85-7,30\ dS\ m^{-1}$) w uprawie sałaty. Pozytywny wpływ BIONY 312 przejawiał się wzrostem biomasy, jak również zwiększeniem objętości korzeni oraz ich aktywności, określonej w oparciu o całkowitą i aktywną powierzchnię adsorpcyjną. Ponadto wprowadzenie substratu jonowymiennego do podłoża zasolonego powodowało wyraźne zwiększenie zawartości azotu i potasu w biomacie roślin. Podniosła się także zawartość siarki, a obniżyła zawartość wapnia i magnezu w liściach. Odnotowano również zwiększoną koncentrację fosforu w korzeniach. Potwierdzono wyniki wcześniejszych badań wskazujące, że substraty jonowymienne nie powodują stresu solnego i że nie istnieje ryzyko przenawożenia roślin przy zastosowaniu tych preparatów. Można przypuszczać, że substraty typu BIONA, posiadające właściwości sorpcyjne i zarazem będące nośnikiem związków biogennych, regulują skład jonowy pożywki oraz wpływają na poprawę aktywności korzeni i składu mineralnego roślin poddanych stresowi osmotycznemu, a w rezultacie zwiększają plonowanie. Mogą być zatem dodawane do roztworów o wysokim stężeniu składników pokarmowych w celu zapobiegania uszkodzeniom roślin, niwelując konieczność częstej wymiany pożywki.

Wprowadzenie składników mineralnych wraz z substratami typu BIONA nie wywołuje negatywnych skutków przenawożenia, dlatego mogą być one rekomendowane jako nawóz w uprawie pomidora i ogórka zarówno w warunkach naturalnych, jak i w warunkach stresu spowodowanego nadmiarem metali śladowych lub zasoleniem. Pozytywny wpływ substratów jonitowych typu BIONA na rośliny jest wynikiem obecności w jonicie i stopniowego uwalniania łatwo przyswajalnych dla roślin składników odżywczych, jak również konsekwencją poprawy właściwości sorpcyjnych podłoża i zatrzymywania składników pokarmowych w podłożu poprzez zapobieganie ich wymywaniu. Stwierdzona obniżona zawartość niklu w biomacie traktowanych tym pierwiastkiem roślin suplementowanych BIONĄ może wynikać nie tylko z dostarczenia roślinom dodatkowej puli pierwiastków niezbędnych, lecz również z dużej pojemności chłonnej anionitu, która warunkuje niską fitoprzyswajalność metali śladowych oraz ze zdolności naturalnego klinoptylolitu, wchodzącego w skład substratów jonowymiennych, do immobilizacji pierwiastków śladowych w środowisku i ograniczenia ich bioprzyswajalności.

Prowadzone przeze mnie badania nad substratami jonowymiennymi są ważne z punktu widzenia rolnictwa i ogrodnictwa. Obiecujące rezultaty są również podstawą do przeprowadzenia bardziej szczegółowych badań nad procesami wymiany składników odżywczych pomiędzy substratem a roztworem odżywczym w środowisku naturalnym, zasolonym oraz zanieczyszczonym metalami śladowymi. Wyniki te mogą być pomocne w ulepszeniu już istniejących oraz opracowaniu nowych strategii uprawy roślin w aspekcie ograniczenia fitotoksycznych skutków stresów abiotycznych.

Ocena możliwości łagodzenia skutków stresów abiotycznych z wykorzystaniem związków organicznych

