

Wpłynęło 05.05.2014 r.
Zrecenzowano 30.05.2014 r.
Zaakceptowano 09.07.2014 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

MOŻLIWOŚCI OCZYSZCZANIA ŚRODOWISK WODNYCH METODĄ RYZOFILTRACJI

Aleksandra KOŹMIŃSKA^{AEF}, **Ewa HANUS-FAJERSKA**^{AEF},
Ewa MUSZYŃSKA^{AF}

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Biologii Roślin i Biotechnologii, Zakład Botaniki i Fizjologii Roślin

Streszczenie

We współczesnym świecie pestycydy, substancje powierzchniowo czynne, węglowodory ropopochodne, fenole, chlorowe pochodne bifenyli i metale ciężkie, takie jak ołów (Pb), miedź (Cu), chrom (Cr), kadm (Cd), rtęć (Hg) i cynk (Zn) są zaliczane do istotnych antropogenicznych zanieczyszczeń środowiska. Zanieczyszczenia wody można usunąć stosując metody mechaniczne, fizykochemiczne lub biologiczne. Ze znanych technologii fitoremediacji, ryzofiltracja jest najbardziej przydatna do usuwania zanieczyszczeń chemicznych z medium wodnego. Mechanizm fitofiltracji opiera się na zdolności wybranych roślin do adsorpcji bądź absorpcji zanieczyszczeń. Jedynie nieliczne gatunki roślin charakteryzują się szybkim tempem wzrostu systemu korzeniowego i są zdolne do wydajnej fitoremediacji. Odpowiedni dobór materiału roślinnego jest zasadniczym etapem procesu ryzofiltracji, zwłaszcza gdy jest wymagane oczyszczenie wody z mieszaniny związków toksycznych. W opracowaniu opisano zalety ryzofiltracji, zwłaszcza w odniesieniu do zbiorników wodnych zanieczyszczonych metalami ciężkimi, oraz dokonano przeglądu gatunków roślin naczyniowych stosowanych w tej technologii.

Słowa kluczowe: *fitofiltracja, fitoremediacja, metale ciężkie, rośliny naczyniowe, zanieczyszczenia wód*

WSTĘP

Intensywny rozwój przemysłu oraz infrastruktury umożliwiającej transport kowalowy i szynowy, a także stałe zwiększanie się liczby ludności powodują intensyfikację niekorzystnych zmian, zachodzących w środowisku przyrodniczym, w wyniku czego szkodliwe substancje gromadzą się w glebie, wodzie i powietrzu. Pesticydy, węglowodory ropopochodne, fenole, chlorowe pochodne bifenyli oraz metale ciężkie lub metaloidy, takie jak ołów, miedź, chrom, kadm, rtęć, cynk czy arsen, są zaliczane do groźnych zanieczyszczeń wód powierzchniowych i gruntowych pochodzenia antropogenicznego. Duża ich ilość trafia do wód wraz ze ściekami przemysłowymi, pochodzącymi z hut, przemysłu galwanizerskiego, garbarskiego, produkcji nawozów sztucznych, środków ochrony roślin, z zakładów farbiarskich, włókienniczych, elektrochemicznych, motoryzacyjnych, energetycznych oraz z zakładów produkujących baterie, akumulatory czy katalizatory. Dodatkowym problemem jest eutrofizacja, zachodząca zarówno na skutek nadmiernego dopływu do wód pierwiastków biogennych aplikowanych w nawozach, jak i zrzutu ścieków przemysłowych, przy czym proces ten dotyczy głównie azotu i fosforu [HASHIM i in. 2011; MARQUES i in. 2009].

