

KARINA KRZCIUK

*Zakład Geochemii i Ochrony Środowiska  
Instytut Chemii Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach  
Świętokrzyska 15G, 25-406 Kielce  
E-mail: karina.krzciuk@ujk.edu.pl*

## HIPERAKUMULATORY ROŚLINNE – CHARAKTERYSTYKA, BADANIA I ZNACZENIE PRAKTYCZNE

### WSTĘP

Ponadprzeciętna akumulacja pierwiastków śladowych przez rośliny jest przedmiotem badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych. Hiperakumulatory po raz pierwszy zostały opisane w latach 70. XX w. Ich wyjątkowość polega na zdolności do pobierania niektórych metali i niemetali z gleby oraz do magazynowania ich w nadziemnych organach. Proces ten dotyczy zazwyczaj pierwiastków zbędnych lub toksycznych dla większości roślin, co czyni hiperakumulatory tym bardziej niezwykłymi. Od blisko połowy wieku wciąż wzrasta liczba badań nad hiperakumulatorami, szczególnie w dyscyplinach takich jak biotechnologia, inżynieria genetyczna czy fizjologia. Najnowsze trendy rozszerzają wachlarz zainteresowań tymi roślinami o nanotechnologię. Ponadto, hiperakumulatory i ich możliwości aplikacyjne wpisują się w obecne trendy związane ze

zrównoważonym rozwojem współczesnego świata. Oprócz roli w ochronie środowiska, rośliny te odgrywają również rolę w ochronie zdrowia człowieka. W niniejszym artykule przedstawiono przegląd najnowszych informacji dotyczących roślin hiperakumulujących, w tym źródła pierwiastków śladowych, najważniejsze informacje dotyczące hiperakumulatorów i opisujące je parametry, a także metody poszukiwań, badania i wykorzystanie roślin hiperakumulujących. W pracy opisano rośliny, które wykazują naturalne zdolności do hiperakumulacji, a pominięto problematykę hiperakumulacji wspomaganą chemicznie (np. poprzez dodatek związków chelatujących) oraz indukowanej metodami inżynierii genetycznej. Odpowiednie informacje na ten temat można znaleźć w publikacji ANDERSON i współaut. (2001).

### ŹRÓDŁA I BIODOSTĘPNOŚĆ PIERWIASTKÓW ŚLADOWYCH W GLEBIE

Pierwiastki śladowe (ang. trace elements, TEs) definiowane są jako pierwiastki chemiczne, których zawartość w glebie zwykle nie przekracza  $1000 \mu\text{g} \times \text{kg}^{-1}$  (HEM 1992). Do TEs należą metale i niemetale, m.in.: kadm, ołów, rtęć, chrom, arsen, selen, kobalt czy nikiel. Pierwiastki śladowe często mylnie nazywane są pierwiastkami toksycznymi; poprawne jest natomiast używanie terminu potencjalnie toksyczne pierwiastki śladowe

(ang. potentially toxic trace elements, PTEs) (HOODA 2010), ponieważ ich toksyczność bezpośrednio zależy od stężenia i warunków środowiska. Gleba stanowi największy rezerwuwar zanieczyszczeń chemicznych, w tym PTEs. Ich źródła można podzielić na naturalne oraz antropogeniczne (BOLAN i współaut. 2014). Większość pierwiastków pochodzenia geogenicznego dostaje się do gleby w procesach wietrzenia skał i minerałów. Pierwiastki

pochodzące z tego źródła mają najczęściej dużo niższą biodostępność, aniżeli te pochodzenia antropogenicznego (BOLAN i współaut. 2014). Najważniejsze, przemysłowe źródła PTEs w glebie to przede wszystkim działalność hutnicza, górnicza, transport, spalanie paliw. Toksyczność pierwiastków śladowych jest ściśle uzależniona od ich biodostępności. Na dostępność związków w glebie wpływają procesy mobilizacji i remobilizacji, składające się na ogólną dynamikę pierwiastków w glebie. Procesy kształtujące mobilność pierwiastków w pedosferze to przede wszystkim procesy sorpcji i desorpcji, procesy strącania i rozpuszczania, redukcja i utlenianie oraz metylacja i demetylacja (BOLAN i współaut. 2014). Inne czynniki to: pH gleby, obecność innych form pierwiastków, wymiana jonów, tekstura i struktura gleby, kationowa

pojemność wymienna gleby (SIWEK 2008a), przewodność elektrolityczna, potencjał redoks, przepuszczalność dla wody, zawartość materii organicznej i typ gleby (MUHAMMAD i współaut. 2012). Pierwiastki śladowe są mniej mobilne w warunkach redukujących, niż w warunkach utleniających (HOODA 2010). Odczyn gleby nie jest stały i zmienia się w czasie i przestrzeni. Co więcej, rozpuszczalność metali, takich jak np.: Cd, Zn wzrasta wraz ze spadkiem pH (MUHAMMAD i współaut. 2012). Do pozostałych czynników mających wpływ na biodostępność pierwiastków śladowych należą: wilgotność, warunki klimatyczne, pora dnia i pora roku. Czynniki biotyczne, wpływające na pobieranie PTEs z gleby to: rodzaj, gatunek i genotyp rośliny, stopień rozbudowy i jakość systemu korzeniowego (SIWEK 2008a).

#### METALOFITY

Metalofity są to rośliny przystosowane do wzrostu i rozwoju na glebach wzbogaconych w pierwiastki śladowe. Stanowią one

przedmiot zainteresowań naukowych różnych grup badawczych. Zostały między innymi szczegółowo opisane w pracach ALFOR-

Tabela 1. Strategie wobec nadmiaru pierwiastków śladowych oraz przykłady roślin zaliczanych do różnych grup metalofitów (rośliny wykluczające, wskaźniki, akumulatory, a w tym hiperakumulatory).

	Strategia akumulacji	Gatunek	Literatura
R. wykluczające	Strategia wykluczania (ang. shoot exclusion) polega na utrzymywaniu niskiej zawartości pierwiastków śladowych w pędach i akumulowaniu ich w korzeniach.	<i>Armeria maritima</i>	(DAHMANI-MULLER i współaut. 2000)
Wskaźniki	Akumulacja pierwiastków śladowych proporcjonalnie do ich zawartości w glebie. Wskaźniki są wykorzystywane w ocenie stanu środowiska.	<i>Viola calaminaria</i> , <i>Nicotiana tabacum</i>	(FRÄNZLE 2006)
Akumulatory	Stężenia pierwiastków śladowych w pędach przewyższają stężenia w korzeniach. Rośliny te zazwyczaj wykształcają mechanizmy neutralizujące toksyczność akumulowanych substancji.	<i>Taraxacum mongolicum</i> , <i>Bidens tripartite</i>	(WEI i współaut. 2008, 2009)
Hiperakumulatory	Zdolność do ponadprzeciętnej akumulacji metali śladowych w tkankach. Rośliny zaliczane do hiperakumulatorów efektywnie pobierają pierwiastki z gleby w ilościach nawet 50–500 krotnie wyższych od ich średnich zawartości w roślinach, nie wykazując przy tym objawów toksyczności.	<i>Noccaea caerulescens</i> , <i>Rumex acetosa</i>	(OZTURK i współaut. 2003, SHAN i współaut. 2011)