Podjęto badania nad wykorzystaniem preparatu komercyjnego Hemozym do celów nawozowych nieskażonych oraz skażonych kadmem gleb (II.A.12). Środek ten jest płynnym nawozem organicznym, uzyskiwanym w procesie mikrobiologicznej hydrolizy białek krwi zwierzęcej, stabilizowanym solami mineralnymi. Zastosowano trzy poziomy Hemozemu (0; 0,1 i 0,2 cm³·kg⁻¹) oraz kadm w stężeniu 5 mg Cd·kg⁻¹ suchej masy gleby. Przydatność nawozową Hemozemu oszacowano w oparciu o charakterystykę kompleksu sorpcyjnego, aktywność oddechową gleby oraz zawartość metali śladowych w glebie i testowanej roślinie, którą była gorczyca biała. Stwierdzona poprawa żyzności gleby była rezultatem korzystnego wpływu Hemozemu na fizykochemiczne właściwości gleby i jej mikrobiologiczną aktywność. Aplikacja Hemozemu obniżała parametry kwasowości gleby i wyraźnie zwiększyła pojemność wymiany kationów (ang. *cation exchange capacity* CEC) gleby, jak również podwyższyła sumę kationów zasadowych oraz ich udział w kompleksie sorpcyjnym. Wraz ze wzrostem dawki Hemozemu zwiększał się udział wapnia i potasu w CEC gleby. Stwierdzony pozytywny wpływ Hemozemu na rozwój mikroflory glebowej, której aktywność spadała już po około 45 dniach od jego aplikacji, wskazuje na szybkie tempo mineralizacji wprowadzonej wraz z hydrolizatem proteinowym substancji organicznej. Wprowadzenie do podłoża kadmu, nawet w obecności Hemozemu, obniżyło aktywność oddechową gleby. Nawożenie Hemozmem zwiększało rozpuszczalność cynku w glebie, a jednocześnie zmniejszało zawartość innych metali śladowych (miedzi, kadmu i ołowiu) w glebie i biomase gorczycy. Jednakże uzyskane wyniki nie pozwalają na jednoznaczne określenie wpływu hydrolizatu proteinowego na rozpuszczalność i wiązanie metali śladowych naturalnie występujących w glebie (Zn, Cu i Pb) oraz celowo wprowadzonego Cd, pomimo orientacyjnej tendencji do ich przekształcania w słabo rozpuszczalne formy.

Przeprowadzono również badania, w których poddano ocenie możliwość zwiększenia tolerancji roślin żeniszka meksykańskiego na stres solny poprzez stosowanie hydrolizatu proteinowego Hemozym (II.B.16). W eksperymencie zastosowano podłoże kwiatowe o naturalnym poziomie NaCl ($0,60 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) i podłoże zasolone ($6,00 \text{ g NaCl}\cdot\text{kg}^{-1}$) oraz trzy dawki Hemozemu (0; $0,07$ lub $0,14 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża). Zarówno w warunkach stresu solnego, jak i w warunkach kontrolnych, aplikacja hydrolizatu proteinowego do podłoża poprawiała wartość dekoracyjną roślin stymulując wzrost poszczególnych organów, zwiększając liczbę i powierzchnię liści oraz zawartość chlorofilu, jak również zwiększając ogólną liczbę i średnicę kwiatostanów (baldachów, a szczególnie koszyczków), jednocześnie poprawiając ich wybarwienie. Bardziej efektywna w łagodzeniu skutków stresu solnego okazała się niższa z zastosowanych dawek Hemozemu ($0,07 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}$ podłoża). Zatem Hemozym może być dobrym komponentem podłoża w uprawie żeniszka meksykańskiego, przy czym korzystny wpływ tego preparatu jest szczególnie wyraźny w warunkach nadmiernego zasolenia.

W przeprowadzonych badaniach wykazano także, że niskocząsteczkowe kwasy organiczne są zaangażowane w odporność roślin na metale śladowe (II.A.10). Stwierdzono, że egzogenna aplikacja kwasów jabłkowego lub octowego (250 lub $500 \mu\text{M}$) do pożywki skażonej kadmem ($5 \mu\text{M}$) w znacznym stopniu ograniczała fitotoksyczne oddziaływanie tego metalu na rośliny słonecznika. Pozytywny wpływ kwasów organicznych na zakłócenia metaboliczne indukowane obecnością kadmu przejawiał się wzrostem koncentracji barwników fotosyntetycznych, obniżeniem akumulacji H_2O_2 oraz większą aktywnością korzeni, co w konsekwencji skutkowało stymulacją wzrostu. Za bardziej efektywne w ograniczaniu toksyczności kadmu uznano wyższe z zastosowanych stężeń kwasów organicznych ($500 \mu\text{M}$), a za bardziej skuteczny kwas jabłkowy niż octowy ze względu na jego silniejsze oddziaływanie antyoksydacyjne. Egzogenna aplikacja kwasów organicznych powodowała wyraźne zwiększenie ich stężenia wewnątrzkomórkowego, szczególnie w tkankach korzeni. W warunkach obniżonego poziomu endogennych kwasów organicznych pod wpływem kadmu, ich dodatkowa, egzogenna aplikacja korzystnie oddziaływała na metabolizm roślin, zwiększając pulę dostępnych kwasów organicznych. Chociaż wprowadzenie do podłoża badanych kwasów powodowało zwiększenie akumulacji kadmu w korzeniach, jednak toksyczność tego metalu była wyraźnie niższa, a jego translokacja do części nadziemnych ograniczona. Potwierdza to teorię, że wybrany do badań gatunek może być wykorzystany do fitoremediacji kadmu, a aplikowane egzogennie kwasy organiczne mogą zwiększać efektywność fitostabilizacji.