Nadmierne stężenia substancji toksycznych w zbiornikach wodnych stanowią zagrożenie dla roślin, zwierząt i ludzi. Poprawę stanu czystości wód można osiągnąć w wyniku ograniczenia emisji zanieczyszczeń oraz drogą remediacji zanieczyszczonych środowisk. W procesach oczyszczania wód wykorzystuje się mechanizmy chemiczne, fizykochemiczne i biologiczne (biochemiczne/biosorpcyjne). Wybór odpowiedniej metody (jej efektywność i opłacalność) jest kluczowy dla skuteczności oczyszczania wód i ścieków. Bardzo często, w celu uzyskania lepszych rezultatów, stosuje się synergistycznie dwie lub nawet większą liczbę technik równocześnie [FU, WANG 2011; HASHIM i in. 2011]. Podejmowane są również próby optymalizacji istniejących technologii czy też nowatorskiego wykorzystania znanych metod.

METODY BADAŃ

W pracy dokonano analizy dostępnych materiałów źródłowych na temat ryzofiltracji, zwłaszcza w odniesieniu do zbiorników wodnych zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Przedstawiono przegląd najważniejszych gatunków roślin naczyniowych aktualnie wykorzystywanych w tej technologii. Dokonano szerokiego przeglądu literatury na temat ryzofiltracji, obejmującego zarówno istotne publikacje wydane w języku polskim, jak też ważniejsze prace zagraniczne, przy czym skomentowano wybrane wyniki badań z okresu ostatnich dwudziestu lat, ze szczególnym uwzględnieniem ostatniego dziesięciolecia.

WYNIKI I Dyskusja

TECHNIKI OCZYSZCZANIA ŚRODOWISK WODNYCH

Do najczęściej stosowanych fizykochemicznych metod usuwania pierwiastków metalicznych z medium wodnego należą wymiana jonowa oraz filtracja membranowa. Często stosuje się również procesy strąceniowe (koagulację – flokulację) i flotację [FU, WANG 2011; KATSOU i in. 2011; KURNIAWAN i in. 2006]. W biosorpcji wykorzystuje się obecność w adsorbentach (biomateriałach) grup funkcyjnych (karboksylowej, hydroksylowej, sulfhydrylowej i amidowej), dzięki czemu jony metali ciężkich są łatwo wiązane. Biosorpcja, mimo że jej mechanizm jest dość skomplikowany, gdyż składa się z wielu procesów (adsorpcji, wytrącania powierzchniowego, wymiany jonowej i kompleksacji), jest metodą zaliczaną do wydajnych i opłacalnych ekonomicznie, ponieważ można w niej zastosować, jako adsorbenty, na przykład słomę czy otręby pszenicy zwyczajnej (*Triticum aestivum* L.) [FAROOQ i in. 2010]. Różnego typu odpady roślinne można również z powodzeniem wykorzystać jako adsorbenty metali ciężkich ze zbiorników wodnych. Posłużenie się tego typu adsorbentami stanowi doskonałą alternatywę dla stosowania kosztownych, konwencjonalnych metod usuwania metali. Do biosorpcji mogą być również użyte materiały odpadowe, takie jak: łuski ryżowe, trociny, wyłoki trzciny cukrowej, odpady z przetwórstwa owoców czy nawet chwasty. Modyfikacje chemiczne tych odpadów, przez zastosowanie kwasów organicznych i nieorganicznych oraz związków utleniających, znacznie zwiększają ich zdolność do adsorbowania Cd, Pb, Hg, Cr, Ni, Cu i Zn [SRINIVAS RAJU, NAIDU 2013; WAN NGAH, HANAFIAH 2008]. W usuwaniu metali ciężkich z układów wodnych zastosowanie znalazła również tak zwana technologia syntezy NMOS, czyli zastosowanie nanometrycznych tlenków żelaza bądź manganu, glinu, tytanu, magnezu i cezu, które umożliwiają uzyskanie dużej powierzchni i wykazują specyficzne powinowactwo do metali ciężkich. Obecnie prowadzone badania z zakresu nauk podstawowych, związane z technologią NMOS, koncentrują się na szczegółowym poznaniu mechanizmów odpowiedzialnych za usunięcie metalu z układu. Stosuje się w nich nowoczesne techniki analityczne (XAS, ATR-FT-IR, NMR) lub modele matematyczne, służące opracowaniu technologii pozyskiwania adsorbentów na bazie tlenków metali (tlenki granulowane lub materiały kompozytowe) [HUA i in. 2012]. Wysokie stężenia arsenu w wodach naturalnych na całym świecie stanowią duży problem i zagrożenie ze względu na toksyczne właściwości tego pierwiastka. Jego usuwanie następuje w wyniku utleniania, precypitacji, koagulacji, filtracji membranowej oraz adsorpcji [MOHAN, PITTMAN 2007]. Natomiast w procesie usuwania metali ciężkich z zanieczyszczonej wody za pomocą adsorbentów, obok powszechnie stosowanego węgla aktywnego, zastosowanie znajdują również inne materiały, takie jak chitosan czy zeolit. Są to materiały łatwo dostępne i mające dużą zdolność adsorpcji [BABEL, KURNIAWAN 2002].

