

Bioremediacja czyli biologia w praktyce

Śmiecimy i zapewne jeszcze długo śmiecić będziemy. Beztrósko zanieczyszczamy świat kręcąc przysłowiową pętlę na własną szyję. Na szczęście są ludzie, którzy pragną go posprzątać, a że nie jest to takie proste dowiedzie się Państwo z niniejszego artykułu.

■ SEBASTIAN BARANOWSKI

Wstęp

Uprzemysłowienie świata i rozwój cywilizacji stale pociągają za sobą olbrzymie zanieczyszczenie środowiska naturalnego. Do skażenia gruntów i wód podziemnych szeregiem związków organicznych, np. paliwami płynnymi, przyczyniły się głównie – przemysł chemiczny, petrochemiczny, górnictwo i komunikacja. Zagroza to m. in.: zasobom przyrodniczym, ujęciom wód pitnych, a przez to i zdrowiu człowieka.

Rozwój nauk biologicznych (w szczególności mikrobiologii) stwarza możliwość ograniczenia lub nawet likwidacji tego typu skażeń za pomocą mikroorganizmów (bakterii, grzybów, glonów), potrafiących degradować zanieczyszczenia. Biologia jest więc matką bioremediacji. Słowo „bioremediacja” powstało przez połączenie dwóch słów: „bio” od biologiczny i „remediacja” pochodzącego od angielskiego terminu „remedy” lub jak ktoś woli łacińskiego „remedium” oznaczających lekarstwo lub wyleczyć/naprawić. Sens tego pojęcia w ochronie środowiska oznacza zatem oczyszczanie środowiska z substancji toksycznych przez zastosowanie metod biologicznych. W tym znaczeniu bioremediacja oznacza każdą metodę biologiczną stosowaną do zmniejszania zanieczyszczeń w środowisku. W praktyce jednak znaczenie to zawęży się jedynie do metod wykorzystujących mikroorganizmy.

Kilka słów o postawach bioremediacji

Głównymi bohaterami bioremediacji są mikroorganizmy, których przydatność w likwidacji skażeń wynika z ich metabolizmu. Mikroorganizmy uzyskują energię poprzez zerwanie wiązań chemicznych związków służących im jako substancje odżywcze. W wyniku zerwania wiązania chemicznego, pojawiają się wolne elektrony i energia. Wolne elektrony muszą być odebrane przez akceptor, w postaci związku chemicznego lub jonu. Mikroorganizmy uzyskaną w ten sposób energię wraz z częścią wolnych elektronów „inwestują” w utworzenie kolejnych komórek, namnażanie się. Na tym etapie powstaje zapotrzebowanie na makroelementy takie jak: węgiel, azot, fosfor, potas. Istota bioremediacji polega na tym, żeby wykorzystał mikroorganizmy, dla których związki zanieczyszczające środowisko są substancjami odżywczymi lub pełnią rolę akceptorów elektronów. Wówczas w wyniku ich metabolizmu dochodzi do rozkładu zanieczyszczeń i zmniejszenia stężenia szkodliwego czynnika w środowisku.

□ Podstawowe procesy i reakcje zachodzące w czasie bioremediacji

W zależności od panujących warunków, mogą zachodzić różne reakcje i procesy, które są użyteczne z punktu widzenia bioremediacji.

W warunkach tlenowych, jeśli mikroorganizmy oddychają tlenowo, akceptorem elektronów jest tlen. Część atomów węgla pochodzących z rozkładanych związków ulega utlenieniu i powstaje dwutlenek węgla, natomiast pozostała pula zostaje zużyta do utworzenia nowej biomasy, a tlen ulega redukcji tworząc wodę. W efekcie następuje zmniejszenie stężenia związków toksycznych, powstaje dwutlenek węgla, woda i zwiększa się biomasa mikroorganizmów.

W warunkach beztlenowych – w oddychaniu beztlenowym, rolę akceptora elektronów mogą pełnić związki nieorganiczne: jon azotanowy (NO_3^-), siarczanowy (SO_4^{2-}), jony niektórych metali, np. żelazo III (Fe^{3+}), czy mangan IV (Mn^{4+}) czy dwutlenek węgla. W zależności od akceptora produktami metabolizmu są: azot cząsteczkowy (N_2), siarkowodor (H_2S), zredukowane formy metali oraz metan. Niektóre mikroorganizmy potrafią nawet wykorzystać, jako akceptor elektronów, rozpuszczalne jony uranu U^{6+} redukując je do postaci U^{4+} , która jest nierozpuszczalna.

