



Charakterystyka biorekultywacji gleb skażonych produktami ropopochodnymi metodą pryzmowania ex situ

*Anna Dmochowska, Dariusz Dmochowski, Stanisław Biedugnis
Szkoła Główna Służby Pożarniczej, Warszawa*

1. Wstęp

Gleba jest złożonym elementem środowiska naturalnego, dzięki któremu może funkcjonować ekosystem. W glebie zachodzą złożone, wieloetapowe procesy, powodujące zmiany form i rozkład materii organicznej. Gleba jest siedliskiem wielu różnorodnych mikroorganizmów a także wyższych organizmów żywych. Na powierzchni gleby rozwija się bogata szata roślinna, czerpiąca z niej wodę i niezbędne do życia składniki mineralne (Cebula & Rajca 2014, Furdyn & Kawala 1996, Karczewska 2012).

Gleba gdy zostanie skażona substancjami ropopochodnymi staje się materią niebezpieczną, szkodliwą dla życia biologicznego oraz prawidłowego funkcjonowania ekosystemu. Węglowodory w zależności od właściwości fizykochemicznych (masa cząsteczkowa, obecność chlorowcopochodnych, pierścieni aromatycznych i cyklicznych oraz wiązań wielokrotnych) i przepuszczalności gleby z różną szybkością będą migrowały w głąb warstwy glebowej. Przemieszczanie się węglowodorów może zachodzić pionowo lub poziomo w przestrzeni glebowej. W glebie dobrze przepuszczalnej, migracja głównie odbywa się w kierunku pionowym, a następnie, gdy osiągnie poziom zwierciadła wód podziemnych – poziomo. Zjawisko to wiąże się z bezpośrednim niebezpieczeństwem skażenia lokalnych źródeł wody pitnej.

Biodostępność węglowodorów alifatycznych i aromatycznych w stosunku do komórek mikroorganizmów zależy od różnych czynników: fizycznych (struktura gleby, rozmiar porów), chemicznych (adsorpcji, wymiany jonowej, kompleksowania) i mikrobiologicznych (głównie budowy ścian komórkowych). Lekkie frakcje benzynowe zawierające w łańcuchu węglowodorowym od 3 do 11 atomów węgla, są mobilne, reaktywne oraz w dużych stężeniach, (rzędu kilkuset mg/kg s.m.) wysoce toksyczne. Natomiast cięższe frakcje olejowe są stosunkowo mniej toksyczne, wolniej się przemieszczają, natomiast szczelnie zasklepiają pory glebowe, powodując degradację gleby na skutek deficytu tlenowego (Gierak 1995, Kołwzan 2003, Siuta 2003).

Produkty naftowe wprowadzone do gleby w sposób niekontrolowany w wyniku awarii technicznych lub zdarzeń komunikacyjnych wpływają więc negatywnie na jej funkcje ekologiczne. Dodatkowo, należy nadmienić, że na poziomie reducentów dokonują się niekorzystne przekształcenia w składzie ilościowym i jakościowym mikroorganizmów glebowych. Zostaje zahamowane zjawisko fotosyntezy oraz zablokowany zostaje proces oddychania roślin. Poważnemu zakłóceniu ulegają, także relacje wodne w glebie w strefie korzeniowej roślin, skutkujące niedoborem składników mineralnych (Kołwzan 2003, Surygała 2000, Surygała 2001).

Najczęściej stosowanymi metodami rekultywacji skażonych przez produkty ropopochodne gleb są metody biotechnologiczne.

