

Monografia

***Wybrane zagadnienia
Rolnictwa i ekologii***

Opole 2016

RECENZENCI :

Dr hab. inż. Stanisław Gajda, Prof. UO

Dr hab. inż. Ryszard Janka, Prof. UO

SKŁAD I REDAKCJA TECHNICZNA:

Dr inż. Alicja Gawdzik

ISBN: 978-83-7342-549-1

SKAŻENIA GLEB METALAMI CIĘŻKIMI ORAZ BIOREMEDIACJA JAKO SZANSA NA POPRAWĘ STANU GLEB W WOJEWÓDZTWIE OPOLSKIM

Wprowadzenie:

Bioremediacja, inaczej bioodzysk, to metoda polegająca na zredukowaniu wielkości lub transformacji w formy mniej szkodliwe, zanieczyszczeń powietrza wody oraz gleb za pomocą układów składających się z organizmów żywych. Ze względu na układ, jaki stosujemy, wyróżniamy różne typy bioremediacji: fitoremediację (zastosowanie znajdują rośliny) oraz biohydrometalurgię (korzystamy z drobnoustrojów). Bioremediacja jest metodą stosunkowo nową i jeszcze słabo poznaną, wciąż pojawiają się artykuły donoszące o kolejnych gatunkach znajdujących zastosowanie w redukcji zanieczyszczeń, a organizmy już poznane stale są ulepszane i stymulowane do wydajniejszej pracy, np. dzięki dobrodziejstwom inżynierii genetycznej. To właśnie rozwijająca się gałąź biotechnologii związana z biologią drobnoustrojów przyczyniła się do popularyzacji bioremediacji przy udziale prokariotów.

Słowa kluczowe: bioremediacja, oczyszczanie gruntów, fitoremediacja

W poniższym przeglądzie skupimy się głównie na bioremediacji w aspekcie metali ciężkich. Metale ciężkie są bardzo ważnym elementem skorupy ziemskiej, a jako surowiec są nieodnawialne. Metale ciężkie występują zarówno naturalnie, jak i powstają w wyniku działalności człowieka. W wyniku wydobycia rudy metali oraz jej obróbki, powstają odpady zawierające metale ciężkie, odpady przenikają do wody, gleby i atmosfery, a stamtąd z łatwością dostają się do roślin, które pośrednio przez zwierzęta lub bezpośrednio dostarczają je do organizmu człowieka. Problem z nimi związany polega na tym, że występują w coraz mniejszych ilościach w rudach, w których są pożądane, a coraz wyższe ich stężenia odnotowuje się w organizmach żywych oraz środowiskach, dla których często wykazują działanie toksyczne. Istotnym jest więc takie sterowanie procesem, aby zwiększyć odzysk metali z odpadów i rud przy jednoczesnym ograniczeniu do absolutnego minimum ich przedostawania się do środowiska naturalnego. Metale ciężkie to te, których gęstość przekracza granicę $4,5 \frac{g}{cm^3}$. Wyróżniamy cztery grupy takich pierwiastków:

Tab. 1. Grupy metali ciężkich

<i>Grupa</i>	<i>Przykład</i>
Bardzo wysoki stopień potencjalnego zagrożenia dla środowiska	Kadm (Cd), Rtęć (Hg), Chrom (Cr), Srebro (Ag), Złoto (Au), Cynk (Zn), Antymon (Sb), Cyna (Sn), Tal (Tl)
Wysoki stopień potencjalnego zagrożenia dla środowiska	Molibden (Mo), Mangan (Mn), Żelazo (Fe), Selen (Se)
Średni stopień potencjalnego zagrożenia dla środowiska	Wanad (V), Nikiel (Ni), Kobalt (Co), Wolfram (W)
Niski stopień potencjalnego zagrożenia dla środowiska	Cyrkon (Zr), Tantal (Ta), Lantal (La), Niob (Nb)

Stężenie metali ciężkich w glebach jest zależne od wielu czynników, wśród których wyróżniamy obecność związków humusowych, rodzaju gleby, jej pH (w glebach o kwaśnym odczynie wzrasta ilość form rozpuszczalnych pierwiastków), potencjału utleniająco- redukcyjnego (w glebie występują formy pierwiastków utlenione oraz zredukowane, podczas redukcji dochodzi do rozpuszczenia uwodnionych tlenków metali i uwolnienia wcześniej zaabsorbowanych metali ciężkich, co prowadzi np. do zmiany ruchliwości metali w glebie), skały macierzystej, na bazie, której powstaje gleba (co przekłada się np. na jej pojemność sorpcyjną) oraz działalności człowieka na danym obszarze. Człowiek przyczynia się do migracji metali ciężkich do biosfery poprzez wydobywanie rud metali, jej przeróbkę, wykorzystanie oraz utylizowanie odpadów powstałych w wyniku przetworzenia rudy, a także eksploatację urządzeń niezbędnych do sterowania procesem technologicznym. Główne gałęzie emitujące metale ciężkie do środowiska, to np.:

- produkcja barwników i farb, będąca źródłem kadmu, chromu i ołowiu
- produkcja akumulatorów i baterii dostarczająca kadmu, ołowiu, cynku
- galwanizacja: kadm, chrom, nikiel
- produkcja środków ochrony roślin i nawozów: ołów, kadm, miedź, rtęć, nikiel
- zakłady drukarskie i przemysł papierniczy: kadm, chrom, cynk

O szkodliwości metali ciężkich nie trzeba nikogo przekonywać, jednak warto scharakteryzować kilka wyjątkowo szkodliwych pierwiastków. Kadm wprowadzony do gleby jest łatwo rozpuszczalny w środowisku kwaśnym, a jego mobilność wzrasta w glebach lekkich. Kadm gości w wątrobie i nerkach naruszając gospodarkę tak ważnych pierwiastków jak: wapń, magnez, żelazo czy cynk. Poprzez regulację stężenia wapnia w organizmie, kadm może powodować zmiany w układzie szkieletowym człowieka, co wpływa na deformację narządów wewnętrznych. Oprócz rozległych zmian w organach, w których się kumuluje, kadm może także wpływać kancerogennie na nerki czy prostatę. Chrom powoduje zmiany w systemie obronnym organizmu, a wysokie stężenie chromu na IV stopniu utlenienia może być przyczyną raka płuc. Rtęć blokuje prawidłowe działanie układu nerwowego, co prowadzi do nieprawidłowego funkcjonowania narządów wydzielniczych, hormonów, enzymów oraz ważnych dla organizmu białek takich jak np. hemoglobina. Metale ciężkie, np. ołów są silnie wiązane przez glebę na poziomie próchnicznym. Nikiel negatywnie działa na rośliny wiążące azot: system ten funkcjonuje na zasadzie sprzężenia zwrotnego, kiedy

wzrasta poziom azotu, zmniejsza się poziom niklu. Gdy poziom niklu jest wysoki, zmniejsza się wiązanie azotu przez rośliny.