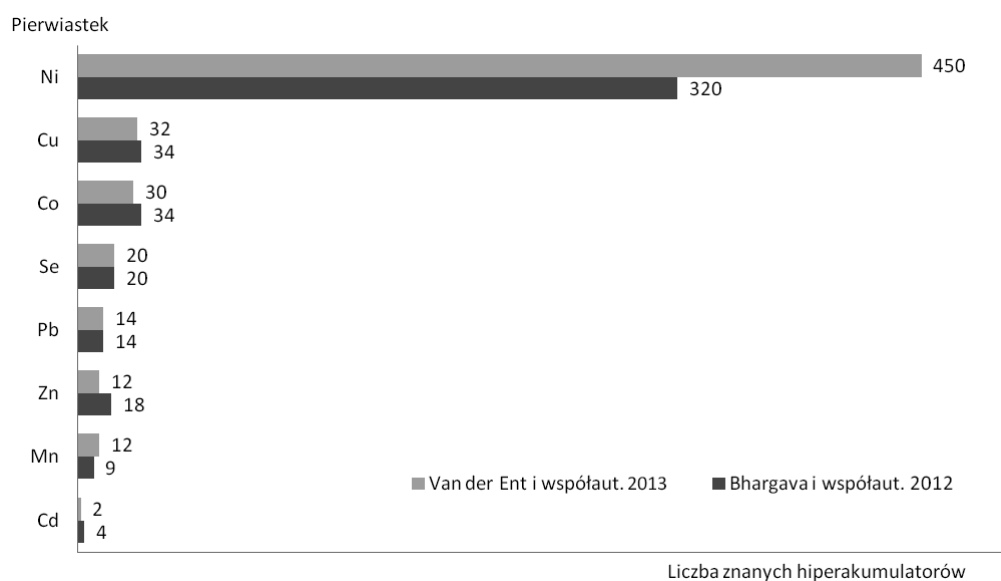
DA i współaut. (2010) i BAKERA i współaut. (2010). Rośliny te wykształciły szereg mechanizmów obronnych i przystosowawczych do trudnych warunków (ALFORD i współaut. 2010). Metalofity można podzielić na trzy grupy: rośliny wykluczające, wskaźniki i rośliny akumulujące, a wśród nich hiperakumulatory (SIWEK 2008b). W Tabeli 1 zostały przedstawione strategie roślin w odpowiedzi na nadmiar pierwiastków śladowych w glebie oraz przykłady roślin zaliczanych do

różnych grup metalofitów. Hiperakumulatory stanowią podgrupę akumulatorów, jednak dla ukazania ich wyjątkowych właściwości, zostały zaprezentowane w oddzielnym wierszu tabeli. Metalofity są to zazwyczaj rośliny endemiczne, najczęściej znajdowane na glebach serpentynitowych. Gleby te są zubożone w biopierwiastki (N, P, K, S, Ca), a wzbogacone w fitotoksyczne metale śladowe (Ni, Co, Mn, Cr). Najwięcej metalofitów należy do rodziny *Brassicaceae* (ALI i współaut. 2013).

## HIPERAKUMULATORY

Tabela 2. Etapy ewoluowania definicji hiperakumulatora.

Rok	Definicja/opis	Literetura
1976/1977	Hiperakumulator definiowany jest jako roślina zawierająca w swoich tkankach nikiel w zakresie powyżej 1000 mg×kg <sup>-1</sup> suchej masy.	(JAFRÉ i współaut. 1976, BROOKS i współaut. 1977)
1989	Hiperakumulatory to rośliny, które zawierają w swoich nadziemnych tkankach więcej niż 1000 mg×kg <sup>-1</sup> Ni, Co, Cu, Cr, Pb w suchej masie i więcej niż 10000 mg×kg <sup>-1</sup> Zn i Mn w suchej masie.	(BAKER i BROOKS 1989)
1992	Reeves rozszerzył i sprecyzował poprzednie definicje, dodając stwierdzenie warunkujące, iż rośliny te muszą wykazywać silne właściwości hiperakumulacyjne w warunkach naturalnych, bez żadnych objawów toksyczności oraz być zdolne do rozmnażania.	(REEVES 1992)
1997	Rośliny lądowe zdolne do akumulowania pierwiastków, a w tym metali, takich jak Zn, Mn, Co, Ni nazywane są hiperakumulatorami.	(KRÄMER i współaut. 1997)
1998	Dla hiperakumulatorów stężenie badanego pierwiastka jest co najmniej 10–500 razy wyższe od typowych zawartości w roślinach zebranych na tym samym obszarze.	(SHEN i LIU 1998)
1999	Hiperakumulatory to rośliny akumulujące pierwiastki śladowe w swoich tkankach w ilościach o 1–10% wyższych, w porównaniu do pozostałych roślin.	(WENZEL i JOCKWER 1999)
2000	Hiperakumulatory to rośliny zdolne do akumulacji w pędach metali w ilości przewyższającej co najmniej 100 razy „normalną” zawartość metali w roślinach.	(BAKER i współaut. 2000)
2006	Roślina może zyskać status hiperakumulatora, jeżeli stężenie pierwiastka w suchej masie tkanek nadziemnych jest 50–500 razy większe, niż w podłożu.	(CLEMENS 2006)
2013	Współcześnie zaproponowane wartości progowe w mg×kg <sup>-1</sup> suchej masy dla wybranych pierwiastków, powyżej których roślina uzyskuje status hiperakumulatora to: 100 mg×kg <sup>-1</sup> Se, Cd i Tl, 300 mg×kg <sup>-1</sup> Cu, Co, Cr; 1000 mg×kg <sup>-1</sup> Ni i Pb; 3000 mg×kg <sup>-1</sup> Zn oraz 10000 mg×kg <sup>-1</sup> Mn.	(VAN DER ENT i współaut. 2013)



Ryc. 1. Liczba znanych hiperakumulatorów pierwiastków śladowych.

Definicja hiperakumulatorów ewoluowała w ciągu ostatnich 30 lat (Tabela 2). Cechy hiperakumulatorów zostały ostatnio przedstawione przez VAN DER ENTA i współaut. (2013) (Tabela 2), którzy podali zakresy zawartości pierwiastków, powyżej których roślina uzyskuje status hiperakumulatora. Defi-

nicyja ta ogranicza się jednak tylko do wybranych pierwiastków, co może stanowić problem w poszukiwaniu roślin akumulujących pierwiastki nieuwzględnione przez autorów.