Biomonitoring zanieczyszczenia środowiska atmosferycznego w aglomeracjach miejskich

Zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego stanowi globalny problem ekologiczny. Szacuje się, że obecnie nadmierne zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego występuje na ponad 20% powierzchni Polski. Celem przeprowadzonych badań była ocena stopnia skażenia środowiska w aglomeracjach miejskich (Lublin) w oparciu o monitoring roślin drzewiastych: jarząb pospolity, lipa drobnolistna i topola osika (II.A.11). Punktem odniesienia był las w pobliżu wsi Huszlew, oddalony od Lublina o ok. 100 km. Uzyskane wyniki wskazują, że liście badanych gatunków drzew rosnących na terenie Lublina, w porównaniu do obiektów z terenów niezurbanizowanych, charakteryzowały się cieńszą blaszką liściową, zredukowaną wielkością komórek epidermalnych, mniejszymi rozmiarami i większą gęstością aparatów szparkowych, mniejszą liczbą otwartych szparek oraz cieńszą warstwą komórek miękiszu palisadowego. Ponadto w liściach badanych gatunków aglomeracji miejskich stwierdzono nieprawidłową ornamentację kutyny oraz mniejszą grubość nerwu głównego i średnicę naczyń ksylemu. Powyższe, niespecyficzne zmiany są charakterystyczne dla oddziaływania niekorzystnych czynników abiotycznych i wskazują na typowe mechanizmy obronne uruchamiane przez rośliny w warunkach stresowych. Mikromorfologiczno-anatomiczne zmiany obserwowane w budowie blaszek liściowych drzew rosnących na terenie Lublina były konsekwencją osadzania cząstek stałych znajdujących się w pyłe zawieszonym (PM 10). Pył osadzający się na powierzchni liści, oprócz tego iż zawiera metale śladowe, pochłania światło oraz zmniejsza rozwartość szparek, co ogranicza wymianę gazową i w następstwie zmniejsza intensywność fotosyntezy. Analiza zawartości cynku, ołowiu i miedzi w liściach badanych taksonów na terenie Lublina wykazała, że akumulacja tych metali mieściła się w zakresie wartości przyjętych dla środowiska naturalnego, za wyjątkiem 3-krotnie przekraczającej dopuszczalne normy zawartości cynku u osiki. Zawartość ołowiu i miedzi w liściach poszczególnych gatunków aglomeracji miejskiej i na terenach niezanieczyszczonych była porównywalna. Zawartość azotu i siarki w liściach wszystkich trzech badanych taksonów mieściła się w zakresie referencyjnych wartości optymalnych, przy czym zawartość azotu w warunkach naturalnych była znacząco wyższa, natomiast siarki wyraźnie niższa niż na terenach zurbanizowanych. Uzyskane wyniki nie wskazują na nadmierne zanieczyszczenie powietrza na terenie Lublina metalami śladowymi, tlenkami siarki (VI) i tlenkami azotu (III), a jedynie na znaczący udział cynku i ołowiu w pyłe zawieszonym. Rezultaty te pozostają w zgodzie z raportem środowiska naturalnego województwa lubelskiego wydanym przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Lublinie.