W warunkach beztlenowych zachodzi również fermentacja. W odróżnieniu od oddychania, w procesie tym nie występują zewnętrzne akceptory elektronów. Związek zanieczyszczający pełni wówczas podwójną rolę – źródła elektronów i akceptora. W wyniku działania mikroorganizmów poprzez kolejne reakcje w układach, w których przekazywane są elektrony, zanieczyszczenia zostają zmienione w szereg nieszkodliwych związków takich jak octany, propiony, wodór i dwutlenek węgla. Produkty fermentacji mogą być dalej biodegradowane przez następne szczepy bakterii, co w efekcie może doprowadzić do powstania z pierwotnych zanieczyszczeń – dwutlenku węgla, metanu i wody.

W niektórych przypadkach mikroorganizmy rozkładają zanieczyszczenia, bez czerpania z tego znaczących, dla nich, korzyści lub zupełnie „bezinteresownie”. Jednym z takich procesów jest kometabolizm, w którym jedna z grup mikroorganizmów, przypadkowo modyfikuje dany związek

czyniąc go dostępnym dla innych. Wówczas związek ten może być wykorzystany przez inne organizmy, które odnoszą korzyść z jego rozkładu. Przykładowo w procesie utleniania metanu niektóre bakterie mogą rozłożyć chlorowane rozpuszczalniki, choć w normalnych warunkach nie są w stanie tego dokonać.

Kolejnym procesem mikrobiologicznym, który ma potencjalnie duże znaczenie w przypadku unieszkodliwiania halogenowanych zanieczyszczeń organicznych, np. rozpuszczalników chlorowanych jest dehalogenacja redukcyjna. W wyniku działania bakterii dochodzi do reakcji, w której atom pierwiastka z grupy fluorowców zostaje zastąpiony przez atom wodoru. Źródłami elektronów mogą być wówczas: wodór lub prostsze związki organiczne, np. octany, mlecza, metanol, glukoza. Dehalogenacja prawdopodobnie nie dostarcza mikroorganizmom żadnej dodatkowej energii, choć w niektórych przypadkach naukowcy stwierdzili występowanie pewnej korzyści energetycznej. Ogólnie proces ten pozytywnie wpływa na mikroorganizmy poprzez zmniejszenie stężeń substancji toksycznych.

□ *Zanieczyszczenia zredukowane za pomocą bioremediacji*

W wyniku powyższych procesów i reakcji dochodzi do zmniejszenia stężeń substancji zanieczyszczających. Większość zanieczyszczeń możliwych do zdegradowania przez mikroorganizmy, to związki organiczne. W przypadku tak zróżnicowanych związków, różne procesy odgrywają decydującą rolę w bioremediacji. Istotne są również uwarunkowania środowiskowe. Ponadto jedne związki są łatwiej, a inne trudniej biodegradowane. W tabeli 1 zebrano dane dotyczące możliwości biodegradowania niektórych zanieczyszczeń.

Zanieczyszczenia w środowisku

Człowiek w wyniku swojej działalności zanieczyszcza środowisko szeregiem związków organicznych, jak i nieorganicznych. Jedne z nich mają prostą budowę chemiczną, a in-

Tabela 1. Związki chemiczne, a biodegradacja (wg CISB et al., 1993 i CIR et al., 2000).