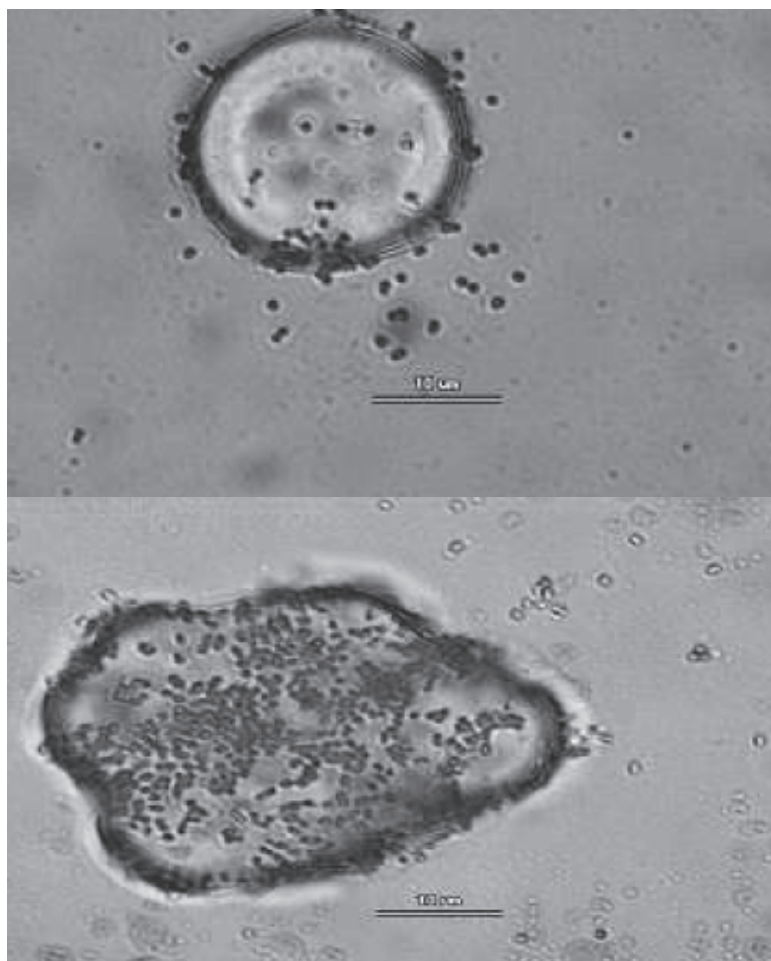
Bioremediacja jest procesem wykorzystującym specjalistyczne szczepy mikroorganizmów z grupy *Rhodococcus*, *Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Norcardia*, *Mycobacterium*, *Sphingomonas*, które rozkładają substancje toksyczne do związków mniej niebezpiecznych lub obojętnych dla środowiska glebowego (Kołwzan 2007).

Mikroorganizmy stosowane w bioremediacji mogą być mikroflorą naturalnie zasiedlająca skażoną glebę, mogą być też wyhodowane w bioreaktorach lub stosowane w postaci handlowych preparatów, charakteryzujących się wysoką skutecznością biodegradacyjną.

Na rysunku 1 przedstawiono bakterie występujące w kropli oleju napędowego.

Proces bioremediacji może być prowadzony metodami *in situ* lub *ex situ*. Pierwsza metoda polega na usunięciu zanieczyszczeń z zanieczyszczonej gleby w miejscu ich powstania. W drugiej metodzie, skażoną

glebę wydobywa się a następnie transportuje na miejsce, gdzie poddana zostaje ona zabiegom bioremediacyjnym (Kołwzan 2007, Nowak 2008).



Rys. 1. Bakterie występujące w kropli oleju napędowego (Kołwzan 2007)
Fig. 1. The bacteria present in the gas oil droplets

Dopuszczalne stężenia substancji ropopochodnych w glebie lub ziemi, w zależności od określonych klas użytkowania i przeznaczenia gruntu (Dz.U 2002.165.1359) (Rozporządzenia 2002), przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dopuszczalne poziomy zawartości związków ropopochodnych w glebie lub ziemi w zależności od określonych klas użytkowania i przeznaczenia gruntu (Rozporządzenia 2002)

Table 1. Acceptable levels of petroleum compounds in soil or ground depending on certain classes of use and zoning

Głębokość [m.ppt]	Dopuszczalne stężenie węglowodorów [mg/kg.s.m.]		
	Tereny przemysłowe użytki kopalne, tereny komunikacyjne. GR. C	Użytki rolne, nieużytki, grunty zabudowane i zurbanizowane. GR.B	Nieruchomości gruntowe wchodzące w skład obszarów chronionych. GR.C
0-0,3	-	50	30
0-2,0	1000 ¹⁾	200 ¹⁾	
do 15,0	3000 ²⁾	1000 ²⁾	
poniżej 15,0	Nie dotyczy	1000 ¹⁾ 3000 ²⁾	

