

Janusz Rosada*, Marta Przewocka**

REMEDIACJA I REKULTYWACJA GRUNTÓW ROLNYCH OBJĘTYCH ODDZIAŁYWANIEM PRZEMYSŁU HUTNICZEGO

Streszczenie

Zakłady przemysłowe chcące sprostać aktualnym polskim i europejskim wymogom ochrony środowiska stanęły przed koniecznością prowadzenia na szeroką skalę działań proekologicznych, których celem jest ograniczenie do minimum ryzyka skażeń środowiska. Jednym z takich działań jest przeprowadzenie remediacji lub rekultywacji (oczyszczenia) gleb różnymi metodami w celu przywrócenia zdegradowanym gruntom ich wartości użytkowych.

Słowa kluczowe: przemysł hutniczy, gleba, metale ciężkie, remediacja, rekultywacja

WSTĘP

Gleba jest ważnym elementem lądowego środowiska przyrodniczego stanowiącym powierzchnią (1,5–2,0 m) część skorupy ziemskiej (górną warstwę litosfery), złożoną z części mineralnych, materii organicznej, wody, powietrza i organizmów żywych, obejmującą warstwę gleby i podglebia. Dostarcza ona niezbędne do życia pierwiastki chemiczne i przy współdziałaniu wody, powietrza oraz energii słonecznej zapewnia rozwój wielu gatunkom roślin żyjących w ekosystemach lądowych. Jest wyjściowym i podstawowym ogniwem w łańcuchu troficznym: gleba → roślina → zwierzę → człowiek [Górski 2006].

Oprócz pełnionej funkcji życiodajnej gleba jest także odbiorcą wszelkich zanieczyszczeń powstających podczas różnorodnej działalności gospodarczej człowieka. W obrębie tych zanieczyszczeń na szczególną uwagę zasługują metale

* Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy

** Instytut Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski, doktorantka

ciężkie, reprezentujące pierwiastki śladowe, posiadające zdolność do bioakumulacji.

Zanieczyszczenie gleb metalami ciężkimi stanowi potencjalne źródło zagrożenia dla roślin rosnących na tych glebach oraz dla wód podziemnych będących często źródłem wody pitnej. Metale ciężkie włączone do łańcucha troficznego ekosystemu, mogą zagrażać zdrowiu ludzi i zwierząt konsumujących skażone rośliny, a także pijących zanieczyszczoną wodę [Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012; Luo i wsp.2012].

W glebach obszarów zanieczyszczonych największą koncentrację metali ciężkich obserwuje się w poziomach próchnicznych, charakteryzujących się dużą zdolnością wiązania różnych substancji chemicznych [Kabata-Pendias i Pendias 1993; Motowicka-Terelak i Terelak 2002; Maciejewska 2003; Rosada 2008].

Ze względu na adsorpcję wielu metali w koloidach mineralnych i organicznych ich zaleganie w glebie może być niezwykle długotrwałe. Zależy to w dużym stopniu od rodzaju gleby, jej właściwości fizyczno-chemicznych, a także od formy chemicznej metalu [Qishlaqi i Moore 2007].

Do głównych czynników antropogenicznych powodujących wzrost zawartości metali ciężkich w środowisku rolniczym zaliczyć można emisje pyłowe hut metali nieżelaznych. Metale ciężkie pochodzące z emitowanych do atmosfery pyłów metalurgicznych mogą negatywnie oddziaływać na wszystkie elementy środowiska, ale skutki najdłużej trwające występują przede wszystkim w glebach, ze względu na adsorpcję wielu metali na koloidach mineralnych i organicznych. Rodzaj oraz formy chemiczne metali występujących w glebach objętych emisjami hut metali nieżelaznych zależą od procesu produkcyjnego stosowanego w danym zakładzie hutniczym [Garbisu i Alkorta 2003; Kicińska 2011].

ODDZIAŁYWANIE METALI CIĘŻKICH NA GLEBY I MECHANIZMY POBIERANIA ICH PRZEZ ROŚLINY

W wielu przypadkach oceny zagrożenia środowiska spowodowanego obecnością metali ciężkich w glebach dokonuje się w oparciu o oznaczenie ich całkowitej zawartości. Najbardziej niebezpieczne są jednak formy metali rozpuszczone w roztworze glebowym, łatwo pobierane przez rośliny i przemieszczające się w głąb profili glebowych [Kabata-Pendias i Pendias 1993; Ross 1994; Wolt 1994].

Przy ocenie stopnia zagrożenia spowodowanego zwiększoną zawartością metali ciężkich w glebie należy określić ich potencjalną rozpuszczalność w krótkim, jak i dłuższym okresie czasu, a także uwzględnić czynniki klimatyczne oraz aktualny rodzaj zagospodarowania terenu [Karczevska 2002].

Metale ze źródeł antropogenicznych, ze względu na formy chemiczne, w jakich są do środowiska wprowadzane, wykazują znacznie większą rozpuszczalność niż metale pochodzenia litogenicznego. Wprowadzone do gleby z pyłami metalurgicznymi ulegają stopniowej redystrybucji i przekształceniu w formy charakterystyczne dla właściwości danej gleby i rodzaju metalu. W glebach objętych emisjami hut metali nieżelaznych metale występują zazwyczaj w formie tlenkowej, siarczkowej, siarczanowej i węglanowej [Kabata-Pendias i Pendias 1993; Ross 1994].

