



Fitoremediacja metodą obniżania toksyczności gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi

Aleksander Astel, Anna Czyżyk, Agnieszka Parzych*

Wstęp

Zanieczyszczenie środowiska metalami ciężkimi staje się coraz poważniejszym problemem na skalę zarówno lokalną jak i światową. Przyczynia się do tego przede wszystkim rozwój przemysłu, zwłaszcza kopalnianego, komunikacja oraz chemizacja rolnictwa. Na skutek silnej antropopresji dochodzi do naruszenia naturalnych cykli biogeochemicznych oraz wzrostu stężenia metali w środowisku [1]. W przeciwieństwie do substancji organicznych, metale ciężkie w zasadzie nie ulegają biodegradacji, na skutek czego dochodzi do ich akumulacji w ekosystemach wodnych i glebowych. Ponadto, mogą pozostawać w środowisku przez wiele lat zmieniając tylko formy w jakich występują. Szczególnie narażonym elementem biosfery jest gleba, do której zanieczyszczenia mogą przenikać z powietrza i wód. Poza tym, ze względu na swoje właściwości fizyko-chemiczne, gleba stanowi ośrodek, w którym zanieczyszczenia pozostają znacznie dłużej w porównaniu z dwoma poprzednimi komponentami środowiska [2].

Wszystkie metale ciężkie przy wysokim stężeniu mają działa-

nie toksyczne [1]. Sam termin „metale ciężkie” określa grupę metali i półmetali o gęstości powyżej 6 g/m^3 [3] lub według innych źródeł - powyżej $4,5 \text{ g/m}^3$ [4], które w reakcjach chemicznych tworzą proste kationy ze względu na tendencję do oddawania elektronów [5]. Najczęściej definicja ta dotyczy takich pierwiastków śladowych jak Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni i Zn [3]. Niekiedy do tej grupy zaliczane są także półmetaliczne pierwiastki, np. As i Te [4]. Co więcej, niektóre pierwiastki określane jako „metale ciężkie” pełnią funkcję mikroelementów, czyli ich niewielkie stężenie jest niezbędne do prawidłowego funkcjonowania większości organizmów żywych. Dla zwierząt są to niewątpliwie Cu, Zn i Fe, dla roślin natomiast - Co i Cr. Mikroelementy stanowią najczęściej składniki enzymów i innych białek o kluczowym znaczeniu dla procesów metabolicznych [6].

Obecność w glebie hamuje rozwój i aktywność funkcjonujących mikroorganizmów, co prowadzi do zakłócenia procesów związanych z rozkładem i przemianą substancji organicznej. Zubożenie gleby w drobnoustroje, a co za tym idzie w związki humusowe,

przyczynia się do zachwiania równowagi jonowej i zwiększenia puli biodostępnych form metali ciężkich w kompleksie sorpcyjnym gleby [2]. Z kolei to, w jakiej formie występuje dany pierwiastek jest jednym z głównych czynników, decydującym o jego mobilności. Biodostępna frakcja jest łatwa do pobierania przez organizmy żywe i przemieszczania się w łańcuchu troficznym. Właściwości te są szczególnie niebezpieczne dla organizmów żywych, ponieważ metale kumulując się w tkankach, mogą powodować poważne konsekwencje dla zdrowia zwierząt czy ludzi [5].

Tradycyjne metody oczyszczania gleb opierają się głównie na dwóch strategiach - immobilizacji metali, bądź ich immobilizacji i usunięciu. Metody stosowane na miejscu zanieczyszczenia (*in situ*) polegają zazwyczaj na zmianie właściwości fizyko-chemicznych gleb, np. poprzez regulację odczynu. Natomiast metody *ex situ* wymagają usunięcia i przemieszczenia warstw zanieczyszczonego podłoża w specjalnie wyznaczone miejsca, w których są następnie oczyszczane mechanicznie, bądź przy pomo-

cy chemicznych eluentów. Ponadto, powodują nieodwracalne zmiany w strukturze gleb i powstawanie dużej ilości odpadów niebezpiecznych [7]. Metody biologiczne wydają się być zatem doskonałą alternatywą.

Fitoremediacja

Możliwość zastosowania organizmów żywych w ochronie środowiska została dostrzeżona już bardzo dawno. Porosty, mszaki czy rośliny wyższe wykorzystywane są jako bioindykatory do oceny zanieczyszczenia powietrza, wody i gleby.