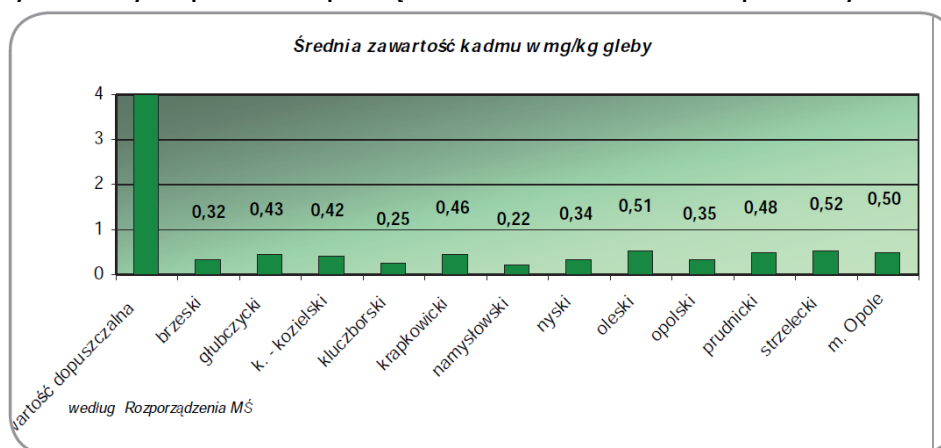
W latach 1992 – 1997, w ramach Ogólnokrajowego Programu Badań Rolniczej Przestrzeni Produkcyjnej, Okręgowa Stacja Chemiczno – Rolnicza w Opolu przeprowadziła badania mające na celu ocenę stopnia zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi – kadm, miedzią, niklem, ołowiem i cynkiem.

Tab. 2. Aktualnie obowiązujące kryteria oceny zawartości zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi zawarte w załączniku do Rozporządzenia Ministra Środowiska z dn. 9 września 2002r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dz. U. nr 165 poz. 1359)

Rodzaj gruntów*	Wartości dopuszczalne stężeń metali ciężkich w glebie lub ziemi (mg/kg s.m.)				
	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Grupa B warstwa 0 - 30 cm	4	150	100	100	300

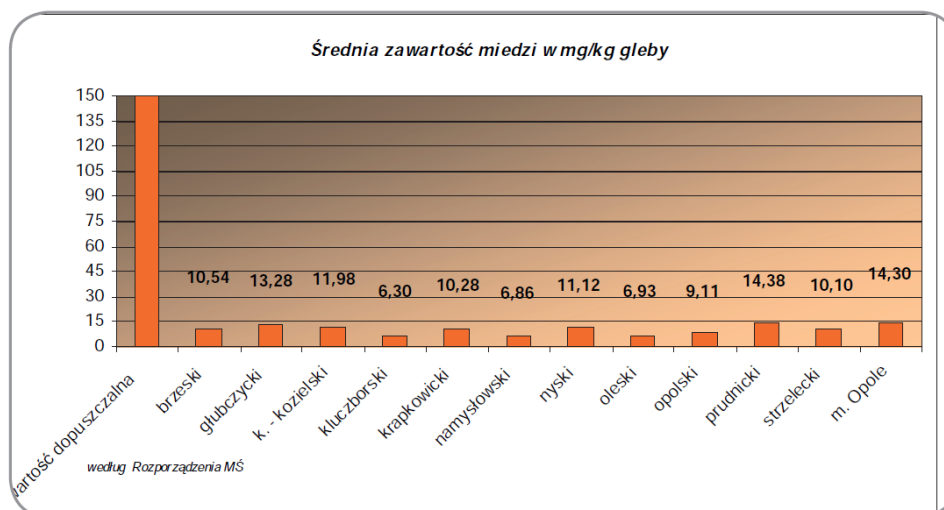
* Grupa B - grunty zaliczone do użytków rolnych z wyłączeniem gruntów pod stawami i gruntów pod rowami, grunty leśne oraz zadrzewione i zakrzewione, a także grunty zabudowane i zurbanizowane z wyłączeniem terenów przemysłowych, użytków kopalnych oraz terenów komunikacyjnych.

W odniesieniu do powyższych danych, zebrano próbki oraz przeprowadzono dokładne badania mające na celu sprawdzenie zawartości wybranych metali ciężkich w glebach na terenie powiatów: brzeskiego, głubczyckiego, kędzierzysko-kozielskiego, kluczborskiego, krapkowickiego, namysłowskiego, nyskiego, oleskiego, opolskiego, prudnickiego, strzeleckiego oraz na terenie miasta Opola. Wyniki badań oraz ich porównanie w stosunku do średnich wartości dopuszczalnych dyktowanych przez Rozporządzenie zamieszczono w poniższych tabelach.



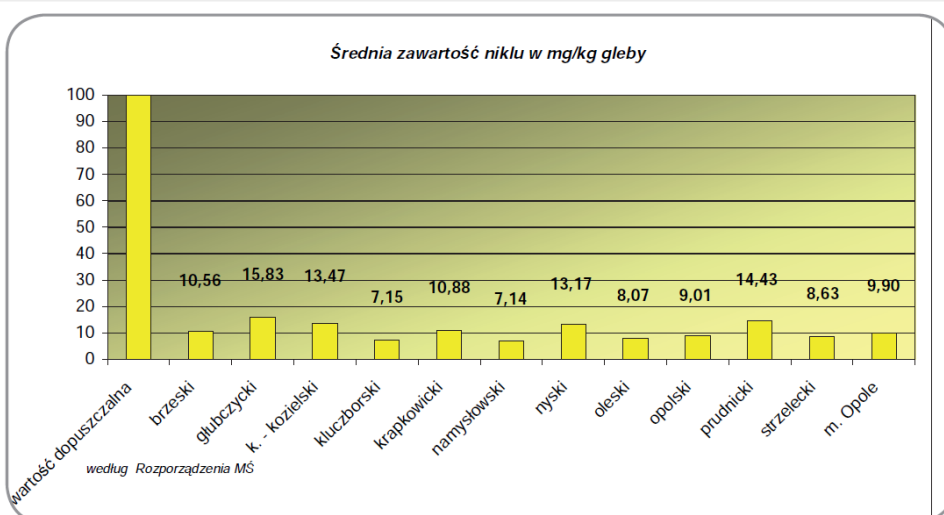
Rys. 1. Średnia zawartość kadmu w glebach Opolszczyzny.

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”



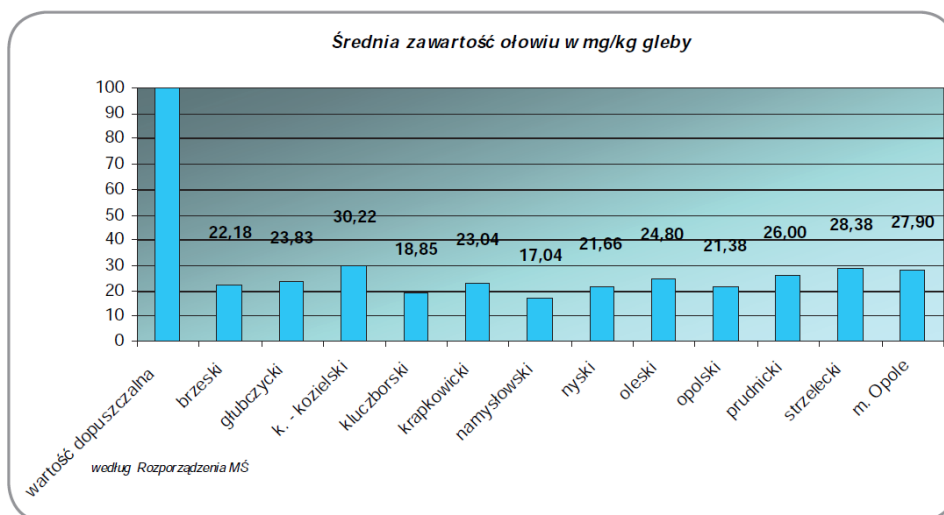
Rys. 2. Średnia zawartość miedzi w glebach Opolszczyzny.