Nie wykazano dotychczas, dlaczego rośliny pobierają i akumulują tak duże ilości pierwiastków śladowych, jednak istnieje kil-

Tabela 3. Przykłady roślin wykazujących hiperakumulację naturalną i wspomaganą czynnikami chemicznymi oraz zakresy akumulacji pierwiastków śladowych (KRZCIUK i GAŁUSZKA 2014).

Pierwiastek	Definiowany zakres akumulacji ( $\text{mg} \times \text{kg}^{-1}$ SM*) wg Van der Ent i współaut. 2013	Poziom akumulacji podanego gatunku ( $\text{mg} \times \text{kg}^{-1}$ SM*)	Gatunek	Literatura
Nikiel (Ni)	100-1000 <i>hemiaccumulators</i>	1050	<i>Cardamine resedifolia</i>	(PRASAD 2005)
	1000 <i>hypernickelophores</i>	1280	<i>Alyssum singarense</i>	
Kobalt (Co)	300	10200	<i>Alyssum syriacum</i>	(BROOKS i współaut. 1998)
	300	9000	<i>Haumaniastrum robertii</i>	
Miedź (Cu)	300	6000	<i>Aeolanthus biformifolius</i>	(MORRISON i współaut. 1979)
	100	10200	<i>Astragalus pattersoni</i>	
Selen (Se)	100	8200	<i>Noccaea rotundifolium</i>	(BROOKS i współaut. 1998)
	1000	>10000	<i>Noccaea caerulescens</i>	
Ołów (Pb)	1000	55000	<i>Macadamia neurophylla</i>	(BROOKS i współaut. 1998)
Cynk (Zn)	3000	3000	<i>Noccaea caerulescens</i>	(BROOKS i współaut. 1998)
Mangan (Mn)	10000			
Kadm (Cd)	100			

\*SM – sucha masa

ka hipotez próbujących to wyjaśnić: (1) rośliny hiperakumulują pierwiastki śladowe, gdyż stanowi to sposób unieszkodliwienia toksycznych właściwości absorbowanych metali, (2) rośliny mogą używać zakumulowanych pierwiastków jako element alleopatycznej obrony przed osobnikami konkurencyjnymi, (3) metale mogą służyć jako osmotyczna obrona przed suszą, (4) nagromadzone metale mogą bronić przed roślinożercami lub patogenami, (5) nagromadzenie metali może być przypadkowe (BOYD 2007). Zagadnieniem tym zajmowali się szczegółowo RASCIO i NAVARI-IZZO (2011).

Obecnie znanych i opisanych jest ok. 500 gatunków roślin przyporządkowanych do grupy hiperakumulatorów. Rycina 1 przedstawia liczby roślin akumulujących wybrane pierwiastki śladowe, podane przez BHARGAVĘ i współaut. (2012) oraz VAN DER ENTA i współaut. (2013). Różnica między wartościami liczbowymi przedstawionymi przez obie grupy badaczy wynika z rozbieżności w podejściu do definio-

wania hiperakumulatorów. Oprócz głównego czynnika, progu akumulacji, autorzy uwzględnili również inne parametry (np. zdolność akumulacji w naturalnych warunkach). Zakresy akumulacji dla zaprezentowanych pierwiastków nie różniły się, z wyjątkiem 3 przypadków (kolejno BHARGAVA i współaut. 2012, VAN DER ENT i współaut. 2013): Cu  $1000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$  i  $300 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$ , Co  $1000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$  i  $300 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$ , Zn  $10000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$  i  $3000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$ . Przykładowe rośliny hiperakumulujące pierwiastki śladowe oraz zróżnicowanie w poziomie akumulacji wybranych pierwiastków przedstawia Tabela 3. Największą część roślin hiperakumulujących (blisko 80%) stanowią hiperakumulatory niklu, przy czym w obrębie tej grupy istnieje dodatkowy podział na rośliny akumulujące nikiel w zakresie  $100\text{--}1000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$  suchej masy (ang. hemiaccumulators) oraz w ilości znacznie powyżej  $1000 \text{ mg} \times \text{kg}^{-1}$  suchej masy (ang. hypernickelophores).

#### PARAMETRY WYKORZYSTYWANE W BADANIACH HIPERAKUMULATORÓW

Roślina nadająca się do fitoekstrakcji, czy fitogórnictwa powinna odznaczać się specyficznymi cechami. Idealny hiperakumulator powinien: (a) szybko rosnać, (b) produkować dużą ilość biomasy, (c) mieć dobrze rozwinięty system korzeniowy, (d) mieć zdolność akumulacji dużej ilości pierwiastków śladowych, (e) mieć zdolność efektywnego transportu pierwiastków z korzeni do pędów, (f) być tolerancyjnym w stosunku do zakumulowanych potencjalnie toksycznych pierwiastków, (g) móc szybko przystosowywać się do różnych warunków klimatycznych, (h) być odpornym na patogeny i szkodniki, (i) być łatwym w uprawie i zbieraniu, (j) powinien mieć wykształcony układ odstrasżający roślinożerców, aby zapobiec wprowadzaniu toksyn do łańcucha pokarmowego (ALI i współaut. 2013). Różne parametry służą do opisu zdolności bioakumulacyjnych roślin (Tabela 4). Porównanie ich wartości liczbowych dla różnych gatunków stanowi dobre narzędzie w ocenie przydatności roślin do fitoekstrakcji, czy fitogórnictwa. Najważniejszymi parametrami stosowanymi w badaniu hiperakumulatorów są: współczynni-

ki bioakumulacji (BAF) oraz translokacji (TF), których wartość dla roślin hiperakumulujących powinna przekraczać 1. Wysokie wartości tych parametrów świadczą o dobrze rozwiniętym systemie transportu pierwiastków do części nadziemnych rośliny. Innym parametrem, którego wartość powinna przekraczać 1 jest wskaźnik wzbogacenia (EF). Współczynnik akumulacji (AF) potwierdza zdolność do akumulacji pierwiastka w warunkach laboratoryjnych. Współczynnik ekstrakcji metali (MER) służy do oceny możliwości usunięcia pierwiastka z gleby podczas jednego zbioru. Wartość MER wynosząca 50% oznacza, że połowa całkowitego stężenia pierwiastka w glebie może być usunięta w jednym zbiorze. Ilość metalu przyswojonego z gleby opisuje współczynnik MEA, który zwykle ma niskie wartości dla naturalnych hiperakumulatorów ze względu na ich niską biomasę. Ostatni wskaźnik, współczynnik fitoremediacji, może zostać użyty do oceny zdolności rośliny do usuwania pierwiastków z odpadów i gleby (LI i współaut. 2011, KRZCIUK i GAŁUSZKA 2014).