Stosunkowo nową ideą jest natomiast stosowanie roślin wyższych do usuwania zanieczyszczeń z matryc środowiskowych. Mimo, że od dawna doceniana jest rola roślin w oczyszczaniu powietrza oraz pierwsze udane próby oczyszczania ścieków komunalnych podejmowano już na początku XIX wieku [8] to rozwój badań naukowych w tej dziedzinie przypada na dwie ostatnie dekady [2].

Pojęcie „fitoremediacja” zaproponowano dopiero w 1991 roku przez amerykańskiego naukowca z Rutgers University, Ilya Raskina. Jest ono połączeniem greckiego



słowa *phyton* oznaczającego roślinę i łacińskiego *remedium*, czyli „naprawiać” lub „zwalczać zło” [2]. Rośliny mogą być przyrównane do pomp napędzanych energią słoneczną, które ekstrahują określone pierwiastki ze swojego otoczenia oraz akumulują je w poszczególnych tkankach [9]. Na podstawie tych obserwacji, fitoremediacja definiowana jest jako wykorzystanie ponadprzeciętnych zdolności niektórych roślin zielonych do usuwania zanieczyszczeń ze środowiska, bądź unieszkodliwiania ich [10].

Technologie fitoremediacji polegają na zastosowaniu gatunków roślin, które są zdolne do wzrostu w skażonym środowisku i oddziaływania na procesy biologiczne, chemiczne i fizyczne, których celem jest usunięcie substancji zanieczyszczających z układu biologicznego [8]. Sposób, w jaki dana roślina oddziałuje na substancje zanieczyszczające środowisko zależy przede wszystkim od rodzaju zanieczyszczenia, gatunku rośliny oraz od warunków panujących w otoczeniu. Niektóre gatunki charakteryzują się zdolnością akumulacji ksenobiotyków, wbudowując je we własne komórki, inne zaś są w stanie włączać je do swojego szlaku metabolicznego. Dzięki specjalnym substancjom wydzielanym przez korzenie, rośliny mogą powodować immobilizację szkodliwych substancji i ograniczenie ich migracji w głąb profilu glebowego. Procesy te są efektem naturalnego przystosowania się roślin do ciężkich warunków środowiskowych [8].

Obecnie pojęciem „fitoremediacja” objętych jest kilka technik wykorzystujących rośliny wyższe do oczyszczania zanieczyszczonych ekosystemów. Są to ryzofiltracja, fitodegradacja, ryzodegradacja, fitoekstrakcja, fitowolatalizacja i fitostabilizacja. Istotnym kryterium stosowanym w charakterystyce metod fitoremediacji jest typ remediowanej matrycy oraz rodzaj zanieczyszczenia [10]. Rośliny służą jako narzędzie do procesów przenoszenia, usuwania, degradacji i stabilizacji zanieczyszczeń w glebie, osadach i wodzie [1].

Ryzofiltracja to metoda fitoremediacji wykorzystywana do oczyszczania wód i ścieków. Proces ryzofiltracji opiera się na zdolności korzeni niektórych gatunków roślin do sorpcji i wytrącania na ich powierzchni obecnych w roztworach wodnych substancji zanieczyszczających lub na ich pobieraniu i akumulowaniu przez roślinę w tkankach korzenia [8]. Ryzofiltrację wykorzystuje się przede wszystkim do usuwania jonów metali ciężkich, ale także niektórych substancji organicznych lub radioaktywnych, jednak nie mogą one występować w wysokich stężeniach [11].

Fitodegradacja oraz ryzodegradacja są to metody fitoremediacji stosowane głównie do usuwania zanieczyszczeń organicznych najczęściej z gleb, ale czasem także z osadów, wód gruntowych oraz powierzchniowych. Idea oparta jest na obserwacji, że rozkład substancji organicznych przebiega szybciej na glebach posiadających szatę roślinną, niż na gruntach jej pozbawionych [10].



Anton Paar

Jeden reometr
Dwa napędy
Nieskończone
możliwości...

MCR 702
TwinDrive™



Anton Paar® Poland Sp. z o.o.