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”



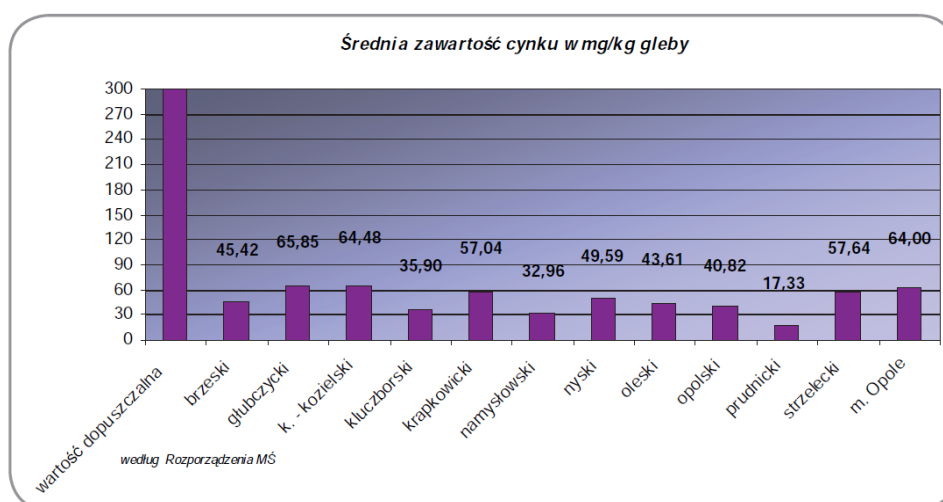
Rys. 3. Średnia zawartość niklu w glebach Opolszczyzny.

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”



Rys. 4. Średnia zawartość ołowiu w glebach Opolszczyzny.

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”

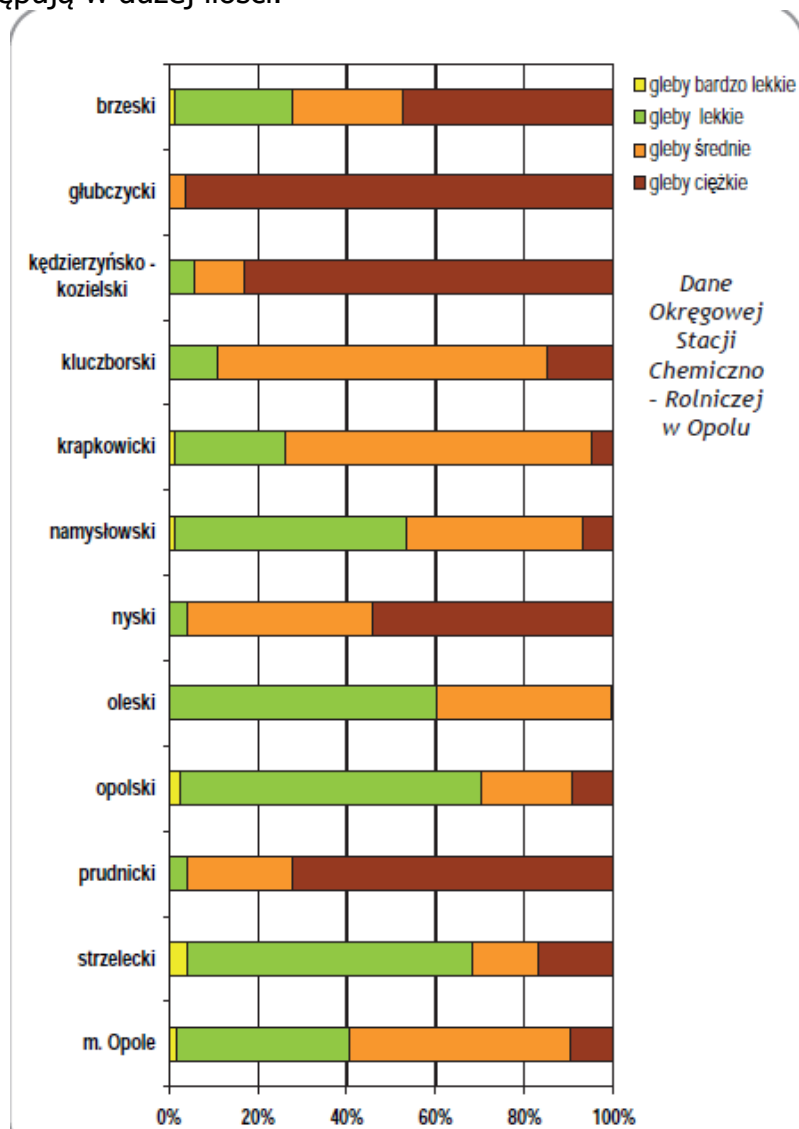


Rys. 5. Średnia zawartość cynku w glebach Opolszczyzny.

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”

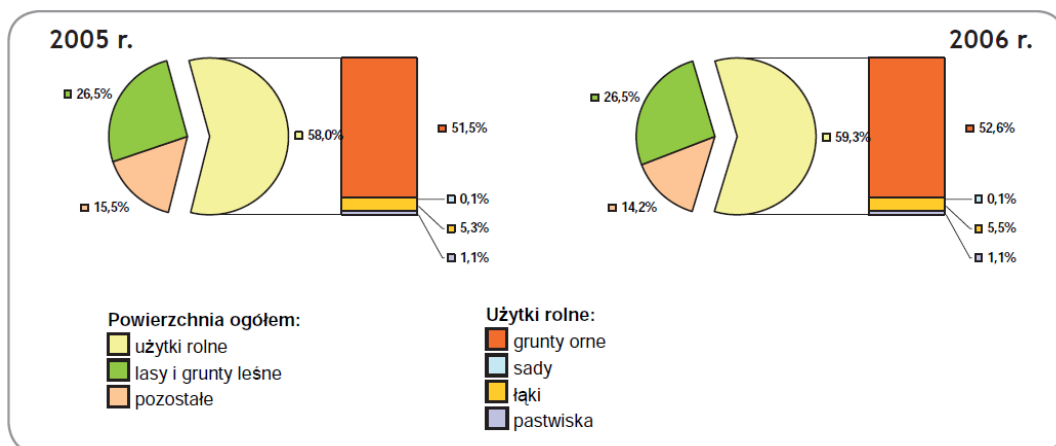
Jak widzimy, losowo zebrane uśrednione próbki mieszczą się w dopuszczalnych wartościach. Niestety, dane te są z roku 2005, a we wznowieniach brak jest rozdziału traktującego o glebach Opolszczyzny- badania nie były prowadzone powtórnie lub też wyniki nie są dostępne publicznie. W doświadczeniu brakuje informacji, jakie gleby badano w próbie. Biorąc jednak pod uwagę czynniki, które zostaną dokładnie omówione w dalszej części tekstu, takie jak np. duża ilość niedawno likwidowanych mogielników, wysokie użycie środków ochrony roślin czy szybki rozwój przemysłu, warto byłoby zastanowić się nad naturalnymi sposobami ochrony gleb naszego województwa. Degradacja gleb, zarówno w aspekcie fizycznym (zniszczenie struktur, zaburzenie proporcji), biologicznym (zaburzenie edafonu i niszczenie warstwy próchnicznej) jak i chemicznym (zaburzenie równowagi jonowej, przenawożenie, zakwaszanie) jest nieza-

przecznym faktem. Najbardziej zagrożone degradacją są gleby lekkie, z dużym udziałem piasków i ciekim poziomem próchnicznym, a takie w naszym krajo-
brazie występują w dużej ilości.



