

Zastosowanie roślin w prospekcji geologicznej oraz w pracach rekultywacyjnych

Zdzisław M. Migaszewski*, Agnieszka Gałuszka**

*Badania geobotaniczne i biogeochemiczne znalazły szerokie zastosowanie w poszukiwaniu złóż rud metali, szczególnie miedzi, złota i uranu, oraz wyznaczaniu przebiegu uskoków. Dzięki tym metodom odkryto złoża typu „porphyry copper” w południowo-zachodniej części USA oraz jedno z największych złóż uranu na świecie — Athabasca w Kanadzie. W ostatnim z omawianych przypadków, gleby nie wykazywały obecności znaczącej mineralizacji uranowej (od 1,8 do 2,5 $\mu\text{g g}^{-1}$ U), w przeciwieństwie do gałązek czarnego świerku [*Picea mariana* (Miller) BSP] (od 5 do 886 $\mu\text{g g}^{-1}$ U). Mak kalifornijski (*Eschscholtzia mexicana* Greene) jest związany przypuszczalnie z glebami miedzionośnymi, występującymi na obszarach południowo-zachodniej części USA. Rośliny wykorzystuje się również do rekultywacji terenów górniczych oraz obszarów skażonych. Należy jednak zachować dużą ostrożność we właściwym doborze gatunków roślin, ponieważ stopień wiązania przez nie pierwiastków śladowych zależy nie tylko od całkowitej koncentracji i formy występowania pierwiastków, lecz również od wielu czynników topograficznych, klimatycznych, edaficznych, fizjologicznych i genetycznych.*

Słowa kluczowe: geobotanika, biogeochemia, poszukiwanie złóż, rekultywacja

Zdzisław M. Migaszewski & Agnieszka Gałuszka — An application of plants in geologic prospecting and reclaiming work. *Prz. Geol.*, 46: 594–599.

S u m m a r y. The paper presents an overview of geobotanical and biogeochemical investigations connected with prospecting for metal ore deposits and faults. Some large copper, gold and uranium deposits were discovered as a result of the aforementioned studies. They included the porphyry copper region of the southwest United States and the world class Athabasca uranium deposit (Canada). A soil survey would miss significant uranium mineralization (1.8 to 2.5 $\mu\text{g g}^{-1}$); the diverse content of this metal was recorded in black spruce [*Picea mariana* (Miller) BSP] twigs (5 to 886 $\mu\text{g g}^{-1}$). California poppy (*Eschscholtzia mexicana* Greene) known from the Southwest seems to have been closely associated with cupriferous soils. Plants are also used for biologic reclamation of mine spoiled and polluted areas. Special precaution should be taken to select an appropriate species (from "barrier-plants") because the uptake of trace metals by plants depends not only on total concentration and form of metals, but also on climatic, topographic, edaphic, physiologic and genetic factors.

Key words: geobotanical methods, biogeochemical methods, mineral exploration, reclamation

Rośliny znalazły zastosowanie na dwóch przeciwnych biegunach działalności geologiczno-górnictwa człowieka, a mianowicie: a) przy poszukiwaniu złóż (zwłaszcza rud metali) i wytyczaniu przebiegu uskoków torujących często drogę roztworom mineralizującym i wodom podziemnym oraz b) przy usuwaniu skutków eksploatacji górniczej metodami biologicznymi.

Badania geobotaniczne w zakresie prospekcji stref mineralizacji oraz złóż rud metali wyprzedziły o całe wieki badania biogeochemiczne. Wiązało się to z faktem, że podstawowym instrumentem badawczym było wówczas oko ludzkie. Zależność występowania określonych gatunków roślin od warunków geologicznych i hydrologicznych stwierdził po raz pierwszy rzymski architekt i inżynier Vitruwiusz żyjący w I w. p.n.e. Niemiecki inżynier górniczy Agricola (XVI w.) zaobserwował zmiany w roślinności rosnącej nad żyłami kruszcowymi. W XVII w. skandynawscy górnicy wykorzystywali gatunek *Lychnis alpina* L. w poszukiwaniu złóż miedzi (Brooks, 1979). Od początku XIX w. rośliny były często wykorzystywane w Europie i Australii jako wskaźniki występowania złóż rud metali.