Związki chemiczne	Częstość występowania	Przykładowe źródła występowania lub zastosowania	Status bioremediacji	Potencjalna efektywność bioremediacji	Ograniczenia
Organiczne					
alkany, BTEX*	bardzo częste	benzyna, olej napędowy, ropa naftowa, rozpuszczalniki	ustalony	duża skuteczność	tworzą odrębną fazę
wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne	powszechne	smoła węglowa, ropa naftowa, barwniki, smary	na etapie rozwoju	biodegradowane w niektórych warunkach tlenowych	silnie sorbowane na powierzchni ciał stałych
kreozot	rzadkie	stosowany do impregnacji drewna (np. podkładów kolejowych)	na etapie rozwoju	łatwo degradowany w warunkach tlenowych	tworzy odrębną fazę, silnie sorbowany na powierzchni ciał stałych
alkohole, ketony, estry	powszechne	utleniacze paliwowe, rozpuszczalniki, farby, kleje, pestycydy, preparaty farmaceutyczne, kosmetyki, produkty fermentacji, detergenty	ustalony	duża skuteczność	
etery	powszechne	rozwpuszczalniki, środki anestetyczne	na etapie rozwoju	biodegradowane w niektórych warunkach przez mikroorganizmy tlenowe i redukujące azot	
węglowodory alifatyczne wysoce chlorowane	bardzo częste	preparaty do prania na sucho, rozpuszczalniki odtłuszczające	na etapie rozwoju	udział w kometabolizmie mikroorganizmów beztlenowych, w niektórych przypadkach również w warunkach tlenowych	tworzą odrębną fazę
węglowodory alifatyczne mniej chlorowane	bardzo częste	rozwpuszczalniki, pestycydy, plastiki, produkt uboczny biodegradacji	na etapie rozwoju	biodegradowane w szczególnych warunkach tlenowych, udział w kometabolizmie mikroorganizmów beztlenowych	
węglowodory aromatyczne wysoce chlorowane	powszechne	obróbka drzewa, izolatory, wymienniki ciepła, produkty uboczne syntezy chemicznej i spalania	na etapie rozwoju	biodegradowane w szczególnych warunkach tlenowych, udział w kometabolizmie mikroorganizmów beztlenowych	tworzą odrębną fazę stałą lub ciekłą, silnie sorbowane na powierzchni ciał stałych

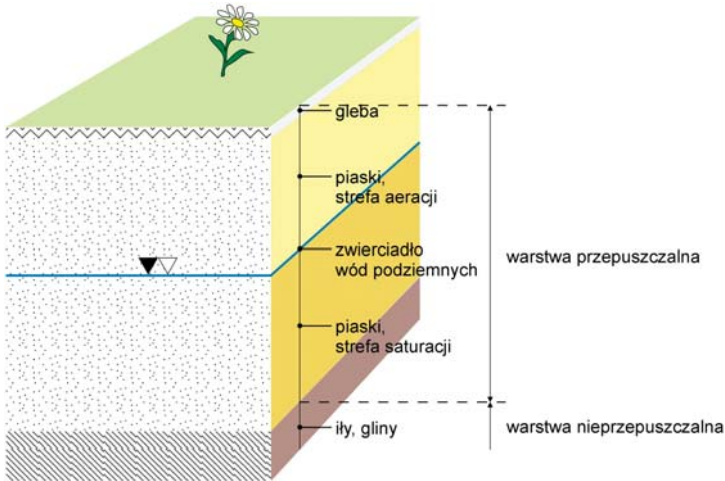
Tabela 1, cd.

Związki chemiczne	Częstość występowania	Przykładowe źródła występowania lub zastosowania	Status bioremediacji	Potencjalna efektywność bioremediacji	Ograniczenia
Organiczne					
węglowodory aromatyczne mniej chlorowane	powszechne	rozpuszczalniki, pestycydy	na etapie rozwoju	łatwo biodegradowane w warunkach tlenowych	tworzą odrębną fazę stałą lub ciekłą
bifenyle wysoce chlorowane (PCB)	sporadyczne	wymienniki ciepła w elektronice, środki poprawiające plastyczność, smary, płyny hydrauliczne, kleje, farby, uszczelniacze	na etapie rozwoju	udział w kometa-bolizmie mikroorganizmów beztlenowych	silnie sorbowane na powierzchni ciał stałych
bifenyle mniej chlorowane (PCB)	sporadyczne			biodegradowane w szczególnych warunkach tlenowych	
aromatyczne związki nitrowe	powszechne	środki wybuchowe (np. dynamit), barwniki, pestycydy	na etapie rozwoju	biodegradowane w warunkach tlenowych, przekształcane w nieszkodliwe lotne kwasy organiczne w warunkach beztlenowych	
Nieorganiczne					
metale (Cr, Cu, Ni, Pb, Hg, Cd, Zn)	powszechne	górnictwo, dodatki do paliw, baterie, farby, środki grzybobójcze	możliwa	rozpuszczalność i reaktywność metali może być zmieniona przez szereg procesów mikrobiologicznych	dostępność zanieczyszczeń wysoce zmienna – uzależniona od chemizmu otoczenia
radionuklidy	rzadkie	reaktory atomowe, broń, medycyna	możliwa		