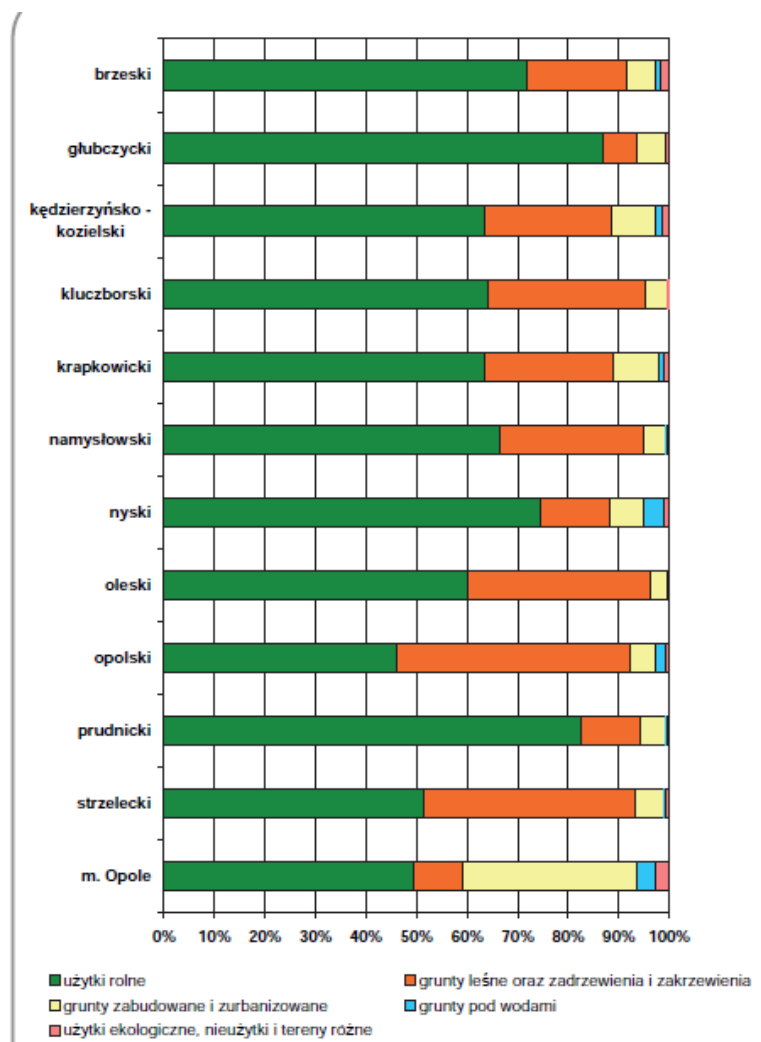
Rys. 6. Procentowy udział kategorii agronomicznych gleb województwa opolskiego użytkowanych rolniczo

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”



Rys. 7. Struktura użytkowania gruntów według danych GUS

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”



Rys. 8. Struktura użytkowania gruntów w powiatach województwa opolskiego w 2006 r. (dane Wydziałów Geodezji i Kartografii Starostw Powiatowych)

Źródło: „Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006”

Analizując powyższe wykresy, możemy zauważyć, że bardzo duży odsetek gleb Opolszczyzny wykorzystywany jest, jako użytek rolny, co dodatkowo przemawia za tym, by włożyć ogromny wysiłek oraz dołożyć wszelkich starań w celu ochrony oraz oczyszczenia gruntów. Warto zwrócić również uwagę na elementy, które silnie wpływają na proces bioremediacji, np. ilość dostępnego tlenu, ilość zgromadzonej wody (oraz jej rodzaj), wartość pH, obecność pożywek do rozwoju oraz temperatura.

Jedną z zaproponowanych metod jest bioremediacja podstawowa, czyli taka, która odbywa się z wykorzystaniem jedynie naturalnych mikroorganizmów żyjących na skażonym terenie. Obniżenie stężenia szkodliwych cząsteczek do satysfakcjonującego poziomu musi odbyć się w określonych ramach czasowych. Metoda ta jest o tyle korzystna, że nie wymaga żadnych dodatkowych nakładów środków czy energii – jedynym procesem, jaki się wykonuje jest bieżący monitoring postępów biodegradacji.

Mikroorganizmy występujące na danym terenie możemy stymulować w celu przyspieszenia procesu biodegradacji zanieczyszczeń glebowych. Szybsze tempo degradacji możemy osiągnąć poprzez wstępne zmniejszenie skażenia innymi metodami, zwiększenie ilości tlenu (np. poprzez proces wtłaczania powietrza pod zwiększonym ciśnieniem, stosowanie rozcieńczonych roztworów wody utlenionej czy spulchnianie gruntu), doprowadzenie gleby do korzystnego poziomu pH, podwyższenie poziomu wilgotności oraz kontrolę temperatury, zwiększenie substancji mineralnych, w tym substancji odżywczych niezwykle ważnych dla prawidłowego zajścia procesu takich jak np. azot i fosfor (wzrost do pożądanej objętości osiąga się poprzez stosowanie nawozów. Stosowany nawóz musi jednak spełniać pewne normy, takie jak np. konieczność efektywnego uwalniania azotu i fosforu w krótkim czasie, dostępność i łatwość transportu, niska cena nawozu). Stosowane obecnie środki wzbogacające w azot i fosfor możemy podzielić na trzy grupy: ciekłe nawozy hydrofobowe, których zaletą jest łatwość przylegania do substancji stałych, na których tworzą one jednolitą powłokę, nawozy w postaci stałej uwalniające z granulek pożądane składniki po kontakcie z wodą oraz wodne roztwory nawozów zawierających azot i fosfor łatwo penetrujące do głębszych warstw gruntu. Dodatkowym czynnikiem stymulacyjnym może być odpowiednio dobrany preparat enzymatyczny. Praca „Reakcja autochtonicznej mikroflory gleby skażonej ropopochodnymi na zastosowanie preparatu enzymatycznego i natlenienia” autorstwa Wioletty Rambau (pod nadzorem naukowym dr hab. Teresy Krzyśko-Łupickiej) wykazuje, że nie tylko natlenienie, ale również zastosowanie preparatu enzymatycznego, wpływa na liczebność mikroorganizmów pożądanych dla procesu bioremediacji gleby skażonej związkami ropopochodnymi.

Gdy naturalnie występująca na danym terenie flora bakteryjna nie jest wystarczająca do prawidłowego zajścia procesu bioremediacji, stosuje się specjalnie wyselekcjonowaną populację bakterii. Szczepy pozyskuje się ze środowiska naturalnego lub z biblioteki mikroorganizmów, a następnie zawiesinę namnożonych organizmów bezpośrednio wstrzykuje się do skażonego gruntu. Większy sukces możemy odnieść wstrzykując mikroorganizmy wraz z substancjami odżywczymi dla nich. Konieczne jest zwrócenie szczególnej uwagi, na oddziaływanie użytego szczepu z naturalną florą gleby. Zbiór metod opierających się na wzbogacaniu zanieczyszczonego terenu w specjalnie wyselekcjonowane mikro-

organizmy nazywamy bioaugmentacją. Skuteczność tego typu bioremediacji zbadał zespół studentów z Koła Naukowego Biotechnologów w składzie: Koszałkowska Magdalena, Kręcidło Łukasz pod nadzorem naukowym dr hab. Teresy Krzyśko-Łupickiej. Doświadczenie wazonowe mające za zadanie sprawdzenie aktywności biologicznej gleby poddanej procesem biostymulacji oraz bioaugmentacji, założono w dwóch wariantach. W opcji pierwszej glebę zanieczyszczoną substancjami ropopochodnymi poddano natlenieniu przy użyciu wody utlenionej. W wariantcie drugim wprowadzono szczepionkę drożdży *Yarrowia lipolytica* do gleby zanieczyszczonej substancjami ropopochodnymi. Za wyznacznik skuteczności zastosowanej metody przyjęto liczebność mikroorganizmów degradujących węglowodory, zaś wskaźnikiem żyzności gleby uczyniono stosunek liczebności bakterii i promieniowców do grzybów. Doświadczenie dowiodło, że stymulacja tlenem jest bardziej korzystna dla żyzności gleby niż bioaugmentacja, ponieważ w znacznie większym stopniu przyczynia się do poprawy rozwoju mikroflory prokariotycznej, a zatem i poprawy żyzności gleby.

