

MAŁGORZATA WIERZBICKA

*Pracownia Środowiskowego Skażenia Roślin, Zakład Morfogenezy,
Instytut Biologii Eksperymentalnej Roślin, Uniwersytet Warszawski,
Krakowskie Przedmieście 26/28, 00-927 Warszawa*

ODDZIAŁYWANIE METALI CIĘŻKICH NA ROŚLINY

WSTĘP

W pierwszych latach XVIII wieku Urban Werne wykrył w roślinach szereg metali ciężkich. Od tego czasu datuje się rozwój naszej wiedzy nad mikroelementami, takimi jak: Fe, Mn, Cu, Zn, Mo i inne. Dokładnie określano próg i zapotrzebowanie oraz skutki jakie powodują ich niedobory. Rozwój tego kierunku badań był związany z rozwojem rolnictwa i ewidentnym znaczeniem odpowiednich ilości mikroelementów dla wielkości uzyskiwanych plonów (MENDEL i KIRKBY 1983). Natomiast sytuacja przeciwna — czyli badanie działania nadmiaru metali na rośliny — zwróciła uwagę badaczy w ostatnim okresie, w związku z postępującym skażeniem środowiska. Szczególnie niekorzystny jest fakt, iż poprzez rośliny nadmierne ilości wielu metali są włączone do łańcucha pokarmowego i przez to do obiegu biologicznego. Natomiast zmniejszenie ilości metali ciężkich w skażonych glebach jest niezwykle trudne, wskutek czego poważnie trzeba się liczyć z faktem, iż metale ciężkie jeszcze przez wiele dziesiątków lat będą powodować nadmierne skażenie roślin.

DZIAŁANIE METALI CIĘŻKICH NA ROŚLINY

CYNK

Spośród wszystkich mikroelementów, w glebach najczęściej występują niedobory cynku, co coraz częściej staje się przyczyną ograniczonej produkcji roślin. Natomiast nadmiernie wysokie ilości cynku występują lokalnie w glebach zanieczyszczonych przez przemysł. Są to głównie tereny bogate w rudy cynkowe i tereny wokół hut metali nieżelaznych. Nadmierne ilości cynku w glebach powodują zmniejszenie tempa wzrostu korzeni i liści oraz hamują pobieranie przez rośliny fosforu i żelaza (MENDEL i KIRKBY 1983).

Niektóre gatunki roślin tolerują duże stężenie cynku w swoich tkankach i są zdolne do wzrostu na glebach o nienormalnie dużej jego zawartości, na przykład roślinność na glebach galmanowych zawiera od 600–7800 mg/kg suchej masy

roślin, podczas gdy w rosnących na przeciętnych glebach roślinach poziom zwykle nie przekracza 100 mg/kg suchej masy roślin (GODZIK 1984).

MIEDŹ

Miedź jest mikroelementem pobieranym przez rośliny w bardzo małych ilościach (2–20 mg Cu/kg s.m.). Dlatego wysoki poziom miedzi w odpadach przemysłowych może być toksyczny, ponieważ miedź wypiera (zastępuje) inne jony potrzebne dla roślin — zwłaszcza żelazo. Powoduje to, że częstym objawem zatrucia miedzią są niedobory żelaza w roślinach.

Skażenie miedzią występuje na terenach rudonośnych lub na glebach, na których przez wiele lat stosowano opryskiwanie związkami miedzi (np. cieczą bordowską, którą powszechnie używano do oprysku winnic).

KOBALT

Jest ważnym składnikiem żywienia zwierząt, gdyż jest składnikiem witaminy B₁₂. Bardzo jest również prawdopodobne, że jest to pierwiastek niezbędny dla roślin wyższych.

Toksyczne działanie kobaltu jest związane z wypieraniem przez ten pierwiastek innych metali ciężkich z fizjologicznie ważnych centrów. Jego toksyczność objawia się chlorozą, nekrozą i całkowitym wędnięciem liści.

Ciekawym zjawiskiem wśród roślin jest istnienie gatunków wyjątkowo mało wrażliwych na wysokie stężenia kobaltu. Liście ich mogą zawierać 100 razy więcej kobaltu niż liście normalnych roślin. Na przykład roślina *Crotalaria cobalticola*, która rośnie wyłącznie na terenach zasobnych w kobalt (Zair), jest traktowana przez geologów jako roślina wskaźnikowa złóż rud kobaltowych. Zawiera 500–800 mg Co/kg s.m. (MENGEL i KIRKBY 1983).

KADM

Kadm jest pierwiastkiem bardzo podobnym do cynku. Podobnie jest pobierany przez rośliny i może go zastępować w funkcjach metabolicznych. Jednak jest to pierwiastek toksyczny i to zarówno dla roślin, jak i dla zwierząt. Wynika to z dużego powinowactwa kadmu do grup tiolowych enzymów i białek. Powoduje on przez to zakłócenie czynności enzymów.

Głównymi źródłami skażenia kadmem są nawozy fosforowe, które często zawierają dodatki związków kadmu, osady ściekowe (jeśli są stosowane jako nawozy), huty metali nieżelaznych oraz ścieranie w czasie jazdy opon samochodowych na arteriach komunikacyjnych.

Zawartość kadmu w roślinach zwykle mieści się w granicach 0,1–1,0 mg Cd/kg s.m., a toksyczne działanie kadmu u ludzi obserwowano już przy spożyciu roślin o zawartości kadmu powyżej 3 mg Cd/kg s.m..

Chroniczne zatrucia ludności zanotowano w Japonii, w mieście Toyoma. Były one skutkiem spożywania ryżu uprawianego na glebach zanieczyszczonych kadmem pochodzącym z wód kopalnianych. Następowaly wówczas zakłócenia metabolizmu wapnia i fosforu, co powodowało bardzo bolesną demineralizację kości (MENGEL i KIRKBY 1983).