Tel.: +48 22 395 53 90
info.pl@anton-paar.com
www.anton-paar.pl

Fitoekstrakcja

Fitoekstrakcja, określana również jako fitoakumulacja, jest główną i najbardziej efektywną metodą fitoremediacji stosowaną do oczyszczania gleb z metali ciężkich [2]. Mechanizm fitoekstrakcji polega na pobieraniu przez korzenie roślin obecnych w glebie zanieczyszczeń metalicznych, ich translokacji i magazynowaniu w organach nadziemnych. Pewne rośliny, określane mianem hiperakumulatorów, absorbują, w porównaniu z innymi roślinami i stężeniami środowiskowymi, niezwykle duże ilości metali ciężkich [10]. W efekcie stężenie zanieczyszczeń metalicznych w ich tkankach może być wyższe od 100 do 1000 razy w porównaniu ze stężeniem charakterystycznym dla innych gatunków roślin [6]. W strefie korzeniowej hiperakumulatorów dochodzi do zakwaszenia środowiska glebowego, a zmiana odczynu gleby podwyższa mobilność i biodostępność metali ciężkich. Proces fitoekstrakcji

Tabela 1. Gatunki roślin, które uznano za hiperakumulatory wraz z rodzajami akumulowanych metali ciężkich oraz odnośnikami literaturowymi

Gatunek rośliny	Rodzina	Metal ciężki	Literatura
<i>Alyssum bertolonii</i>	Brassicaceae	Ni, Co, Mg	[1, 2, 11, 12]
<i>Alyssum murale</i>	Brassicaceae	Ni	[4, 10, 12]
<i>Azolla pinnata</i>	Azollaceae	Cd	[2]
<i>Berkheya coddii</i>	Asteraceae	Ni, Cd, Pb, Zn	[11]
<i>Brassica juncea</i>	Brassicaceae	Pb, Cd, Cu, Ni	[8, 10]
<i>Cardaminopsis halleri</i>	Brassicaceae	Zn	[12]
<i>Eleocharis acicularis</i>	Cyperaceae	Cu, Zn, Cd, As	[2]
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Lamiaceae	Co	[1]
<i>Helianthus annuus</i>	Asteraceae	As, Cd, Ni	[6]
<i>Iberis intermedia</i>	Brassicaceae	Tl	[1]
<i>Ipomoea alpina</i>	Convolvulaceae	Cu	[1]
<i>Pteris vittata</i>	Pteridaceae	As	[1, 12]
<i>Polygonum aviculare</i>		Hg	[13]
<i>Schima superba</i>	Theaceae	Mn	[2]
<i>Sebertia acuminata</i>	Sapotaceae	Ni	[10, 14]
<i>Streptanthus polygaloides</i>	Brassicaceae	Ni	[11]
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Brassicaceae	Cd, Zn	[2, 10, 12, 13]
<i>Thlaspi rotundifolium</i>	Brassicaceae	Pb	[11]

umożliwia redukcja jonów metali i utworzenie kompleksów chelatowych, np. z metalotioneiną i fitochelatyną, które są wydzielane w ryzosferze roślin. Absorpcja metali przez korzenie przyspieszana jest także dzięki sekrecji kwasów organicznych, np. kwasu jabłkowego. W kolejnym etapie zanieczyszczenia obecne w glebie są pobierane przez korzenie roślin, transportowane w ksylemie, ponownie rozprowadzane do tkanek i sekwestrowane w komórkach [1].

Rośliny odpowiednie dla procesu fitoekstrakcji powinny odznaczać się:

- szybkim tempem wzrostu;
- dużą produkcją nadziemnej biomasy;
- rozbudowanym systemem korzeniowym;
- zdolnością akumulacji określonego metalu ciężkiego;
- przemieszczeniem akumulowanego metalu ciężkiego z korzeni do pędów;
- tolerancją na wysokie stężenie określonego metalu ciężkiego;

- zdolnością adaptacji do panujących warunków środowiskowych;
- odpornością na patogeny chorobotwórcze i pestycydy;
- prostymi technikami uprawy i zbioru;
- małą atrakcyjnością pokarmową dla zwierząt w celu uniknięcia włączenia szkodliwych pierwiastków do łańcucha pokarmowego [2].

Do tej pory opisano ponad 400 gatunków roślin pobierających metale ciężkie w znacznych ilościach [12].