#### METODY POSZUKIWAŃ ROŚLIN AKUMULUJĄCYCH

Selekcja nowych hiperakumulatorów najczęściej odbywa się poprzez wybór gatun-

ków roślin rosnących na glebach o podwyższonej zawartości metali śladowych. Istnieje

Tabela 4. Parametry opisujące zdolność, efektywność i przydatność roślin pod względem ich właściwości hiperakumulacyjnych (Li i współaut. 2011; KRZCIUK i GAŁUSZKA 2014).

Parametr	Nazwa angielska	Akronim	Wzór
Współczynnik translokacji	<i>Translocation Factor</i>	TF	$TF = \frac{\text{zawartość pierwiastka w pedach}}{\text{zawartość pierwiastka w korzeniach}}$
Współczynnik bioakumulacji	<i>Bioaccumulation Factor</i> = <i>Bioaccumulation Coefficient</i>	BAF = BC	$BAF = \frac{\text{zawartość pierwiastka w pedach}}{\text{zawartość pierwiastka w glebie}}$
Współczynnik akumulacji	<i>Accumulation Factor</i>	AF	$AF = \frac{\text{zawartość pierwiastka w roślinie badanej}}{\text{zawartość pierwiastka w glebie}}$
Wskaźnik wzbogacenia	<i>Enrichment Factor</i>	EF	EF = zawartość pierwiastka w glebie
Współczynnik ekstrakcji metali	<i>Metal Extraction Ratio</i>	MER	$C_{\text{roślina}}$ – zawartość pierwiastka w zebranej części biomasy rośliny $M_{\text{roślina}}$ – masa nadziemnej biomasy rośliny $C_{\text{gleba}}$ – zawartość pierwiastka w glebie $M_{\text{strefa zakorzeniona}}$ – masa ziemi zakorzenionej przez rośliny
Ilość metalu przyswojonego z gleby	<i>Metal Extraction Amount</i>	MEA	$MEA = \left( \frac{gg}{roślina} \right) = \text{zawartość pierwiastka w tkance rośliny} \times \text{biomasa}$
Współczynnik fitoremediacji	<i>Phytoremediation Factor</i>	PF	$PF = \frac{\text{stężenie pierwiastka w pedach} \times \text{biomasa pedów rośliny}}{\text{stężenie pierwiastka w odpadzie}}$

prawdopodobieństwo, że rośliny naturalnie występujące w takich warunkach będą miały cechy hiperakumulatorów. Badania roślin powinno poprzedzać zebranie informacji o badanym terenie, takich jak zagospodarowanie przestrzenne w przeszłości czy anomalie geochemiczne w glebie (WENZEL i JOCKWER 1999). Kolejne etapy badań obejmują zebranie dużej liczby próbek roślin do analiz oraz wytypowanie grup kontrolnych (WENZEL i JOCKWER 1999). Definicja oraz kryteria uznania roślin za hiperakumulatory, narzucają specyficzne podejście do ich analiz chemicznych. Znane są standardowe procedury laboratoryjne oznaczania potencjalnie toksycznych pierwiastków śladowych w tkankach roślin, jednak muszą być one zmodyfikowane w badaniach hiperakumulatorów. VAN DER ENT i współaut. (2013) omówił niektóre z problemów metodologicznych w badaniu roślin hiperakumulujących, jakie powinny być wzięte pod uwagę w przyszłych badaniach, ponieważ istnieją rozbieżności w naukowym podejściu do poszukiwania nowych hiperakumulatorów. Rośliny, które rosną na glebach wzbogaconych w pierwiastki śladowe, są dobrze przystosowane do wzrastania w trudnych warunkach; część z nich to prawdopodobnie hiperakumulatory. Przykładem takich roślin są te, które rosną na glebach pochodzenia ultramaficznego (BROOKS 1987). Ponad 90% hiperakumulatorów to rośliny endemiczne dla gleb wzbogaconych w metale, takich jak gleby serpen-



Ryc. 2. Ogólny schemat poszukiwania nowych hiperakumulatorów.

tynitowe, a wśród nich najbardziej znany gatunek *Alyssum* (smagliczka): *A. discolor* (BAYRAMOGLU i współaut. 2012), *A. bertolonii* (GALARDI i współaut. 2007), *A. inflatum* (GHADERIAN i współaut. 2007), *A. murale* (SHALLARI i współaut. 1998), *A. serpyllifolium* (ALVES i współaut. 2011). Hiperakumulatory znajdowane były także na glebach w sposób naturalny wzbogaconych w pierwiastki śladowe, np. na obszarach wulkanicznych (ROBINSON i współaut. 2006). Rośliny, które naturalnie występują na glebach zanieczyszczonych antropogenicznie, również mogą być badane pod kątem ich użyteczności w fitoremediacji (BECH i współaut. 2002). Dotyczy

to także obszarów, na których rozwijana jest działalność przemysłowa (ORCHARD i współaut. 2009); XUE i współaut. (2004) znaleźli nowy hiperakumulator manganu, *Phytolacca acinosa*, w pobliżu kopalni rudy tego metalu, w mieście Xiangtan w Chinach.

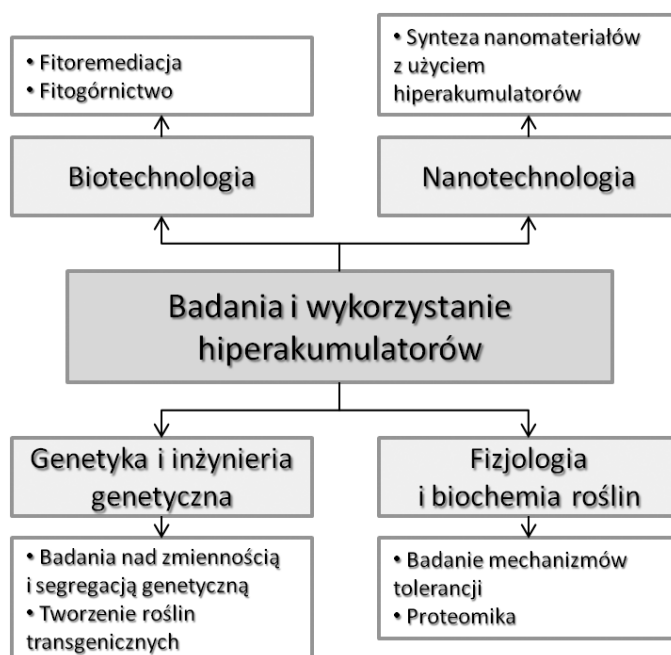
Kolejnym sposobem selekcji hiperakumulatorów jest uprawa roślin w szklarniach, na glebie o podwyższonej zawartości pierwiastka potencjalnie przez nie akumulowanego (SHAN i współaut. 2011) lub hodowle hydroponiczne oparte na uprawie roślin z minimalną ilością gleby lub bez gleby. Systemy hydroponiczne zazwyczaj składają się z plastikowych tacek z roślinami, którym dostarczany jest specjalny czynnik wzrostu (BALDWIN i BUTCHER 2007). Podejście to pozwala na monitorowanie przyswajania pierwiastka przez rośliny, z pominięciem jednoczesnego oddziaływania pierwiastka z matrycą gleby. Jednakże eksperymenty hydroponiczne, jako pojedyncze badania, nie są zalecane do identyfikacji statusu hiperakumulatora, ponieważ często prowadzą do śmierci rośliny, a ponadto warunki prowadzenia eksperymentów różnią się znacznie od naturalnych (zbyt wysokie dawki pierwiastków). Z tego powodu badaniom roślin w uprawach hydroponicznych powinny zawsze towarzyszyć badania terenowe. Dobrym przykładem tego podejścia są badania hiperakumulatora Ni, *Noccaea goesingense*, który został przetestowany zarówno w eksperymentach hydroponicznych (KRÄMER i współaut. 1997), jak i w terenie (WENZEL i JOCKWER 1999) (Ryc. 2).