Mikromorfologia i histochemia włosków wydzielniczych oraz fitotoksyczne działanie olejków eterycznych roślin leczniczych

Badania z zakresu mikromorfologii i histochemii włosków gruczołowych w epidermie liści przeprowadzono na melisie lekarskiej. Jest to roślina miododajna wykorzystywana w przemyśle kosmetycznym, spożywczym i farmaceutycznym. W epidermie liści badanego taksonu, przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego, wyróżniono trzy typy włosków gruczołowych: palcowate, główkowate (zróznicowane morfologicznie) oraz tarczowate (II.A.13). Na podstawie reakcji barwnych, po zastosowaniu odpowiednich testów histochemicznych z użyciem mikroskopii świetlnej i fluorescencyjnej, określono wybrane grupy biologiczne czynnych związków występujących wewnątrz włosków. Przeprowadzone testy histochemiczne pozwoliły na wyznaczenie: lipidów, kwasów tłuszczowych, tłuszczów obojętnych, związków terpenowych, polifenoli, flawonoidów oraz związków polisacharydowych. Zastosowanie technik histochemicznych w badaniach włosków gruczołowych umożliwia poznanie metabolizmu komórek wydzielniczych, a w przyszłości może pozwolić na modyfikację produktów sekrecji włosków.

Problematykę badawczą, dotyczącą fitotoksycznego działania olejków eterycznych roślin leczniczych, realizowałam w trakcie stażu naukowego w Uniwersytecie Kolumbii Brytyjskiej (Vancouver, Kanada). Obecnie, z uwagi na intensywny rozwój rolnictwa ekologicznego, prowadzone są szeroko zakrojone badania nad pozyskaniem naturalnych środków ochrony roślin w celu zmniejszenia użycia preparatów syntetycznych. Zakres podjętych badań dotyczył sprawdzenia herbicydowej aktywności olejku eterycznego ekstrahowanego z goździkowca korzennego oraz poszczególnych składników tego olejku (eugenolu, β -kariofilenu i α -humulenu) w oparciu o ocenę integralności błon komórkowych brokuła i komosy białej (A.II.7). W eksperymencie zastosowano 2,5% roztwór olejku goździkowego, który we wcześniejszych badaniach wykazywał działanie fitotoksyczne oraz roztwory poszczególnych jego składników w stężeniach uwzględniających proporcje, w jakich składniki te występują w olejku, tj. 1,6% roztwór eugenolu, 0,35% roztwór β -kariofilenu i 0,15% roztwór α -humulenu. Poddano także ocenie relatywną herbicydową aktywność poszczególnych składników olejku goździkowego (10 – 160 mM) oraz wpływ intensywności światła w zakresie od 250 do 1500 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na fitotoksyczność olejku goździkowego i jego głównego składnika – eugenolu. Badania dotyczące herbicydowej aktywności olejku goździkowego oraz jego poszczególnych składników, jak również badania

ich fitotoksyczności z uwzględnieniem ekwimolarnych stężeń wskazywały na największy udział eugenolu w fitotoksyczności olejku goździkowego. Pozostałe składniki olejku, tj. β -kariofilen i α -humulen miały niewielki wpływ na jego fitotoksyczność. U obu badanych gatunków uszkodzenia błon pod wpływem oprysku olejkami goździkowym i eugenolem zmniejszały się w miarę wzrostu intensywności światła przed zastosowaniem oprysku olejkami. Uzyskane rezultaty mogą być podstawą do dalszych badań nad opracowaniem naturalnych preparatów chwastobójczych.

d) Podsumowanie dorobku naukowo - badawczego

Mój dotychczasowy dorobek naukowy obejmuje łącznie **37** oryginalnych prac naukowych (468 pkt. MNiSW zgodnie z rokiem opublikowania), w tym **18** opublikowanych w czasopismach indeksowanych w bazie JCR, oraz **52** komunikaty zjazdowe. Łączny Impact Factor (IF) publikacji wynosi **23,538**. Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora opublikowałam **32** prace (461 pkt. MNiSW; IF = 23,538), w tym **18** w czasopismach z bazy JCR, oraz **38** komunikatów w materiałach konferencyjnych. Sumaryczne zestawienie informacji na temat dorobku naukowo - badawczego oraz wskaźników dokonań naukowych ujęto w formie tabelarycznej (Tab. 1 i 2).