Rys. 1. *Eleocharis acicularis* - sitowie igłowate. Robert H. Mohlenbrock, hosted by the USDA-NRCS PLANTS Database / USDA SCS. 1989. Midwest wetland flora: Field office illustrated guide to plant species. Midwest National Technical Center, Lincoln



Rys. 2. *Helianthus annuus* - słonecznik zwyczajny. Patrick J. Alexander, hosted by the USDA-NRCS PLANTS Database



Rys. 3. *Polygonum aviculare* - rdest ptasi. Robert H. Mohlenbrock, hosted by the USDA-NRCS PLANTS Database / USDA NRCS. 1995. Northeast wetland flora: Field office guide to plant species. Northeast National Technical Center, Chester

Są to zarówno rośliny zielne, jak i drzewa oraz krzewy [10]. W tabeli 1 zestawiono przykładowe gatunki roślin, które uznano za hiperakumulatory wraz z rodzajami akumulowanych metali ciężkich, zaś na rysunkach 1-3 przedstawiono odpowiednio *Eleocharis acicularis*, *Helianthus annuus* oraz *Polygonum aviculare*.

Fitostabilizacja

Fitostabilizacja, w przeciwieństwie do fitoekstrakcji, nie ma na celu usuwania metali ciężkich, ale zmniejszenie zagrożenia związanego z ich obecnością poprzez ich unieruchomienie w glebie [4]. Proces definiowany jest jako wykorzystanie roślin do immobilizacji zanieczyszczeń w glebie poprzez absorpcję i akumulację w korzeniach, adsorpcję na powierzchni korzeni lub precipitację w strefie ryzosferowej [8]. Rośliny wprowadzone na tereny skażone zapobiegają rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń w głębsze warstwy gleby oraz ich przenikaniu do wody i po-

wietrza. Redukując bioprzyswajalność metali ciężkich, fitostabilizacja zmniejsza również prawdopodobieństwo włączenia ich do łańcucha pokarmowego [15]. Obniżenie bioprzyswajalności metali możliwie jest dzięki związkom chemicznym wydzielanym przez korzenie do ryzosfery. Substancje te noszą nazwę eksudatów korzeniowych i należą do nich głównie związki fenolowe, kwasy organiczne i fitodiserofory. Eksudaty korzeniowe stymulują absorpcję jonów metali do korzeni i wytrącają je w postaci nierozpuszczalnych soli.

Akumulacja natomiast zachodzi w korzeniach - w ścianie komórkowej na terenie apoplastu [11]. Immobilizacja toksycznych pierwiastków może być wspomagana poprzez podwyższenie odczynu gleby na skutek wapnowania, dodawania materii organicznej (kompost, osady) lub dodawania minerałów ilastych, węglanów czy fosforanów. Zabiegi te mają na celu dezaktywację jonów metali i utworzenie nierozpuszczalnych kompleksów o obniżonej fitodostępności. Technika fitostabilizacji nie ogranicza się jedynie do obniżenia toksyczności gleb obciążonych metalami ciężkimi. Może ona być także wykorzystana do stabilizacji podłoża i odtworzenia szaty roślinnej na obszarach zdegradowanych, np. terenach dawnych kopalń odkrywkowych, składowisk odpadów i innych stanowisk przemysłowych [10]. Gatunki roślin stosowane w fitostabilizacji powinny odznaczać się przede wszystkim wysokim współczynnikiem biokoncentracji, niskim współczynnikiem translokacji metali ciężkich do łodyg i liści oraz dużą produkcją biomasy korzeni. Ponadto, podobnie jak

w przypadku pozostałych technik fitoremediacji, pożądany jest wysoki poziom tolerancji na zanieczyszczenia, szybkie tempo wzrostu i rozległy system korzeniowy [6]. Przykładowe gatunki roślin wykorzystywanych w procesie fitostabilizacji zestawiono w tabeli 2, zaś na rysunkach 4-5 przedstawiono odpowiednio *Typha latifolia*, *Leucaena leucocephala*. Biomasy roślinnej otrzymanej w technice fitostabilizacji nie usuwa się [1]. Fitostabilizacja nie powoduje zatem oczyszczania gleby z zanieczyszczeń metalicznych, a jedynie minimalizuje ich toksyczne oddziaływanie na poszczególne składniki ekosystemu poprzez unieruchomienie. Rośliny oprócz pobudzania procesów sorpcji metali w glebie pełnią także funkcję ochronną i stabilizującą grunt. Pozbycie się ich byłoby równoznaczne z ponownym uaktywnieniem i przemieszczaniem się metali ciężkich do różnych komponentów środowiska [4].