OŁÓW

Ołów jest jednym z głównych zanieczyszczeń środowiska, o dużej toksyczności dla człowieka. Żadne inne zanieczyszczenia chemiczne nie są kumulowane przez ludzi w ilościach tak bliskich poziomowi toksycznemu klinicznie.

Głównym źródłem zanieczyszczeń ołowiem jest spalanie paliw płynnych w silnikach samochodowych. Pochodzi stąd 80% ołowiu znajdującego się w atmosferze. Po spaleniu benzyny samochodowej, z rury wydechowej wydostają się głównie nieorganiczne związki ołowiu (chalogenki). Około połowa tych zanieczyszczeń pada w odległości 100 m od drogi, a pozostała część bardzo rozprasza się w biosferze. Właśnie stąd pochodzi zwiększenie ilości ołowiu w lodowcach północnej Grenlandii — terenów tak bardzo oddalonych od wszelkiego przemysłu.

Można przyjąć, że w pyłe ulicznym zawartość ołowiu dochodzi do 1000 mg/kg. Przemysłowe źródła skażenia ołowiem pochodzą z hutnictwa miedzi, żelaza i stali, z wytopu rud cynku i produkcji cementu.

Toksyczne działanie ołowiu na organizmy żywe przede wszystkim jest związane z reakcją jonów ołowiatwych z grupami sulfhydryłowymi enzymów i białek lub też jony ołowiatwe wypierają inne metale z cząsteczek enzymów i białek.

Zanieczyszczenie roślin ołowiem zależy od odległości od drogi, zwarcia roślin, czasu ekspozycji, natężenia ruchu samochodowego, kierunku wiatru. I tak rośliny wzdłuż ruchliwych autostrad zawierają od 50–100 mg/kg s.m., podczas gdy w odległości 150 m już tylko 2–3 mg/kg s.m. (dopuszczalna norma w żywności wynosi 1,5 mg/kg s.m.).

Głównym miejscem, przez które ołów wnika do roślin, są podziemne części roślin — korzenie. Przy wysokich dawkach ołowiu występują silne toksyczne objawy zatrucia u roślin, przejawiające się hamowaniem procesów metabolicznych, takich jak fotosynteza, oddychanie, transpiracja, pobieranie wody. Hamowane są liczne reakcje enzymatyczne (WIERZICKA 1991, WOŹNY 1995).

TOKSYCZNE DZIAŁANIE METALI CIĘŻKICH

Zaburzenia w procesach fizjologicznych komórek pod wpływem metali ciężkich mogą być wynikiem działania dwóch różnych mechanizmów.

1. Bezpośredniej interakcji kationów z grupami SH metabolitów lub enzymów. Metale ciężkie wiążące się z grupami SH blokują enzymy bogate w te grupy, na przykład polimerazę DNA, RNA, ATP-azy.

2. Nasilenie procesów peroksydacji lipidów; oddziaływanie na poziomie błon biologicznych; powstające rodniki lipidowe i wysoce toksyczne produkty ich częściowej degradacji zaburzają układ redoksy. Często wiąże się to bezpośrednio z zaburzeniami homeostazy wewnątrzkomórkowego wapnia, przez hamowanie aktywności Ca (TUKENDORF 1989).

SKAŻENIE ŻYWNOSCI METALAMI CIĘŻKIMI

Dochodzimy obecnie do ważnego pytania. Czy jest możliwe, aby warzywa i rośliny użytkowe zawierały aż tak duże ilości metali ciężkich i stały się niebezpieczne dla ludzi?

Przecież związki metali ciężkich są toksyczne zarówno dla organizmów roślinnych, jak i zwierzęcych, a więc w silnie skażonym środowisku, warzywa i inne rośliny użytkowe nie powinny rosnąć i w związku z tym nie powinny również wydawać plonów. Czy więc rośliny użytkowe mogą stanowić jakieś istotne zagrożenie? Otóż okazuje się, że mogą stanowić poważne zagrożenie. Rośliny mogą prawidłowo rosnąć i wydawać plon zawierając toksyczne dla ludzi ilości metali. Opisano drastyczne przypadki zawartości dużych ilości ołowiu w rzodkiewkach, toksycznych wskutek tego dla organizmów ludzkich.

Okazuje się, że występujące w obszarach silnie skażonego środowiska dobrze widoczne uszkodzenia roślin, takie jak obniżenie plonów, hamowanie wzrostu roślin, spowodowane są przez gazowe zanieczyszczenia atmosfery, na przykład: dwutlenek siarki, tlenek azotu, fluor i ozon.

Bardzo silne zwiększanie ilości takich metali, jak ołów, kadm, cynk prowadzi również do zahamowania wzrostu, obniżenie biomasy, zmniejszenie plonów, większej podatności na choroby, a w skrajnych przypadkach do wyniszczenia roślin. Toksyczne objawy u roślin występują przy odpowiednio dużej zawartości w nich metali: Cu — ponad 30 mg/kg s.m.; Zn — ponad 1500 mg/kg s.m.; Mn — ponad 1000–1500 mg/kg s.m.; Cd — ponad 15 mg/kg s.m.; Pb — ponad 500 mg/kg s.m. Natomiast poziomy dopuszczalnej ilości metali w żywności są dużo niższe i na przykład dla ołowiu jest to 1,5 mg Pb/kg suchej masy, kadmu 0,15 mg/kg s.m. — czyli ponad 100x mniej niż próg pierwszych uszkodzeń.

Oznacza to zatem, że rośliny bez żadnego wpływu na swój rozwój i plonowanie mogą przekroczyć dopuszczalną dla nas normę zawartości metali w swoich tkankach. Jest to zjawisko niebezpieczne, ponieważ prowadzi do włączenia w obieg biologiczny nadmiernych ilości metali ciężkich.