Tab. 1. Zestawienie czasopism, w których opublikowano prace naukowe wraz z IF oraz liczbą punktów przysługującą za publikacje w tych czasopismach

L.p.	Nazwa czasopisma	Liczba publikacji	IF (w roku opublikowania)	Punkty wg MNiSW*	Punkty wg MNiSW**
Czasopisma znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR)					
1.	Acta Physiologiae Plantarum	2	2,370	35	50
2.	Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus	1	0,523	20	20
3.	Biological Trace Element Research	1	1,523	13	15
4.	Communications in Soil Science and Plant Analysis	4 (1)	1,967 (0,589)	65 (15)	60 (15)
5.	Journal of Environmental Management	(1)	(4,010)	(35)	(35)
6.	Fresenius Environmental Bulletin	1	0,531	10	15
7.	Journal of Elementology	1	0,719	15	15
8.	Journal of Plant Nutrition	2	1,128	35	30
9.	Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues	1	1,637	27	25
10.	Plant Physiology and Biochemistry	1	2,928	35	35
11.	Environmental Science and Pollution Research	(1)	(2,741)	(30)	(30)
12.	Water, Air, & Soil Pollution	(1)	(1,702)	(25)	(25)
13.	Weed Science	1	1,759	30	35
Publikacje naukowe w czasopismach wymienionych w części B wykazu czasopism naukowych MNiSW					
14.	Acta Agrophysica	(1)	(-)	(14)	(14)
15.	Acta Agrobotanica	4	-	26	56
16.	Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus	2	(-)	8	40
17.	Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Horticulture	1 (1)	- (-)	5 (14)	12 (14)
18.	Folia Horticulturae	1	-	5	14
	Vegetable Crops Research Bulletin (obecnie: Journal of Horticultural Research)	1	-	6	14
19.	Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych	4	-	14	52
Publikacje nieujęte w aktualnym wykazie czasopism naukowych MNiSW					
20.	Biologia w Szkole	1	-	-	-
21.	Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences	(1)	(-)	(-)	(-)
22.	Materiały II Ogólnopolskiej Konferencji pt. „Zastosowanie kultur <i>in vitro</i> w fizjologii roślin”, Kraków 21-23 XI 1996.	1	-	-	-
23.	Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Sesja Naukowa (obecnie: Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego Krakowie)	1	-	1	-
ŁĄCZNIE, (w tym dla Osiągnięcia)		37 (7)	23,719 (9,042)	468 (133)	606 (133)

IF - w przypadku publikacji 2017 roku uwzględniono ostatni dostępny IF

* wg załączników do Komunikatu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za odpowiedni rok (wg roku opublikowania).

** wg Komunikatu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 9 grudnia 2016 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych wraz z liczbą punktów przyznawanych za publikacje w tych czasopismach

Tab. 2. Wskaźniki dokonań naukowych wg najważniejszych baz danych

Baza danych	Liczba dokumentów w bazie	Liczba cytowań	Indeks Hirscha
Web of Science (WoS)	19	88 (85*)	5
Scopus	20	107 (102*)	7

* bez autocytaowań

A) Kierowanie projektami badawczymi oraz udział w takich projektach

1. Główny wykonawca w projekcie badawczym nr N N310 430939 pt.: „Biofortyfikacja wybranych warzyw w selen w aspekcie wzrostu ich odporności na zasolenie lub metale ciężkie” finansowanym przez MNiSW (od 2011 r. NCN) w ramach 39. konkursu o dofinansowanie projektów badawczych. Okres realizacji projektu: 2010-2014.
2. Udział w badaniach finansowanych przez Fundację Państwa A. i S. Dekaban (The Dr A. and S. Dekaban Foundation) oraz Państwowy Komitet Badań Naukowych w Kanadzie (The Natural Sciences and Engineering Council of Canada, NRC). Okres realizacji projektu: VI-XII 2006.

B) Staże naukowe

1. Podoktorski staż naukowy w Uniwersytecie Kolumbii Brytyjskiej na Wydziale Nauk Rolniczych, Vancouver, Kanada (University of British Columbia UBC, Faculty of Agricultural Sciences, Vancouver, Canada) (22 VI - 8 XII 2006 r.)

C) Nagrody otrzymane za działalność naukową

1. - **2010 r.** - nagroda zespołowa I stopnia JM Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie za osiągnięcia naukowe w latach 2007-2009,
2. - **2003 r.** – nagroda zespołowa II stopnia JM Rektora Akademii Rolniczej w Lublinie za działalność naukową,
3. - **2001 r.** - nagroda indywidualna II stopnia JM Rektora Akademii Rolniczej w Lublinie za wyróżniającą się pracę doktorską.

Renata Matraszek-Gawron