Fitoulatnianie

Fitoulatnianie (fitowolatylizacja, fitoewaporacja, fitoodparowanie) jest jedną z najmniej poznanych, a zarazem

Tabela 2. Rośliny stosowane w fitostabilizacji, immobilizowane metale ciężkie oraz odniesienia literaturowe

Gatunek rośliny	Rodzina	Metal ciężki	Literatura
<i>Artemisia frigida</i>	Asteraceae	As, Cu, Pb, Zn	[15]
<i>Artemisia ludoviciana</i>	Asteraceae	As, Cd, Cu, Zn	[15]
<i>Brassica Juncea</i>	Brassicaceae	Cr	[6]
<i>Festuca rubra</i>	Poaceae	Pb, Zn, Cd	[16]
<i>Gentiana pennelliana</i>	Gentianaceae	Pb, Cu, Zn	[17]
<i>Leucaena leucocephala</i>	Fabaceae	As, Pb	[18]
<i>Lupinus albus</i>	Fabaceae	Cu, Pb, Zn	[6]
<i>Poa secunda</i>	Poaceae	Cu, Zn	[15]
<i>Salix viminalis</i>	Salicaceae	Hg	[6]
<i>Sesbania rostrata</i>	Fabaceae	Pb, Zn	[1]
<i>Stachys sylvatica</i>	Lamiaceae	As	[6]
<i>Typha latifolia</i>	Typhaceae	As, Cd, Cr, Co, Ni, Mn, Zn	[17]



Rys. 4. *Typha latifolia* - palka szerokolistna. Sheri Hagwood, hosted by the USDA-NRCS PLANTS Database



Rys. 5. *Leucaena leucocephala*. Wikipedia, domena publiczna

najbardziej kontrowersyjnych metod fitoremediacji [6]. Proces fitoulatniania polega na pobieraniu i transpiracji zanieczyszczeń przez roślinę, a następnie ich odparowaniu do atmosfery w zmodyfikowanej, lotnej postaci [11]. Fitowaporacja stosowana jest również do usuwania niektórych związków organicznych, np. rozpuszczalników chloroorganicznych, nitrobenzenu, atrazyny, a także do eliminacji z gleb selenu i rtęci oraz ich lotnych połączeń [17].

Selen skażający środowisko występuje najczęściej w postaci selenitu (SeO_3^{2-}), selenianu (SeO_4^{2-}) oraz rzadziej w formie organicznej - selenometioniny. Szybkość pobierania selenu z podłoża, tak jak i innych pierwiastków, zależy od jego chemicznej formy, stężenia i warunków środowiskowych. Pobrany selen ulega reakcjom enzymatycznym

w chloroplastach przy udziale takich związków jak reduktaza glutationowa, reduktaza siarczynowa, ATP sulfurylaza i S-metylmetionio hydrolazy. Następnie uwalniany jest do atmosfery w zredukowanej formie jako dimetyloselenid lub dimetyldiselenid. Obie metylowane formy charakteryzują się nawet do 700 razy mniejszą toksycznością niż selen w formie organicznej [8]. Przykładem rośliny zdolnej do akumulacji tego pierwiastka i wydzielania w formie lotnej jest traganek grojniasty (*Astragalus racemosus*). Gatunek ten wydziela selen w formie selenku dimetylu - związku o charakterystycznym zapachu czosnku [9, 10]. Fitoulatnianie rtęci natomiast możliwe jest dzięki hodowlom transgenicznych roślin posiadających geny bakteryjnych enzymów - reduktazy rtęciowej (merA) i liazy

organicznych związków rtęci (merB) [8]. Enzymy umożliwiają mikroorganizmom redukcję toksycznego jonu rtęci Hg^{2+} do mniej toksycznej metalicznej rtęci Hg. Rośliny wyposażone w geny bakteryjne uzyskują zdolność do pobierania rtęci, głównie w formie metylowanej, oraz jej redukcji do formy elementarnej Hg [9]. Następnie zredukowana rtęć zostaje uwolniona do atmosfery poprzez aparat transpiracyjny rośliny [8].