W przypadku nadmiernych ilości metali ciężkich wprowadzonych do gleby może dojść do naruszenia naturalnej równowagi środowiska glebowego poprzez zmianę jego właściwości chemicznych, biologicznych i fizycznych, co znacznie zwiększa ryzyko przedostania się metali do łańcucha troficznego ekosystemu [Kabata-Pendias i Pendias 1993; Maciejewska 2003; Motowicka-Terelak i Terelak 2002].

Skażenie terenów rolniczych metalami ciężkimi w skrajnych przypadkach może prowadzić do nieodwracalnych zmian w glebie, ponieważ metale, w przeciwieństwie do substancji organicznych, nie ulegają rozkładowi mikrobiologicznemu. Pozostają one przez długi czas w glebie, a ich specjacja może się zmieniać w czasie wraz ze zmianą warunków glebowych [Alloway 1995].

Metale ciężkie charakteryzują się różną fito- i ekotoksycznością. Do najbardziej niebezpiecznych dla zdrowia ludzi i zwierząt zaliczyć należy kadm (Cd), Wysoki współczynnik bioakumulacji i biodostępności Cd, łatwość migracji z gleb do wód gruntowych i podziemnych sprawiają, że może on być bardzo łatwo włączony do łańcucha pokarmowego. Badania prowadzone przez Koncewicz – Baran i Gondka [2010] na terenach rolniczych zlokalizowanych w powiecie krakowskim, potwierdziły, że udział biodostępnych form Cd jest wysoki (41%). Ponadnormatywne zawartość Cd w glebach wokół huty w Oławie (11,40 mg/kg -1) zostały przedstawione w badaniach Cuske i wsp.[2013]. Zagrożenie wynikające z obecności w glebie nadmiernych ilości ołowiu (Pb), rtęci (Hg) i chromu (Cr), pierwiastków bardzo słabo pobieranych przez rośliny, związane jest raczej z możliwością przedostania się ich do organizmu ludzi i zwierząt drogą pokarmową z cząstkami zanieczyszczonej gleby. Obecność w glebie zwiększonych zawartości miedzi (Cu), cynku (Zn) i arsenu (As) zagraża głównie roślinom oraz mikroflorze glebowej [Kabata-Pendias i Pendias 1993]. Toksyczne działanie miedzi na siewki kukurydzy i pszenicy zostało potwierdzone w badaniach Świędrzyńskiej i Sawickej [2010].

Szczególnie niebezpieczne z punktu widzenia ekologicznego są zwiększone koncentracje metali ciężkich w warstwie ornej gleb przeznaczonych do produkcji rolniczej ze względu na możliwość przedostania się metali przez system korzeniowy do jadalnych organów uprawianych roślin, co stanowi nie tylko poważne zagrożenie dla zdrowia ludzi i zwierząt, ale także przyczynia się do obniżenia jakości produkowanego pożywienia [Rosada 2008].

Sam mechanizm pobierania metali przez korzenie roślin jest złożony i stanowi wypadkową kilku procesów, takich jak wymiana kationowa poprzez błony komórkowe, transport wewnątrzkomórkowy, a także procesy zachodzące w ryzosferze [Inal i wsp. 2007; Ociepa-Kubicka i Ociepa 2012].

Dostępność metali występujących w glebie w formach rozpuszczalnych i wymiennych zależy w dużym stopniu od nasilenia zachodzących w glebie procesów adsorpcji i desorpcji. Z właściwościami sorpcyjnymi gleb ściśle związane są ich zdolności buforowe, tj. zdolność przeciwdziałania zmianom odczynu glebowego oraz odporność na różne zanieczyszczenia chemiczne [Siebielec i wsp. 2008; Kwiatkowska-Malina i Maciejewska 2011]. Najważniejszymi czynnikami wpływającymi na przyswajalność metali ciężkich przez rośliny są:

- całkowita zawartość „potencjalnie” przyswajalnych metali w glebie;
- stężenie metali w roztworze glebowym i ich wzajemne proporcje ilościowe;
- przepływ metali ze stałej fazy glebowej do fazy ciekłej (roztworu glebowego), a następnie do korzeni.

Obfitym źródłem metali ciężkich dla roślin uprawianych w sąsiedztwie zakładów hutniczych jest także atmosfera, a konkretnie opady emitowanych pyłów, które spadają bezpośrednio na powierzchnię nadziemnych organów roślin. Zawartość pyłów w całkowitej emisji głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce w badaniach prowadzonych przez GUS [2016] określono na poziomie 383 tysięcy ton. Szacuje się, że na terenach o zwiększonej emisji pyłów przemysłowych przeciętnie 70–90% zawartości metali w roślinach pochodzi ze źródeł atmosferycznych [Rosada i wsp. 1995; Siebielec 2008].

Oprócz pyłowych emisji metalononnych z procesów hutniczych równie niekorzystny wpływ na środowisko wywierają emisje gazowe (dwutlenek siarki, tlenki azotu i węgla). Według badań prowadzonych przez GUS [2016] całkowita emisja głównych zanieczyszczeń powietrza w Polsce, prowadzona w 2012 roku, wykazała, że poziom dwutlenku siarki wynosił 853,3 tys. ton, tlenku azotu 817,3 tys. ton i tlenku węgla 2818,4 tys. ton. Największe stężenia stwierdzono w województwie Śląskim, Łódzkim i Mazowieckim [GUS 2016].