*BTEX – jednopierścieniowe węglowodory aromatyczne: benzen, toluen, etylobenzen, ksyleny

ne bardzo złożoną i co za tym idzie przeróżne właściwości. Zróznicowany jest również sposób występowania zanieczyszczeń w środowisku. Istnieją zanieczyszczenia lotne, rozpuszczone w wodach oraz stałe, które mogą być obecne w atmosferze, hydrosferze i litosferze. Spośród całej palety zanieczyszczeń środowiska, bioremediacja znalazła największe zastosowanie w przypadku likwidacji skażeń gruntów i wód podziemnych czyli środowiska gruntowo-wodnego.

Przy tej okazji należy wspomnieć, że środowisko gruntowo-wodne składa się z wielu rodzajów gruntów, w których bardzo często występuje woda podziemna. Poszczególne rodzaje gruntów cechują się zróżnicowanymi parametrami filtracji. Przykładowo: piaski, żwiry są utworami przepuszczalnymi, a ropy i gliny stanowią barierę, która znacząco spowalnia migrację przez nie cieczy. Zróznicowany układ warstw o odmiennych parametrach umożliwia występowanie wód



Rys. 1.

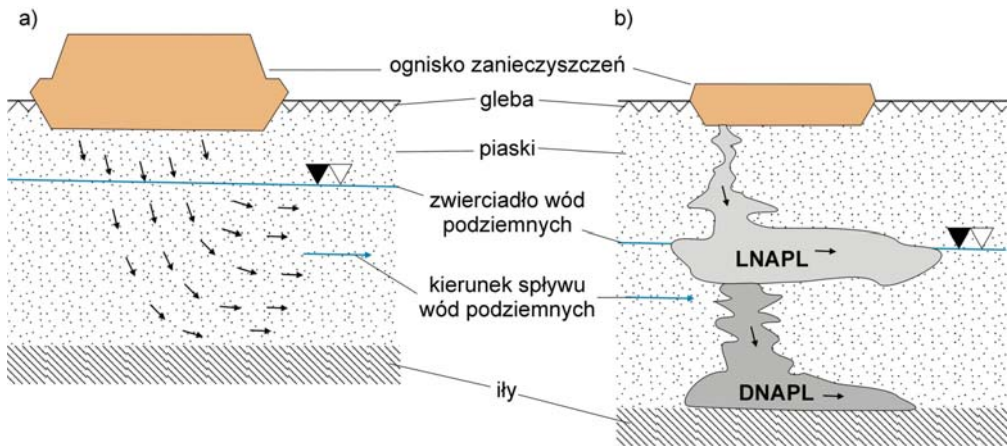
podziemnych. Grunty przy powierzchniowe, wolne od wody, tworzą strefę napowietrzania, inaczej aeracji, a głębsze, których pory lub szczeliny są wypełnione wodą, stanowią strefę nasycenia, inaczej saturacji. Pomiędzy strefą saturacji a aeracji woda tworzy powierzchnię zwaną zwierciadłem wód podziemnych. Z punktu widzenia biologii w ogólnym ujęciu, strefa aeracji zapewnia warunki tlenowe, a saturacji warunki redukcyjne, beztlenowe. Wody podziemne na ogół nie stagnują, tylko w stosunkowo niedużym tempie spływają w kierunku np. studni, rzek, strumieni, itp. Przykładowy układ środowiska gruntowo-wodnego przedstawia rys. 1.

Wiele związków ulega rozpuszczeniu w wodzie i wraz z nią może migrować. Jednak szereg związków przedstawionych w Tab. 1 jest słabo rozpuszczalna w wodzie i ma właściwości niepolarne, co powoduje, że mają one zdolność do tworzenia odrębnej fazy, najczęściej ciekłej. Te, które mają mniejszą gęstość od wody i tworzą warstwę na jej powierzchni, oznacza się terminem LNAPL (z ang. Light Non-Aqueous Phase Liquids czyli lekkie ciecze fazy nie-wodnej), np.: benzyny, olej napędowy, oleje mineralne. Zanieczyszczenia gęstsze (cięższe) od wody określa się skrótem DNAPL (z ang. Dense Non-Aqueous Phase Liquids czyli gęste ciecze fazy nie-wodnej). Do DNAPL należą szereg węglowodorów

chlorowanych, np. rozpuszczalniki chlorowane (m. in. trichloroetylen TCE). Mają one tendencję do tonięcia w wodzie i tworzenia odrębnej fazy w spodniej strefie warstwy wodonośnej. Właściwości te mają duży wpływ na zachowanie się zanieczyszczeń w środowisku gruntowo-wodnym i ich migrację (Rys. 2).