¹⁾ Grunty o przepuszczalności do $1 \cdot 10^{-7}$ m/s

²⁾ Grunty o przepuszczalności poniżej $1 \cdot 10^{-7}$ m/s

W metodzie in situ wykorzystywane są zabiegi agrotechniczne. Lekkie frakcje produktów naftowych są usuwane przez odparowanie, natomiast cięższe frakcje poddaje się zabiegowi biodegradacji. Glebę formuje się w cienkie warstwy, które w celu napowietrzenia są przeorywane lub bronowane z jednoczesnym dostarczaniem (w postaci roztworów) mikroorganizmów. Często stosowana jest także metoda bioekstrakcji, polegająca na przepłukiwaniu gleby wodą z mikroorganizmami i odżywkami oraz jednoczesnym napowietrzaniem (Nowak 2008, Turek i in. 2013).

Skażenie gleby substancjami ropopochodnymi powoduje niekorzystny wzrost stosunku węgla do azotu, stąd szybkość procesu biodegradacji może być limitowana stężeniem substancji odżywczych i ich dostępnością. Głównie są to związki azotu i fosforu. Z tego powodu koniecznym zabiegiem jest zasilenie skażonej gleby nawozami azotowymi, w składzie których stosunek C:N:P powinien wynosić: 10:1:0,1 (Gierak 1995, Siuta 2003).

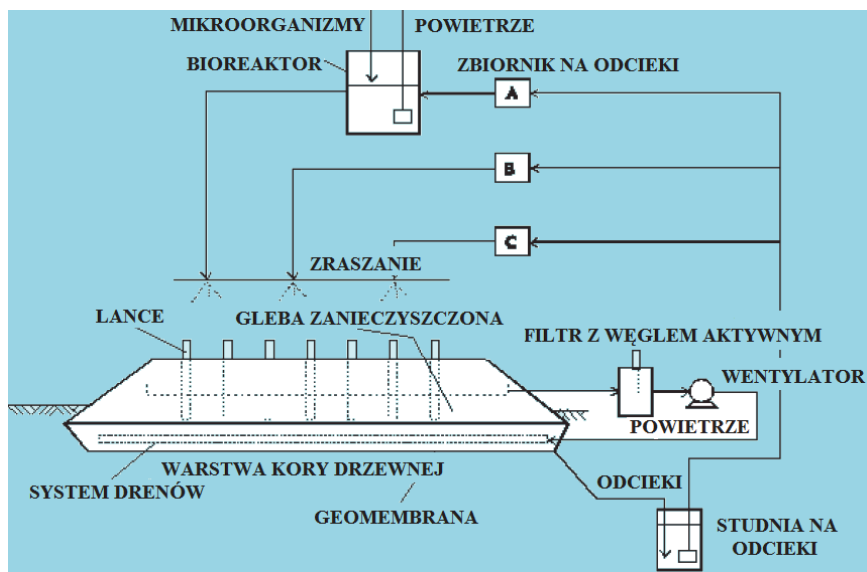
Metoda ex situ stosowana jest w przypadkach, gdy konieczne jest przeprowadzenie remediacji skażonej gleby w stosunkowo krótkim czasie, a także gdy istnieje ryzyko szybkiej migracji niebezpiecznych związków do płytkich wód gruntowych.

Jedną z najczęściej stosowanych metod *ex situ* jest pryzmowanie, które polega na przetransportowaniu zanieczyszczonej gleby na wcześniej specjalnie przygotowane miejsce, o odpowiedniej infrastrukturze technicznej, zabezpieczone przed migracją zanieczyszczeń specjalistyczną geomembraną często wyposażoną w system napowietrzający i drenażowy z możliwością doprowadzenia wody z mikroorganizmami.

Na wspomnianej geomembranie, z gleby formowana jest pryzma, którą poddaje się zaprojektowanym zabiegom technicznym (Kołwzan 2003, Sarbak 2010).

Pryzmę, standardowo przykrywa się folią w kształcie tunelu, który wyposażony jest w system zraszający. Dzięki czemu, na powierzchnię pryzmy, doprowadzona zostaje woda z mikroorganizmami. W trakcie procesu bioremediacji kolektorowane są wypływające z pryzmy odcieki, które po oczyszczaniu i wzbogacaniu w mikroorganizmy są zwracane do pryzmy.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat bioremediacji metodą pryzmowania.