Emisja związków siarki do atmosfery jest jednym z głównych problemów dla terenów rolniczych znajdujących się w zasięgu oddziaływania zakładów hutniczych. Wszystkie emitowane związki siarki ulegają przemianom troposferycznym do trójtlenków siarki (SO₃), które reagując z parą wodną lub wodą tworzą kwas siarkowy. Związek ten w postaci kwaśnego lub suchego opadu wpływa szkodliwie na rośliny oraz przyspiesza degradację gleb przez silne ich zakwaszenie [Grzesiak i wsp. 2004; Grzesiak i Schroeder 2004; Rosada 2008].

Ekologiczne skutki zakwaszania gleb wiążą się z niekorzystnymi zmianami w chemicznym składzie i biologii gleb, spadkiem i pogorszeniem jakości plonów, skażeniem wód glebowo-gruntowych składnikami wymywanymi z gleb, wzro-

stem mobilności większości metali ciężkich, a także uruchomieniem innych pierwiastków toksycznych [Kabata-Pendias i Pendias 1993; Rosada 2008]. Udział gleb o odczynie kwaśnym jest dużym problemem terenów, na których prowadzona jest działalność hutnicza i wydobywcza. W badaniach prowadzonych przez Baran i Wieczorek [2012] potwierdzono przeważającą liczbę gleb o odczynie kwaśnym (kwaśny 46%, lekko kwaśny 23%, bardzo kwaśny 19%) w rejonie bezpośredniego oddziaływania cynkowni.

OBOWIĄZKI ZAKŁADÓW PRZEMYSŁOWYCH WYNIKAJĄCE Z PRZEPISÓW DOTYCZĄCYCH OCHRONY ŚRODOWISKA

W przypadku gleb użytkowych niezbędna jest dokładna ocena stopnia ich zanieczyszczenia w celu określenia ich przydatności dla rolnictwa, (rośliny przeznaczone do celów konsumpcyjnych i paszowych), a przy wyższym stopniu zanieczyszczenia do uprawy roślin energetycznych lub przemysłowych.

Postępowanie z terenami zanieczyszczonymi reguluje w Polsce ustawa Prawo Ochrony Środowiska z 2001 r. [Dz.U. Nr 62, poz. 627 z dnia 20 czerwca 2001 r.], z późniejszymi licznymi nowelizacjami.

Usunięcie metali ciężkich z gleby jest problemem bardzo złożonym, ponieważ są one specyficznym, trwałym zanieczyszczeniem potrafiącym zalegać w glebie niezwykle długo. Procesy samooczyszczania zachodzą w glebach bardzo wolno [Alloway 1995; Bradshaw 2000].

Podstawowym warunkiem ochrony ekologicznej gleb powinno być przede wszystkim niedopuszczenie do ich skażenia. Ograniczenie emisji przemysłowych oraz racjonalna chemizacja rolnictwa stwarza dużą szansę ochrony gleb przed niepotrzebnymi skażeniami metalami ciężkimi [Kabata-Pendias i Pendias 1993; Rosada 2008].

Wytyczne Unii Europejskiej w zakresie ochrony środowiska przyrodniczego mające na celu ograniczenie zagrożeń związanych z działalnością przemysłową określone zostały w odpowiednich Dyrektywach Rady Unii.

Dyrektywy te uzupełnione zostały polskim aktem prawnym Prawo Ochrony Środowiska [Dz.U. Nr 62, poz. 627 z dnia 20.06.2001], z późniejszymi nowelizacjami oraz Ustawą o Odpadach [Dz.U. Nr 62, poz. 628, z dnia 20.06.2001], z późniejszymi nowelizacjami.

Działanie zgodnie z Dyrektywami Rady Unii Europejskiej oraz ustawą Prawo Ochrony Środowiska, a także ustawą o Odpadach oznacza pełne rozpoznanie oddziaływań przemysłu na środowisko oraz kontrolę nad procesami produkcyjnymi w celu systematycznej redukcji emisji zanieczyszczeń przy zastosowaniu najnowszych osiągnięć technologicznych zgodnie z wytycznymi dla tzw. Najnowszych Dostępnych Technik (BAT – Best Available Techniques).

Realizacja Dyrektyw Rady Unii oraz krajowych przepisów dotyczących ochrony środowiska nakłada na znaczną część przedsiębiorstw obowiązek posiadania pozwoleń zintegrowanych na prowadzenie działalności, której warunki muszą być ustalone zgodnie ze standardami BAT.

Zawarte w powyżej przytoczonych przepisach wytyczne określają obowiązki zakładów przemysłowych w zakresie identyfikacji źródeł zagrożeń, a także w zakresie negatywnych skutków ich oddziaływania na środowisko.

Wymogi określone w Dyrektywach Rady Unii Europejskiej, ustawie Prawo Ochrony Środowiska oraz ustawie o Zagospodarowaniu Odpadów mają na celu osiągnięcie wysokiego poziomu ochrony środowiska w wyniku zastosowania szerokiej gamy działań, w tym także środków zapobiegających powstawaniu zanieczyszczeń lub zmniejszenia emisji tych zanieczyszczeń z zakładów przemysłowych do powietrza, wody i gleby, także z uwzględnieniem działań mających na celu ograniczenie ilości wytwarzanych odpadów.