BIOLOGICZNE METODY OCZYSZCZANIA ŚRODOWISKA

Duże nadzieje pokłada się w wykorzystaniu nieskomplikowanej biologicznej metody oczyszczania środowiska, jaką jest fitoremediacja. Jest to technologia oczyszczania gleb, wód gruntowych i powierzchniowych, osadów ściekowych i powietrza, w której wykorzystuje się naturalne predyspozycje określonych taksonów roślin, zdolnych do wzrostu i rozwoju w ekosystemach skażonych substancjami nieorganicznymi i organicznymi, a także do ich pobierania i gromadzenia lub biodegradacji. Technologia ta jest postrzegana jako alternatywa dla negatywnie ingerujących w środowisko metod fizykochemicznych, które mogą przyczyniać się do generowania wtórnych zanieczyszczeń gleby, wody oraz powietrza. Jest opłacalna ekonomicznie, ponieważ wymaga znacznie mniejszych niż inne metody nakładów finansowych, a jednocześnie jest przyjazna dla środowiska [CUUNNINGHAM i in. 1995; HANUS-FAJERSKA i in. 2011; MARQUES i in. 2009; RASKIN i in. 1997]. Rośliny używane jako fitoremediatory powinny charakteryzować się dobrze rozwiniętym systemem korzeniowym, szybkim tempem wzrostu wegetatywnego, tolerancją na określone typy substancji skażających, a nawet, w pewnych przypadkach – zdolnością akumulowania kilku zanieczyszczeń jednocześnie. Dotychczas zidentyfikowano ponad czterysta gatunków roślin wykazujących zdolność hiperakumulacji jonów metali, lecz nie wszystkie spełniają te wymagania. Niektóre z badanych fitoremediatorów pełnią również ważne funkcje ekologiczne, stanowiąc pożytek dla owadów, a także estetyczne, ze względu na wybarwienie i zapach kwiatów czy interesujący pokrój.

Ze względu na sposób, w jaki rośliny umożliwiają oczyszczanie skażonych ekosystemów, wyróżnia się następujące techniki: fitoekstrakcję, fitodegradację, fitostabilizację, fitoewaporację oraz ryzofiltrację i blastofiltrację, które są zaliczane do technik fitoakumulacji w systemach wodnych. Jednak mechanizmy usuwania czy detoksykacji zanieczyszczeń są dość złożone i często wynikają z połączenia różnego rodzaju szlaków metabolicznych [GHOSH, SINGH 2005; HANUS-FAJERSKA i in. 2011; MARQUES i in. 2009; PIOTROWSKA-NICZYPORUK, BAJGUS 2013; SALT i in. 1995].

MOŻLIWOŚCI POPRAWY STANU CZYSTOŚCI WÓD Z ZASTOSOWANIEM RYZOFILTRACJI

Spośród wymienionych technik, ryzofiltracja jest najbardziej odpowiednią metodą usuwania zanieczyszczeń, w tym również jonów metali ciężkich, ze zbiorników wodnych. Do mediów podatnych na jej zastosowanie zalicza się ścieki komunalne (ryzofiltracja metali, nutrientów), wysięki z pól uprawnych (składniki użyźniacze, metale, selen, bor, arsenik, herbicydy oraz organiczne pestycydy), wysięki z hałd (metale), ścieki przemysłowe (metale ciężkie, selen), wysięki ze składowisk