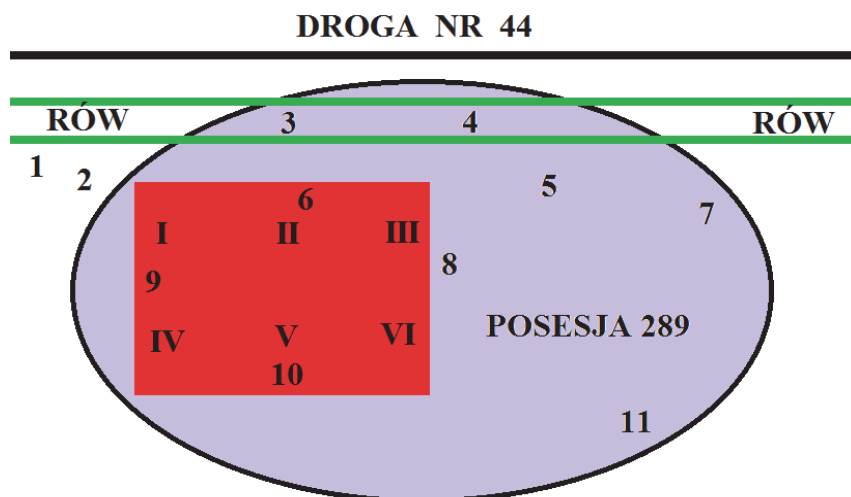
Rys. 2. Schemat metody pryzmowania (Kołwzan 2007)

Fig. 2. A scheme method of the prism

2. Przykład zastosowania

Przykładem zastosowania metody pryzmowania były działania jakie zastosowano po wypadku, który miał miejsce pod Radomiem, a w którym brała udział autocysterna z olejem napędowym. Po zabezpieczeniu miejsca zdarzenia przez jednostki Państwowej Straży Pożarnej i odpompowaniu 4000 l rozlanego oleju, o konieczności poboru próbek skażonej gleby powiadomiony został Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska.

Na rysunku 3 przedstawiono orientacyjny plan miejsca zdarzenia z rozmieszczeniem miejsc poboru pierwszej i drugiej serii próbek – po wycieku ropopochodnych.



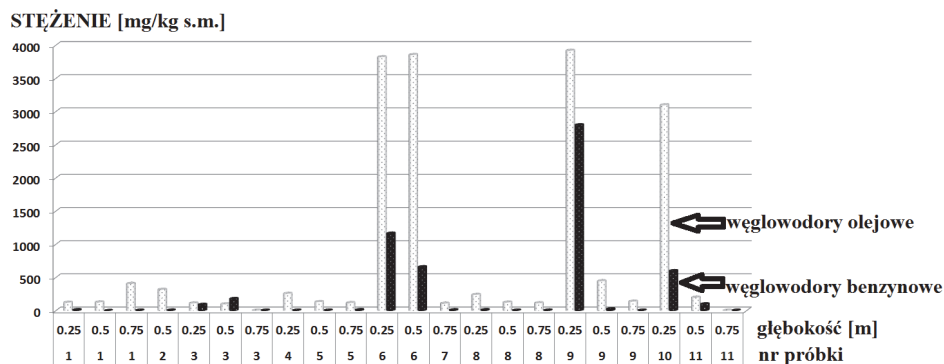
Rys. 3. Orientacyjny plan sytuacyjny zdarzenia związanego z wyciekiem substancji ropopochodnych; opracowanie na podstawie (Przygucki 2011)

Fig. 3. Indicative plan of the events associated with the leakage of oil

Wyniki badań otrzymane z pierwszej serii próbek gleby, pobranej z miejsca kolizji, przedstawiono na rysunku 4.

Z terenu zaznaczonego na rysunku owalem koloru szarego pobrano do badania pierwszą serię próbek skażonej gleby, które ponumerowano cyframi arabskimi. Przeprowadzone badania jakościowe i ilościowe wykazały przekroczenia dopuszczalnych stężeń węglowodorów olejowych o liczbie atomów węgla w łańcuchach C₁₂-C₂₅ – 3000 mg/kg s.m., oraz węglowodorów benzynowych – C₆-C₁₂ – 500 mg/kg s.m. wg Roz-

porządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów gleby oraz standardów jakości ziemi. Dz. U 2002 nr 165 poz. 1359.) Przekroczenia stężeń badanych frakcji węglowodorów odnotowano w próbce Nr 6 na głębokości od 0,25 m do 0,50 m oraz w próbkach Nr 9 i 10 na głębokości 0-0,25 m.



