

Metal z liści – ekologiczne oblicze górnictwa

mgr inż. **Mateusz ŁASIEWICKI**
Okręgowy Urząd Górniczy w Warszawie

TREŚĆ: Fitogórnictwo to innowacyjna technologia wykorzystująca zdolność niektórych roślin hiperakumulujących do pobierania i gromadzenia metali ciężkich z gleby. Pozwala ona na odzysk cennych pierwiastków, takich jak nikiel, ołów, kadm czy arsen, poprzez uprawę odpowiednich gatunków, zbiór biomasy oraz odzysk metali z popiołu po spalaniu. Metoda ta znajduje zastosowanie zarówno w eksploatacji ubogich złóż, jak i w bioremediacji terenów zdegradowanych przemysłowo. Fitogórnictwo charakteryzuje się niższym kosztem inwestycyjnym i mniejszym wpływem na środowisko w porównaniu do klasycznego górnictwa. Nie wymaga ingerencji w strukturę geologiczną, wspiera także procesy rekultywacji. Skuteczność tej technologii uzależniona jest od doboru gatunków roślin charakteryzujących się szybkim tempem wzrostu, intensywnym przyrostem biomasy oraz wysokim potencjałem akumulacji metali. Fitogórnictwo niesie również zagrożenia, m.in. w postaci ryzyka rozprzestrzenienia gatunków inwazyjnych, akumulacji metali w łańcuchu troficznym oraz emisji zanieczyszczeń podczas spalania biomasy. Wymaga to dalszych badań i odpowiedzialnego zarządzania, aby metoda ta mogła stać się pełnoprawną alternatywą dla tradycyjnego wydobywania metali. Największym wyzwaniem jest jej opłacalność ekonomiczna oraz konkurencja ze strony konwencjonalnego wydobywania.

SŁOWA KLUCZOWE: fitogórnictwo, hiperakumulator, środowisko, bioremediacja

1. Wstęp

Fitogórnictwo to rozwijająca się metoda pozyskiwania metali z gleb i odpadów górniczych, oparta na wykorzystaniu zdolności niektórych gatunków roślin do hiperakumulacji metali ciężkich w tkankach. W literaturze funkcjonuje wiele ujęć tego pojęcia. Van der Ent i in. (2015) definiują je jako *agromining*, czyli „rolnicze wydobywanie metali” polegające na odzysku pierwiastków z gleb o niskiej ich zawartości poprzez uprawę odpowiednich roślin hiperakumulujących [1]. Według Chaneya i Bakalanova (2017) fitogórnictwo to proces biologicznego odzysku metali, prowadzony równolegle z remediacją zanieczyszczonych gleb [2]. Z kolei Robinson i in. (1997) podkreślają jego znaczenie jako alternatywy dla klasycznych metod eksploatacji rud metali [3]. Nkrumah, van der Ent i Baker (2023) wskazują również na potencjał tej metody jako nowej gałęzi wydobywania, łączącej aspekty rolnictwa, metalurgii i ochrony środowiska [4].

2. Rys historyczny

Choć pojęcie fitogórnictwa jest stosunkowo nowe, opiera się ono na zależnościach między obecnością metali

w glebie a wzrostem roślin, które zaczęto obserwować i opisywać już w pierwszym milenium naszej ery [5]. Pierwszymi, którzy zaobserwowali korelacje występowania konkretnych rodzajów roślinności ze złożami, byli Chińczycy. Kroniki chińskie z VIII–IX w. n.e. odnotowują, że pewne trawy wyrastają nad rudami miedzi i żelaza.

Państwa z europejskiego kręgu kulturowego ugruntowały swoje obserwacje nieco później, bo w renesansie. Georgius Agricola, niemiecki górnik, metalurg i mineralog (z zawodu lekarz), w dziele *De Re Metallica* (1556) zaznacza wpływ metali zawartych w glebie na fizjologię flory [6]. Kolejne opracowania w większym stopniu opisywały wpływ rud metali na rozwój roślinności. Warto przytoczyć fragment opracowania hiszpańskiego metalurga Alvaro Alonso Barby – *Arte de los Metales* (1640) – traktujący o tym, że „(...) Niektóre drzewa, rośliny bagienne i zioła są czasami wskaźnikami żył. Wśród nich są rośliny jednego typu, które wydają się być posadzone na linii; powtarzają na powierzchni przebieg podziemnej żyły. Rośliny rosnące na szczycie metalicznej żyły są mniejsze i nie wykazują swoich zwykłych żywych kolorów. Jest to spowodowane wyziewami metali. Szkodzą one roślinom, które wydają się wychudzone (...)” [7].