odpadów czy zanieczyszczone wody gruntowe (metale, związki organiczne). Jest to technika, w której najczęściej, choć nie jedynie, systemy korzeniowe wykorzystuje się do adsorpcji, gromadzenia oraz wytrącania toksycznych metali z wód gruntowych i ścieków. Zanieczyszczenia są wytrącane na powierzchni korzeni i w wyniku absorpcji gromadzone w wakuolach komórek kory pierwotnej bądź bezpośrednio przenikają do tkanek naczyniowych. Ryzofiltrację można czasem uznać za wariant fitoekstrakcji, ponieważ może dotyczyć absorpcji makro- i mikroelementów z wód i ścieków.

Możliwości wykorzystania roślin do oczyszczania ścieków bytowo-gospodarczych zauważono dość dawno [DĄBEK 2010; DUSHENKOW i in. 1995; KRISHNA i in. 2012; MARECIK i in 2006]. Obecnie technika ta jest stosowana głównie do usuwania jonów metali ciężkich oraz pierwiastków radioaktywnych, zwłaszcza jeżeli występują w środowisku wodnym w stosunkowo małych stężeniach. Ryzofiltracja jest najbardziej efektywna w usuwaniu ołowiu. Usuwanie przez systemy korzeniowe roślin jonów ołowiu z wód jest kilkadziesiąt razy bardziej wydajne niż usuwanie związków zawierających arsen. Jak już wspomniano, najważniejszą rolę w usuwaniu metali ciężkich z zastosowaniem ryzofiltracji odgrywają procesy sorpcyjne, zachodzące na powierzchniowych tkankach roślinnych. Sorpcja zanieczyszczeń to złożony proces, wynikający z oddziaływań fizykochemicznych pomiędzy rośliną a substancją remediowaną, uzależniony głównie od intensywności chelatacji i wymiany jonowej, przy czym procesy te mogą również zachodzić na martwej tkance [ISLAM i in. 2013; KRISHNA i in. 2012; MARECIK i in 2006; RASKIN i in. 1997]. Procesy biologiczne związane z aktywnym pobieraniem ksenobiotyków, ich akumulacją w wakuolach czy transportem do nadziemnych organów nie wpływają w dużym stopniu na efektywność ryzofiltracji [KAREN i in. 2009].

Mimo że środowisko wodne jest zwykle naturalnym siedliskiem większości gatunków stosowanych w procesie ryzofiltracji, coraz większą uwagę zwraca się na możliwość wykorzystania do tego celu także typowych roślin lądowych. Rośliny kultywowane w kulturach hydroponicznych bądź aeroponicznych cechuje znacznie większa efektywność ryzofiltracji zanieczyszczeń aniżeli rośliny wodne [FINE i in. 2013; MARECIK i in 2006; RASKIN i in. 1997]. Opracowano różne warianty techniczne ryzofiltracji, począwszy od mat pływających po powierzchni i utrzymujących korzenie roślin w wodzie, z zastosowaniem trzciny pospolitej (*Phragmites australis* Trin. ex Steud), palki szerokolistnej (*Typha latifolia* L.), pontederii grubogonkowej (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms), słonecznika zwyczajnego (*Helianthus annuus* L.) [LEE, YANG 2010; ZEMLEDUCH, TOMASZEWSKA 2007]. Dużą popularność zyskały układy ryzofiltrujące ścieki bytowo-gospodarcze oparte na trzcinie i innych roślinach strefy przybrzeżnej zbiorników wodnych lub na wierzbie. Kolejnym przykładem zastosowania ryzofiltracji jest tworzenie wzdłuż cieków pasów zadrzewień i zakrzewień, których zadaniem jest ochrona wód przed ściekającymi z pól zanieczyszczeniami [SYMONIDES 2010; WESOŁOWSKI, BRYSEWICZ

2014]. Pasy te składają się zazwyczaj z trzech typów roślin: gatunków terenów podmokłych (higrofitów), gatunków wyżynnych i gatunków fakultatywnych.