Zalety i ograniczenia technik fitoremediacyjnych

Fitoremediacja nazywana jest czasem „zieloną remediacją” bądź „zieloną technologią”. Pojęcia te są adekwatne nie tylko ze względu na to, że proces oczyszczania gleb prowadzony jest przez rośliny, z natury zielone, ale także dlatego, że techniki fitoremediacji są przyjazne środowisku [10].

Metody fitoremediacji mogą być wykorzystywane jako odrębne technologie, ale także jako uzupełnienie tradycyjnych sposobów oczyszczania gleb i rekultywacji terenów zdegradowanych [11].

Techniki fitoremediacji stosowane są głównie w miejscu wystąpienia zanieczyszczeń (*in situ*) dzięki czemu nie następują dodatkowe szkody w środowisku naturalnym związane z koniecznością zebrania i przemieszczenia zanieczyszczonej gleby [1]. W odróżnieniu od metod tradycyjnych, w procesie fitoremediacji nie są stosowane dodatkowe związki ekstrahujące. Oznacza to mniejszą ilość zanieczyszczeń wtórnych, a więc i redukcję składowanych odpadów [8]. Ponadto, proces oczyszczania gleby z metali ciężkich przebiega w sposób nie degradujący matrycy, co często ma miejsce podczas stosowania chemicznych i fizykochemicznych metod remediacji gleb [10].

Rośliny dzięki zwartemu systemowi korzeniowemu dodatkowo chronią zdegradowane gleby przed erozją, która mimo, że jest procesem naturalnym powodowanym przez czynniki atmosferyczne nasila się na skutek działań antropogenicznych. Stosowanie nasadzeń na otwartych terenach ogranicza przede wszystkim erozję wietrzną oraz zmniejsza natężenie hałasu pochodzącego np. z działalności przemysłowej [1]. Redukcja procesów erozji powierzchniowej zmniejsza natomiast ryzyko przedostania się zanieczyszczeń do wód oraz atmosfery [11]. Ponadto, związki uwalnianie do ryzosfery przez



korzenie roślin przyczyniają się do zwiększenia liczebności i aktywności mikroorganizmów znajdujących się w glebie. Wzmocniona działalność mikroflory powoduje zwiększenie się ilości substancji humusowej, zwiększając tym samym żyzność gleby oraz poprawiając jej strukturę.

Zastosowanie technik fitoremediacji nie wymaga użycia profesjonalnego sprzętu ani wyspecjalizowanego personelu. Niewątpliwą zaletą jest więc opłacalność ekonomiczna [11]. Koszty procesu oczyszczania gleby obciążonej metalami ciężkimi, zarówno na poziomie planowania, jak i późniejszej praktycznej realizacji projektu, są wielokrotnie niższe od nakładów finansowych koniecznych dla przeprowadzenia oczyszczania klasycznymi metodami fizykochemicznymi [10]. Szacuje się, że oczyszczenie jednego hektara powierzchniowej warstwy ziemi (do ok. 50 cm) kosztowałoby w granicach 40 tysięcy dolarów, przy czym koszt ten rozłożony jest na 30 lat trwania procesu. Dla porównania, koszt zastosowania technik fizykochemicznych może sięgać nawet 2 milionów dolarów [8]. Z ekonomicznego punktu widzenia istotny jest także problem powstających odpadów. Biomasa wzbogacona w metale ciężkie jest materiałem łatwym do termicznej utylizacji. Jednocześnie pierwiastki mające wartość rynkową, takie jak nikiel, cynk, miedź i kobalt, zgromadzone w tkanakach roślinnych w wyniku procesu fitoekstrakcji mogą zostać ponownie pozyskane [2].

Fitoremediacja uznana jest za efektywną metodę remediacji gleb nie tylko na małych, ale także na rozległych obszarach [11]. Ponadto, obsadzenie zdegradowanego terenu roślinnością bez wątplenia poprawia walory krajobrazowe danego terenu. Aspekt estetyczny, niskie koszty oraz „naturalność” procesów fitoremediacji powodują, że technologia ta budzi coraz większe zainteresowanie oraz akceptację społeczną [8].