## BADANIA ROŚLIN HIPERAKUMULUJĄCYCH

Badania roślin zdolnych do hiperakumulacji obejmują zarówno aspekty teoretyczne, jak i praktyczne, łączą w sobie wiele dyscyplin naukowych, m.in. fizjologię, genetykę, inżynierię genetyczną, biotechnologię, nanotechnologię.

Badania nad fizjologią roślin prowadzą do wyjaśniania skomplikowanych mechanizmów tolerancji przez hiperakumulatory wysokich stężeń pierwiastków śladowych obecnych w podłożu (KRÄMER i współaut. 2007). Badania nad identyfikacją genów odpowiedzialnych za przyswajanie, translokację i dystrybucję pierwiastków w tkankach roślin, pomagają w wyjaśnieniu zjawiska hiperakumulacji u roślin. Dzięki nim udowodniono, że kluczowe geny zaangażowane w syntezę ligandów metali wy-

kazują zwiększoną ekspresję w hiperakumulatorach (MAESTRI i współaut. 2010). W 1997 r. CHANEY i współaut. wykazali, że zdolność do hiperakumulacji pierwiastków śladowych przez jedną roślinę może zostać przeniesiona do innej, z wykorzystaniem inżynierii genetycznej. Od tego czasu modyfikacje genetyczne stały się nieodłączną częścią badań nad hiperakumulatorami (KOTRBA i współaut. 2009). Istotnym aspektem praktycznego wykorzystania hiperakumulatorów są fitoremediacja i fitogórnictwo, umożliwiające oczyszczanie gleb na terenach wzbogaconych w pierwiastki śladowe, a także pozyskiwanie w sposób tani i skuteczny metali o znaczeniu ekonomicznym z odpadów i rud gorszej jakości (GAŁUSZKA 2005). Kolejnym kierunkiem badań roślin hi-



Ryc. 3. Badania i wykorzystanie hiperakumulatorów roślinnych.

perakumulujących metale jest biosynteza węglowych nanorurek i nanocząstek, czego przykładem może być hiperakumulator Cu, *Bras-*

*sica juncea* L. (QU i współaut. 2012). Rycina 3 przedstawia wszystkie aspekty badań roślin hiperakumulujących.

#### WYKORZYSTANIE ROŚLIN HIPERAKUMULUJĄCYCH – PROCESY FITOREMEDIACJI I FITOGÓRNICSTWO

Początkowo hiperakumulatory wykorzystywane były jedynie w geochemii poszukiwawczej (WENZEL i JOCKWER 1999). Obecnie znajdują największe zastosowanie w procesach fitoremediacji (VITHANAGE i współaut. 2012). Pierwiastki śladowe w glebie stanowią duże zagrożenie, także dla zdrowia człowieka. Istotne jest dbanie o środowisko i rekultywacja terenów zanieczyszczonych. Oczyszczanie gleby z pierwiastków śladowych jest dużym wyzwaniem, ze względu na ich długi czas rozkładu (LIU i współaut. 2009). Tradycyjne metody remedacyjne są kosztowne, czasochłonne, często nieefektywne (ich zasięg obejmuje górną warstwę gleby), niebezpieczne dla osób obsługujących oraz przyczyniają się do powstawania wtórnych, niebezpiecznych dla środowiska zanieczyszczeń (VITHANAGE i współaut. 2012). Dlatego tak ważne są prace rozwijające „zielone” metody remedacji gleb zanieczyszczonych, do których należą: fitoremediacja, fitoekstrakcja i fitogórnictwo.

##### FITOREMEDIACJA

Fitoremediacja jest względnie nową technologią (została opisana w latach 90. XX w.),

wykorzystującą rośliny w celu oczyszczenia środowiska. Ze względu na sposób remedacji i rolę roślin w tym procesie, wyróżnia się: fitoekstrakcję, fitodegradację, fitostabilizację, fitoewaporację i ryzofiltrację (WÓJCIK 2000). Hiperakumulatory najczęściej wykorzystuje się w metodzie fitoekstrakcji. Procesy fitoremediacji można zintensyfikować dzięki metodom inżynierii genetycznej, a także dzięki inokulacji bakteriami, endofitami czy też grzybami mikoryzowymi. Rośliny badane pod kątem fitoremediacji lub wykorzystywane w tym procesie m.in. dla Cd, Co, Cr to: *Panicum antidotale*, *Pennisetum purpureum*, *Cucurbita pepo*, *Gossypium hirsutum* i *Helianthus annuus* (WANG i współaut. 2007, 2012; XIONG i współaut. 2008; RABĘDA i współaut. 2011; LOTFY i MOSTAFA 2013).

##### FITOEKSTRAKCJA

Fitoekstrakcja polega na ekstrakcji pierwiastków z podłoża z użyciem roślin akumulujących zanieczyszczenia w pędach. Istotnym elementem optymalizacji tego procesu jest prawidłowy dobór gatunku rośliny, zarówno pod względem zdolności akumulacji



jących, jak i szybkości przyrostu biomasy. Rozróżnia się fitoekstrakcję ciągłą i wspomaganą. Fitoekstrakcja ciągła zależy od naturalnej zdolności niektórych gatunków roślin do gromadzenia, translokacji i odporności na podwyższone ilości metali. Fitoekstrakcja wspomaganą jest prowadzona z użyciem środków chelatujących, w celu zwiększenia przyswajania metali przez rośliny. Wspomaganie fitoekstrakcji może także poprawić aktywność enzymatyczną i liczebność mikroorganizmów znajdujących się w glebie (BHATIA i współaut. 2002, MCGRATH i ZHAO 2003, ZHUANG i współaut. 2007, CHANDER i JOERGENSEN 2008, SUN i współaut. 2009).