I tak dochodzimy do pewnego paradoksu. Z faktu że rośliny dobrze rosną w środowisku skażonym metalami ciężkimi wcale nie należy się cieszyć. Wręcz przeciwnie. Dla nas jest niebezpieczna dorodna i dobrze wyglądająca żywność skażona nadmiernymi ilościami metali ciężkich.

Należy się teraz zastanowić, czy nie jest to problem przesadzony. Czy rzeczywiście dotyka on ludzi obecnie żyjących w Polsce. A może zakres tego problemu jest tylko lokalny i dotyczy obszarów wokół hut metali nieżelaznych?

Ciekawej oceny narażenia ludności na kupno warzyw skażonych metalami ciężkimi w okolicach Poznania, czyli terenu o przeciętnym skażeniu metalami ciężkimi, dokonali badacze z Akademii Rolniczej w Poznaniu (TYKSIŃSKI i współaut. 1989). Oznaczyli oni zawartość metali w warzywach kupowanych z przypadkowych stoisk na czterech targowiskach Poznania poczynając od marca aż do lipca. Po kupieniu warzywa myto —czyli traktowano je tak, jak się to zwykle robi w codziennym życiu i oznaczono ilość metali ciężkich (ołowiu, kadmu, cynku, żelaza) w jadalnych częściach roślin.

Stwierdzono, że przekroczenie dopuszczalnej zawartości ołowiu wystąpiło w 66,7% prób warzyw o jadalnych owocach (pomidor, ogórek) i w 68,2% prób warzyw korzeniowych (marchew, seler, rzodkiewka, pietruszka). Natomiast w warzywach liściastych takich jak sałata, seler, kapusta, szpinak, pietruszka, koper, szczypiorek w 15,4% prób wykazywało zawartość ołowiu powyżej normy.

Zawartość ołowiu nie zależała ani od miejsca ani daty zakupu warzyw. Wyliczając średnią arytmetyczną z bardzo dużej rozpiętości zawartości ołowiu w pojedynczych próbach stwierdzono, że przeciętnie warzywa zawierały 5 mg/kg s.m. co jest 3-krotnym przekroczeniem normy.

Gorsze wyniki uzyskano dla kadmu. Przekroczenie dopuszczalnej normy dla kadmu stwierdzono dla warzyw liściowych w 94,9% prób, dla korzeniowych w 72,7% prób, dla warzyw których częścią jadalną są owoce — 100% prób. Średnia zawartość kadmu dla wszystkich analizowanych warzyw wynosiła 0,82 mg/kg s.m., była prawie 6-krotnie wyższa od dopuszczalnej normy.

Natomiast część z badanych warzyw zawierała nadbyt małą ilość cynku (57% prób) i nadbyt małą ilość żelaza (82,4% prób). Stwierdzone niedobory są niekorzystne z punktu widzenia żywienia człowieka.

Wydaje się, że wyniki te dobrze ilustrują sytuację, jakiej może spodziewać się przeciętny człowiek w Polsce. Oczywiście są to dane lokalne, które fragmentarycznie ilustrują sytuację. Jednak okolice Poznania nie są terenem szczególnie skażonym metalami ciężkimi, a zastosowana w badaniach tak prosta metodyka pobierania prób do badań przy dużej liczbie powtórzeń, dobrze ilustruje sytuację z jaką powinna się liczyć przeciętna osoba w Polsce.

STRATEGIE OBRONNE ROŚLIN PRZED METALAMI CIĘŻKIMI

Dalsza część tego artykułu będzie poświęcona rozważaniu problemu — w wyniku jakich procesów rośliny potrafią znosić w swoich tkankach wysokie ilości metali ciężkich ze szczególnym uwzględnieniem ołowiu. Problem ten można analizować na poziomie komórkowym, oraz na poziomie całego organizmu roślinnego.

MECHANIZMY ODPORNOŚCI NA METALE CIĘŻKIE NA POZIOMIE KOMÓRKOWYM

Odporność roślin na metale ciężkie jest związana ze strategią wykluczającą (LEWITT 1980). Polega ona na szybkim uruchamianiu procesów pozwalających wyłączyć nadmiar wolnych jonów z ogólnego metabolizmu komórki.

Wiązanie ze związkami chemicznymi

Stosunkowo powszechnie, wzrost wewnątrzkomórkowego stężenia metali powoduje indukcję syntezy niskocząsteczkowych białek bogatych w grupy SH, zwanych fitochelatynami. Białka te charakteryzują się wysoką zawartością cysteiny i glutamionu. Wykryto je u kilkuset roślin, począwszy od purpurowych glonów, paproci, a skończywszy na najbardziej ewolucyjnie zaawansowanych roślinach z rodziny *Orchidales* (TUKENDORF 1989, WOŹNY 1995).

Główną funkcją fitochelatyn jest utrzymanie homeostazy metali w komórce. Mogą one czasowo przyjmować takie metale, jak Zn, Cu, Cd, Pb, aby obniżyć

stężenie wolnego metalu w komórce. Równocześnie związki te mogą być źródłem potrzebnego komórce metalu, jako, na przykład, kofaktora dla enzymów, co pozwala utrzymać niezakłócony metabolizm komórki. Jest bardzo prawdopodobne, że fitochelatyny pełnią również rolę systemu przenoszącego jony metali z cytoplazmy do wakuoli, w której jony oddysocjują i mogą być wiązane na przykład przez szczawiany.

Poza fitochelatynami są znane jeszcze inne związki odpowiedzialne za wyłączenie nadmiaru wolnych jonów z ogólnego metabolizmu komórki. Wzrostowi jonów cynku, niklu i chromu w środowisku zewnętrznym towarzyszy znaczna akumulacja kwasu jabłkowego w cytoplazmie i kwasu szczawiowego w wakuoli. Kwasy te są czynnikami chelatującymi jony metali ciężkich.