Rozwój technik analitycznych i związana z tym możliwość oznaczeń różnych pierwiastków w popiołach roślin, dał początek badaniom biogeochemicznym. Pionierem w tej nowej dziedzinie był Lungwitz, który jako pierwszy w 1900

roku zaproponował wykorzystanie analiz popiołów drzew do lokalizacji złóż złota. W latach dwudziestych Aleksandrov odkrył obecność wysokich koncentracji uranu i wanaadu w roślinach występujących w pobliżu złóż uranu w środkowej Azji. Z kolei w latach trzydziestych Brundin i Palmquist wykorzystywali analizę popiołów liści do poszukiwania złóż złota, wanaadu, molibdenu i cyny na rozległych obszarach Szwecji; pierwszy z wymienionych uzyskał w 1937 r. patent w zakresie zastosowanej metodyki badań.

Po drugiej wojnie światowej badania biogeochemiczne rozwinęły się w ZSRR oraz w USA i Kanadzie. Na uwagę zasługują tu prace Cannon (1957, 1960) prowadzone w latach pięćdziesiątych nad wykorzystaniem biowskaźników roślinnych selenu w poszukiwaniu złóż karnotyту na Płaskowyżu Kolorado. W latach sześćdziesiątych Cole kontynuowała badania geobotaniczne i biogeochemiczne w zakresie poszukiwania rud metali na obszarach Australii, Afryki i Ameryki Południowej (Cole, 1965 — cyt. z Dunn i in., 1992).

Problem rekultywacji biologicznej obszarów pogórnictwa nabrał szczególnego znaczenia pod koniec XIX w., kiedy doszło do rozwoju górnictwa na niespotykaną dotychczas skalę. Intensywna eksploatacja i przeróbka kopalni była przyczyną nie tylko wielu niekorzystnych zmian w środowisku przyrodniczym na ogromnych obszarach, lecz prowadziła również do bezpośredniej degradacji fizycznej, chemicznej i biologicznej gleb i podłoża skalnego.

Celem niniejszego artykułu jest przybliżenie czytelnikowi szczególnie mało znanej problematyki wykorzystania roślin w prospekcji geologicznej. Ich zastosowanie w pracach rekultywacyjnych zostało omówione tylko w zarysie, ze względu na dość obszerną literaturę w języku polskim; badania w aspekcie

*Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Świętokrzyski, ul. Zgoda 21, 25-953 Kielce

**Katolicki Uniwersytet Lubelski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, al. Raclawickie 14, 20-031 Lublin

rekultywacji biologicznej są prowadzone również przez różne specjalistyczne ośrodki naukowe w Polsce (Siuta, 1990; Turski & Baran, 1995; Maciak, 1996).

Podstawowe pojęcia z zakresu geobotaniki i biogeochemii

Wzbogacenie lub zubożenie w niektóre mikroelementy może niekiedy prowadzić do pojawienia się anomalii w rozwoju roślin: zahamowania wzrostu, gigantyzmu, dziwnych kształtów liści i gałęzi, niezwykłych barw, niespotykanych asocjacji florystycznych, itp. Obserwacje tego typu są szczególnie przydatne na obszarach o klimacie suchym. W USA takie wizualne badania roślinności są domeną geobotaniki. Z kolei na obszarach lasów subborealnych i borealnych, wysokie koncentracje pierwiastków nie prowadzą w zasadzie do widocznych zmian w roślinach, dlatego też uchwycenie anomalii geochemicznych jest możliwe tylko za pomocą analiz chemicznych. Te ostatnie wchodziły w skład badań biogeochemicznych, a ściślej mówiąc fitogeochemicznych (Migaszewski, 1998a).

Geobotanika jest pojęciem szerszym, obejmującym całość zagadnień związanych z rozmieszczeniem i życiem roślin na Ziemi. W jej skład wchodzi: florystyka (zajmująca się poznaniem składu gatunkowego roślin na Ziemi), geografia roślin (bada rozmieszczenie roślin na Ziemi i zasięgi poszczególnych grup i gatunków), ekologia roślin (określa wzajemne związki między roślinami a środowiskiem) i fitosocjologia (zajmuje się zbiorowiskami roślinnymi rosnącymi w określonym siedlisku).