#### FITOGÓRNICtwo

Fitogórnictwo to technologia wykorzystująca hiperakumulatory w celu pozyskiwania metali o wartości ekonomicznej (np. stoso-

wane w nowoczesnych materiałach lantanowce). Strategia ta polega na obsadzeniu terenu pogórniczego lub gleb wysoko zmineralizowanych roślinami hiperakumulującymi. Po okresie wegetacji rośliny te tworzą biorudę (ang. bio-ore), która spalona pozwala na odzyskanie cennych pierwiastków. Proces fitogórnictwa może być wspomagany nawozami lub związkami kompleksującymi, jak np. EDTA. Dodatkową zaletą metody jest pozyskiwanie energii odnawialnej (ok. 30–42 tys. kWh na hektar uprawy) ze spalanej biorudy. Spalanie roślin emituje do atmosfery mniej tlenków SO<sub>x</sub>, niż spalanie węgla. Pozyskiwanie niklu metodą fitogórnictwa jest obecnie stosowaną, wysoko opłacalną i ekologiczną metodą (GAŁUSZKA, 2005, CHANEY i współaut. 2007, MEERS i współaut. 2010, ALI i współaut. 2013).

#### PODSUMOWANIE

Hiperakumulatory stanowią fascynującą grupę roślin, o szerokich możliwościach aplikacyjnych (fitoekstrakcja, fitogórnictwo, nanotechnologia).

Zanieczyszczenie gleb pierwiastkami śladowymi stanowi poważny problem współczesnego świata. Konwencjonalne metody remediacji gleb często są niemożliwe do zastosowania, stąd konieczność wykorzystywania nowych, przyjaznych dla środowiska technik oczyszczania, jak fitoremediacja.

Wciąż zwiększające się zapotrzebowanie na metale śladowe wymusza konieczność pozyskiwania ich z gleb silnie zanieczyszczonych antropogenicznie czy z rozproszonych rud. W tym przypadku również mogą zostać wykorzystane nowoczesne techniki, np. fitogórnictwo.

Większość znanych hiperakumulatorów to rośliny akumulujące nikiel; istnieje potrzeba poszukiwania roślin zdolnych do akumulacji innych pierwiastków oraz kilku pierwiastków naraz (multiakumulatory).

Fitoremediacja i fitogórnictwo, prócz korzyści związanych z oczyszczaniem terenów skażonych, mogą stanowić istotne źródło korzyści ekonomicznych.

Fitoremediacja i fitogórnictwo, prócz korzyści związanych z oczyszczaniem terenów skażonych, mogą stanowić istotne źródło korzyści ekonomicznych.

#### HIPERAKUMULATORY ROŚLINNE – CHARAKTERYSTYKA, BADANIA I ZNACZENIE PRAKTYCZNE

##### Streszczenie

Zanieczyszczenie pierwiastkami śladowymi (metalami i niemetalami), głównie pochodzenia antropogenicznego, jest poważnym problemem współczesnego świata. Toksyczne ilości pierwiastków w różnych elementach środowiska mogą stanowić zagrożenie przez wiele lat. Z drugiej strony, wciąż wzrasta zapotrzebowanie na metale, szczególnie te wykorzystywane w nowych technologiach, a racjonalne wykorzystanie surowców nieodnawialnych jest obecnie jednym z priorytetów gospodarki ogólnoswiatowej. Nowoczesne metody biotechnologiczne wychodzą naprzeciw tym problemom angażując do procesów remediacji i fitoekstrakcji roślinne metalofity. Do tej grupy należą hiperakumulatory, zdolne do pobierania i akumulowania ponadprzeciętnych

ilości pierwiastków śladowych. Hiperakumulatory to w większości rośliny endemiczne, występujące zarówno w klimacie tropikalnym, jak i umiarkowanym. Na skuteczność akumulowania przez nie zanieczyszczeń wpływa wiele czynników, np. szybkość przyrostu biomasy. Jednak większość do tej pory opisanych roślin nie spełnia wymogów idealnego hiperakumulatora; część z nich jest zdolna do akumulacji jedynie w specyficznych warunkach, stąd konieczność poszukiwania nowych roślin akumulujących. Prócz procesów fitoremediacji, hiperakumulatory wykorzystywane są także w fitogórnictwie (do pozyskiwania metali) i nanotechnologii (w syntezie nanomateriałów), co czyni je obiektem o szerokich możliwościach aplikacyjnych i badawczych.

## HYPERACCUMULATORS – THEIR CHARACTERISTICS, RESEARCH AND PRACTICAL IMPORTANCE

Environmental contamination with trace elements (both metals and non-metals), mainly of anthropogenic origin, is one of the most challenging contemporary global problems. Toxic amounts of elements in different environmental compartments may pose a threat for many years. On the other hand, there is an increasing demand for metals, particularly those used in new technologies. A sustainable use of non-renewable resources is one of the priorities of the global economy. Modern biotechnological methods could help to ameliorate these problems through application of metallophytes in the process of phytoremediation and phytoextraction. Hyperaccumulating plants are species showing the highest potential for taking up and storage of abnormal concentrations of trace elements in their

green parts. Hyperaccumulators are mostly endemic plants, occurring both in tropical and temperate climate zones. Their efficiency for accumulation of trace elements is affected by many factors such as the rate of biomass production. However, most of the known hyperaccumulators do not meet the criteria of an ideal hyperaccumulator, some of the species are able to show accumulative properties only under specific conditions. There is a need to find new accumulating plant species. Aside from their application in phytoremediation, hyperaccumulators are also used in phytomining (as a source of metals of economic value) and in nanotechnology (in synthesis of nanomaterials). These features make hyperaccumulators very interesting subject of basic and applied research.