Ponadto stwierdzono wiązanie miedzi przez aminokwasy, takie jak cysteina i histydyna, a glin był wiązany z kwasami nukleinowymi i odkładany w jądrach komórkowych w postaci agregatów (TUKENDORF 1989, SHAW 1990).

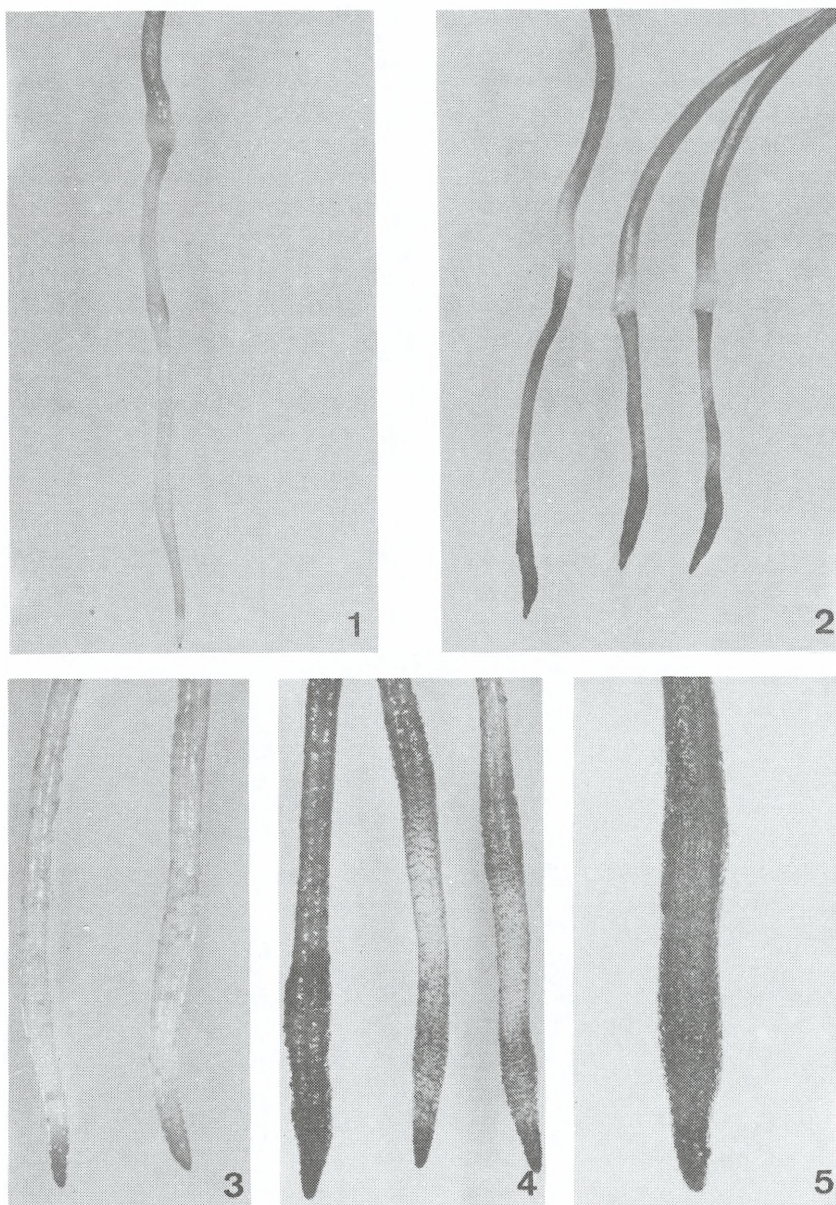
Gromadzenie metali w obszarach bezpiecznych dla metabolizmu komórkowego na przykładzie ołowiu

Korzenie roślin mają zdolność pobierania i gromadzenia dużych ilości metali w swoich tkankach (tab. 1, fot. 1–5), ograniczając przy tym jego transport do nadziemnych części roślin (JONES i współaut. 1973). A zatem właśnie w korzeniach znajdują się podstawowe mechanizmy rządzące gospodarką ołowiem w roślinach.

Ołów po wejściu do korzenia szybko przenika przez poszczególne warstwy komórek korzeni — w tempie 1 warstwa/5 minut (WIERZBICKA 1987b). W komórkach korzeni ołów jest unieszkodliwiany przez gromadzenie w wakuolach (tab. 2, fot. 1–5, tab. 3 fot. 1, 6), ścianach komórkowych (tab. 3, fot. 2–6) przestworach międzykomórkowych (tab. 2, fot. 2, tab. 3, fot. 4), pęcherzykach diktiosomalnych i siateczce śródplazmatycznej. Z cystern siateczki śródplazmatycznej powstaje rozbudowany system wakuolarny oraz następuje trawienie zatrutych obszarów protoplastu połączone z powstawaniem wakuol autofagowych zawierających złoże ołowiu (WIERZBICKA 1995, WOŹNY 1995). Ciekawy proces unieczynniania ołowiu połączony z wydalaniem opisali MALONE i współautorzy (1974) w korzeniach kukurydzy (*Zea mays*). Stwierdzili oni, że ołów jest transportowany w pęcherzykach diktiosomalnych z wnętrza komórek do ściany komórkowej wraz z materiałem ściany komórkowej i w ten sposób wyrzucany poza obręb komórki. W komórkach korzeni cebuli jadalnej (*Allium cepa*) obserwowano inny proces wyrzucania ołowiu z wnętrza komórki. Następowoło wydalanie ołowiu z protoplastu do ściany komórkowej poprzez palczaste wypuklenie plazmolemy (plazmotubule) (WIERZBICKA 1984).