Geomikrobiologia jest dynamicznie rozwijającą się

Tab. 1. Skład chemiczny trzech warstw kory brzozy *Betula papyrifera* Marsch. (*paper birch*) w pobliżu kopalni miedzi Anglo-Rouyn w prowincji Saskatchewan, Kanada (Dunn i in., 1992)

Pierwiastki	Warstwy kory brzozy		
	wewnętrzna	środkowa	zewnętrzna
As $\mu\text{g g}^{-1}$	0,9	18	22
Au $\mu\text{g kg}^{-1}$	10	153	108
Ba $\mu\text{g g}^{-1}$	1700	870	450
Ca %	28,7	12,2	5,2
Fe %	0,05	0,71	2,76
La $\mu\text{g g}^{-1}$	2	7	20
Na $\mu\text{g g}^{-1}$	506	3410	12000
Rb $\mu\text{g g}^{-1}$	190	160	120
Zn $\mu\text{g g}^{-1}$	8800	16000	3000

Tab. 2. Skład chemiczny trzech części gałązki o różnej grubości świerku rodzaju *Tsuga* w pobliżu kopalni złota Carolin Mine, Kolumbia Brytyjska, Kanada (Dunn i in., 1992)

Pierwiastki	Części gałązki o różnej grubości		
	>10 mm	5-10 mm	<5 mm
As $\mu\text{g g}^{-1}$	22	31	82
Au $\mu\text{g kg}^{-1}$	530	650	1590
Br $\mu\text{g g}^{-1}$	19	18	18
Ca %	29	24	14
Co $\mu\text{g g}^{-1}$	11	12	21
Cr $\mu\text{g g}^{-1}$	32	26	84
Cs $\mu\text{g g}^{-1}$	2	2	2
Fe %	0,05	0,71	2,76
La $\mu\text{g g}^{-1}$	2	3	6
Na $\mu\text{g g}^{-1}$	0,4	0,4	1,1
Sr $\mu\text{g g}^{-1}$	430	480	450
Zn $\mu\text{g g}^{-1}$	1500	1400	1900

dziedzina wykorzystująca bakterie, grzyby, algi, protozoa i metazoa do poszukiwań złóż rud metali. Badania koncentracji różnych substancji toksycznych w roślinach mają również duże znaczenie dla rolnictwa oraz rekultywacji terenów skażonych. Oddziaływaniem tych substancji w łańcuchu pokarmowym na zwierzęta i człowieka zajmuje się biotoksykologia.

Ogólnie biorąc, podwyższona zawartość metali w podłożu skalnym prowadzi do ich podkoncentrowania w nadległej szacie roślinnej. Każdy gatunek ma jednak specyficzne wymagania i tolerancje w stosunku do poszczególnych metali i dlatego też kluczowe znaczenie w eksploracji geochemicznej ma wytypowanie odpowiedniego bioindykatora — rośliny (ewentualnie jej części anatomicznej lub morfologicznej).

Duże drzewo posiadające rozbudowany system korzeniowy pobiera pierwiastki z wielu metrów sześciennej gleby i podłoża skalnego. Nadmiar pierwiastków śladowych jest w sposób naturalny usuwany poprzez akumulację w najbardziej zewnętrznych partiach drzew lub krzewów (zewnętrznej warstwie kory, gałązkach).

Najbardziej przekonującym przykładem zróżnicowania składu chemicznego w różnych tkankach określonych gatunków roślin są wyniki oznaczeń złota w pojedynczym drzewie sosny *Pinus banksiana* Lamb. (*jack pine*) w pobliżu kopalni Ni–Cu–Pt–Pd–Au Rottenstone, w północnej części prowincji Saskatchewan (Dunn i in., 1992). Zawartość złota w drewnie pnia u podstawy wynosiła w partiach wewnętrznych 15 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (ppb), natomiast zewnętrznych 28 $\mu\text{g kg}^{-1}$. Z kolei najwyższą koncentrację złota (do 140 $\mu\text{g kg}^{-1}$) zanotowano w zewnętrznej warstwie kory.

Podobne zróżnicowanie zawartości różnych pierwiastków wykazały trzy warstwy kory brzozy *Betula papyrifera* Marsch. (*paper birch*) w pobliżu opuszczonej kopalni miedzi Anglo-Rouyn w prowincji Saskatchewan (tab. 1). Wiele pierwiastków chemicznych, takich jak: As, Au, Fe, La i Na, koncentrowało się głównie w najbardziej zewnętrznej warstwie kory. Ich podwyższoną zawartość zanotowano również w warstwie środkowej. Z kolei Ba, Ca, Rb oraz częściowo Zn ujawniały maksymalną koncentrację w warstwie wewnętrznej.