### LITERATURA

- ALFORD E. R., PILON-SMITS E. A. H., PASCHKE M. W., 2010. *Metallophytes – a view from the rhizosphere*. *Plant Soil* 337, 33–50.
- ALI H., KHAN E., SAJAD M. A., 2013. *Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications*. *Chemosphere* 91, 869–881.
- ALVES S., NABAIS C., DE LURDES SIMÕES GONCALVES M., CORREIA DOS SANTOS M. M., 2011. *Nickel speciation in the xylem sap of the hyperaccumulator *Alyssum serpyllifolium* ssp. *lusitanicum* growing on serpentine soils of northeast Portugal*. *J. Plant Physiol.* 168, 1715–1722.
- ANDERSON C., DERAM A., PETTIT D., BROOKS R. R., STEWART R. SIMCOCK R., 2001. *Induced hyperaccumulation: metal movement and problems*. [W:] *Trace Elements in Soils: Bioavailability, Flux and Transfer*. ISKANDAR I. K., KIRKHAM M. B. (red.). CRC Press, Boca Raton, Florida, 63–76.
- BAKER A. J. M., BROOKS R. R., 1989. *Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements - A review of their distribution, ecology and phytochemistry*. *Biorecovery* 1, 81–126.
- BAKER A. J. M., ERNST W. H. O., VAN DER ENT A., MALAISSE F., GINOCCHIO R., 2010. *Metallophytes: the unique biological resource, its ecology and conservational status in Europe, central Africa and Latin America*. [W:] *Ecology of industrial pollution*. BATTY L. C., HALLBERG K. B. (red.). Cambridge University Press, Cambridge, 7–40.
- BAKER A. J. M., MCGRATH S. P., REEVES R. D., SMITH J. A. C., 2000. *Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils*. [W:] *Phytoremediation of Contaminated Soil and Water*. TERRY N., BANUELOS G. (red.). Lewis Publisher, Boca Raton, FL, USA.
- BALDWIN P. R., BUTCHER D. J., 2007. *Phytoremediation of arsenic by two hyperaccumulators in a hydroponic environment*. *Microchem. J.* 85, 297–300.
- BAYRAMOGLU G., ARICA M. Y., ADIGUZEL N., 2012. *Removal of Ni(II) and Cu(II) ions using native and acid treated Ni-hyperaccumulator plant *Alyssum discolor* from Turkish serpentine soil*. *Chemosphere* 89, 302–309.
- BECH J., POSCHENRIEDER C., BARCELÓ J., LANSAC A., 2002. *Plants from mine spoils in the South American Area as a potential source of germplasm for phytoremediation technologies*. *Acta Biotechnol.* 22, 5–11.
- BHARGAVA A., CARMONA F. F., BHARGAVA M., SRIVASTAVA S., 2012. *Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals*. *J. Environ. Manage.* 105, 103–120.
- BHATIA P., BHATIA N. P., ASHWATH N., 2002. *In vitro propagation of *Stackhousia tryonii* Bailey (Stackhousiaceae): a rare and serpentine-endemic species of central Queensland, Australia*. *Biodiver. Conservat.* 11, 1469–1477.
- BOLAN N., KUNHIKRISHNAN A., THANGARAJAN R., KUMPIENE J., PARK J., MAKINO T., KIRKHAM M. B., SCHECKEL K., 2014. *Remediation of heavy metal(lloid)s contaminated soils – To mobilize or to immobilize?* *J. Hazard. Mat.* 266, 141–166.
- BOYD R. S., 2007. *The defense hypothesis of elemental hyperaccumulation: status, challenges and new directions*. *Plant Soil* 293, 153–176.
- BROOKS R. R., 1987. *Serpentine and its vegetation: a multidisciplinary approach*. *Dioscorides Press, Portland, Oregon, USA*.
- BROOKS R. R., LEE J., REEVES R. D., JAFFRE T., 1977. *Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants*. *J. Geochem. Explorat.* 7, 49–57.
- BROOKS R. R., CHAMBERS M. F., NICKS L. J., ROBINSON B. H., 1998. *Phytomining*. *Perspectives* 3, 359–362.
- CHANDER K., JOERGENSEN R. G., 2008. *Decomposition of Zn-rich *Arabidopsis halleri* litter in low and high metal soil in the presence and absence of EDTA*. *Water Air Soil Pollut.* 188, 195–204.
- CHANEY R. L., MALIK M., LI Y. M., BROWN S. L., BREWER E. P., ANGLE J. S., BAKER A. J. M., 1997. *Phytoremediation of soil metals*. *Curr. Opin. Biotechnol.* 8, 279–284.
- CLEMENS S., 2006. *Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants*. *Biochimie* 88, 1707–1719.
- CHANEY R. L., ANGLE J. S., BROADHURST C. L., PETERS C. A., TAPPERO R. V., SPARKS D. L., 2007. *Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies*. *J. Environ. Qual.* 36, 1429–1443.
- DAHMANI-MULLER H., VAN OORT F., GÉLIE B., BALABANE M., 2000. *Strategies of heavy metal uptake by*