Rys. 4. Wyniki badań poziomu stężeń węglowodorów z pierwszej serii pobranych próbek; opracowanie na podstawie (Przygucki 2011)

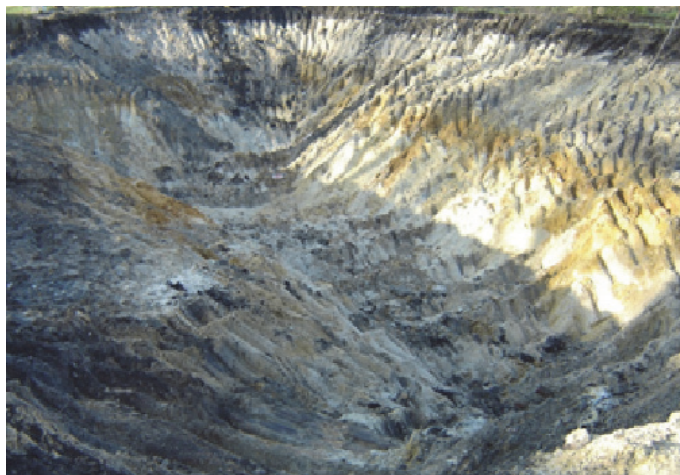
Fig. 4. Test results of the concentrations of hydrocarbons from the first series of samples

Skażona gleba wybrana została do głębokości 0,65 m, i przenieś transportowana na wcześniej przygotowany plac bioremediacyjny firmy posiadającej stosowne uprawnienia do przeprowadzenia tego typu rekultywacji. Z wykopu, oznaczonego kwadratem koloru czerwonego pobrano drugą serię próbek z głębokości ok. 0,5 m (miejsca poboru próbek oznaczono cyframi rzymskimi) w celu sprawdzenia stężenia analizowanych frakcji węglowodorów w glebie pozostałej na miejscu zdarzenia.

Na rysunku 5 zamieszczono zdjęcie miejsca z którego wybrana została skażona gleba po pierwszej serii poboru próbek. Na terenie tego wykopu przeprowadzono pobór drugiej serii próbek w celu potwierdzenia braku skażenia.

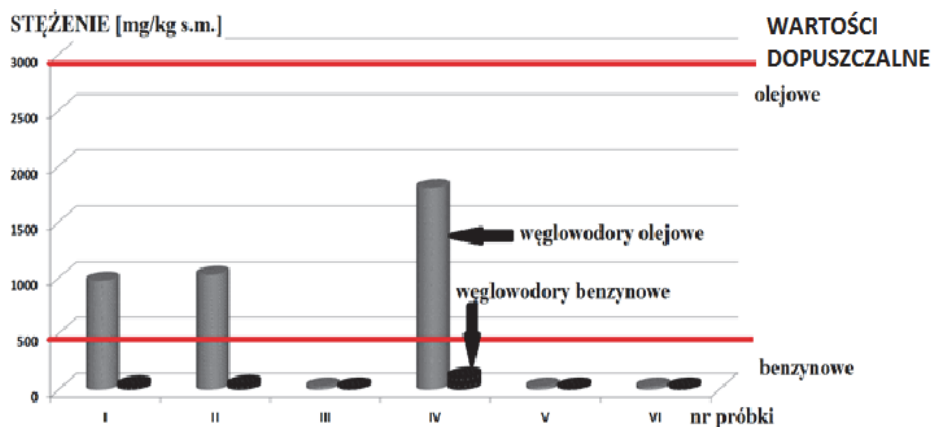
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów drugiej serii, sześciu próbek kontrolnych gleb, pobranych ze ścian bocznych i dna wykopu po wybraniu zaolejonej gleby na miejscu kolizji. Na wykresie, czerwonymi liniami poziomymi, zaznaczono wartości stężeń dopuszczalnych.

Na rysunkach 7-10 przedstawiono kolejne fazy bioremediacji w metodzie ex situ – przyzmuwania.