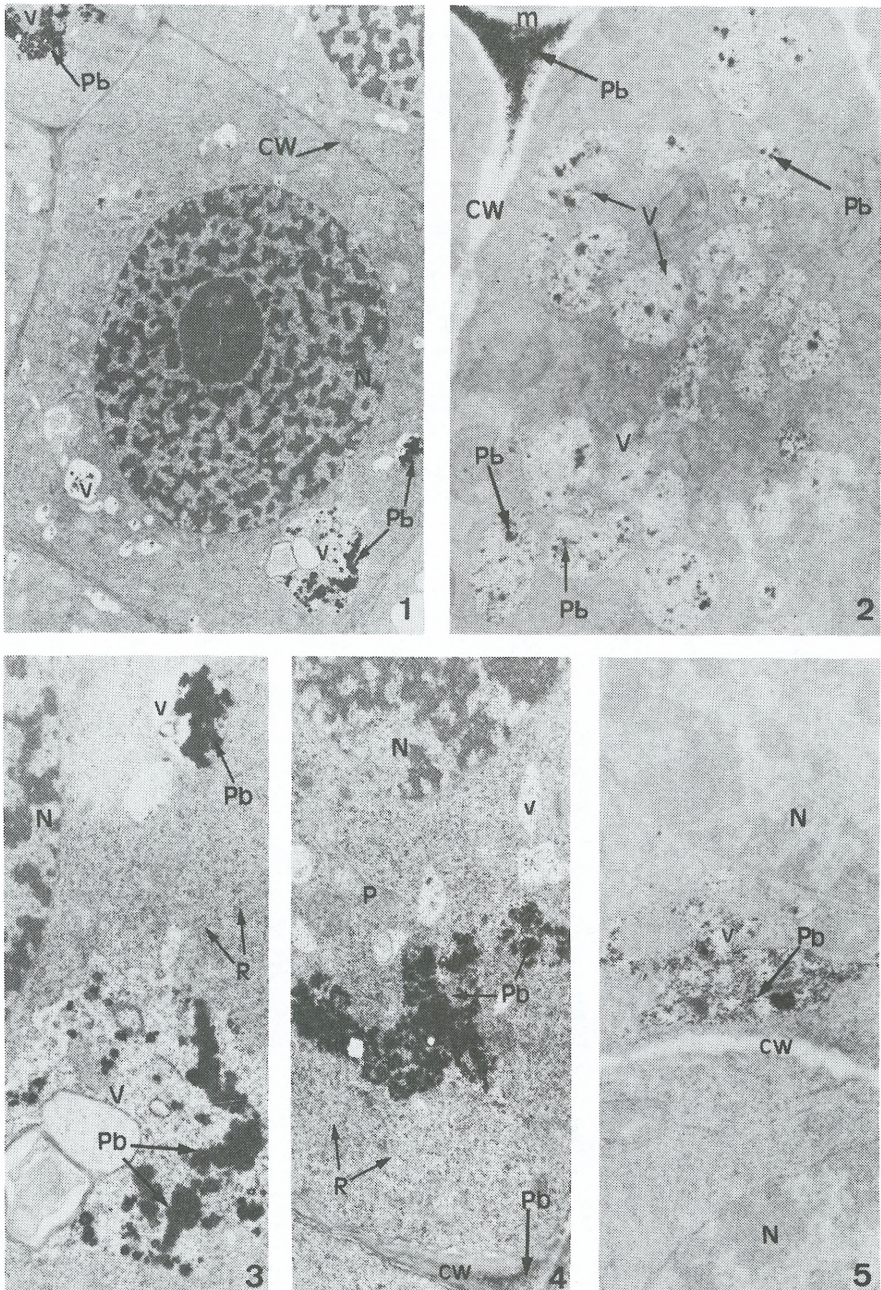
Powyższe dane wskazują na duże możliwości organizmów roślinnych w przystosowaniu się do zatrutego środowiska i detoksykacji groźnej dla komórki trucizny. Wart podkreślenia jest fakt, że możliwości obronne roślin wydają się być znacznie większe niż organizmów zwierzęcych chociażby dlatego, że komórki zwierzęce nie posiadają ani ściany komórkowej, ani tak rozwiniętego systemu wakuolarnego, jak komórki roślinne. A zatem odmienny system wydalniczy

*Tablice fotograficzne pochodzą z pracy magisterskiej Baranowskiej A. (1995).