- three plant species growing near a metal smelter. *Environ. Pollut.* 109, 231–238.
- FRÄNZLE O., 2006. *Complex bioindication and environmental stress assessment*. *Ecol. Indic.* 6, 114–136.
- GALARDI F., MENGONI A., PUCCI S., BARLETTI L., MASSI L., BARZANTI R., ARNETOLI M., GABBRIELLI R., GONNELLI C., 2007. *Intra-species differences in mineral element composition in the Ni-hyperaccumulator *Alyssum bertolonii*: A survey of populations in nature*. *Environ. Exp. Bot.* 60, 50–56.
- GALUSZKA A., 2005. *Wykorzystanie mikroorganizmów i roślin do pozyskiwania metali*. *Przegląd Geologiczny* 53, 858–862.
- GHADERIAN S. M., MOHTADI A., RAHIMINEJAD R., REEVES R. D., BAKER A. J. M., 2007. *Hyperaccumulation of nickel by two *Alyssum* species from the serpentine soils of Iran*. *Plant Soil* 293, 91–97.
- HEM J. D., 1992. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 254, 263.
- HOODA P., 2010. *Trace Elements in soils*. A John Wiley and Sons, Ltd. New York.
- JAFFRÉ T., BROOKS R. R., LEE J., REEVES R. D., 1976. *Serbertia acuminata: a nickel-accumulating plant from New Caledonia*. *Science* 193, 579–580.
- KOTRBA P., NAJMANOVA J., MACEK T., RUML T., MACKOVA M., 2009. *Genetically modified plants in phytoremediation of heavy metal and metalloids soil and sediment pollution*. *Biotechnol. Adv.* 27, 799–810.
- KRÄMER U., GRIME G. W., SMITH J. A. C., HAWES C. R., BAKER A. J. M., 1997. *Micro-PIXE as a technique for studying nickel localization in leaves of the hyperaccumulator plant *Alyssum lesbiacum**. *Nucl. Instr. Meth. Physics Res. B* 130, 346–350.
- KRÄMER U., TALLE I. N., HANIKENNE N., 2007. *Transit on metal transport*. *FEBS Lett.* 581, 2263–2272.
- KRZCIUK K., GALUSZKA A., 2014. *Prospecting for hyperaccumulators of trace elements: a review*. *Crit. Rev. Biotechnol.* DOI:10.3109/073885512014.922525.
- LI G., HU N., DING D., ZHENG J., LIU Y., WANG Y., NIE X., 2011. *Screening of plant species for phytoremediation of uranium, thorium, barium, nickel, strontium and lead contaminated soils from a uranium mill tailings repository in South China*. *Bull. Environ. Contamin. Toxicol.* 86, 646–652.
- LIU X., GAO Y. S. K., DUAN G., CHEN A., LING L., ZHAO L., LIU Z., WU X., 2009. *Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on contaminated sites and their potential accumulation capacity in Heqing, Yunnan*. *J. Environ. Sci.* 20, 1469–1474.
- LOTFY S. M., MOSTAFA A. Z., 2013. *Phytoremediation of contaminated soil with cobalt and chromium*. *J. Geochem. Explor.* DOI:10.1016/j.gexplo.2013.07.003.
- MAESTRI E., MARMIROLI M., VISIOLI G., MARMIROLI N., 2010. *Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment*. *Environ. Exp. Bot.* 68, 1–13.
- MCGRATH S. P., ZHAO F. J., 2003. *Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils*. *Curr. Opin. Biotechnol.* 14, 277–282.
- MEERS E., SLYCKEN S. V., ADRIAENSEN K., RUTTENS A., VANGRONSVELD J., LAING G. D., WITTERS N., THEWYS T., TACK F. M. G., 2010. *The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoremediation' of heavy metals on moderately contaminated soils: a field experiment*. *Chemosphere* 78, 35–41.
- MORRISON R. S., BROOKS R. R., REEVES R. D., MALAISSE F., 1979. *Copper and cobalt uptake by metallophytes from Za re*. *Plant Soil* 53, 535–539.
- MUHAMMAD I., PUSCHENREITER M., WENZEL W. W., 2012. *Cadmium and Zn availability as affected by pH manipulation and its assessment by soil extraction, DGT and indicator plants*. *Sci. Total Environ.* 416, 490–500.
- ORCHARD C., LEÓN-LOBOS P., GINOCCHIO R., 2009. *Phytostabilization of massive mine wastes with native phylogenetic resources: potential for sustainable use and conservation of the native flora in North-Central Chile*. *Ciencia e Investigación Agraria* 36, 329–352.
- OZTURK L., KARANLIK S., OZKUTLU F., CAKMAK I., KOCHAN L. V., 2003. *Shoot biomass and zinc/cadmium uptake for hyperaccumulator and non-accumulator *Thlaspi* species in response to growth on a zinc deficient calcareous soil*. *Plant Sci.* 164, 1095–1101.
- PRASAD M. N. V., 2005. *Nickelophilous plants and their significance in phytotechnologies*. *Braz. J. Plant Physiol.* 17, 113–128.
- QU J., LUO C., CONG Q., YUAN X., 2012. *Carbon nanotubes and Cu-Zn nanoparticles synthesis using hyperaccumulator plants*. *Environ. Chem. Lett.* 10, 153–158.
- RABEDA I., WOŻNY A., KRZESŁOWSKA M., 2011. *Bakterie i grzyby mikoryzowe zwiększają wydajność roślin w fitoremediacji metali śladowych*. *Kosmos* 60, 423–433.
- RASCIO N., NAVARI-IZZO F., 2011. *Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?* *Plant Sci.* 180, 169–181.
- REEVES R. D., 1992. *Hyperaccumulation of nickel by serpentine plants*. [W:] *The Vegetation of Ultramafic (Serpentine) Soils*. BAKER A. J. M., PROCTOR J., REEVES R. D. (red.). Intercept Ltd., Andover, UK, 253–277.
- ROBINSON B. H., KIM N., MARCHETTI M., MONI C., SCHROETER L., VANDEN DIJSSSEL C., MILNE G., CLOTHIER B., 2006. *Arsenic hyperaccumulation by aquatic macrophytes in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand*. *Environ. Exp. Bot.* 58, 206–215.
- SHALLARI S., SCHWARTZ C., HASKO A., MORCI J. L., 1998. *Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania*. *Sci. Total Environ.* 209, 133–142.
- SHAN Q., LIU X., ZHANG J., CHEN G., LIU S., ZHANG P., WANG Y., 2011. *Analysis on the tolerance of four ecotype plants against copper stress in soil*. *Proc. Environ. Sci.* 10, 1802–1810.
- SHEN Z. G., LIU Y. L., 1998. *Progress in the study on the plants that hyperaccumulate heavy metal*. *Plant Physiol. Communicat.* 34, 133–139.
- SIWEK M., 2008a. *Rośliny w skażonym metalami ciężkimi środowisku poprzemysłowym. Część I. Pobieranie, transport i toksyczność metali ciężkich (śladowych)*. *Wiadomości Botaniczne* 52, 7–22.
- SIWEK M., 2008b. *Rośliny w skażonym metalami ciężkimi środowisku poprzemysłowym. Część II. Mechanizmy detoksyfikacji i strategie przystosowania roślin do wysokich stężeń metali ciężkich*. *Wiadomości Botaniczne* 52, 7–23.
- SUN Y.-B., ZHOU Q.-X., AN J., LIU W.-T., LIU R., 2009. *Chelator-enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soil irrigated by industrial wastewater with the hyperaccumulator plant (*Sedum alfredii* Hance)*. *Geoderma* 150, 106–112.
- VAN DER ENT A., BAKER A. J. M., REEVES R. D., POLLARD A. J., SCHAT H., 2013. *Hyperaccumulators of metal and metalloids trace elements: facts and fiction*. *Plant Soil* 362, 319–334.
- VITHANAGE M., DABROWSKA B. B., MUKHERJEE A. B., SANDHI A., BHATTACHARYA P., 2012. *Arsenic up-*

- take by plants and possible phytoremediation applications: a brief overview. *Environ. Chem. Lett.* 10, 217-224.
- WANG M., ZOU J., DUAN X., JIANG W., LIU D., 2007. *Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (Zea mays L.)*. *Biores. Technol.* 98, 82-88.
- WANG Y., YAN A., DAI J., WANG N. N., WU D., 2012. *Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in Chlorophytum comosum: a popular ornamental plant and potential Cd hyperaccumulator*. *Environ. Monitor. Asses.* 184, 929-937.
- WEI S., ZHOU Q., SAHA U. K., 2008. *Hyperaccumulative characteristics of weed species to heavy metals*. *Water Air Soil Pollut.* 192, 173-181.
- WEI S., NIU R., SRIVASTAVA M., ZHOU Q., WU Z., SUN T., HU Y., LI Y., 2009. *Bidens tripartite L.: A Cd-accumulator confirmed by pot culture and site sampling experiment*. *J. Hazard. Mat.* 170, 1269-1272.
- WENZEL W. W., JOCKWER F., 1999. *Accumulation of heavy metals in plants grown on mineralised soils of the Austrian Alps*. *Environ. Pollut.* 104, 145-155.
- WÓJCIK M., 2000. *Fitoremediacja – sposób oczyszczania środowiska*. *Kosmos* 49, 135-147.
- XIONG J., HE Z., LIU D., MAHMOOD Q., YANG X., 2008. *The role of bacteria in the heavy metals removal and growth of Sedum alfredii Hance in an aqueous medium*. *Chemosphere* 70, 489-494.
- XUE S. G., CHEN Y. X., REEVES R. D., BAKER A. J. M., LIN Q., FERNANDO D. R., 2004. *Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant Phytolacca acinosa Roxb. (Phytolaccaceae)*. *Environ. Pollut.* 131, 393-399.
- ZHUANG P., YANG Q. W., WANG H. B., SHU W. S., 2007. *Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field*. *Water Air Soil Pollut.* 184, 235-242.