► Rys. 1. *Polycarpaea spirostylis* F. Muell, hiperakumulator miedzi z rodziny goździkowatych

► Fig. 1. Copper hyperaccumulator plant, *Polycarpaea spirostylis* F. Muell (<https://bie.ala.org.au/species/https://id.biodiversity.org.au/node/apni/2913258> \l „gallery”, fot.: Aaron Bean)



► Rys. 2. *Viola lutea* Huds, fiołek będący endemitem na Wyspach Brytyjskich oraz w Europie Zachodniej

► Fig. 2. *Viola lutea* Huds, native plant for the north-western (British Isles) and western Europe (<https://powo.science.keew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:868582-1>)

Carski uczony Michaił Łomonosow w 1763 roku również potwierdził korelację zawartości metali w glebie z zahamowanym wzrostem roślinności [5]. Z kolei inne gatunki roślin miały preferować podwyższoną zawartość konkretnych metali w glebie.

W XIX wieku zidentyfikowano pierwsze gatunki wykazujące naturalną predyspozycję do zasiedlania gleb wzbogaconych w konkretne metale, zwane roślinami wskaźnikowymi [5]. Przykładem takich roślin są: *Polycarpaea spirostylis* F. Muell (rys. 1), należąca do rodziny goździkowatych, preferująca gleby wzbogacone w miedź; *Viola lutea* Huds (rys. 2) – fiołek żółty, będący wskaźnikiem gleb z podwyższoną zawartością cynku; *Eriogonum ovalifolium* (rys. 3), roślina z rodziny rdestowatych, porastająca gleby o podwyższonej zawartości srebra. Z początkiem XX wieku oprócz obserwacji wizualnych zaczęto analizować tkanki roślinne pod kątem chemicznym, co dało początek biogeochemii. Lata 60. i 70. XX wieku przyniosły standaryzację metod badawczych, wprowadzono też wówczas pojęcie hiperakumulatorów.

3. Opis fitogórnictwej ekstrakcji metali użytecznych

W aspekcie efektywnego odzysku metali (fitogórnictwa) ważny jest dobór odpowiednich gatunków hiperakumulatorów, dostosowanych do konkretnego metalu i warunków środowiskowych [8, 9, 10]. Przykład stanowić mogą: smagliczki (*Alyssum murale* i *Alyssum bertoloni*) (rys. 4), rośliny z rodziny kapustowatych zdolne do akumulacji niklu, wykorzystywane w Europie do odzysku tego metalu z gleb na skałach ultramaficznych [3, 11], oraz roślina z rodzaju liściokwiatów (*Phyllanthus rufuschaneyi*) (rys. 5), gatunek pochodzący z Azji Południowo-Wschodniej (Malezja) wykazujący zdolność do akumulacji niklu w stężeniach do 16% suchej masy liści, co potwierdzono w doniesieniach literaturowych [1, 12]. Kolejny gatunek roślin zaliczanych do grona hiperakumulatorów stanowi kapusta sitowata (*Brassica juncea*) (rys. 6), mająca zdolność akumulacji ołowiu, kadmu i uranu, szeroko stosowana w fitoremediacji [9, 10, 13], oraz orliczka pasiasta (*Pteris vittata*) (rys. 7),

wykazująca zdolność akumulacji arsenu, powszechnie wykorzystywana w oczyszczaniu gleb skażonych tym pierwiastkiem [14, 15].

Wybór gatunku wykorzystanego do fitogórnictwa determinowany jest kilkoma czynnikami, do najważniejszych z nich należą: rodzaj i stężenie metalu w glebie, odczyn (pH) i struktura gleby oraz klimat i długość sezonu wegetacyjnego [12, 16, 17]. Po wybraniu gatunku następuje proces uprawy – rośliny są wysiewane lub sadzone na obszarach, gdzie gleba zawiera dostępne formy metali [2, 9, 18]. Aby zwiększyć ich biodostępność stosuje się dodatki w postaci kwasów organicznych lub EDTA (z ang. *ethylenediaminetetraacetic acid*) mające na celu utworzenie chelatu, czyli związku chemicznego złożonego z cząsteczki o organicznej strukturze pierścieniowej oraz związanego z nią kilkoma wiązaniami kationu metalu [19, 20, 21]. W trakcie rozwoju rośliny poprzez system korzeniowy pobierają metale z gleby, następnie transportują je do nadziemnych części (liście, łodygi) [9, 10, 15]. W zależności od gatunku po osiągnięciu dojrzałości i odpowiedniego poziomu akumulacji