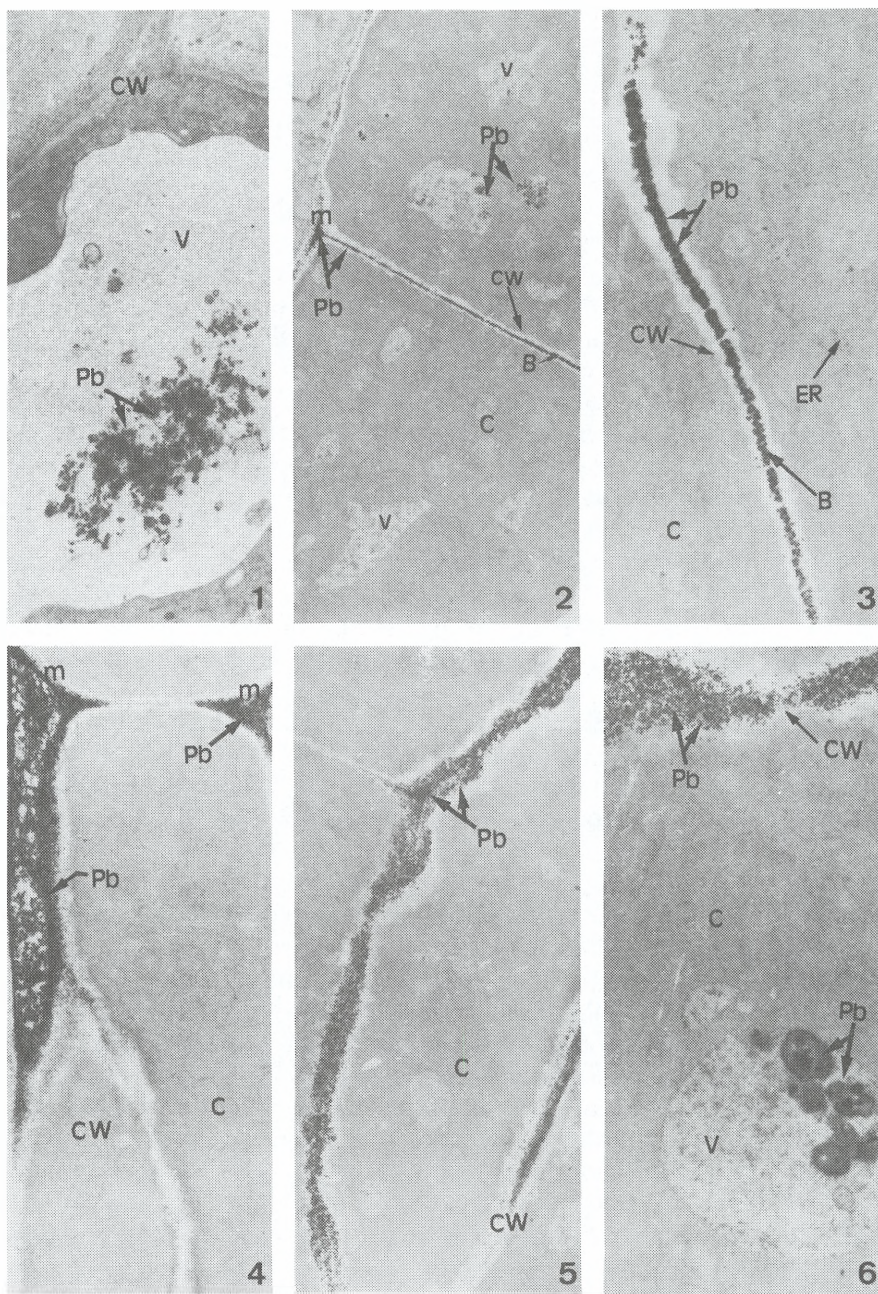
*Tablica 1. Lokalizacja ołowiu w korzeniach cebuli jadalnej *Allium cepa* L. za pomocą metody rodizonianowej. Rośliny hodowano przez 72 godziny w pożywce mineralnej z dodatkiem soli ołowiu ($4 \text{ mg/dm}^3 \text{ Pb}^{2+}$ z PbCl_2), lub bez dodatku ołowiu (kontrola). Ciemne wybarwienie korzeni wskazuje na obecność ołowiu. Fot. 1-4 pow. 5x, fot. 5 pow. 9x.

Fot. 1. Korzenie siewek — rośliny kontrolne, które nie były traktowane roztworem soli ołowiu.
 Fot. 2. Korzenie siewek — rośliny doświadczalne traktowane PbCl_2 . Fot. 3. Korzenie przybyszowe — rośliny kontrolne, które nie były traktowane roztworem soli ołowiu. Fot. 4, 5. Korzenie przybyszowe — rośliny doświadczalne, traktowane PbCl_2 .



Tablica 2. Ultrastrukturalna lokalizacja ołowiu w komórkach merystematycznych wierzchołków korzeni siewek *Allium cepa* L. przeprowadzona w mikroskopie elektronowym. Rośliny traktowano ołowiem ($4\text{mg Pb/dm}^3 \text{ Pb z PbCl}_2$) przez 54 godziny. Widoczne czarne złogi ołowiu (Pb) głównie w wakuolach komórek (V).

CW — ściana komórkowa, N — jądro, P — proplastyd, R — rybosomy, V — wakuola, Pb — złogi ołowiu, m — przestwór międzykomórkowy. Fot. 1 — pow. 14000x; fot. 2, 3 — pow. 35000x; fot. 4, 5 — pow. 60000x.



Tablica 3. Ultrastrukturalna lokalizacja ołowiu w komórkach merystematycznych wierzchołków korzeni siewek *Allium cepa* L. przeprowadzona w mikroskopie elektronowym. Rośliny traktowano ołowiem ($4\text{mg Pb/dm}^3 \text{ Pb z PbCl}_2$) przez 54 godziny. Widoczne czarne złogi ołowiu (Pb) głównie w ścianach komórkowych (CW).

CW — ściana komórkowa, V — wakuola, Pb — złogi ołowiu, C — cytoplazma, B — błazka środkowa ściany komórkowej, m — przestwór międzykomórkowy, ER — siateczka śródplazmatyczna.
 Fot. 1 — pow. 15000x; fot. 2, 5 — pow. 20000x; fot. 3, 6 pow. — 45000x; fot. 4 — pow. 25000x.

komórek roślinnych i zwierzęcych wydaje się być podstawową różnicą w zdolności obrony przed tak silną trucizną, jaką jest ołów.

MECHANIZMY ODPORNOŚCI NA METALE CIĘŻKIE NA POZIOMIE CAŁEGO ORGANIZMU NA PRZYKŁADZIE
OŁOWIU

Miejsca szczególnie chronione w roślinach

W korzeniach ołów jest gromadzony początkowo z podobną intensywnością na całej długości. Jednak już po kilku godzinach jest on przenoszony z wierzchołków korzeni do wyższych części roślin. Powoduje to znaczne zmniejszenie ilości ołowiu w wierzchołkach korzeni, a przez to ochronę komórek merystematycznych korzenia, które są odpowiedzialne za jego wzrost.

Drugim obszarem szczególnie chronionym przed ołowiem jest wyspa komórek znajdujących się w samym szczycie korzenia — tak zwane komórki cichego centrum. Obszar ten zawiera komórki inicjalne, które uaktywniają się głównie w procesach regeneracji korzenia, co ma najistotniejsze znaczenie przy uszkodzeniu korzenia. Okazało się, że ołów od początku nie przenika do tego obszaru korzenia, a zatem istnieje mechanizm ochraniający te szczególnie ważne komórki (WIERZBICKA 1987a).