Najwyższe zawartości wielu metali śladowych notuje się w obrębie końcówek gałązek, gdzie wraz ze spadkiem ich grubości stosunek kory do warstw podkorowych jest wyższy. Uwidacznia to szczególnie skład chemiczny przekroju gałązki świerku z rodzaju *Tsuga* (*western hemlock*), rosnącego w pobliżu kopalni złota Carolin Mine w Brytyjskiej Kolumbii (tab. 2). Zwraca uwagę podwyższona zawartość As, Au i Cr w obrębie końcówek gałązek. Wyniki oznaczeń uranu w różnowiekowych przyrostach gałązek świerku *Picea mariana* (Miller) BSP (*black spruce*) wykazały, że najwyższe koncentracje tego metalu występują w przyrostach 2- do 6-letnich (Dunn i in., 1992).

Igły lub liście zawierają, w porównaniu z gałązkami, mniej metali. Podlegają one również szybszym zmianom składu chemicznego w trakcie wzrostu (Migaszewski & Paślowski, 1996; Migaszewski, 1997, 1998a, b; Migaszewski & Gałuszka, 1997). Pnie zawierają znacznie mniej pierwiastków (z wyjątkiem srebra) niż pozostałe części morfologiczne i anatomiczne drzew. Jednak w przypadku silnego zanieczyszczenia kory i gałązek pyłem pochodzącym z emisji atmosferycznych, drewno pnia stosunkowo najlepiej rejestruje skład chemiczny gleby i/lub skały.

Rośliny wymagają wielu pierwiastków chemicznych (C, Ca, H, K, Mg, N, Na, O, P, S i mikroelementów) do

Tab. 3. Średnie zawartości Cu, Pb i Zn w różnych organach wybranych roślin (wg Turskiego i Barana, 1995)

Gatunek rośliny	Organ rośliny	Cu ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Pb ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Zn ($\mu\text{g g}^{-1}$)
bobik (<i>Vicia</i>)	nasiona	4,3	3,1	60,6
	słoma	9,6	8,4	180,2
	korzeń	23,4	42,4	465,0
gryka (<i>Fagopyrum</i>)	nasiona	6,2	8,5	39,7
	słoma	8,6	10,1	316,3
	korzeń	21,1	36,0	325,9
jęczmień (<i>Hordeum</i>)	nasiona	2,3	0,5	25,9
	słoma	7,2	4,8	112,8
	korzeń	18,5	22,7	158,4
kukurydza (<i>Zea</i>)	nasiona	2,8	0,7	21,0
	słoma	6,0	4,5	103,4
	korzeń	15,0	13,0	186,7
len (<i>Linum</i>)	nasiona	4,7	5,7	97,7
	słoma	5,7	8,7	112,3
	korzeń	9,3	11,0	135,0
rzodkiewka (<i>Raphanus</i>)	liście	5,7	4,7	254,3
	korzeń	2,7	2,7	113,7
sałata (<i>Lactuca</i>)	części nadziemne	8,7	12,8	226,2

podtrzymania swoich procesów życiowych. Kovalevskii (1976) zaproponował tzw. koncepcję bariery (*barrier concept*). Ujmując w skrócie, liczne gatunki roślin lub ich części składowe pobierają w różnym stopniu pierwiastki występujące w nadmiernych koncentracjach w podłożu glebowym lub skalnym (*barrier plants*). Zdolność przyswajania poszczególnych pierwiastków reguluje m.in. mechanizm wzrostu rośliny. Roślina może albo zmniejszyć absorpcję takich pierwiastków, gromadzić je w tkankach inertnych nie posiadających bezpośredniego wpływu na jej stan zdrowotny lub też akumulować je w aktywnych komórkach, odkładając na błonie komórkowej lub w różnych organellach wewnątrz komórek. Metale są też często unieruchamiane przez korzenie nie docierając tym samym do wyżej położonych części rośliny (King i in., 1984). Nadmiar siarki jest wydalany m.in. w postaci H_2S (Case & Krouse, 1980; Migaszewski & Paślawski, 1996; Migaszewski, 1997), a niektórych metali odpowiednio w postaci lotnych związków organicznych Hg, Pb i Sn (cyt. Kabata-Pendias & Pendias, 1992) lub Se (Herring, 1991).