► Rys. 3. *Eriogonum ovalifolium*, rdestowiec wskazujący na podwyższoną zawartość srebra

► Fig. 3. *Eriogonum ovalifolium*, plant of the Polygonaceae family, silver indicator plant (<https://boisefrontnature.com/erigogonum-ovalifolium-var-pansum/>)



► Rys. 4 Smagliczka (*Alyssum murale*)

► Fig. 4. Yellowtuft alyssum (*Alyssum murale*) (<https://hillfarmnursery.com>)



► Rys. 5. Roślina akumulująca nikiel (*Phyllanthus rufuschaneyi*) na polniku eksperymentalnym w stanie Sabah w Malezji

► Fig. 5. The nickel 'metal crop' *Phyllanthus rufuschaneyi* in an experimental agromining field in Sabah, Malaysia (<https://stories.uq.edu.au/news/2021/plants-that-absorb-metal-could-help-provide-a-sustainable-future-for-mining/index.html>)

metali są zbierane mechanicznie [1, 4, 22]. Typowy cykl uprawy trwa od kilku miesięcy do roku – zależnie od klimatu i rośliny [18, 21, 23]. Aby odzyskać metal, zebrana biomasa jest suszona, a następnie spalana w kontrolowanych warunkach [1, 2, 4]. Metale koncentrują się w popiele – ich zawartość może sięgać nawet do 20% masy [4, 23, 24]. Z popiołu metale odzyskiwane są przy użyciu metod hydrometalurgicznych (np. ługowanie) [1, 2, 23].

4. Szanse fitogórnictwa

Fitogórnictwo można postrzegać jako technologię prośrodowiskową, która umożliwia zagospodarowanie gleb skażonych i terenów poprzemysłowych w sposób ograniczający ryzyko środowiskowe oraz zdrowotne, a jednocześnie przynosi wymierne korzyści ekonomiczne. Hiperakumulujące rośliny, takie jak smagliczka (*Alyssum murale*, rys. 4) czy liściokwiat (*Phyllanthus rufuschaneyi*, rys. 5), działają jak biologiczne pompy, pobierając metale ciężkie z podłoża i gromadząc je w biomacie, co pozwala na jednoczesną rekultywację terenu oraz odzysk cennych pierwiastków [1, 11, 19].

Na etapie hodowli wymaga ona jedynie dostępności arealu oraz rolniczej infrastruktury (nasion, pług, systemu nawadniania i suszarni), dzięki czemu nakłady inwestycyjne są wielokrotnie niższe, a środowiskowe skutki uboczne, takie jak drenaż kwaśny, erozja czy detonacje materiałów wybuchowych, praktycznie nie występują [1, 23, 24]. Pilotażowe plantacje w Albanii (rys. 8) dowiodły, że z hektara zdegradowanej gleby można odzyskać około 100 kg niklu rocznie, co przy obecnych cenach przekłada się na dochód porównywalny do upraw sadowniczych. Przy czym podkreślić należy, że odzysk następuje z terenów, które z uwagi na poziom zanieczyszczenia nie nadają się do uprawy roślin jadalnych [3, 11, 25]. Jednocześnie rośliny hiperakumulujące stabilizują skarpy, wiążą dwutlenek węgla i wspierają rekultywację terenów pogórnich. Trwające już próby z kobalt, pierwiastkami ziem rzadkich czy złotem wskazują, że fitogórnictwo może stać się jedną z kluczowych, społecznie akceptowalnych metod pozyskania krytycznych surowców z bardzo ubogich złóż wrażliwych przyrodniczo [4, 23, 26].