RÓŻNE SPOSOBY REMEDIACJI I REKULTYWACJI ZANIECZYSZCZONYCH GLEB

W przypadku zaistniałego zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi należy zastosować odpowiednie ich wykorzystanie rolnicze, natomiast w stosunku do gruntów o bardzo silnym zanieczyszczeniu dokonać zmiany formy ich użytkowania. Można także przeprowadzić remediację lub rekultywację (oczyszczenie) gleb różnymi metodami w celu przywrócenia zdegradowanym gruntom ich wartości użytkowych [Maciejewska 2003; Rosada 2008].

Większość gleb Polski zawiera ilości metali mieszczące się w granicach dopuszczalnych stężeń. Średnie wartości stężenia metali ciężkich w polskich glebach są porównywalne z glebami innych krajów europejskich i świata [Maciejewska 2003]. Są jednak w Polsce obszary objęte wpływem procesów industrializacyjnych i urbanizacyjnych, gdzie zawartość metali ciężkich w glebach osiąga bardzo wysokie koncentracje, co powoduje konieczność ich remediacji, a czasami także rekultywacji. Dotyczy to głównie obszarów: górnośląskiego, legnicko-głogowskiego, tarnobrzeskiego, puławskiego, bełchatowskiego i kieleckiego [Motowicka-Terelak i Terelak 1995].

Przez pojęcie remediacji rozumie się poddanie gleby, ziemi i wód gruntowych działaniom mającym na celu usunięcie lub zmniejszenie ilości substancji powodujących ryzyko, ich kontrolowanie oraz ograniczenie rozprzestrzeniania się, tak aby teren zanieczyszczony przestał stwarzać zagrożenie dla zdrowia ludzi lub stanu środowiska, z uwzględnieniem obecnego i, o ile jest to możliwe, planowanego w przyszłości sposobu użytkowania terenu. Remediacja może polegać także na samooczyszczaniu, jeżeli przynosi największe korzyści dla środowiska [art. 3

pkt 31b Prawa Ochrony Środowiska – przepis dodany przez regulację noweli z dnia 11 lipca 2014 r., Dz. U., poz. 1101].

Do użytku wprowadzone zostało narzędzie – co wyraźnie podkreśla się w uzasadnieniu do projektu lipcowej noweli Prawa Ochrony Środowiska – o mniej restrykcyjnym charakterze niż obowiązek przeprowadzenia rekultywacji. Nadto w cytowanym uzasadnieniu przewiduje się, że znaczną część terenów w Polsce zanieczyszczonych przed dniem 30 kwietnia 2007 r., kwalifikowanych w oparciu o obowiązujące standardy jakości gleby i ziemi jako wymagające rekultywacji, będzie można wyłączyć z obowiązku rekultywacji, rozumianej jako usuwanie zanieczyszczeń za wszelką cenę.

Analizując treść znowelizowanych przepisów Prawa Ochrony Środowiska, stwierdzić trzeba, iż podmiotem zobligowanym do przeprowadzenia remediacji jest władający powierzchnią ziemi, na której występuje historyczne zanieczyszczenie powierzchni ziemi.

Dopuszcza się następujące sposoby przeprowadzenia remediacji:

- usunięcie zanieczyszczenia, przynajmniej do dopuszczalnej zawartości w glebie i w ziemi substancji powodujących ryzyko;
- działania prowadzące do usunięcia znaczącego zagrożenia dla zdrowia ludzi i stanu środowiska, z uwzględnieniem obecnego i, o ile jest to możliwe, planowanego sposobu użytkowania terenu, takie jak: (a) zmniejszenie ilości zanieczyszczeń lub (b) ograniczenie możliwości rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń i kontrolowanie zanieczyszczenia poprzez okresowe prowadzenie badań zanieczyszczenia gleby i ziemi w określonym czasie, lub (c) przeprowadzenie samooczyszczania powierzchni ziemi, ewentualne działania wspomagające samooczyszczanie, kontrolowanie zanieczyszczenia poprzez okresowe prowadzenie badań zanieczyszczenia gleby i ziemi w określonym czasie, ewentualne ograniczenie dostępu ludzi do zanieczyszczonego terenu i ewentualna konieczność zmiany sposobu użytkowania zanieczyszczonego terenu.

Uwaga: przy planowaniu lub określaniu sposobu przeprowadzenia remediacji w pierwszej kolejności należy rozważyć usunięcie zanieczyszczenia, o którym mowa w pkt 1. Odstąpienie od usunięcia zanieczyszczenia i przeprowadzenie remediacji w sposób, o którym mowa w pkt 2, dopuszcza się, jeżeli:

- nie są znane technologie lub sposoby pozwalające na usunięcie zanieczyszczenia lub
- negatywne dla środowiska skutki działań prowadzonych w celu usunięcia zanieczyszczenia byłyby niewspółmiernie wysokie do korzyści osiągniętych w środowisku, lub

- koszty oczyszczania doprowadzające do usunięcia zanieczyszczenia byłyby nieproporcjonalnie wysokie w stosunku do korzyści osiągniętych w środowisku i zasadne jest przeprowadzenie remediacji w sposób, o którym mowa w pkt 2, lub
- obowiązany do przeprowadzenia remediacji wykaże, że zanieczyszczenie nastąpiło przed dniem 1 września 1980 r.