Najczęściej wykorzystywaną techniką ryzofiltracyjną jest tworzenie sztucznych mokradeł, które służą głównie do oczyszczania ścieków przemysłowych, obciążonych przede wszystkim metalami ciężkimi lub znaczną zawartością soli. Ze względu na sposób wprowadzania ścieków można wyróżnić trzy typy sztucznych mokradeł: z systemem przepływu powierzchniowego, podpowierzchniowego oraz pionowego. Systemy te różnią się między sobą sposobem przemieszczania się ścieków przez matrycę mokradła. W sztucznych mokradłach znajdują zastosowanie rośliny wodne lub błotne, należące do następujących gatunków: alternantera bezszypułkowa (*Alternanthera sessilis* (L.) DC), azolla karolińska (*Azolla caroliniana* Will.), pontederia gruboogonkowa (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms), przętka pospolita (*Hippurus vulgaris* L.), sit bałtycki (*Juncus balticus* Willd.), rzęsa drobna (*Lemna minor* L.), niezapominajka błotna (*Myosotis palustris* (L.) Emend. Rchb.), pistia rozetkowa (*Pistia stratiotes* L.) [KARCZEWSKA, KABALA 2010; KRISHNA i in. 2012; MITHEMBU 2012].

Sztuczne mokradła są zaliczane do szeroko rozumianych systemów hydrofitowych. Systemy hydrofitowe to obiekty lub obszary symulujące prace ekosystemów bagiennych, tworzone przez człowieka w celu ochrony wód lub oczyszczania ścieków. W systemach hydrofitowych zachodzą procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne, właściwe dla ekosystemów bagiennych, między innymi tlenowy i beztlenowy rozkład materii organicznej przez mikroorganizmy, pobieranie związków biogennych i metali ciężkich przez rośliny, spulchnianie, udrażnianie i dotlenianie podłoża przez korzenie i kłącza, niszczenie organizmów patogennych przez antagonistyczne oddziaływanie mikroflory bagiennej i wydzielin korzeni niektórych gatunków. Oczyszczalnie hydrofitowe nie wytwarzają wtórnych osadów ściekowych, mają zdolność usuwania substancji organicznej i związków biogennych oraz metali ciężkich i niektórych mikrozanieczyszczeń organicznych. Dzięki temu, że makrofity mają dobrze rozwinięty system kłączy i korzeni, który rozprzestrzenia się we wszystkich kierunkach, przesączenie ścieków zachodzi równomiernie. Obumierające korzenie i kłącza ulegają rozkładowi, pozostawiając przestrzenie zwiększające i stabilizujące przewodność hydrauliczną złoża. Makrofity wykazują też przystosowania biochemiczne, fizjologiczne i strukturalne, które pozwalają im funkcjonować w warunkach niedotlenienia [KARCZEWSKA, KABALA 2010; MITHEMBU 2012; OBASRKA-PEMPKOWIAK 2005].

DĄBEK [2010] badał skuteczność fitoremediacyjną rdestu plamistego (*Polygonum persicaria* L.) – gatunku zaliczanego do nitrofitów, stosowanego do oczyszczania ścieków bytowych. Badania prowadził w formie mikrouprawy i określał stopień akumulacji makroelementów (N, P, K) przez *Polygonum persicaria*. Rdest plamisty akumulował azot w liściach ($48,40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.) i w korzeniach ($45,64 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.), natomiast fosfor – w liściach ($4,11 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m.). Rośliny wydajnie akumulowały składniki w strefie ryzofiltracji, zalewanej ściekami, to jest na głębo-