5. Fitogórnictwo a bioremediacja

Rośliny hiperakumulujące, dzięki zdolności do pobierania i gromadzenia w swoich tkankach wysokich stężeń metali ciężkich, stanowią skuteczne narzędzie biologicznej remediacji gleb zdegradowanych przez działalność przemysłową, górniczą czy rolnictwo [8]. Gatunki takie jak kapusta sitowata (*Brassica juncea*, rys. 6), tobołek



► Rys. 6. Kapusta sitowata (*Brassica juncea*) naturalnie występująca w Azji (Syberia, Chiny), w Europie Wschodniej i Ameryce Północnej

► Fig. 6. Mustard greens (*Brassica juncea*) commonly found in Siberia, China, Eastern Europe, and North America (<https://atlas.roslin.pl/plant/6492>)



► Rys. 7. Osobnik *Pteris vittata* utrzymywany w Jerozolimskim Ogrodzie Botanicznym

► Fig. 7. *Pteris vittata*, The Jerusalem Botanical Gardens, Israel (<https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:17217500-1>) The Jerusalem Botanical Gardens, Israel (<https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:17217500-1>)

alpejski (*Noccaea caerulescens*, rys. 9) czy orliczka pasiasta (*Pteris vittata*, rys 7) potrafią akumulować w liściach i korzeniach znaczne ilości ołowiu, cynku, kadmu, arsenu lub niklu bez istotnego uszczerbku dla własnego rozwoju [13, 14, 19]. Proces ten, znany jako fitoremediacja, jest alternatywą dla kosztownych metod mechanicznego usuwania gleby czy chemicznej neutralizacji zanieczyszczeń [10]. Regularne zbieranie i usuwanie biomasy zawierającej metale pozwala na stopniowe obniżenie ich stężenia w gruncie, a tym samym przywrócenie jego wartości użytkowej – zarówno pod kątem rolnictwa, jak i zagospodarowania przestrzennego [10, 27].

Co istotne, metoda ta jest niskoemisyjna, tania w stosowaniu i może być prowadzona bez konieczności głębokiej ingerencji w środowisko, co czyni ją idealnym rozwiązaniem w strefach przyrodniczo cennych lub zurbanizowanych [10, 12, 13]. Dzięki temu hiperakumulatory nie tylko pełnią funkcję biologicznych „odkurzaczy” metali, ale także wspierają zrównoważoną rekultywację terenów zdegradowanych [9, 10, 19].

6. Fitogórnictwo a klasyczne pozyskiwanie kopalin

Fitogórnictwo, jako technologia oparta na naturalnych procesach biologicznych, jest znacznie mniej inwazyjne dla środowiska niż klasyczne metody wydobycia surowców [1, 23]. W przeciwieństwie do tradycyjnego górnictwa, które wymaga rozległych wykopów, ciężkich maszyn, wieloetapowego przerobu rudy i często prowadzi do degradacji krajobrazu oraz skażenia wód gruntowych, opiera się na uprawie roślin na powierzchni gleby, bez konieczności mechanicznej ingerencji w podłoże [1, 19]. Dzięki temu ogranicza erozję, zanieczyszczenia pyłowe oraz emisje szkodliwych substancji do atmosfery i wód [4, 26, 28].

Co więcej, cały proces jest niskoemisyjny – rośliny w trakcie fotosyntezy wiążą dwutlenek węgla z atmosfery, co częściowo kompensuje emisje związane z późniejszym przetworzeniem biomasy [23, 26]. W porównaniu do energochłonnych operacji, takich jak kruszenie, mielenie i prażenie rudy, zużywa znacznie mniej ener-

gii, zwłaszcza że może wykorzystywać naturalne źródła ciepła (np. słońce do suszenia biomasy) i być zasilane lokalnymi, odnawialnymi źródłami energii [1, 26, 28]. W efekcie technologia ta nie tylko umożliwia pozyskanie metali z trudno dostępnych lub zdegradowanych obszarów, ale czyni to w sposób zgodny z zasadami zrównoważonego rozwoju i gospodarki niskoemisyjnej [4, 23, 26]. Należy jednak zaznaczyć, że wprowadzenie nowego gatunku roślin w obszar o odmiennym klimacie niż występujący w jego rodzimych stronach może skutkować wymuszeniem nawadniania gleby, aby roślina mogła przeżyć w obszarze o względnie niższej rocznej sumie opadów lub charakteryzującym się odmienną krzywą opadów rocznych.