Inną metodą znajdującą zastosowanie w zmniejszaniu skażeń gruntów jest elektrobioremediacja. Jest to zbiór metod wykorzystujących zjawiska mikrobiologiczne, chemiczne oraz elektrokinetyczne (np. oddziaływanie pola elektrycznego) do przyspieszania zajścia procesów usuwania zanieczyszczeń z gleb.

Bioremediacja z użyciem mikroorganizmów cieszy się dużym powodzeniem w procesach technologicznych związanych z wydobywaniem, przetwórstwem oraz ekstrakcją metali z odpadów, ponieważ wspomaga proces odzysku części metali z kopalin. Ogół dyscyplin skupionych wokół tej kwestii nosi nazwę biohydrometalurgii, a do głównych zagadnień tej dziedziny należy pozyskiwanie siarki z siarczanów, odsiarczanie paliw takich jak węgiel czy ropa, oczyszczanie ścieków (co nie pozostaje bez wpływu na grunty). Metody biohydrometalurgiczne koncentrują się na ługowaniu chemicznym oraz biologicznym metali z odpadów (np. przy użyciu bakterii *Ferroxidans* oraz *Thiooxidans*). Mikroorganizmy biorące udział w utlenianiu mineralnych związków siarki i żelaza to zazwyczaj organizmy odżywiające się chemolitotroficznie, występują wśród nich zarówno chemolitotrofy obligatoryjne, takie jak *Thiobacillus thiooxidans*, *Thiobacillus ferrooxidans*, czyli chemolithoheterotrofy, np. *Beggiata sp.*, *Thiotrix sp.* Istotą procesu bioługowania jest upłynnianie nierozpuszczalnych związków metali. Główną rolą mikroorganizmów jest zatem wytwarzanie kwasu siarkowego (VI). Na wydajność bioługowania ma wpływ aktywność biochemiczna drobnoustrojów i właściwości fizykochemiczne związków. Do głównych zalet metod z wykorzystaniem mikroorganizmów należy z pewnością prostota ich pozyskiwania (np. ze wspomnianych wcześniej szczepów muzealnych) oraz niskie wymagania finansowe: mikroorganizmy wykorzystywane w procesach biohydrometalurgii stanowią produkt uboczny procesów przemysłu farmaceutycznego oraz fermentacyjnego w procesach oczyszczania ścieków. Zdolność osadu czynnego do absorbowania na swojej powierzchni jonów metali ciężkich, została opisana w 1949 roku przez Ruchoffa, który stwierdził obecność w osadzie czynnym mikroorganizmów produkujących polimery i białka zewnątrzkomórkowe wiążące metale. Laboratoryjnie wykazał on, że już po pierwszych 15 minutach sorpcji dochodzi do usunięcia 85- 90% metali występujących w roztworze wodnym. Usuwanie metali ciężkich z cieczy jest bardzo przydatne w rolnictwie, kiedy mamy do czynienia z wykorzystywaniem środków ochrony roślin. Czynnikiem,

na które musimy zwrócić uwagę jest pojemność adsorpcyjna mikroorganizmów, łatwość ich flokulacji lub unieruchamiania, a także sprawność usuwania metali czy stała efektywność zmniejszania ich stężenia przy jednoczesnym zastosowaniu jak najszerszego zakresu odczynu. Duży problem stanowią koszty procesu, a szczególnie etap związany z oddzieleniem biomasy organizmów od wody osadowej.

Istotny wpływ na biodegradację metali ciężkich występujących w glebie przy okazji wykorzystywania środków ochrony roślin mają grzyby glebowe. Dostarczają one między innymi enzymów do biodegradacji, ale także są cenne ze względu na fakt, że mają mniejsze wymagania środowiskowe niż bakterie. Do drobnoustrojów szczególnie pożądaných możemy zaliczyć grzyby z rodzaju *Penicillium*, *Aspergillus*, *Fusarium* i *Trichoderma*. Na podstawie doświadczenia wykonanego na potrzeby pracy „Fitoekstrakcja wspomagana biologicznie” możemy wysnuć kilka wniosków odnośnie działalności grzybów. W warunkach doświadczalnych badano wpływ grzybów z rodzaju *Glomus*. Inokulum stanowiły zarodniki grzybów: *Glomus constrictum*, *Glomus geosporum*, *Glomus claroideum*, *Glomus mosseae*, *Glomus laccatum* wyizolowane z próbki zanieczyszczonej metalami ciężkimi gleby. Dla przykładowych gatunków roślin używanych w fitoremediacji stworzono wykresy, ukazujące ich aktywności przy obecności grzybów z rodzaju *Glomus* oraz przy braku wspomagania. Na podstawie doświadczenia, możemy zaobserwować, że na mikoryzę najbardziej czułe były trawy, największy przyrost na długość nadziemnych organów zaobserwowano u babki lancetowatej oraz lucerny siewnej. Przyrost korzeni traw znacznie wpływa na penetrację w głąb zanieczyszczonej gleby, co zwiększa wydajność fitoekstrakcji metali ciężkich.

Metodę oczyszczania gruntów bazującą na naturalnej zdolności roślin do pobierania i akumulacji metali ciężkich nazywamy fitoremediacją. Fitoodzysk pozwala na usunięcie zanieczyszczenia wraz z masą roślinną w fazie rozwojowej, w której rośliny wykazują największą zdolność do akumulacji metali. Dotychczas duży problem stanowiły dalsze losy zanieczyszczonych roślin, jednak obecnie stosuje się specjalne spalarnie, które zapobiegają powrotom zanieczyszczeń do środowiska. Rośliny używane do fitoremediacji, powinny wykazywać się dużą odpornością na obecność metali ciężkich w glebie, zdolnością akumulacji metali w swoich tkankach (tzw. „hiperakumulatory”), wysokim przyrostem biomasy w stosunkowo krótkim czasie, dobrze poznaną biologią, zdolnością do szybkiego wewnętrznego transportu metali z korzeni do części nadziemnych. Metalofity wykazują dobrze rozwinięty wewnętrzny mechanizm tolerancji na wysokie stężenie metali ciężkich. Zanieczyszczenia ulegają detoksykacji na drodze chelatowania przez specjalne peptydy – fitochelatyny (syntetizowane z glutationu) oraz metalotioneiny (kodowane przez genom jądrowy) zawierające duże ilości reszt cysteinowych zgrupowane w dwóch domenach na C' i N' końcu białka, a następnie szkodliwe substancje gromadzone są w wodniczce. Tam zostają związane w kompleksy z fenolami i glikozydami. Metalofity znajdują także zastosowanie w bioekstrakcji, czyli wydobywaniu toksycznych metali ciężkich z gleb, jezior i rzek. Zdolność roślin do adaptacji do obecności jednego lub kilku metali została wykorzystana do poszukiwania złóż niektórych metali, np. *Hybanthus floribundus* jest krzewem świadczącym o obecności w podłożu niklu, *Eriogonum ovalifolium* wskazuje lokalizację złóż srebra, a niektóre

gatunki *Astragalus* służą identyfikacji złóż uranu. Dla procesu bioremediacji występuje także szereg zaleceń ułatwiających wiązanie metali ciężkich przez rośliny, tj.: musimy zadbać o to, by nie występowały ograniczenia w długości korzeni roślin (szczególnie dotyczy to traw), gdyż uniemożliwia to penetrację zanieczyszczonej gleby, rośliny powinny równomiernie i w pełni pokrywać powierzchnię zanieczyszczonej gleby, możemy stosować specjalne wspomaganie, np. omawiane wcześniej grzyby z rodzaju *Glomus*, wchodzące w mikoryzę z rośliną.