Rys. 5. Wykop po wybraniu skażonej gleby, miejsce poboru drugiej serii próbek (Przygucki 2011)

Fig. 5. Trench after selecting contaminated soil, place collecting a second series of samples



Rys. 6. Wyniki pomiarów poziomu stężeń węglowodorów z drugiej serii poboru próbek; opracowanie własne na podstawie (Przygucki 2011)

Fig. 6. The results of measurements of levels of hydrocarbons from the second series of sampling



Rys. 7. Skażona gleba uformowana w pryzmę (Przygucki 2011)

Fig. 7. Contaminated soil formed in a prism



Rys. 8. Zraszanie skażonej gleby wodą z mikroorganizmami (Przygucki 2011)

Fig. 8. Spray water from contaminated soil microorganisms



Rys. 9. Pryzma uformowana ze skażonej gleby, przykryta folią (Przygucki 2011)
Fig. 9. The prism formed from contaminated soil, covered with foil



Rys. 10. Pryzma gleby po zakończonej bioremediacji (Przygucki 2011)
Fig. 10. Prism soil after completion of bioremediation

Prowadzono stały monitoring składowanej gleby poddawanej rekultywacji. Postęp procesu kontrolowany był na podstawie analiz systematycznie pobieranych próbek, dostosowanych do stopnia homogeniczności złoża oraz rodzaju i stężenia zawartych w nich zanieczyszczeń ropopochodnych, a także ich podatności na biodegradację. Wyniki analiz porównano z obowiązującymi normami zgodnie z wyżej wymienionym Rozporządzeniem Ministra Środowiska (Rozporządzenia 2002). Całkowity czas rekultywacji zanieczyszczonej gleby wyniósł osiem miesięcy, co szacunkowo stanowi jedną czwartą czasu, koniecznego do przeprowadzenia bioremediacji metodą *in situ* (Kołwzan 2007).

3.Podsumowanie

Przeprowadzanie bioremediacji gleb w miejscach gdzie została ona skażona, (tzn. metodą *in situ*) jest działaniem, które nie powoduje zmian rzeźby terenu ani przebudowy czy przemieszczenia istniejącej infrastruktury technicznej. Jednak istnieje niebezpieczeństwo niekontrolowanej migracji zanieczyszczeń ropopochodnych w profilu pionowym i poziomym środowiska glebowego, co z kolei zagraża przedostawaniu się ich do wód gruntowych oraz terenów zamieszkałych przez ludzi.

W procesach rekultywacji gleb, przeprowadzanych metodą *in situ* wiele trudności może powodować specyficzna budowa geologiczna związana z ich dużą związłością, uniemożliwiająca dostarczenie odpowiedniej ilości tlenu i roztworu wodnego zawierającego mikroorganizmy. Wszystkie te trudności są eliminowane w technologiach przeprowadzanych metodą *ex situ*. Jest to metoda stosowana zazwyczaj w przypadkach, gdy ilość skażonej gleby jest stosunkowo niewielka, gdyż prace związane z usuwaniem i transportem bardzo dużych objętości skażonego przez produkty ropopochodne materiału glebowego są kosztowne. Jednocześnie przemieszczanie dużej ilości silnie zanieczyszczonej gleby może być przyczyną niekontrolowanego uwalniania się trudnych do oszacowania ilości lotnych węglowodorów do powietrza atmosferycznego.

Po dokonaniu analiz ekonomicznych i kosztów ekologicznych prac rekultywacyjnych przeprowadzonych metodą *ex situ* należy zastanowić się nad wybraniem właściwej metody. Niewątpliwie metoda *ex situ* charakteryzuje się wysokim stopniem skuteczności, a zachodzące procesy remediacji są prowadzone pod pełną kontrolą. Końcowy efekt uzyskuje się w czasie ponad czterokrotnie krótszym niż w metodzie *in situ*.