Do dnia 30 kwietnia 2007 roku w Prawie Ochrony Środowiska w przypadku gruntów silnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi istniał obowiązek rekultywacji gleb. W świetle obowiązującej wówczas ustawy (Art. 101 i 103) rekultywacja powinna prowadzić do zmniejszenia całkowitej zawartości zanieczyszczeń w glebie do stanu określonego wyznaczonymi standardami jakości. W przypadku gleb skażonych metalami ciężkimi nie zawsze jest to możliwe do zrealizowania, gdyż nadmiar metali powinien być w takim przypadku za pomocą różnorodnych metod usunięty z gleby bądź też wierzchnią warstwę skażonej gleby należałoby usunąć lub wymieszać z glebą niezanieczyszczoną. W praktyce jest to niezwykle trudne, a nawet wręcz niemożliwe do wykonania, zwłaszcza na dużych obszarach.

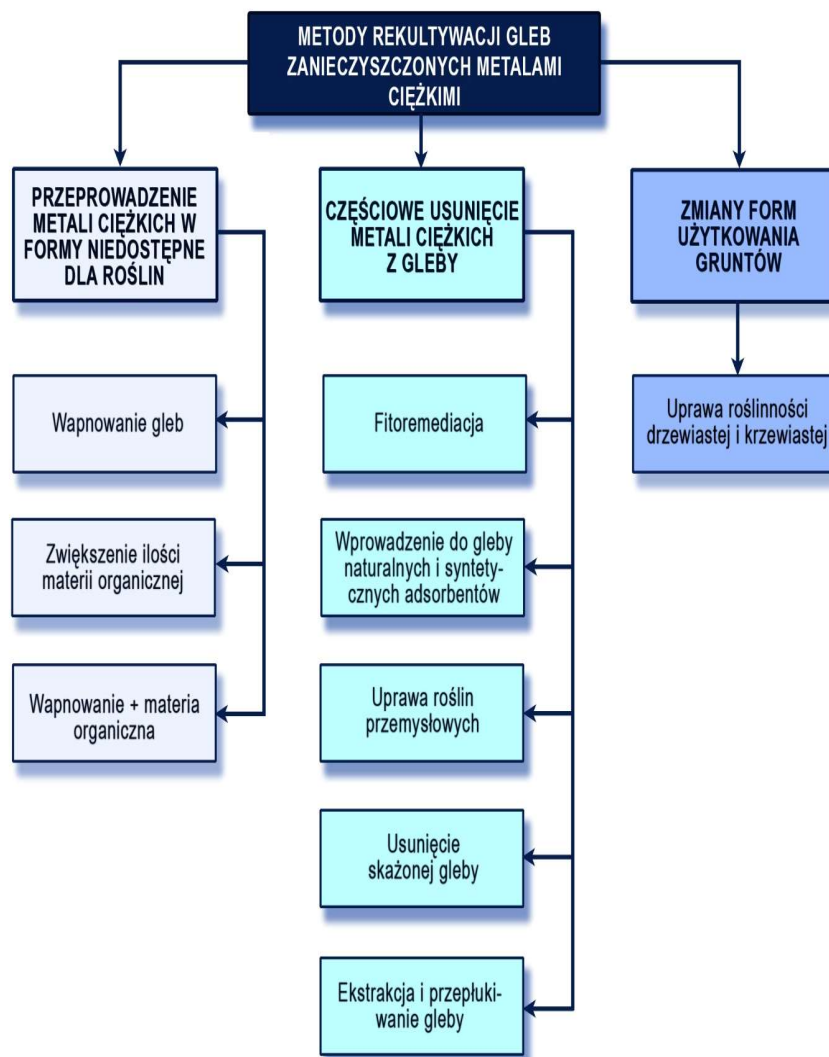
Wykaz podstawowych metod rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi z podziałem na trzy grupy przedstawiono na rysunku 1.

Pierwsza grupa obejmuje metody rekultywacji prowadzące do tworzenia z metalami ciężkimi stosunkowo trwałych kompleksów chelatowych i innych połączeń, w konsekwencji których pierwiastki te przeprowadzane są w formy trudno dostępne dla roślin. Imobilizacja metali w glebie poprzez utworzenie kompleksów utrudnia ich przedostanie się do łańcucha troficznego ekosystemu, ograniczając tym samym negatywne skutki zdrowotne i ekologiczne [Karczewska 2002; Maciejewska 2003].

O sile wiązania metali ciężkich w kompleksie sorpcyjnym gleby decyduje jej skład granulometryczny, zawartość substancji organicznej i pH. W miarę wzrostu w glebie zawartości cząstek spławianych (głównie iłu koloidalnego) oraz materii organicznej (zwłaszcza próchnicy), a także pH mobilność metali maleje. Wynika z tego, że czynnikami decydującymi o dostępności metali ciężkich dla roślin jest pojemność sorpcyjna gleby determinowana ilością i jakością koloidów tworzących glebowy kompleks sorpcyjny oraz odpowiednie pH gleby [Karczewska 2002; Rosada 2008].