kości 10–15 cm, oraz w części liściowej na wysokości 70–95 cm, to jest w strefie ewaporacji i fotosyntezy. Gatunek ten wytwarza dużą powierzchnię chłonną korzenia, co zapewnia wydatny transport wody i soli mineralnych do nadziemnych części rośliny. Zaabsorbowane makroelementy mogą stanowić surowiec kompostowy o dużej zawartości azotu. Natomiast wyniki badań prowadzonych przez KAREN i in. [2009] potwierdzają fitostabilizacyjne zdolności wierzby (*Salix* L. sp.) w odniesieniu do miedzi i ołowiu, co ma bardzo duże znaczenie w przypadku ochrony stanu wód podziemnych. Ponadto dowiedziono, że zastosowanie juwenilnych osobników kapusty sitowatej (*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.) do ryzofiltracji metali ciężkich daje lepsze rezultaty aniżeli stosowanie osobników dojrzałych. Stosowanie siewek w kulturach hydroponicznych, których celem jest usuwanie toksycznych metali, jest określane jako blastofiltracja [DĄBEK 2010; KAREN i in. 2009; MARECIK i in. 2006].

Obok ryzofiltracji, w usuwaniu zanieczyszczeń organicznych z wód gruntowych i powierzchniowych znalazła zastosowanie również technika fitodegradacji. Do łatwo ulegających degradacji ksenobiotyków organicznych zalicza się węglowodory C1-C15, alkohole, fenole, aminy, kwasy i estry, w odróżnieniu od polichlorowanych bifenyli (PCBs), chlorowanych węglowodorów, wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (PAHs), pochodnych materiałów wybuchowych, substancji ropopochodnych czy pestycydów, których rozkład biologiczny jest trudny [MARECIK i in. 2006].

Technika fitoewaporacji może być stosowana do oczyszczania środowiska wodnego, choć znajduje również zastosowanie w trakcie oczyszczania podłoża skażonych selenem, rtęcią lub arsenem.

W ostatnim czasie zauważa się znaczny wzrost zainteresowania alternatywnymi formami oczyszczania wód i ścieków. Zarówno użyty materiał roślinny, jak i oczyszczane medium wpływa znacząco na efektywność procesu degradacji zanieczyszczeń. Do fitoekstrakcji metali ciężkich ze środowiska wodnego z powodzeniem może być również wykorzystywana wOLFIA bezkorzeniowa (*Wolffia arrhiza* (L.) Horkel ex Wimm.) z rodziny rzęosowatych (*Lemnaceae*) [HANUS-FAJERSKA i in. 2011; PIOTROWSKA-NICZYPORUK, BAJGUS 2010].

Niezaprzeczalnymi zaletami ryzofiltracji są mniejsze, w porównaniu z metodami mechanicznymi czy fizykochemicznymi, koszty oczyszczania wód i ścieków, znacznie mniejsza ilość otrzymanej jako odpad biomasy, prostota metody, efektywność procesu oczyszczania, a także poprawa jakości powietrza za sprawą zwiększenia obszaru pokrytego roślinnością na danym terenie. W naszych warunkach klimatycznych za wady tej metody można uznać ograniczone zastosowanie ze względu na stosunkowo krótki okres wegetacji, konieczność doboru gatunków rosnących w klimacie umiarkowanym i dobrze tolerujących rodzaj usuwanych zanieczyszczeń oraz stopień praktycznego zastosowania technologii, ponieważ wciąż znaczna liczba metod, zwłaszcza usuwania metali ciężkich, jest w fazie badań pilotażowych [KRISHNA i in. 2012; MITHEMBU 2012].

PODSUMOWANIE

Na podstawie przedstawionego w niniejszym opracowaniu przeglądu licznych możliwości aplikacji metody ryzofiltracji można stwierdzić, że jest to efektywny, alternatywny dla metod fizykochemicznych sposób oczyszczania zbiorników wodnych. Mimo pewnych ograniczeń, które również przedstawiono w pracy, zalety opisywanej technologii są tak niewątpliwe, że potrzeba jej dalszego doskonalenia w naszym kraju jest w najwyższym stopniu uzasadniona.