7. Biologiczne ograniczenia fitogórnictwa

Proces akumulacji metali przez rośliny hiperakumulujące, choć skuteczny, jest rozciągnięty w czasie, wymaga cierpliwości oraz odpowiedniego zaplanowania działań w dłuższej perspektywie [12, 19]. Rośliny te gromadzą metale stopniowo, w trakcie każdego cyklu wegetacyjnego, co oznacza, że pojedyncza uprawa nie jest w stanie znacząco oczyścić gleby ani dostarczyć dużych ilości surowca [4, 12]. W praktyce oznacza to konieczność przeprowadzenia wielu sezonów uprawnych – pięciu, dziesięciu, a nawet kilkunastu – zanim zawartość metalu w glebie osiągnie poziom umożliwiający zakończenie fitoremediacji lub ekonomiczny próg opłacalności w fitogórnictwie [4, 11]. Dodatkowo tempo akumulacji zależy od wielu czynników, takich jak: gatunek rośliny, typ gleby, warunki klimatyczne, odczyn podłoża (pH), dostępność składników pokarmowych i obecność metali w formach łatwo przyswajalnych [19, 20].

W niektórych przypadkach konieczne jest wspomaganie procesu przez nawożenie, irygację lub dodatek chelatorów, które zwiększają biodostępność metali [20, 23]. Mimo tych ograniczeń biologiczny charakter metody sprawia, że może być ona stosowana na dużych obszarach w sposób ciągły i zautomatyzowany, a osiągnięty efekt, choć długoterminowy, przekłada się na realne korzyści środowiskowe i surowcowe [4, 12, 23].



► Rys. 8. „Żniwa niklu” zawartego w roślinach obsadzonych na albańskich polach

► Fig. 8. The ‘nickel harvests’, accumulated in plants grown over the Albanian fields (www.newscientist.com/article/2438399-flower-farm-could-supply-nickel-for-electric-vehicle-batteries/)

8. Związek: biomasa – zawartość metali

Nie wszystkie rośliny są odpowiednie do zastosowania w fitogórnictwie, ponieważ skuteczność tej technologii zależy zarówno od zdolności gatunku do akumulowania określonych metali, jak i od jego potencjału do wytwarzania dużej ilości biomasy [8, 11]. Sama zdolność do pobierania metalu nie wystarczy, roślina musi również szybko rosnąć, być odporna na stres środowiskowy i produkować znaczną ilość masy zielonej, która będzie nośnikiem odzyskiwanych pierwiastków [1, 16, 19]. Gatunki o wysokiej akumulacji, ale niskiej biomacie (np. niektóre fiołki czy mchy) są mało użyteczne w kontekście komercyjnego fitogórnictwa [15, 17]. Dlatego niezbędne jest prowadzenie badań nad doбором odpowiednich gatunków, ich selekcją, krzyżowaniem, a w przyszłości także modyfikacjami genetycznymi, aby zwiększyć zarówno efektywność akumulacji, jak i wydajność plonowania [4, 12]. Właściwy dobór roślin ma kluczowe znaczenie dla opłacalności procesu oraz jego zastosowania w różnych warunkach klimatycznych i glebowych [3, 4, 19].

9. Fitogórnictwo vs. górnictwo tradycyjne

Aby fitogórnictwo mogło konkurować z tradycyjnym wydobyciem metali, całkowite koszty związane z uprawą roślin, ich zbiorem, suszeniem oraz dalszym przetwarzaniem biomasy muszą mieścić się w granicach opłacalności rynkowej [2, 18]. Choć metoda ta cechuje się niższym nakładem kapitałowym (brak potrzeby budowy szybów, zakładów wzbogacania rudy czy infrastruktury ciężkiej), to opiera się na procesach biologicznych wymagających czasu i powtarzalnych cykli agrotechnicznych [21, 22]. Do kosztów należy zaliczyć m.in. przygotowanie gleby, zakup nasion hiperakumulatorów, nawożenie, nawadnianie (szczególnie w cieplejszych strefach), koszty pracy przy zbiorze oraz energii potrzebną do suszenia i przetwarzania biomasy [3, 18].

Równie istotne są koszty ekstrakcji metali z popiołu lub soku roślinnego, które muszą być zoptymalizowane pod kątem niskiej skali produkcji oraz zróżnicowanego składu chemicznego materiału wejściowego [4, 22]. Tylko przy zapewnieniu odpowiedniej wydajności roślin (czyli zawartości metalu oraz masy biomasy z hektara) możliwe jest osiągnięcie dodatniego bilansu ekonomicznego [1, 2, 18]. W przypadku niklu badania pokazują, że próg rentowności można osiągnąć przy uzysku ~100 kg Ni/ha/rok i cenie rynkowej powyżej 15 000 USD/t, jednak opłacalność może gwałtownie spaść przy spadku cen lub pogorszeniu warunków uprawy [1, 3, 18]. Dlatego niezbędne jest prowadzenie analiz ekonomicznych i badań nad optymalizacją łańcucha produkcyjnego od rośliny do metalu, aby fitogórnictwo mogło stanowić realną alternatywę dla górnictwa konwencjonalnego, a nie było jedynie ekologiczną ciekawostką [4, 22].