Trzecim obszarem, do którego nie przenikają toksyczne związki ołowiu, są generatywne części kwiatu. Zalążki, a szczególnie woreczki zalążkowe, pozostają wolne od ołowiu nawet przy znacznym skażeniu wegetatywnych części roślin (pędu i korzenia). Dlatego też rozwijające się z tych części kwiatu nasiona roślin z reguły nie zawierają ołowiu w swoich tkankach (SHAW 1990). Również okrywy nasienne większości gatunków roślin szczelnie chronią nasiona przed związkami ołowiu aż do momentu uszkodzenia ciągłości tych okryw (WIERZBICKA i współaut. 1986).

Jako czwarty obszar można wymienić całe nadziemne części roślin. W korzeniach znajdują się bariery ograniczające transport ołowiu do części nadziemnych roślin. Rzeczywistą barierą jest najbardziej wewnętrzna warstwa komórek kory pierwotnej — endoderma. Komórki te znajdują się na pograniczu pomiędzy centralną częścią korzenia — walcem osiowym, zawierającym komórki przewodzące, a korą pierwotną, która ma położenie bardziej peryferyczne. To właśnie w komórkach endodermy jest zatrzymywany ołów wędrujący wraz z ruchem wody w głąb korzenia. Chroni to walec osiowy przed wnikaniem ołowiu a przez to mocno jest ograniczone przenoszenie ołowiu do nadziemnych części roślin. Zwykle 70%–95% pobranego przez roślinę ołowiu jest zatrzymywane w korzeniu. W wyniku tego procesu jest chroniony przed tą trucizną aparat fotosyntetyczny roślin znajdujący się w zielonych częściach roślin (WIERZBICKA 1995).

Jak się ostatnio okazało, miejscem, w którym ołów może być zatrzymywany, jest również organ spichrzowy — cebula.

W korzeniu *Allium cepa* — cebuli jadalnej, jest zatrzymywane około 30% ołowiu pobranego przez roślinę, a aż 70% przechodzi do nadziemnych części roślin, z czego około 40% znajdowało się w spichrzowym organie — cebuli, a 30% w zielonych liściach. Przemieszczanie tak znacznych ilości ołowiu do organu spichrzowego wydaje się być korzystne dla rośliny, natomiast bardzo niekorzy-

stne dla nas, ponieważ oznacza gromadzenie ołowiu w jadalnych częściach *Allium cepa* (BARANOWSKA 1995).

ZYWIENIE MINERALNE ROŚLIN

Metale ciężkie w tym również ołów, znajdując się w podłożu, w którym rosną rośliny, zwykle hamują pobieranie i transport wielu makro- i mikroelementów, co często powoduje obniżenie właściwych stosunków składników mineralnych w roślinach. Powoduje to, że u roślin obok odporności na dany metal rozwija się również odporność na obniżony poziom składników mineralnych. Może również pojawiać się możliwość zwiększonego ich pobierania (ANTOSIEWICZ 1992). Oznacza to, że u roślin odpornych na działanie ołowiu mogą również wystąpić obniżone wymagania pokarmowe. Szczególnie ważny pod tym względem okazał się wapń. Stwierdzono, że rośliny odporne na deficyt wapnia osiągają wysoki poziom odporności na ołów. Można więc powiedzieć, że jeśli roślina dobrze znosi nazbyt małe ilości wapnia, to równocześnie dobrze znosi toksyczne działanie ołowiu. Zależność ta została niedawno wykryta i mechanizm tego procesu nie jest jeszcze znany, a wyjaśnienie warto jest dalszych badań (ANTOSIEWICZ 1995).

GOSPODARKA WODNA ROŚLIN

Wiele metali ciężkich, w tym również ołów, powoduje zakłócenia w gospodarce wodnej roślin. Powoduje to, że u roślin odpornych na działanie metali ciężkich może wytworzyć się również zwiększona odporność na deficyt wody. Wyraźne anatomiczne przystosowanie do znoszenia deficytu wody stwierdzono u rośliny *Silene inflata* var. *angustifolia* rosnącej na hałdzie galmanowej w okolicy Olkusza (PANUFNIK i WIERZBICKA 1993). Rośliny pochodzące z tych terenów mają mniejszą powierzchnię asymilacyjną liści, a komórki liści są powiększone, przez co uzyskują zdolność do gromadzenia wody w porównaniu z roślinami rosnącymi w terenach nieskażonych. Okazało się, że oszczędna gospodarka wodna sprzyja dobremu tolerowaniu nadmiernych ilości ołowiu.

Ołów jest mniej szkodliwy dla roślin, jeśli rosną one w warunkach wysokiej wilgotności powietrza. Natomiast w warunkach niskiej wilgotności powietrza (niewielkiej suszy) należy spodziewać się, że większa ilość ołowiu będzie pobierana i transportowana do nadziemnych części roślin. Może być to przyczyną zwiększenia skażenia jadalnych części roślin, jak również zwiększenia puli ołowiu włączonej do obiegu biologicznego (BARANOWSKA 1995).

POCHODZENIE MECHANIZMÓW ODPORNOŚCIOWYCH ROŚLIN NA METALE CIĘŻKIE

Jak jest możliwe pojawienie się mechanizmów tak wysokiej odporności roślin na metale ciężkie, takich jak ołów (co opisano powyżej), skoro pierwiastek ten dopiero od 60 lat znajduje się w nadmiernych ilościach w glebie. Jest to nazbyt krótki czas na wytworzenie w drodze ewolucji tak złożonych procesów dających w efekcie dobre tolerowanie przez rośliny nadmiernych ilości metali ciężkich. Jak więc doszło do ich wytworzenia.