Inne procesy zachodzące w gruncie, w odniesieniu do zanieczyszczeń, to sorpcja i dyspersja. Sorpcja powoduje gromadzenie się zanieczyszczeń na powierzchni cząstek mineralnych tworzących strukturę gruntu. Dyspersja natomiast odpowiedzialna jest za rozpraszanie się zanieczyszczeń w gruncie w wyniku m. in. ich zróżnicowanych dróg przepływu poprzez pory gruntu.

W warunkach rzeczywistych można spotkać się z szeregiem czynników utrudniających bioremediację. Istniejące zanieczyszczenie może być „zamaskowane” przed mikroorganizmami. Na „maskowanie” wpływa m.in. tworzenie odrębnej fazy przez skażenie, słaba rozpuszczalność w wodzie, silna sorpcja na powierzchni cząstek gruntu, uwięzienie zanieczyszczeń w porach na tyle małych, że woda w ograniczonym stopniu może przez nie się przemieszczać. Wówczas stężenie zanieczyszczeń jest zbyt niskie, aby bakterie mogły efektywnie je rozkładać. Z drugiej strony zbyt wysokie stężenia mogą być toksyczne



Rys. 2. Migracja zanieczyszczeń w gruncie: a) tworzących roztwory wodne, b) tworzących odrębną fazę (NAPL)

dla samych mikroorganizmów, pomimo potencjalnej zdolności ich degradowania.

Rzeczywiste skażenia są na ogół mieszaniną różnych związków chemicznych. W przypadkach takich mikroorganizmy mogą wybierać te związki, które są najłatwiej rozkładane i przynoszą im największą korzyść energetyczną. Ma to szczególne znaczenie, gdy skażenie, które ma być zredukowane, nie jest „najatrakcyjniejszym” składnikiem odżywczym dla mikroorganizmów uczestniczących w bioremediacji. W innych przypadkach mieszaniny mogą wspomagać rozkład związków o mniejszych stężeniach, które w sytuacji samodzielnego występowania nie zostałyby zredukowane.

Niekiedy rozkład zanieczyszczeń następuje stopniowo, a w poszczególnych etapach powstają formy przejściowe. Czasem jednak formy przejściowe bywają bardziej toksyczne niż związki wyjściowe. Trzeba również pamiętać, iż poszczególne etapy mogą wymagać też innego czasu rozkładu. Często etapy początkowe przebiegają dość szybko, a późniejsze wymagają coraz więcej czasu.

Istnieją przypadki, gdy redukcja zanieczyszczeń do poziomu wymaganego przez odpowiednie normy nie jest osiągalna, ponieważ są to na tyle małe stężenia, że procesy mikrobiologiczne ustają wcześniej zanim zostaje osiągnięta wymagana wartość.

Bioremediacja w praktyce

Przy skażeniach gruntu, aby wykorzystać bioremediację, należy uwzględnić uwarunkowania geologiczne (rodzaj i właściwości gruntów, układ warstw), hydrogeologiczne (warstwy wodonośne, wzajemne ich relacje, kierunki spływu wód podziemnych, chemizm wód), wielkość i rodzaj skażenia oraz mikroorganizmy istniejące w gruncie. Inne ważne czynniki to: miejsce skażenia, otoczenie i sposób zagospodarowania terenu, występowanie ujęć wód, osiedli mieszkalnych, itp. Pamiętać również należy o zagadnieniach przedstawionych powyżej. Wyróżnia się trzy główne rodzaje bioremediacji. Są to: biostymulacja, bioaugmentacja i bioremediacja wewnętrzna.