10. Zagrożenia wynikające z fitogórnictwa

Jak każda metoda eksploatacji fitogórnictwo niesie ze sobą pewne konsekwencje oraz zagrożenia. Pierwszą kwestią, jaką należy zaznaczyć, jest wprowadzanie



► Rys. 9. Tobotek alpejski (*Noccaea caerulescens*), roślina z rodziny kapustowatych, rodzima w Europie Centralnej i Zachodniej (Alpy, Pireneje, Apeniny)

► Fig. 9. *Noccaea caerulescens* (*Brassicaceae* family), a plant naturally found in Central and Western Europe (<https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:287737-1>)

gatunków allochtonicznych na nowe obszary. Zabiegi rolnicze kontrolują przygotowanie gleby pod uprawę, miejsce obsiania gruntu, wzrost oraz zbiory roślin. Agrotechnika może nie mieć wpływu na kwestię rozprzestrzenienia się roślin poza poletka uprawne, co może skutkować inwazją uprawianego gatunku w nowym, sprzyjającym rozwojowi środowisku. Może to prowadzić do zaburzenia równowagi biologicznej, a gatunek uprawny staje się rośliną inwazyjną. Nowy gatunek zabiera przestrzeń życiową dla roślin autochtonicznych, pobiera substancje odżywcze z gleby, zmniejszając ich dostępność dla roślin miejscowych. Gatunki lokalne mogą zacząć wymierać, ustępując pola gatunkowi inwazyjnemu. Zmiana lokalnej flory w kierunku monokultury może wpływać także na okoliczną faunę. Zubożenie flory oddziałuje negatywnie na naturalne habitaty lokalnej zwierzyny (zmniejszenie lub utrata naturalnego terytorium miejscowych gatunków).

Naturalna predyspozycja do akumulowania metali ciężkich może negatywnie wpływać na zwierzęta roślinnożerne, które potraktują ją jako pożywienie. Zwierzę, żywiąc się rośliną bogatą w metale ciężkie, gromadzi je, co ma bezpośredni wpływ na stan jego zdrowia, a następnie na spodziewaną długość życia. Drapieżniki polujące na lokalną zwierzynę kumulują w ciałach metale ciężkie, pozyskane w trakcie pożywiania się ofiarami.

Kolejną kwestią wartą poruszenia jest emisja tlenku węgla (CO) oraz tlenku azotu (NO) do atmosfery, generujących się w czasie spalania biomasy. Biomasa często uważana jest za medium energetyczne, mogące zastąpić klasyczne paliwa, w szczególności węgiel. Badania przeprowadzone przez zespół Politechniki Łódzkiej [29] pokazały, że spalanie biomasy może być bardziej szkodliwe niż pozyskiwanie energii cieplnej z węgla. Zastosowanie odpowiedniej technologii może znacząco ograniczyć emisję gazów cieplarnianych. W przypadku węgla standardem jest zastosowanie odpowiednich pieców. W przypadku biomasy koszty związane z zastosowaniem pieców wytwarzających właściwą temperaturę spalania mogą mieć znaczący wpływ,

co może skutkować wyborem tańszej technologii, niekoniecznie dającej lepsze wyniki emisji spalin do atmosfery. Ponadto należy również przeprowadzić badania mające na celu wskazanie, jaki procent pierwiastków ciężkich związanych w roślinach jest emitowany w spalinach do atmosfery.