Literatura

- Cebula, J., Rajca, M. (2014). *Oczyszczanie gleb i gruntów*. Gliwice: Wydawnictwa Politechniki Śląskiej.
- Furdyn, G., Kawala, Z. (1996). Odnowa zanieczyszczonych gruntów metodami in situ. *Ochrona Środowiska*, 2(61), 27-34.
- Gierak, A. (1995). Zagrożenie środowiska produktami ropopochodnymi. *Ochrona Środowiska*, 2(57), 31-34, 1995
- Karczewska, A. (2012). *Ochrona gleb i rekultywacja terenów zdegradowanych*. Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego.
- Kołwzan, B. (2003). Toksykologia gleb skażonych produktami ropopochodnymi. *Inżynieria Ekologiczna*, 8, 43-50.
- Kołwzan, B. (2007). *Remediacja środowiska gruntowo-wodnego skażonego produktami naftowymi. Podstawy naukowe i ich aplikacja na terenach zdegradowanych*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Nowak, J. (2008). Bioremediacja gleb z ropy naftowej i jej produktów. *Biotechnologia*, 1(80), 97-108.
- Sarbak, Z. (2010). Wykorzystanie sorbentów w procesach oczyszczania gruntów. *Chemia Dydaktyka Ekologia Metrologia*, 15(1), 77-92.
- Siuta, J. (2003). Ekologiczne, technologiczne i prawne aspekty rekultywacji gruntów zanieczyszczonych produktami ropy naftowej. *Inżynieria Ekologiczna*, 8, 7-26.
- Surygała, J. (2001). *Ropa naftowa a środowisko przyrodnicze*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Surygała, J. (2000). *Zanieczyszczenia naftowe w gruncie*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Turek, S., Gnioda, A., Marciocha, D. (2013). *Oczyszczanie gleby w teorii i praktyce*. Wydawnictwa WPS.
- Przygucki, R. (2011). *Remediacja gleb zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi metodą kopcowania*. Praca dyplomowa.
- Rozporządzenia Ministra Środowiska w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi z dnia 9 września 2002.

Characteristics of Bioremediation of Soils Contaminated with Petroleum Products Using Ex situ Prism Method

Abstract

Petroleum substances after entering into soil cause the block located in the free space through which the transport takes place the soil solution and air. As a result of this process the compacts the soil and what this involves changing

its chemical, physical and biological. Consequently, following a high degree of reduction of the characteristic production.

In the soil occurs mass death of living organisms, also drastically changes the microflora composition by reducing the number of species including aerobic nitrogen-bounding bacteria atmospheric. Therefore widening anoxia and digestible plant forms of nitrogen and phosphorus, while excess carbon. Technologies used for remediation of soils contaminated with petroleum products are based mostly on biological methods, using methods of *in situ* and *ex situ*.

The aim of the publication was to characterize the method of prism soil contaminated with petroleum products and to assess the effectiveness of this method, carried out on the basis of the analysis of the test results for the content of petroleum substances, for example, events involving tankers transporting fuel oil.

Streszczenie

Substancje ropopochodne po przedostaniu się do gleby powodują blokowanie znajdujących się w niej wolnych przestrzeni, za pośrednictwem których odbywa się transport roztworu glebowego i powietrza. W wyniku tego procesu następuje zbrylenie gleby a co się z tym wiąże zmiana jej właściwości chemicznych, fizycznych i biologicznych. W konsekwencji tego następuje w wysokim stopniu zredukowanie jej właściwości produkcyjnych. W glebie następuje wtedy masowe obumieranie żywych organizmów, drastycznie zmienia się także skład mikroflory poprzez zmniejszenie liczby gatunków tlenowych w tym bakterii wiążących azot atmosferyczny. Pogłębia się zatem deficyt tlenu a także przyswajalnych dla roślin form azotu i fosforu przy jednoczesnym nadmiarze węgla.

Technologie stosowane do rekultywacji gleb skażonych produktami ropopochodnymi oparte są najczęściej na metodach biologicznych, wykorzystujących sposoby *in situ* oraz *ex situ*.

Celem pracy jest scharakteryzowanie metody przyzmoiania gleby skażonej produktami ropopochodnymi oraz ocena skuteczności tej metody, przeprowadzona na podstawie analizy wyników badań pod kątem zawartości substancji ropopochodnych, na przykładzie zdarzenia z udziałem autocysterny przewożącej olej napędowy.

Słowa kluczowe:

biorekultywacja gleb po wyciekach substancji ropopochodnych, przyzmoianie *ex situ*

Keywords:

land remediation after spills of petroleum substances, *ex situ* prism