Tab. 3. Zastosowanie różnych gatunków roślin w fitoekstrakcji i fitostabilizacji.
Źródło: [1]

Gatunek rośliny	Proces fitoremediacji	Rodzaj doświadczenia	Zawartość metali w glebie (mg/kg)	Odniesienia literaturowe
<i>Brassica Juncea</i>	fitostabilizacja	wazonowe	Cr (100)	Bluskov i inni (2005)
<i>Lupinus albus</i>	fitostabilizacja	wazonowe	Cu, Pb, Zn (30/2947/2058)	Marinez-Alcala i inni (2009)
<i>Populus tremuloides</i>	Nieokreślono	polowe	Cu	Seguin i inni (2004)
<i>Salix viminalis x Salix Schwerinii</i>	fitostabilizacja	wazonowe	Hg (30)	Wang i inni (2005)
<i>Stachys sylvatica</i>	fitostabilizacja	polowe	As	Antosiewicz i inni (2008)
<i>Nicotiana tabacum</i>	fitoakumulacja	wazonowe	ZnEDTA (60.1)	Loosemore i inni (2004)
<i>Salix viminalis</i>	fitoakumulacja	wazonowe	Cd, Cu, Zn (1.76/547/666)	Hammer i Keller (2002)
			Cd, Cu, Zn (2.49/227/1144)	Hammer i Keller (2002)
<i>Alyssum pintodasilvae</i>	fitoakumulacja	polowe	Ni (2199-3028)	Garcia-Leston i inni (2007)
		wazonowe	Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Ni	Kidd i Monterroso (2005);
			(100/250/500/2000/2500)	Kidd i inni 2007
<i>Brassica oleracea</i>	fitoakumulacja	wazonowe	Tl (1300)	Al.-Najar i inni (2003)
<i>Iberis intermedia</i>	fitoakumulacja	wazonowe	Tl (1300)	Al.-Najar i inni (2003)
<i>Pteris vittata</i>	fitoakumulacja	wazonowe	As (105)	Silva Gonzagai inni (2006)
<i>Thlaspi caerulescens</i>	fitoakumulacja	wazonowe	Cd/Pb/Zn (15.4/4800/2190)	Puschenreiter i inni (2003)
			Cd/Cu/Zn (2.49/227/1144)	Hammer i Keller (2002)
			Cd/Cu/Zn (1.76/547/666)	Hammer i Keller (2002)
<i>Thlaspi goeingeense</i>	fitoakumulacja	polowe	Ni (2580)	Wenzel i inni (2003)
		wazonowe	Cd/Ni/Pb/Zn (15.4/26.2/4800/2190)	Puschenreiter i inni (2003)

Tab. 4. Porównanie zdolności do pobierania metali ciężkich z gleb przez wybrane gatunki roślin.
Źródło: [9]

Rodzaj, gatunek	Zdolność do pobierania m.c. z gleby (g/ha)			
	Zn	Cu	Pb	Cd
<i>Lactuca serriola</i>	20 600	b.d.	b.d.	420
<i>Artemisia vulgaris</i>	8 000	1 620	340	720
<i>Salix viminalis</i>	b.d.	b.d.	b.d.	217
<i>Salix caprea</i>	2 340	76	242	41
<i>Betula pendula</i>	2 480	27	285	8
<i>Deschampsia cespitosa</i>	11 500	b.d.	1 600	470
<i>Chenopodium album</i>	13 200	620	200	b.d.

W powyższym zestawieniu znajduje się wiele gatunków roślin występujących w województwie opolskim, należy do nich np.: kapusta sitowata (*Brassica juncea*), będąca efemerofitem, czyli gatunkiem czasowo występującym na terenie danego kraju, jednak nie będącym jego gatunkiem rodzimym, łubin biały (*Lupinus albus*), często siany jako poplon ze względu na swoją wysokobiałkowość, kapusta warzywna (*Brassica oleracea*), której odmiany są obecnie szeroko rozpowszechnione na całym świecie, czyściec leśny (*Stachys sylvatica*),

pospolicie występujący na całym niżu Polski oraz wierzba wiciowa (*Salix viminalis*). Kolejnym ważnym gatunkiem jest topola osika (*Populus tremuloides*), która jako gatunek łęgowy, często rośnie na granicy pól oraz rzek. Niestety, populacja topoli osiki drastycznie zmniejsza się na Opolszczyźnie, ze względu na szkodliwą działalność bobrów, zgryzających drewno. Można wysnuć tezę, że topola osika jest jednym z szybciej zanikających drzew naszego województwa.

Tab. 5. Przykłady hiperakumulatorów.

Źródło: [1]

Pierwiastek	Gatunek rośliny	Zawartość metalu (mg/kg)
Cynk (Zn)	<i>T. caerulescens</i>	39,600
Kadm (Cd)	<i>T. caerulescens</i>	1,800
Nikiel (Ni)	<i>Alyssum bertolonii</i>	13,400
Selen (Se)	<i>Astragalus racemosa</i>	14,900
Tall (Tl)	<i>Iberis intermedia</i>	3,070
Miedź (Cu)	<i>Ipomoea alpina</i>	12,300
Kobalt (Co)	<i>Haumaniastrum robertii</i>	10,200
Arsen (As)	<i>P. vittata</i>	27,000

Powyższa tabela zawiera przykłady hiperakumulatorów, czyli roślin, które są w stanie przyjmować nawet do 100 razy większą koncentrację metali ciężkich. Niestety, żaden z wyszczególnionych gatunków nie występuje naturalnie na Opolszczyźnie. Stwierdzono jednak inne gatunki hiperakumulatorów, występujące na terenie naszego województwa, takie jak np.: zawciąg pospolity (*Armeria maritima*) odpowiedzialny za akumulację cynku i ołowiu, rzodkiewnik Hallera (*Arabidopsis halleri*) gromadzący w swoich liściach oraz łodygach cynk i kadm, czy perz właściwy (*Agropyron repens*), z czego ten ostatni pospolicie występuje na całym niżu Polski. Do fitoremediacji zanieczyszczeń rzek używa się metody- ryzofiltracji, bazującej na roślinach pospolitych, takich jak wierzby, topole oraz trzciny.

Fitoekstrakcja, jako jedna z metod fitoremediacji, skupia się na nagromadzeniu wysokiego plonu biomasy z roślin uprawianych w skażonym środowisku. Jest jedyną metodą wykorzystującą rośliny, pozwalającą na usuwanie zanieczyszczeń *in situ* w miejscu skażenia. Rośliny znajdujące zastosowanie w tym procesie są w stanie wydzielać do podłoża specjalne substancje ułatwiające pobieranie metali ciężkich. Poważnym problemem fitoekstrakcji jest niska dostępność przyswajalnych przez rośliny jonów metali. Do fitoekstrakcji indukowanej używa się czynników chelatujących, takich jak np.: EDTA czy kwas cytrynowy. Zanieczyszczenia są kumulowane w wodniczkach, najczęściej w organach starzejących się lub w miejscach, gdzie nie stanowią one zagrożenia dla rośliny, np. w przestrzeniach międzykomórkowych czy w ścianach komórkowych z wykorzystaniem pektyn. Czynniki, na które warto zwrócić uwagę przy fitoekstrakcji jest pokrycie gleby przez roślinę, długość korzeni oraz pędów, sucha masa roślin, stężenie pobieranego metalu w roślinie oraz współczynnik akumulacji pierwiastka charakterystyczny dla danego gatunku.