Mimo tak wielu zalet, fitoremediacja posiada także szereg ograniczeń. Podstawową wadą jest długotrwałość całego procesu, który w zależności od stopnia skażenia oraz zastosowanego gatunku rośliny może trwać od kilku do kilkunastu lat zanim stężenie metali ciężkich nagromadzonych w glebie osiągnie akceptowalny poziom [2]. Na szybkość usuwania metali ciężkich ma wpływ rodzaj gleby i jej odczyn, odpowiednia ilość składników odżywczych i wody, długość sezonu wegetacyjnego, gatunek rośliny, a także wybrana metoda – najdłużej proces przebiega przy zastosowaniu fitoekstrakcji ciągłej. Większość stosowanych roślin to jednoroczne lub dwuletnie rośliny zielne, które charakteryzują się niewielkim przyrostem biomasy w sezonie wegetacyjnym [8, 10].

Ograniczona fitoprzyswajalność metali ciężkich także stanowi problem w zastosowaniu fitoekstrakcji. Rozwiązaniem wydają się być naturalne i syntetyczne związki chelatujące, np. EDTA, jednak niewłaściwe zastosowanie tego typu substancji może doprowadzić do skażenia terenów sąsiadujących oraz wód. Dlatego też, ważnym



CyBio
An Analytik Jena Company

CyBi®-FeliX

Doskonały wybór dla Twojego laboratorium.

- » Wszechstronna stacja pipetująca do jednoczynnego i wielokanałowego pipetowania
- » Kompaktowa konstrukcja z 12-pozycyjnym pokładem roboczym
- » Zakres objętości 500 nl – 1 ml obsługiwany jedną głowicą



Wszechstronne zastosowanie, np.:

- » Rozcieńczenie seryjne w dowolnym układzie na płytce
- » Replikacja i przeformatowywanie płytki
- » Pipetowanie wybiórcze – „Cherry Picking”

i wiele innych

Wylączny dystrybutor w Polsce:
BIOGENET, ul. Parkingowa 1, 05-420 Józefów k. Otwocka
tel.: +48 22 463 80 40 do 49, faks: +48 22 417 31 98
e-mail: biogenet@biogenet.com.pl www.biogenet.pl

Liquid Handling. Automation. Service.



aspektem przy przeprowadzaniu fitoekstrakcji wspomaganą jest stały monitoring oczyszczanego obszaru. Ponadto, biomasa roślinna zanieczyszczona metalami ciężkimi stanowi odpad wysoce toksyczny, nawet po termicznym zagospodarowaniu. Metody odzysku metali z popiołów wzbogaconych w potencjalnie wartościowe pierwiastki w dalszym ciągu nie jest opłacalna [8]. Wyjątek stanowi nikiel, którego wtórne pozyskiwanie z biomasy *Alyssum murale* i *Alyssum corsicum* uznano za ekonomicznie efektywne - z jednego hektara uzyskano 400 kg niklu, którego cena wynosi 40 dolarów za kilogram [2]. Istotnym ograniczeniem wszystkich technik fitoremediacji jest limitowana przez głębokość penetracji korzeni rozpuszczalność i dostępność zanieczyszczeń [1]. Długość korzeni większości roślin zielnych wynosi do 120 cm, natomiast w przypadku drzew jest to 5-10 m. Metale ciężkie znajdujące się poza zasięgiem systemu korzeniowego są niedostępne dla roślin, a więc nie ulegają fitoremediacji [8]. Ponadto, w technice fitostabilizacji zanieczyszczenia metaliczne są jedynie unieruchamiane przez system korzeniowy. Zmiana warunków środowiska, przede wszystkim odczynu gleby, wiąże się z ich z ponownym uaktywnieniem i wzrostem toksyczności [4]. Podobny problem stanowi przemieszczanie się metali ciężkich z gleby do innej matrycy środowiskowej, a mianowicie do rosnących na niej roślin bądź do atmosfery. Roślinność „wzbogacona” o metale ciężkie stanowi nie tylko zagrożenie wynikające