11. Wnioski

Fitogórnictwo jawi się jako nowoczesna i zrównoważona alternatywa dla tradycyjnych metod pozyskiwania metali, zwłaszcza w przypadku złóż o niskiej zawartości pierwiastków lub terenów wrażliwych środowiskowo. Technologia ta łączy w sobie aspekty uprawy i remediacji, umożliwiając odzysk metali i oczyszczanie gleb zdegradowanych przez działalność przemysłową. Zastosowanie hiperakumulujących roślin, takich jak smagliczki (*Alyssum murale*), kapusta sitowata (*Brassica juncea*) czy liściokwiat (*Phyllanthus rufuschaneyi*), pozwala na skuteczne gromadzenie metali ciężkich w biomacie, którą następnie można przetworzyć w sposób relatywnie niskoemisyjny i przyjazny dla środowiska. Niższe nakłady kapitałowe oraz brak konieczności ingerencji w strukturę geologiczną podłoża czynią fitogórnictwo atrakcyjnym ekonomicznie rozwiązaniem, szczególnie tam, gdzie konwencjonalne metody są nieopłacalne lub niedopuszczalne z przyczyn środowiskowych. Jednocześnie należy podkreślić, że metoda ta wymaga odpowiedniego doboru gatunków roślin, starannego planowania agrotechnicznego oraz długoterminowej perspektywy zarówno pod względem technologicznym, jak i ekonomicznym.

Wciąż istnieją wyzwania, takie jak długi czas akumulacji metali, zagrożenia związane z introdukcją roślin inwazyjnych, emisje powstałe przy spalaniu biomasy oraz niepewność co do opłacalności w zmieniających warunkach rynkowych. Mimo to fitogórnictwo doskonale wpisuje się w gospodarkę obiegu zamkniętego, a rozwój badań nad selekcją roślin, optymalizacją procesów oraz ograniczaniem ryzyk środowiskowych może uczynić z tej technologii nie tylko ciekawostkę naukową, ale realne narzędzie pozyskiwania metali w zgodzie z naturą.

Pomimo licznych korzyści środowiskowych i ekonomicznych fitogórnictwo nie jest pozbawione istotnych zagrożeń. Wprowadzanie obcych gatunków hiperakumulatorów może prowadzić do zaburzenia równowagi ekosystemów, szczególnie jeśli rośliny te staną się inwazyjne i wyprą lokalną florę. Może to mieć kaskadowe skutki dla fauny – w tym zatrucia roślinożerców metalami ciężkimi oraz ich dalszym bioakumulowaniem w łańcuchu troficznym. Dodatkowo proces spalania biomasy, który jest kluczowym etapem odzysku metali, generuje emisje szkodliwych gazów (np. CO, NO), a przy niewłaściwej technologii prowadzi do wtórnego zanieczyszczenia powietrza. Brakuje także jednoznacznych danych na temat tego, jaka część metali zawartych w roślinach trafia do atmosfery w wyniku niekontrolowanego spalania. Te aspekty wskazują, że rozwój fitogórnictwa musi iść w parze z odpowiedzialnym zarządzaniem środowiskowym oraz badaniami nad minimalizacją ryzyk ekologicznych.

Metals from leaves – the green face of mining

Abstract: Phytomining is an innovative technology that utilizes the ability of certain hyperaccumulating plants to absorb and store heavy metals from the soil. This process enables the recovery of valuable elements such as nickel, lead, cadmium, or arsenic through the cultivation of selected plant species, biomass harvesting, and metal extraction from the ash after combustion. The method is applicable both in the exploitation of low-grade ores and in the bioremediation of industrially degraded lands. Phytomining is characterized by lower capital investment and reduced environmental impact compared to conventional mining. It does not require interference with the geological structure and also supports land reclamation processes. However, the effectiveness of this technology depends on the selection of appropriate plant species with high biomass production and strong accumulation capacity. Phytomining also carries certain risks, including the potential spread of invasive species, bioaccumulation of metals in the food chain, and emissions of pollutants during biomass combustion. These issues call for further research and responsible environmental management to allow this method to become a viable alternative to traditional metal extraction. The greatest challenge for phytomining remains its economic feasibility and competition from conventional mining.