Z porównania działania nadmiernych ilości składników odżywczych, takich jak cynk i miedź oraz metali balastowych (czyli całkowicie zbędnych dla metabolizmu roślin), takich jak ołów i kadm wynika, że rośliny mogą w obu wypadkach wykorzystywać te same mechanizmy odporności (MICHALAK i WIERZBICKA 1995). Wydaje się więc, iż rośliny nie mając zdolności ruchu i nie mogąc ani zmienić ani wybierać miejsca swojego bytowania, wykształciły w drodze ewolucji duże możliwości bronięcia się przed różnego typu związkami, które mogą przypadkowo być dostarczone w różnych ilościach i w różnych momentach życia roślin (np. zalewanie wodą o różnym składzie).

Sugerujemy więc, że rośliny broniąc się przed nadmiernymi ilościami metali mogą wykorzystywać drogi wytworzone w toku ewolucji dla działania nadmiernych ilości składników odżywczych. W ten sposób w chwili obecnej rośliny mogą skutecznie bronić się przed presją skażonego metalami ciężkimi środowiska.

INFLUENCE OF HEAVY METALS ON PLANTS

Summary

Due to increased pollution of the environment, plant pollution by heavy metals becomes a serious problem. The most noxious are excessive amounts of such elements as zinc, copper and cobalt, which simultaneously (in minute amounts) are necessary for plant metabolism, or of balast elements, such as cadmium and lead, which being superfluous in the plant and animal metabolism, at the same time are toxic. Their effect consists most often in blocking of enzymes by binding to their -SH groups. The uptake by plants of heavy metals leads to their incorporation into the biological circulation.

Plants possess efficient strategies which protect them against the toxic action of metals and simultaneously accumulate them in large amounts in some tissues. On the cellular level, these protection mechanisms consist in binding metals with various types of chemical compounds (e.g. phytochelatins), and in accumulating the metals in those plant cell areas (mainly the walls and vacuoles) where they remain inert. On the level of the whole organism, the protection concerns first of all the areas that are especially sensitive, e.g. the meristematic cells. The resistance of plants against heavy metals is enhanced by resistance towards calcium shortage and water deficit.

It seems that plants, to counteract the toxic effects of heavy metals, take advantage of the defensive strategies formed in the course of evolution for protection against excessive amounts of some components present in natural nutrients.

LITERATURA

- ANTOSIEWICZ D., 1992. *Adaptation of plants to an environment polluted with heavy metals*. Acta Soc. Bot. Pol. 61, 281-299.
- ANTOSIEWICZ D., 1995. *Do calcium — deficiency tolerant plants better tolerate the presence of toxic lead?* Environ. Exp. Bot. (w druku).
- BARANOWSKA A., 1995. *Wpływ warunków wilgotności względnej powietrza na reakcję Allium cepa L. var. Balstora na ołów*. Praca magisterska, Pracownia Środowiskowego Skażenia Roślin, Zakład Morfogenezy, IBER, Uniwersytet Warszawski.
- GODZIK B., 1984. *Tolerancja wybranych gatunków roślin na metale ciężkie*. Praca doktorska, Instytut Botaniki PAN, Kraków.
- JONES L. H. P., CLEMENT C. R., HOPPER M. J., 1973. *Lead uptake from solution by perennial ryegrass and its transport from roots to shoots*. Plant Soil. 38, 403-414.
- LEVITT J., 1980. *Responses of plants to environmental stress*. Academic Press, New York.
- MALONE C., KOEPPE D. E., MILLER R. J., 1974. *Localization of lead accumulated by corn plants*. Plant Physiol. 53, 388-394.
- MENGEL K., KIRKBY E. A., 1983. *Podstawy żywienia roślin*. PWRiL, Warszawa.

- MICHALAK E., WIERZBICKA M., 1995. Różnica w tolerancji na metale ciężkie pomiędzy roślinami *Allium cepa* L. rozwijającymi się z cebul i nasion. 50 Zjazd Polskiego Towarzystwa Botanicznego, Kraków, 26 sierpień–1 lipiec.
- PANUFNIK D., WIERZBICKA M., 1993. *Adaptation of Silene inflata plants to growth on the calamine waste heaps*. Central and Eastern European Regional Meeting, Porąbka-Kozubnik, Poland, 23–26 August.
- SHAW A. J., 1990. *Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects*. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.
- TUKENDORF A., 1989. *Proteins and peptides binding heavy metals*. Post. Bioch. 35, 141–153.
- TYKSIŃSKI W., BRES W., GOLCZ A., KOMOSA A., KOZIK E., ROSZYK J., 1989. Zawartość ołowiu, kadmu, cynku i żelaza w warzywach sprzedawanych na terenie Poznania. Biul. Warz. Suppl. 121–128.
- WIERZBICKA M., 1984. *Ultrastructural location of lead in the cell walls in Allium cepa L. roots*. Post. Biol. Kom. 11, 509–512.
- WIERZBICKA M., ŁOBODZIŃSKA B., GODZIK B., 1986. *Seed coats as barriers for lead in plants resistant and nonresistant to heavy metals*. Post. Biol. Kom. 13, 377.
- WIERZBICKA M., 1987a. *Lead accumulation and its translocation barriers in roots of Allium cepa L. — autoradiographic and ultrastructural studies*. Plant Cell Environ. 10, 17–26.
- WIERZBICKA M., 1987b. *Lead translocation and localization in Allium cepa roots*. Can. J. Bot. 65, 1851–1860.
- WIERZBICKA M., 1991. *Skażenie roślin ołowiem*. Konferencja Zanieczyszczone Środowisko a Fizjologia Roślin, Warszawa 10–11 maj, PTB, Warszawa, 101–108.
- WIERZBICKA M., 1995. *How lead loses its toxicity to plants*. Acta Soc. Bot. Pol. 64, 81–90.
- WOŹNY A., 1995. *Ołów w komórkach roślinnych, pobieranie, reakcje, odporność*. Sorus, Poznań.