Fitodegradacja, polega na pobieraniu przez rośliny metali ciężkich, a następnie, przy pomocy kompleksów metabolicznych cyklu enzymatycznego (przy po-

mocy enzymów katalizujących reakcję, takich jak dehalogenazy, peroksydazy, fosfatazy), ich transformacji w formy bardziej odpowiednie dla rośliny. Metoda ta powoduje całkowity rozkład zanieczyszczenia do dwutlenku węgla oraz wody, co znacznie redukuje problem zbioru populacji oraz unieszkodliwiania organów roślinnych gromadzących szkodliwe związki. Problem fitodegradacji stanowi odpowiedni dobór zanieczyszczenia, które za jej pomocą będzie usuwane: związki powinna cechować odpowiednia rozpuszczalność, prężność par oraz masa cząsteczkowa.

Fitostabilizacja polega na immobilizacji metali ciężkich w korzeniach roślin, adsorbpcji na powierzchni tych organów lub wytrącania w strefie korzeniowej. Jest to metoda zabezpieczająca przedostawanie się zanieczyszczeń w głąb gleby oraz do hydrosfery, nie degradowe ona jednak szkodliwych substancji. Technika ta używana jest do odtwarzania szaty roślinnej na terenach, na których zanikła ona w wyniku długotrwałego dużego stężenia szkodliwych substancji.

Tab. 6. Porównanie kosztów bioremediacji oraz metod konwencjonalnych do usuwania skażeń wód oraz gruntów
Źródło: [2]

Rodzaj i miejsce skażenia	Koszt konwencjonalnej metody oczyszczania [\$]	Koszt bioremediacji [\$]	Zysk [\$]
Grunt na terenie miejskim, skażony węglowodorami pochodzenia petrochemicznego	wydobycie gruntu, oczyszczanie poza miejscem skażenia 3 mln	biowentylowanie miejsca skażenia 0,2 mln	2,8 mln
Grunt na terenie przemysłowym, skażony węglowodorami pochodzenia petrochemicznego	wydobycie gruntu, oczyszczanie poza miejscem skażenia 3 mln	biowentylowanie miejsca skażenia 0,2 mln	2,8 mln
Grunt i wody gruntowe skażone trichloroetanem (TCE)	pompowanie oraz oczyszczanie 20 mln	ekstrakcja parą wodną, biowentylowanie 2 mln	18 mln
Katastrofa tankowca – skażenie wybrzeża	wymywanie 1,1 mln za km wybrzeża	biostymulacja dodawanymi odżywkami 0,005 mln za km wybrzeża	1 mln za km
Grunt i wody gruntowe na terenie skażonym TCE	pompowanie oraz oczyszczanie wody i gleby 20 mln	biowentylowanie 2 mln	18 mln
Teren skażony halogenowęglowodorami	wydobycie gruntu i oczyszczanie poza terenem 15 mln	biowentylowanie 2 mln	13 mln

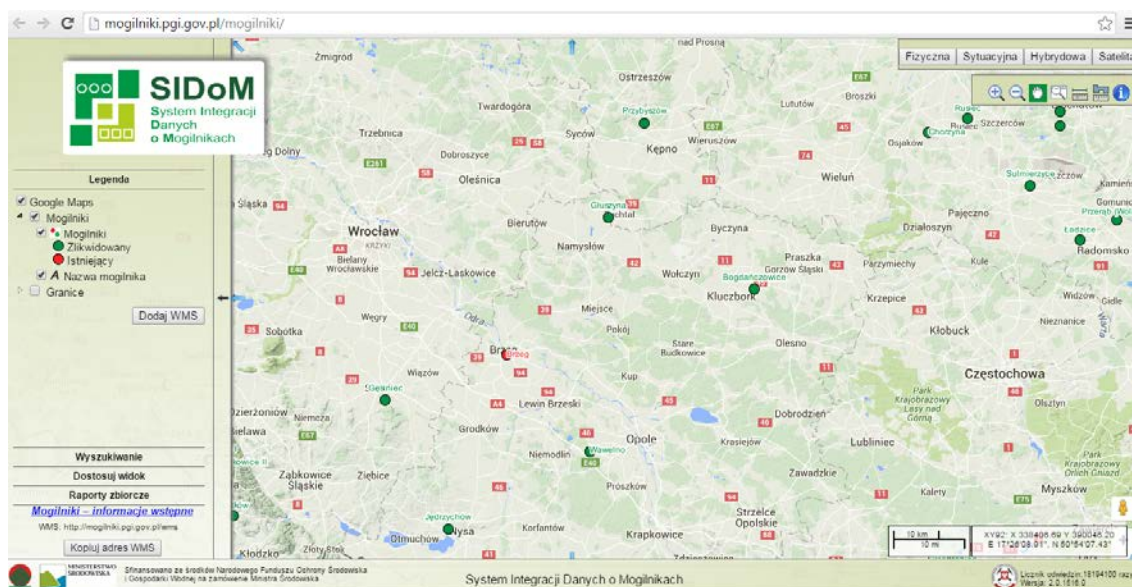
Fitoewaporacja jest metodą polegającą na pobieraniu zanieczyszczeń przez rośliny, a następnie transpiracji zanieczyszczeń w zmienionej formie. Szczególna skuteczność tego procesu została wykazana dla selenu, rtęci oraz arsenu.

Podsumowanie

Bioremediacja posiada niezliczoną ilość zalet, wśród których wymienić można możliwość zastosowania jej w zmiennych warunkach pogodowych oraz w zróżnicowanych formacjach geologicznych, ekonomiczność prowadzenia procesów, w tym niskie wymagania odnośnie specjalistycznej aparatury i sprzętu, możliwość prowadzenia procesu *in situ*, co znacznie ogranicza problemy związane z transportem, dostęp do gleby bezpośrednio po oczyszczeniu, redukcję powstających odpadów, łatwość wdrożenia metody oraz fakt, że rośliny są łatwo dostępnym i odnawialnym źródłem, dobry odbiór społeczeństwa.

Ograniczeniem bioremediacji może być rodzaj skażenia, głębokość penetracji korzeni, rozpuszczalność i dostępność zanieczyszczeń zależna od wielu czynników zewnętrznych, powstawanie materiałów niebezpiecznych, możliwość rozprzestrzenienia się pierwiastków w łańcuchu pokarmowym, konieczność prowadzenia monokultur rośliny dokonującej procesu fitoremediacji, a zatem niższą odporność populacji na szkodniki czy choroby, możliwość sprowadzenia wraz z gatunkiem będącym hiperakumulatorem, innych gatunków inwazyjnych, w tym gatunków potencjalnie niebezpiecznych dla rodzimej fauny i flory, wolne tempo oczyszczania, metody bioremediacji są stosunkowo mało poznane naukowo.