Wprowadzanie do gleby nawozów organicznych oraz systematyczne jej wapnowanie radykalnie polepsza jej właściwości sorpcyjne. Ochronna rola próchnicy glebowej wynika ze specyfiki związków humusowych stanowiących główny jej składnik. Związki te charakteryzują się dużą pojemnością sorpcyjną. [Curyło i Jasiewicz 1998; Maciejewska 2003].

Druga grupa obejmuje metody rekultywacji (biologiczne, chemiczne, elektrochemiczne) prowadzące do częściowego usunięcia metali ciężkich z gleby. Metody te, z wyjątkiem biologicznych, są jednak bardzo kosztowne i nie zapewniają całkowitego oczyszczenia gleby. Ponadto ich stosowanie powoduje degradację biologicznej aktywności gleby i dlatego nie poleca się ich w praktyce rolniczej [Kabata-Pendias i Pendias 1993].



Rys. 1. Metody rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi [wg Maciejewska 2003]
 Fig. 1. Methods for remediation of soils contaminated with heavy metals [according to Maciejewska 2003]

Duże nadzieje wiąże się ostatnio z możliwością oczyszczania gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi przy wykorzystaniu roślin o zwiększonych możliwościach pobierania tych pierwiastków z gleby. Ogólnie sposób taki nazywany jest fitoremediacją i polega na użyciu zielonych roślin do usunięcia zanieczyszczeń ze środowiska albo unieszkodliwienia tych zanieczyszczeń [Abratowska 2006].

Fitoremediacja jest stosunkowo niedrogą, tzw. zieloną metodą, która w ostatnich latach stała się obiektem intensywnych badań. Obejmuje ona trzy sposoby oczyszczania gleb [Maciejewska 2003]:

- fitoekstrakcja (rośliny pobierają metale ciężkie z gleby, a następnie transportują je do organów nadziemnych);
- ryzofiltracja (korzenie roślin absorbują, wytrącają i koncentrują metale ciężkie z zanieczyszczonych środowisk);
- fitostabilizacja (rośliny zmniejszają ruchliwość metali ciężkich w glebie).

Z dobrym skutkiem można usuwać metale ciężkie z gleby także przez umieszczenie w jej warstwie ornej naturalnych lub syntetycznych adsorbentów, takich jak bentonity, zeolity. Wprowadzenie do środowiska rozproszonych materiałów sorpcyjnych pozwala na wiązanie i unieruchomienie różnych substancji toksycznych (w tym także metali), ale ich trwałe usunięcie z ośrodka nie jest możliwe. Ze względu na wysokie koszty tych metod można je stosować tylko na niewielką skalę [Kabata-Pendias i Pendias 1993].

Gleby silnie zanieczyszczone metalami ciężkimi powinny być wyłączone z produkcji roślin rolniczych i przeznaczone pod uprawę roślin przemysłowych (np. len, konopie, wiklina) i energetycznych (np. wierzba krzewiasta, śluzowiec pensylwański, miskantus), a także ziemniaków dla przemysłu spirytusowego (na spirytus jako dodatek do paliwa) oraz rzepaku na olej techniczny [Kabata-Pendias i Pendias 1993].

Innym sposobem technicznej rekultywacji gleby skażonej metalami ciężkimi jest całkowite usunięcie jej wierzchniej (próchniczo-ornej) warstwy lub wymieszanie tej warstwy z glebą niezanieczyszczoną. Metoda ta jest niezwykle kosztowna i praktykowana tylko do likwidowania skażeń punktowych. W przypadku konieczności rekultywacji dużych obszarów gruntów rolnych skażonych metalami ciężkimi zabieg taki jest praktycznie niemożliwy do wykonania.

Badania nad skutecznością oczyszczania gleb w procesie przemywania oraz oczyszczania metodą ekstrakcji (in situ i ex situ) wykazały, że procesy te są efektywne do usuwania zanieczyszczeń nieorganicznych przede wszystkim z gleb lekkich i piaszczystych. W przypadku dużego udziału cząstek ilastych i gliny stosowanie przemywania gleby czy procesu ekstrakcji nie daje oczekiwanych rezultatów. Są to metody kosztowne, skomplikowane i wymagające dalszych badań ze względu na istnienie szeregu innych czynników ograniczających ich stosowanie [Maciejewska 2003].

Trzecia grupa metod rekultywacji gleb opiera się na zmianie użytkowania gruntów poprzez obsadzenie ich roślinnością drzewiastą i krzewiastą. Metoda ta stosowana jest najczęściej w obrębie stref ochronnych zakładów przemysłowych na gruntach silnie zanieczyszczonych metalami ciężkimi, których nie można wykorzystać do uprawy roślin rolniczych. Bardzo często obszary stref ochronnych obsadzane są szybko rosnącymi drzewami, np. drzewami topoli.

PODSUMOWANIE

Zakłady przemysłowe chcące sprostać aktualnym polskim (Prawo Ochrony Środowiska, Ustawa o Zagospodarowaniu Odpadów) i europejskim (Dyrektywa Rady Unii Europejskiej) przepisom ochrony środowiska stanęły przed koniecznością prowadzenia na szeroką skalę działań proekologicznych, których celem jest ograniczenie do minimum ryzyka skażeń środowiska. Tylko takie zakłady mają szansę istnienia na rynku europejskim.