Literatura

1. Van der Ent A., Echevarria G., Baker A.J.M., Morel J.L., Agromining: Farming for metals in the future? "Environmental Science & Technology", 2015, 49(8), s. 4773–4780.
2. Chaney R.L., Baklanov I.A., Phytoremediation and phytomining: Status and promise. "Advances in Botanical Research", 2017, 83, s. 189–221.
3. Robinson B.H., Brooks R.R., Howes A.W. et al., The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator *Alyssum murale* for phytoremediation and phytomining. "Journal of Geochemical Exploration", 1997, 59(2), s. 75–86.
4. Nkrumah P.N., van der Ent A., Baker A.J.M., A review of the economic potential of phytomining: From concept to practice. "Resources Policy", 2023, 82.
5. Cannon H.L., Advances in botanical methods of prospecting for minerals, part I – advances in geobotanical methods. [in:] Geophysics and geochemistry in the search for metallic ores, "Geological Survey of Canada, Economic Geology Report", 1979, 31, s. 385–395
6. Agricola G., De Re Metallica, 1556.
7. Barba A.A., Arte de los Metales, 1640.
8. Baker A.J.M., Brooks R.R., Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – A review of their distribution, ecology and phytochemistry. "Biorecovery", 1989, 1(2), s. 81–126.
9. Baker A.J.M., McGrath S.P., Reeves R.D. et al., Metal hyperaccumulator plants: A review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. [in:] I. Raskin & B.D. Ensley (eds.), Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment, 2000, s. 85–107.
10. Reeves R.D., Baker A.J.M., Metal-accumulating plants, [in:] I. Raskin & B.D. Ensley (eds.), Phytoremediation of toxic metals: Using plants to clean up the environment, 2000, s. 193–229.
11. Bani A., Echevarria G., Mullaj A. et al., Nickel hyperaccumulation by *Odontarrhena muralis* (syn. *Alyssum murale*) from ultramafic soils of Albania. "Ecological Engineering", 2015, 80, s. 172–177.
12. Van der Ent A., Baker A.J.M., Reeves R.D. et al., Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. "Plant and Soil", 2013, 362(1–2), s. 319–334.
13. Pilon-Smits E., Phytoremediation. "Annual Review of Plant Biology", 2005, 56, s. 15–39.
14. Ma L.Q., Komar K.M., Tu C. et al., A fern that hyperaccumulates arsenic. "Nature", 2001, 409(6820).
15. Rascio N., Navari-Izzo F., Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? "Plant Science", 2011, 180(2), s. 169–181.
16. Kochian L.V., Hoekenga O.A., Piñeros M.A., How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. "Annual Review of Plant Biology", 2004, 55, s. 459–493.
17. Pollard A.J., Reeves R.D., Baker A.J.M. et al., The evolution of metal hyperaccumulation and tolerance in plants. "New Phytologist", 2014, 202(1), s. 49–63.
18. Kikis C., Thalassinou G., Antoniadis V., Soil phytomining: Recent developments – A review. *Soil Systems*, 2024, 8(1).
19. Chaney R.L., Angle J.S., Broadhurst C.L. et al., Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies. "Journal of Environmental Quality", 2007, 36(5), s. 1429–1443.
20. Herzig R., Nehnevajova E., Pfister C. et al., Feasibility of zinc and cadmium phytoextraction on a moderately contaminated soil. "Environmental Science and Pollution Research", 2014, 21(6).
21. Lima L.H.V., Ly S.N., Rocha de Araújo R.S., Testing the feasibility of citric-acid-assisted nickel agromining with tropical and temperate hyperaccumulator plants. *ACS Omega*, 2025, 10(21).
22. Shah R., Eng B., Altalag J., Recent advances in an emerging green technology: Nickel phytomining. *Petro Industry News (Fuel-for-Thought section)* 2025.
23. Morel J.L., van der Ent A., Echevarria G. et al., Agromining: The ten-year journey of a plant-based metal recovery technology. "Current Opinion in Environmental Science & Health", 2022, 26.
24. EIT RawMaterials, Agromining and phytomining: Innovative methods for metal recovery. European Institute of Innovation & Technology, 2021.
25. USGS, Mineral Commodity Summaries 2022. U.S. Geological Survey, 2022.
26. Laizé C.L.R., Rousseau L., Morel J.L., Hyperaccumulators as tools for sustainable metal recovery: A perspective for a circular economy. *Sustainability*, 2020, 12(19).
27. U.S. Environmental Protection Agency, Introduction to phytoremediation (EPA/600/R-99/107). National Risk Management Research Laboratory, 2000.
28. European Commission, Study on the environmental impact of raw material extraction and its contribution to climate change. Publications Office of the European Union, 2022.
29. Wielgoński G., Łechtańska P., Emisja zanieczyszczeń z procesu spalania biomasy. POL-EMIS 2010. X Konferencja Naukowo-Techniczna „Współczesne osiągnięcia w ochronie powietrza atmosferycznego”, s. 391–400.