Koniecznym jest, aby bioremediacja, jako metoda usuwania zanieczyszczeń z gruntów, się rozwijała. Zbadane powinny zostać sposoby odzysku metali z biomasy roślinnej oraz z formacji geologicznej, a także dalszy los mikroorganizmów oraz roślin, w których akumulowane są substancje niebezpieczne. Dodatkowo, równocześnie z badaniami nad ewentualnymi zagrożeniami wynikającymi z zastosowanych metod, powinny być prowadzone doświadczenia na poziomie inżynierii genetycznej, mające na celu podniesienie zdolności akumulacyjnych wybranych organizmów, a także możliwości krzyżowania i lepszej adaptacji gatunków. Naturalne metalofity stanowią bardzo dobry punkt wyjścia do badań nad mechanizmami odporności na wysokie stężenia metali, co powinno się przełożyć na wskazanie genów odpowiedzialnych za złożone procesy, a w przyszłości powstanie transgenicznych odmian osiągających lepsze wyniki oczyszczania. Rozwój metod oczyszczania gruntów powinien być szeroko badany, ze względu np. na bliską perspektywę zamknięcia składowiska odpadów niebezpiecznych w Różanowie, co za tym idzie konieczność oczyszczenia okolicznych gruntów, ograniczenie ilości produkowanych i nieużytych odpadów. Metody remediacji wpisują się w programy rozwoju technologii sąsiadujących województw, np. województwa śląskiego na lata 2010 – 2020. Na terenie Opolszczyzny, bioremediacja znalazłaby zastosowanie nie tylko do usuwania metali ciężkich z gleb wykorzystywanych rolniczo, ale również z gruntów po dawnych mogiłnikach, czy do unieszkodliwiania skażeń powstałych w obecnie istniejącym mogiłniku na terenie miasta Brzeg.



Ryc. 9. Mogilniki województwa opolskiego.

Źródło: www.mogilniki.pgi.gov.pl/mogilniki

Literatura:

- [1] Grobelak A., Kacprzak M., Fijałkowski K. Fitoremediacja – *niedoceniony potencjał roślin w oczyszczaniu środowiska* w: JEcolHealth, vol. 14, nr 6, listopad-grudzień 2010.
- [2] Hadaś E. *Bioremediacja metali ciężkich i innych zanieczyszczeń z gleby*. Źródło: <http://www.parasit.amp.edu.pl/seminars/1WL-2/W-3.pdf> [dostęp: 14 czerwca 2016]
- [3] Kopcewicz J. *Podstawy biologii roślin*. PWN: Warszawa, 2012.
- [4] Koszałkowska M., Kręcidło Ł. *Wpływ biostymulacji i bioaugmentacji gleby skażonej związkami ropopochodnymi na jej aktywność biologiczną*. Źródło: <http://www.knbt.uni.opole.pl/show.php?id=31&lang=pl&m=1> [dostęp: 26 marca 2016]
- [5] Marecik R., Króliczak P., Cyplik P. (2006) Fitoremediacja – *alternatywa dla tradycyjnych metod oczyszczania środowiska* w: Biotechnologia 3 (74), s. 88-97.
- [6] Mierek-Adamska A., Dąbrowska G., Goc A. (2009) *Rośliny modyfikowane genetycznie, a strategie oczyszczania gleb z metali ciężkich* w: Postępy Biologii Komórki, t. 36, Nr 4, s. 649 – 662.
- [7] Rambau W. *Reakcja autochtonicznej mikroflory gleby skażonej ropopochodnymi na zastosowanie preparatu enzymatycznego i natlenienia*. Źródło: <http://www.knbt.uni.opole.pl/show.php?id=29&lang=pl&m=1> [dostęp: 26 marca 2016]
- [8] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska W Opolu: *Stan środowiska w województwie opolskim w latach 2005- 2006*. Biblioteka monitoringu środowiska: Opole, 2007.
- [9] Żurek G., Majtkowski W. (2009) *Rośliny alternatywne w fitoekstrakcji metali ciężkich z obszarów skażonych*. Problemy Inżynierii Rolniczej, Nr 3, s. 83-89.

akalinichenko@uni.opole.pl

SPIS TREŚCI

S.A. BALIUK, V.V. MEDVEDEV, J. MAKUCHOWSKA-FRYC SOILS OF UKRAINE, THEIR PROPERTIES AND FERTILITY	5
M.Ya. BOMBA, U.B. LOTOTSKA-DUDYK, ENVIRONMENTAL PROBLEMS OF WATER RESOURCES AND WAYS OF THEIR RATIONAL USE	14
Viktor KARPENKO, Alina BURLIAI, J. MAKUCHOWSKA-FRYC WAYS OF REDUCING CARBON EMISSIONS IN AGRICULTURE OF UKRAINE	20
V. DUBOVYY, O. DUBOVYY ECOLOGICAL CULTURE AS THE BASE OF THE SOCIETY HARMONIZATION IN THE SCIENTIFIC PROGRESS ERA	28
Volodymyr M. ISAIENKO, Kateryna O.BABIKOVA, Małgorzata OSTROWSKA ENGINEERING ECOLOGY	35
Victor KARPENKO, Oleksandr BURLIAI PRODUCTION OF ALTERNATIVE PRODUCTS AND RENEWABLE ENERGY SOURCES IN RURAL AREAS	43
Lyudmyla KIRILENKO, Antonina KALINICHENKO, Volodymyr PATYKA INFLUENCE PLANT PATHOGENIC BACTERIA AND FUNGI ON THE EFFICIENCY OF THE SYMBIOTIC SYSTEM RHIZOBIUM GALEGAE – <i>GALEGA ORIENTALIS</i> L	51
O. MAKLYUK OPTIMIZATION OF THE ECOLOGICAL STATE AGROCENOSSES BIOLOGICALLY ACTIVE SOIL	65
D.I. MASLENNIKOV, T.G. TKACHENKO, J. GAJDA MATHEMATICAL MODEL OF MICROCLIMATIC PECULIARITIES IN TEMPERATURE CONDITIONS	72
M.M. MUSIENKO, O.V. VOITSEKHIVSKA, L.M. BATSMANOVA ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE SOCIETY IN THE FUTURE - REALITY AND PROSPECTS	81
V.K. POUZIK, L.V. GOLOVAN', M. OSTROWSKA BIOLOGICAL CONTROL OF ENVIRONMENT: GENETIC MONITORING	88
V. PATYKA, O. ZAKHAROVA, O. GORB, St. GAJDA ENVIRONMENTAL ENGINEERING IN SOLVING THE CONFLICT BETWEEN NOOSPHERE AND BIOSPHERE	95

Małgorzata OSTROWSKA	
WODY POWIERZCHNIOWE ZLEWNI RZEKI MAŁA PANEW BĘDĄCE POD WPŁYWEM ANTROPOGENIZACJI	104
Małgorzata OSTROWSKA, Monika PAWLITA-POSMYK	
ANALIZA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W MIEJSCOWOŚCI PIETROWICE WIELKIE	117
Małgorzata OSTROWSKA, Monika PAWLITA-POSMYK	
CHARAKTERYSTYKA GOSPODARKI ODPADAMI W GMINIE SKARBIMIERZ	132
Małgorzata OSTROWSKA	
ANALIZA PORÓWNAWCZA ZESPOŁÓW GLONÓW W ZBIORNIKU TURAWA	149
Małgorzata OSTROWSKA	
BUDOWLE I URZĄDZENIA ŚRODOWISKOWE W RZEKACH	166
Elżbieta PYTLIK, Antonina KALINICHENKO	
SKAŻENIA GLEB METALAMI CIĘŻKIMI ORAZ BIOREMEDIACJA JAKO SZANSĄ NA POPRAWĘ STANU GLEB W WOJEWÓDZTWIE OPOLSKIM	181