Pomimo zalet i wad przedstawionych metod rekultywacji i remediacji przy wyborze właściwej metody przywracania zanieczyszczonego terenu do bezpiecznej użyteczności należy dokonać wnikliwej analizy poziomu skażenia badanych gleb, warunków lokalnych, a także planowanego sposobu zagospodarowania terenu. Należy także wziąć pod uwagę aspekty ekonomiczne, ponieważ niektóre z metod, takie jak fizyczne, termiczne i chemiczne zaliczane są do bardzo kosztownych. Czas ich realizacji wynosi od 6 do 12 miesięcy. Metody te powodują także powstawanie różnych ubocznych odpadów, które należy w odpowiedni sposób zagospodarować. Fitoekstrakcja jest metodą wymagającą bardzo długiego okresu czasu, a ponadto przy jej realizacji duży problem stwarza sposób utylizacji zanieczyszczonej biomasy roślinnej.

Spośród opisanych wyżej metod rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi na szczególną uwagę zasługują działania zmierzające do unieruchomienia metali w kompleksie sorpcyjnym gleb, w celu uniemożliwienia przedostania się ich do łańcucha pokarmowego ludzi i zwierząt. Racjonalne wapnowanie i działanie substancji organicznej jako regulatora dostępności metali ciężkich dla roślin sprzyja ograniczeniu pobierania tych pierwiastków przez większość gatunków roślin. Tak więc różnorodne zabiegi agrotechniczne zmierzające do poprawienia właściwości fizycznych i chemicznych gleb, w celu ograniczenia pobierania metali ciężkich przez rośliny, wydają się być najwłaściwszym sposobem ich rekultywacji. Zaletą tych metod jest możliwość stosowania ich na dużych obszarach gruntów rolnych, a także to, że są one stosunkowo niedrogie i łatwe technicznie do wykonania. Dzięki temu metody te znalazły największe zastosowanie w praktyce rolniczej [Rosada 2008].

Systematyczne badania mające na celu poznanie stopnia zanieczyszczenia środowiska ksenobiotykami pochodzącymi z emisji przemysłowych, współpraca

zakładów emitujących zanieczyszczenia, służb rolnych oraz producentów rolnych wykonujących zalecenia agrotechniczne to jedyna słuszna i ekonomicznie uzasadniona droga przywracania dla rolnictwa terenów zdegradowanych chemicznie.

LITERATURA

1. ABRATOWSKA A.; 2006. *Armeria Martima* – gatunek roślin przystosowany do wzrostu na glebach skażonych metalami ciężkimi. *Kosmos* 55, 2–2(271–272), s.217– 227.
2. ALLOWAY B.J.; 1995. *Heavy metals in soils*. Blackie Academic, London.
3. BRADSHAW A. ;2000. The use of natural processes in reclamation - advantages and difficulties. *Landscape and Urban Planning* 51: 89-100.
4. BARAN A.; WIECZOREK.J.; 2012.Zawartość cynku w różnych elementach środowiska w strefie potencjalnego oddziaływania cynkowni. *Proceedings of ECOpole*, DOI: 10.2429/proc.6(1)025.
5. CURYŁO T, JASIEWICZ C.; 1998. Wpływ nawozów organiczno-mineralnych na akumulację metali ciężkich przez rośliny. *Zesz. Prób. Post. Nauk Roi.* 455: 57-72.
6. CUSKE M.; MARCINKIEWICZ M.; SZOPKA K.; KARCZEWSKA A.; PORA E; 2013. Oddziaływanie Huty Cynku Oława na środowisko glebowe terenów przyległych w świetle całkowitej zawartości metali ciężkich w poziomach powierzchniowych gleb miasta Oława.Uniwersytet Zielonogórski. *Zeszyty Naukowe* 149(29), *Inżynieria Środowiska*.
7. GARBISU C.,ALKORTA J. ; 2003. Basic concepts on heavy metal soil bioremediation. *European journal of mineral procession and Environmental Protection* 3, 58–66.
8. GŁÓWNY URZĄD STATYSTYCZNY.2016.Ochrona Środowiska; 2016. *Informacje i opracowania statystyczne*.Warszawa.ISSN 0867–3217.
9. GÓRSKI M. ; 2006. Prawna ochrona ziem i wód. s. 11–35. W: „Rekultywacja i rewitalizacja terenów zdegradowanych. Praca zbiorowa (S. Zabawa, red.), PZITS Poznań, 334 ss. ISBN 83–60055–12-2 i ISBN 83–89696–45–2 nr PZITS 846/2006.
- 10.GRZESIAK J., GRZESIAK P., ROSADA J. ; 2004. Charakterystyka zanieczyszczeń gazowych emitowanych do atmosfery w procesie produkcji kwasu siarkowego. s. 105–114. W: „Chemiczne aspekty badań środowiska” (G. Schroeder, red.). Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Poznań, Tom 2, 215 ss. ISBN 83–89936–02–X.
- 11.GRZESIAK P., SCHROEDER G. ; 2004. Możliwości ograniczenia emisji związków siarki z fabryk kwasu siarkowego w aspekcie ochrony środowiska.