Biostymulacja polega na dodaniu odpowiednich składników do środowiska, aby umożliwić wzrost istniejących już mikroorganizmów, które wykazują zdolności rozkładu zanieczyszczeń. Wykorzystuje się fakt, że komórki mikroorganizmów mają w przybliżeniu stały skład podstawowych pierwiastków. Typowa komórka bakterii zawiera 50% węgla, 14% azotu, 3% fosforu, 2% potasu, 1% siarki, po 0,5% wapnia, magnezu i chloru oraz 0,2% żelaza. Skażenia organiczne zaś dostarczają do środowiska głównie węgiel. Tak więc aby zmniejszyć konkurencję w zdobywaniu nutrientów

w stosunku do dostępnej puli węgla, do środowiska dostarcza się pozostałe brakujące składniki w postaci roztworu wodnego lub w formie gazowej. W ten sposób stymuluje się rozwój mikroorganizmów rozkładających istniejące zanieczyszczenie.

Bioaugmentacja opiera się na wyselekcjonowanych mikroorganizmach zdolnych do rozkładu stwierdzonego skażenia. W metodzie tej odpowiednie mikroorganizmy są wprowadzane do środowiska w postaci wodnego biopreparatu.

Bioremediacja wewnętrzna to nic innego jak tyłko naturalny rozkład istniejących zanieczyszczeń. W tym przypadku nie dostarcza się dodatkowych składników odżywczych lub mineralnych ani innych zespółów mikroorganizmów. Dotyczy ona głównie rejonów skażonych paliwami, gdyż paliwa stosunkowo łatwo ulegają biodegradacji. Metodę tę można stosować jedynie w sytuacjach, w których m.in. zanieczyszczenie nie zagraża wykorzystywanym ujęciom wód podziemnych, innym ważnym zasobom środowiska oraz gdy nie ma wpływu na tereny zamieszkałe. W przeciwnym przypadku stosuje się biostymulację, bioaugmentację lub inne metody rekultywacyjne (np. napowietrzanie), które przyspieszają proces oczyszczania.

Niezależnie od rodzaju bioremediacji, może być ona prowadzona na dwa sposoby: *In situ* oraz *ex situ*. Sposób *in situ* polega na prowadzeniu bioremediacji w miejscu skażenia, a *ex situ* poza nim. Sposób *ex situ* wymaga wybrania zanieczyszczonego gruntu i złożeniu go na uprzednio przygotowanym miejscu, na tzw. płycie remedycyjnej, gdzie przeprowadza się już właściwą bioremediację. Płyta remedycyjna jest odpowiednio przygotowaną powierzchnią, odizolowaną od podłoża w taki sposób, aby uniemożliwić przedostanie się wszelkich zanieczyszczeń do gruntu.

Biostymulacja i bioremediacja wewnętrzna wykorzystują mikroorganizmy naturalnie żyjące na terenie skażonym. W przypadku bioaugmentacji do środowiska wprowadza się biopreparat zawiera-

jący odpowiednie mikroorganizmy rozkładające związki zanieczyszczające występujące na skażonym terenie. Mikroorganizmy są przygotowane wcześniej w laboratorium, gdzie produkuje się tzw. szczepionkę. Szczepionka ma postać roztworu wodnego, którą dostarcza się na miejsce prowadzonych prac. Pojemność szczepionki wynosi około 1 do 2 litrów. Za jej pomocą, poprzez namnożenie mikroorganizmów, w bioreaktorze wytwarza się biopreparat. Bioreaktor jest zbiornikiem wyposażonym w elementy grzejne, urządzenia do napowietrzania wody, regulatory temperatury, pompy cyrkulacyjne itp. Umożliwia on wyprodukowanie odpowiedniej ilości biopreparatu (wielkości rzędu kilku – kilkunastu metrów sześciennych). Do bioreaktora dodaje się również substancje odżywcze, które często mają postać nawozu opartego na azocie, fosforze i potasie w odpowiednich proporcjach. Otrzymany biopreparat aplikuje się do skażonego gruntu poprzez jego zraszanie (przypomina to podlewanie ogródka) lub przez otwory, którymi dostarcza się preparat na odpowiednią głębokość. Aplikacje preparatu wykonuje się wielorazowo w odpowiednich odstępach czasu, tak aby w gruncie i wodzie podziemnej zdążyły zajść odpowiednie reakcje.

W każdym z przedstawionych przypadków bardzo ważną rolę pełni monitoring procesu bioremediacji. Polega on na okresowym pobieraniu próbek gruntu i wody do analiz chemicznych i mikrobiologicznych. Wyniki z tych badań pozwalają określić, jak przebiega proces oczyszczania, a w efekcie końcowym stwierdzić czy zanieczyszczenie zostało ostatecznie zlikwidowane.