LITERATURA

- BABEL S., KURNIAWAN T.A. 2002. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review. *Journal of Hazardous Materials*. No 97 s. 219–243.
- CUNNINGHAM S.D., BERTI W.R., HUANG J.W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends in Biotechnology*. No 13 s. 398–403.
- DĄBEK Z. 2010. Efektywność nitrofitów w oczyszczaniu ścieków szarych w oczyszczalni z osadnikiem szybowym. *Inżynieria Ekologiczna*. Nr 22 s. 90–96.
- DUSHENKOV V., KUMAR P., MOTTO H., RASKIN I. 1995. Rhizofiltration: the use of plant to remove heavy metals from aqueous streams. *Journal of Environmental Science and Technology*. No 29 (5) s. 1232–1238.
- FAROOQ U., KOZINSKI J.A., KHAN M.A., ATHAR M. 2010. Biosorption of heavy metal ionusing wheat based biosorption – A review of the recent literature. *Bioresource Technology*. No 101 s. 5043–5053.
- FINE P., RATHOD P.H., BERIOZKIN A., MINGELGRIN U. 2013. Uptake of cadmium by hydroponically grown, mature *Eucalyptus camaldulensis* saplings and the effect of organic ligands. *International Journal of Phytoremediation*. No 15 s. 585–601.
- FU F., WANG Q.I. 2011. Removal of heavy metal ions from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*. No 92 s. 407–418.
- GHOSH M., SINGH S.P. 2005. A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of. It's by Products. *Energy and Environmental Science*. No 6(04) s. 214–231.
- HANUS-FAJERSKA E. AUGUSTYNOWICZ J. MUSZYŃSKA E. KOŹMIŃSKA A. 2011. Organizmy przydatne w oczyszczaniu środowiska z nadmiernych ilości metali ciężkich. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*. Nr 50 s. 180–192.
- HASHIM M.A., MUKHOPADHYAY S., SACHU J.N., SENGUPTA B. 2011. Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal Environmental Management*. No 92 s. 2355–2388.
- HUA M., ZHANG S., PAN B., ZHANG W., LV L., ZHANG Q. 2012. Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides. *Journal of Hazardous Materials*. No. 211–212 s. 317–331.
- ISLAM M.S., UNEO Y., SKIDER M.T., KURASAKI M. 2013. Phytofiltration of arsenic and cadmium from the water environment using *Micranthemum umbrosum* (J. F. Gmel) S.F Blake as a hyperaccumulator. *International Journal of Phytoremediation*. No 15 s. 1010–1021.
- KARCZEWSKA A., KABAŁA C. 2010. Gleby zanieczyszczone metalami ciężkimi i arsenem na Dolnym Śląsku – potrzeby i metody rekultywacji. *Zeszyty Naukowe UP we Wrocławiu*. Nr 576 s. 59–78.
- KAREN E., GERHARD T., XIAO-DONG H., BERNARD R., BRUCE M. 2009. Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges. *Plant Science*. No 176 s. 20–30.