- s. 115–141. W: "Chemiczne aspekty badań środowiska" (G. Schroeder, red.). Tom 2, UAM Poznań, 215 ss. ISBN 83–89936–02–X.
12. INAL A., GUNES A., ZHANG F., CAKMAKI. ; 2007. Peanut/maize intercropping induced changes in rhizosphere and nutrient concentrations in shoots. *Plant Physiology and Biochemistry*. 45, 350–356.
 13. KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H.; 1993. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. PWN, Warszawa, 364 ss.
 14. KARCZEWSKA A.; 2002. Metale ciężkie w glebach zanieczyszczonych emisjami hut miedzi – formy i rozpuszczalność. *Zesz. Nauk AR we Wrocławiu*, Nr 432, 159 ss. *Rozprawy CLXXXIV*, ISSN 0867–7964 i ISSN 0867–1427.
 15. KICIŃSKA A. ; 2011. Formy występowania oraz mobilność cynku, ołowiu i kadmu w glebach zanieczyszczonych przez przemysł wydobywczo-metalurgiczny. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* nr 49.
 16. KONCEWICZ-BARAN M.; GONDEK K. ; 2010. Zawartość pierwiastków śladowych w glebach użytkowanych rolniczo. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*. Nr14/2010, ss.65–74.
 17. KWIATKOWSKA-MALINA J., MACIEJEWSKA A.; 2011. Pobieranie metali ciężkich przez rośliny w warunkach zróżnicowanego odczynu gleb i zawartości materii organicznej. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* nr 49.
 18. LUO CH., YANG R., WANG Y., LI Y., ZHANG G., LI X. ; 2012. Influence of agricultural practice on trace metals in soils and vegetation in the water conservation area along the East River (Dongjiang River), South China. *Sci. Total Environ*, 431: 26-32.
 19. MACIEJEWSKA A. ; 2003. Problematyka rekultywacji gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi w świetle literatury. 539-550. W: „Obieg Pierwiastków w Przyrodzie”. Monografia Tom II. (B. Gworek, J. Misiak red.). Dział Wydawnictw IOŚ, Warszawa, 730 ss., ISBN 83–85805–90–7.
 20. MOTOWICKA-TERELAK T., TERELAK H. ; 2002. *Gleboznawstwo ekologiczne*. Wyd. Wszech. Mazurskiej, Olecko. ISBN 83–86523–64.
 21. MOTOWICKA-TERELAK T., TERELAK H. ; 1995. Obszary ekologicznego zagrożenia gleb w Polsce w wyniku oddziaływania czynników antropogenicznych. *Zesz. Prob. Post. Nauk Rol.* 422: 43–54.
 22. OCIEPA-KUBICKA A., OCIEPA E. ; 2012 Toksyczne oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, zwierzęta i ludzi. *Inżynieria i Ochrona Środowiska* t. 15, nr 2, s. 169–180
 23. ROSADA J., CHUDZIŃSKI B., NIJAK K. ; 1995. Zanieczyszczenie roślin uprawnych metalami ciężkimi pochodzącymi z gleby oraz bieżącej emisji Huty Miedzi „Głogów”. s. 236–243. W: *Mater. 35 Ses. Nauk. Inst. Ochr. Rośl.*, cz. 1 Referaty.

24. ROSADA J. ; 2008. Stan środowiska rolniczego w rejonie oddziaływania emisji Huty Miedzi GŁOGÓW. Rozprawy Naukowe Instytutu Ochrony Roślin – Państwowego Instytutu Badawczego. Zeszyt 19.
25. ROSS S.M. ; 1994. Toxic metals in soil-plant system. John Wiley and Sons Ltd. (red.), London, 152 ss.
26. SIEBIELCEC G., STUCZYŃSKI T., TRELAK H., FILIPIAK K., KOZA P., KORZENIOWSKA –PUCUŁEK R., ŁOPATKA A., JADCZY SZYŃ J. ; 2008. Uwarunkowania produkcji rolniczej w regionach o dużym udziale gleb zanieczyszczonych metalami śladowymi. Studia i Raporty IUNG- PIB. Zeszyt 12.
27. SWĘDRZYŃSKA D.; SAWICKA A. ; 2010. Wpływ miedzi na bakterie z rodzaju *Azospirillum* występujące w ryzosferze siewek kukurydzy i pszenicy. Woda- Środowisko- Obszary wiejskie, t(10)z.2(3), ss.167–178.
28. WOLT J.D. ; 1994. Soil solution chemistry. Applications to environmental science and agriculture. J. Wiley and Sons, N.York.
29. QISHLAQI A., MOORE F. ; 2007. Statistical analysis of accumulation and sources of heavy metals occurrence in agricultural soils of Khoshk River Banks, Shiraz, Iran. American–Eurasian J. Agric. Environ. Sci., 2(5): 565–573.

REMEDICATION AND RECLAMATION OF AGRICULTURAL LANDS COVERED BY EMISSIONS OF METALLURGY INDUSTRY

S u m m a r y

Industrial plants that want to be up to current Polish and European environmental protection requirements faced the need to conduct large-scale pro-ecological activities aimed at minimizing the risk of environmental pollution. One of such action is the remediation or reclamation (purification) of soils using different methods to restore the degraded lands to their usefulness.

Key words: metallurgy industry, soil, heavy metals, remediation, reclamation