Czas potrzebny do redukcji skażeń w środowisku gruntowo-wodnym dożądanego poziomu zależy od kilku czynników, m.in.: rodzaju i ilości zanieczyszczeń, rozmiaru skażonego terenu, głębokości na której znajduje się skażenie, rodzaju i właściwości skażonych gruntów. Czas prowadzenia bioremediacji może więc wahać się od kilku miesięcy do kilku lat.

Przykłady

Bioremediacja od ponad 30 lat jest z powodzeniem stosowana w praktyce. Jednym z pierwszych miejsc, gdzie zaobserwowano proces bioremediacji, był rejon skażony ropą naftową pochodzącą z wycieku z nieszczelnego ropociągu w Bemidji (Minnesota, USA), który nastąpił w 1979 roku. Nie prowadzono tam żadnych prac bioremediacyjnych, jedynie zarejestrowano zmiany zachodzące w skażonej strefie. Na podstawie wyników badań stwierdzono wpływ mikroorganizmów na zmniejszenie skażenia środowiska gruntowo-wodnego. Przykład ten stał się pierwszym miejscem o dobrze udokumentowanej bioremediacji wewnętrznej.

Głośnym echem odbiła się na świecie, w marcu 1989 roku, wiadomość o wycieku ropy naftowej z tankowca Exxon Valdez w Zatoce Alaska. Do środowiska przedostało się około 38 tys. ton ropy naftowej, zanieczyszczając 750 km południowego wybrzeża Alaski. Aby zlikwidować lub zmniejszyć skutki awarii zastosowano wiele metod oczyszczenia środowiska, w tym biostymulację. Polegała ona na dostarczeniu odpowiednich nawozów, które wspomagały rozwój mikroorganizmów rozkładających węglowodory. Metoda okazała się skuteczna na plażach, gdzie warstwa ropy naftowej nie była zbyt gruba.

Jednym z miejsc, gdzie zastosowano bioremediację w Polsce, była rafineria w Czechowicach-Dziedzicach. W 1996 roku, w miejscu dołu na kwaśne smoły pogazowe, utworzono płytę bioremediacyjną, w której dnie umieszczono system drenów przykrytych warstwą dolomitu. Na płycie złożono smoły zmieszane ze ścinkami drzewnymi, które następnie przykryto war-

stwą czystego gruntu z posianą trawą. Ponadto zainstalowano system napowietrzania. Zastosowano proces biostymulacji i bioaugmentacji. W efekcie w ciągu dwóch lat zawartość węglowodorów ropopochodnych spadła o 81%.

Istnieje wiele innych miejsc, gdzie z sukcesem zastosowano bioremediację, np.: na stacjach benzynowych, gdzie do gruntu dostało się paliwo, po jego usunięciu, aplikowano preparaty bakteryjne. Na jednej ze stacji benzynowych w Poznaniu w ciągu roku osiągnięto 20-krotne zmniejszenie stężeń węglowodorów w skażonym rejonie.

Wciąż jest wiele miejsc skażonych związkami organicznymi, nierzadko bardzo toksycznymi i to tam, gdzie ich wydobycie nastręcza wiele trudności lub wymaga poniesienia ogromnych kosztów finansowych. Stąd też rozwój bioremediacji staje się jednym z bardziej obiecujących sposobów na rozwiązanie tego typu problemów.

mgr **SEBASTIAN BARANOWSKI**

PIŚMIENNICTWO

- Committee on Intrinsic Remediation, Water Science and Technology Board, Board on Radioactive Waste Management, Commission on Geosciences, Environment, and Resources. 2000. Natural attenuation for groundwater remediation, *National Academy Press*, Washington, D. C.
- Committee on In Situ Bioremediation, Water Science and Technology Board, Commission on Engineering and Technical Systems, National Research Council. 1993. In situ Bioremediation: When does it work? *National Academy Press*, Washington, D. C.
- BioBasics – Biportal. Bioremediation. <http://biobasics.gc.ca/>
- US Geological Survey. Bioremediation: Nature's way to a cleaner environment. <http://water.usgs.gov/wid/html/bioremed.html>
- Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council. <http://www.evostc.state.ak.us>