- KATSOU E., MALAMIS S., HARALAMBOUS K. J. 2011. Industrial wastewater pre-treatment for heavy metal reduction by employing a sorbent-assisted ultrafiltration system. *Chemosphere*. No 82 s. 557–564.
- KRISHNA R., FULEKAR M.H., PATAKG B. 2012. Rhizofiltration: a green technology for remediation of heavy metals. *International Journal of Innovation in Bio-Sciences*. No 2(4) s. 193–199.
- KURNIWAN T.A., CHAN G.Y.S., LO W., BABEL S. 2006. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. No 118 s. 83–98.
- LEE M., YANG M. 2010. Rhizofiltration using sunflower (*Helianthus annuus* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L. var *vulgaris*) to remediate uranium contaminated groundwater. *Journal of Hazardous Materials*. No 173 s. 589–596.
- MARECİK R., KRÓLICZAK P., CYPLIK P. 2006. Fitoremediacja – alternatywa dla tradycyjnych metod oczyszczania środowiska. *Biotechnologia*. Nr 3(74) s. 88–97.
- MARQUES A.P., RANGEL A.S., CASTRO P. M.L. 2009. Remediation of Heavy Metal Contaminated. *Environmental Science and Technology*. No 39 s. 622–654.
- MITHEMBU M.S. 2012. Nitrogen and Phosphorus Removal from Agricultural Wastewater Using Constructed Rhizofiltration in Durban, South Africa. *Journal of Agricultural Science and Technology*. No 2 s. 1142–1148.
- MOHAN D., PITTMAN Jr. C.U. 2007. Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents – A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. No 142 s. 1–53.
- OBARSKA-PEMPKOWIAK H. 2005: Oczyszczalnie hydrofitowe w świetle przepisów UE. Materiały VII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej „Kompleksowe i szczegółowe problemy inżynierii środowiska”. Koszalin – Ustronie Morskie. 26–29.05.2005. Zeszyty Naukowe Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Koszalińskiej. Nr 22 s. 77–97.
- PIOTROWSKA-NICZYPORUK A., BAJGUS A. 2013. Fitoremediacja – alternatywa na czyste środowisko. Różnorodność biologiczna – od komórki do ekosystemu. W: *Rośliny i grzyby w zmieniających się warunkach środowiska*. Pr. zbior. Red. I. Ciereszko i A. Bajgus. Białystok. PTB s. 97–110.
- RASKIN I., SMITH R.D., SALT D.E. 1997. Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment. *Current Opinion in Biotechnology*. No 8 s. 221–226.
- SALT D.E., BLAYCOCK M., KUMAR N.B.A., DUSHENKOV V., ENSLEY B.D., CHET I., RASKIN I. 1995. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*. No 13 s. 468–474.
- SRINIVAS RAJU R.K., NAIDU S.V. 2013. A Review on Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater by Rice Husk as an Adsorbent. *Journal of Chemical, Biological and Physical Science*. No 2(3) s. 602–606.
- SYMONIDES E. 2010. Znaczenie powiązań ekologicznych w krajobrazie rolniczym. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. No 10 (4) s. 249–263.
- WAN NGAH W.S., HANAFIAH M.A.K.M. 2008. Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*. No 99 s. 3935–3948.
- WESOŁOWSKI P., BRYŚIEWICZ A. 2014. Zdolność przybrzeżnej roślinności szuwarowej śródpolnych oczek wodnych do kumulacji makroskładników. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. No 14 (1) s. 111–119.
- ZEMLEDUCH A., TOMASZEWSKA B. 2007. Mechanizmy, procesy i oddziaływania w fitoremediacji. *Kosmos, Problemy Nauk Biologicznych*. No 3/4 s. 393–407.

Aleksandra KOŹMIŃSKA, Ewa HANUS-FAJERSKA, Ewa MUSZYŃSKA

POSSIBILITIES OF WATER PURIFICATION USING THE RHIZOFILTRATION METHOD

Key words: *heavy metals, phytofiltration, phytoremediation, vascular plants, water pollution*

Summary

Pesticides, surfactants, petroleum hydrocarbons, phenols, chlorinated derivatives of biphenyls and heavy metals such as lead (Pb), copper (Cu), chromium (Cr), cadmium (Cd), mercury (Hg) and zinc (Zn) are ranked among the most common anthropogenic environmental pollutions. Contaminated water can be subjected to purification using mechanical, chemical or biological methods. Phytofiltration is classified as one of phytoremediation technologies, in which plants are used to remediate contaminated water through absorption, concentration, and precipitation of pollutants. Presently, only very few plant species are known to be suitable for rhizofiltration technology. Such species can efficiently remove toxic metals from a solution, thanks to rapidly growing root systems. The selection of suitable plant material is still considered a difficult step, especially when purification of groundwater contaminated with a mixture of compounds is concerned. The advantages of rhizofiltration are described in this article, especially in relation to water reservoirs contaminated with heavy metals, and the vascular plant species used in this technology are reviewed.

Adres do korespondencji: mgr inż. A. Koźmińska, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Biologii Roślin i Biotechnologii, Zakład Botaniki i Fizjologii Roślin, al. 29 Listopada 54, 31-425 Kraków; tel. +48 12 662-52-05, e-mail: Ola.Kozminska.88@gmail.com