z bezpośredniego kontaktu, ale także możliwość włączenia usuwanych zanieczyszczeń do łańcucha pokarmowego [1]. Dlatego też funkcje terenów oczyszczanych przy pomocy fitoekstrakcji powinny zostać ograniczone do minimum, niedopuszczalne jest np. wykorzystywanie takiego obszaru jako pastwiska [10]. Fitoulatanianie natomiast uważane jest za metodę najbardziej ryzykowną, ponieważ usuwane w trakcie tego procesu zanieczyszczenia wnikają do atmosfery i mimo mniej toksycznej postaci nadal stanowią poważne zagrożenie dla środowiska. Przenoszone drogą powietrzną, lotne związki selenu czy rtęci rozprzestrzeniają się, skażając przy tym dalsze tereny, być może wcześniej niezanieczyszczone [8]. Zależność wzrostu roślin od klimatu oraz ich sezonowość także stanowi poważne ograniczenie w stosowaniu technik fitoremediacyjnych. Efektywność procesu oczyszczania gleby może ulec zmniejszeniu w wyniku uszkodzenia rośliny w okresie wegetacji np. na skutek zaistnienia skrajnych warunków pogodowych lub pojawienia się szkodników lub choroby. Ponadto, stosując daną technikę fitoremediacji, należy unikać wprowadzania nieodpowiednich roślin inwazyjnych, gdyż obce gatunki mogą zachwiać lokalną różnorodność biologiczną [1].

Literatura

[1] Grobelak A., Kacprzak M., Fijałkowski K., 2010. Fitoremediacja – niedoceniony potencjał roślin w oczyszczaniu środowiska. *Journal of Ecology and Health*, 14(6), 276-280.

[2] Hazrat A., Khan E., Muhammad A.S., 2013. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91, 869-881.

[3] Alloway B.J., Ayres D.C., 1999. Chemiczne podstawy zanieczyszczenia środowiska. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

[4] Karczewska A., 2008. Ochrona i rekultywacja terenów zdegradowanych. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego, Wrocław.

[5] Ociepa E., Ociepa-Kubicka A., 2012. Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi. *Inżynieria i ochrona środowiska*, 15(2), 169-180.

[6] Dąbrowska G., Gos A., Mierek-Adamska A., 2009. Rośliny modyfikowane genetycznie a strategie oczyszczania gleb z metali ciężkich. *Postępy biologii komórki*, 3(4), 649-662.

[7] Karczewska A., Kabała C., 2012. Gleby zanieczyszczone metalami ciężkimi i arsenem na Dolnym Śląsku – potrzeby i metody rekultywacji. *Zeszyty naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu: Rolnictwo XCVI*, 576, 61-76.

[8] Cyplik P., Króliczak P., Marzec R., 2006. Fitoremediacja – alternatywa dla tradycyjnych metod oczyszczania środowiska. *Biotechnologia*, 3(74), 88-97.

[9] Raskin I., Smith R.D., Salt D.E., 1997. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current opinion in biotechnology*, 8, 221-226.

[10] Buczkowski R., Kondzielski I., Szymański T., 2002. Metody remediacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi.

Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń.

[11] Siwek M., 2008. Biologiczne sposoby oczyszczania środowiska – fitoremediacja. *Wiadomości Botaniczne*, 52(1/2), 23-28.

[12] Hrycyk K., 2012. Hiperakumulatory. *Zielona Planeta*, 3(102), 6-7.

[13] Bothe H., 2011. Plants in heavy metal soils. *Soil Biology*, 30, 35-57.

[14] Brooks R.R., Jaffre T., Lee J., Reeves R.D., 1976. *Sebertia acuminata*: a hyperaccumulator of nickel from New Caledonia. *Science*, 193, 4253, 579-580.

[15] Ford K.L.I., Neuman D., 2006. Phytostabilization as a remediation alternative at mining sites. *Technical Note*, 420, 2-48.

[16] Datta R., Hannigan R., Sarkar D., 2007. Concepts and applications in environmental geochemistry, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

[17] De Souza R, Paul M.S., Pratas J., Varun M., 2011. Evaluation of phytostabilization, a green technology to remove heavy metals from industrial sludge using *Typha latifolia* L. *Biotechnology. Bioinformatics and Bioengineering*, 137-145.

[18] Alves E., Guimaraes L., Labory C., Rangel W., Schneider J. 2012. Anatomy and ultrastructure alterations of *Leucaena leucocephala* (Lam.) inoculated with mycorrhizal fungi in response to arsenic-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 262, 1245-1258.

* Aleksander Astel, Anna Czyżyk, Agnieszka Parzych - *Akademia Pomorska, Zakład Chemii Środowiskowej, Instytut Biologii i Ochrony Środowiska, e-mail: astel@apsl.edu.pl*