Nieliczne gatunki roślin, zwane „akumulatorami” (*non-barrier plants, accumulators*), przyswajają pierwiastki w stopniu pozwalającym na osiągnięcie prawie takich samych koncentracji, jakie zaznaczają się w glebie lub skale. Terminem „hiperakumulatory” (*hyperaccumulators*) określa się rośliny gromadzące powyżej $1000 \mu\text{g g}^{-1}$ (ppm). Skrajnym tego przykładem jest gatunek *Aeolanthus biformifolius* De-Wild (*copper flower*) z prowincji Shaba w Zairze akumulujący do 1,3% miedzi (Manahan, 1994).

Zdaniem Bakera i in. (1988) pierwsza grupa roślin (*non-barriers*) posiada mechanizmy umożliwiające przekształcenie toksycznych związków nieorganicznych w izolowane inkluzje lub mniej szkodliwe połączenia organiczne. Na przykład miedź wchodzi w skład ponad 30 metaloenzymów, niezbędnych do podtrzymania procesów życiowych. W przypadku zbyt wysokiej koncentracji tego pierwiastka, w obrębie komórek mogą tworzyć się inkluzje, zawierające np. miedź w połączeniu z siarką (Bowen, 1985). Dotychczasowo-

we wyniki badań wykazują, że metal wychwycony przez komórkę przenika do cytoplazmy lub wakuoli pozakomórkowych. W komórkach metale są wiązane przez metalotioneiny i fitochelatyny (enzymy polipeptydowe), natomiast w wakuolach odpowiednio przez kwasy organiczne i fosforany cukrowe.

Rozważając powyższe zagadnienie, nie należy pomijać wpływu takich czynników, jak np.: kwasowości lub wilgotności gleb oraz ich składu chemicznego i mineralnego. Na uwagę zasługuje również fakt, że rośliny mogą pobierać pierwiastki bezpośrednio ze skał lub z migrujących wód podziemnych z pominięciem substratu glebowego. Przykładem tego ostatniego zjawiska jest wielkie złożo uranu występujące w formacji Athabaska Sandstone w kanadyjskiej prowincji Saskatchewan. Zawartość uranu wykazywała znaczne wahania ($5\text{--}886 \mu\text{g g}^{-1}$) w gałązkach świerku *Picea mariana* (Miller) BSP oraz brak większej zmienności ($1,8\text{--}2,5 \mu\text{g g}^{-1}$) w poziomie glebowym Bf (Dunn i in., 1992).

W dziedzinie eksploracji złóż stosuje się niecodzienne techniki badań, np.: analizę pyłków przenoszonych przez pszczoły (obszar badany pokrywa się ulami w określonej siatce), oznaczenia metali w wątrobie pszczoł wraz z wytyczeniem obszaru ich żerowania, użycie psów do poszukiwań otoczek z mineralizacją siarczkową na obszarach pokrytych utworami polodowcowymi. Ptak *el mine-ro* z Południowej Ameryki jest uznawany przez poszukiwaczy złota za zwiastuna występowania złóż tego cennego kruszcu. Wyjaśnienie jest dość proste — wymieniony ptak odżywia się jagodami drzewa mory, rosnącego w strefach złotonosnych żył kwarcowych.

Wśród mikroorganizmów, w prospekcji złóż największe zastosowanie znalazł gatunek bakterii *Bacillus cereus* Frankland et Frankland z uwagi na jego adaptację do różnych warunków geochemicznych środowiska przyrodniczego. Wymieniony gatunek okazał się najlepszym indykatorem występowania miedzionośnych żył kwarcowych w rejonie Cotter Basin w stanie Montana (Grimes, niepubl., cyt. Dunn i in., 1992).

Prospekcja geologiczna

Wyznaczanie przebiegu uskoków. Złożo złota związane z uskokiem Carlin w północno-środkowej części stanu Nevada zostało odkryte w 1980 r. w wyniku analizy ciemnych pasów na zdjęciach lotniczych. Pasy te powstały w wyniku odbarwienia bylicy (*Artemisia*) w warunkach podniesionego zwierciadła wód podziemnych w strefie uskoku (Seabrook, 1989). W krańcowych przypadkach obecność uskoku, torującego drogę solankom, może prowadzić do całkowitego wyginięcia roślinności, co zostało uchwycone na zdjęciach lotniczych na niektórych obszarach Turkmenii (Viktorov, 1961).

Innym przykładem było wykorzystanie krzewu mimo-zowatego (*Prosopis* sp.) do wyznaczenia uskoków w utworach jurajskich na SW od Nogales (Meksyk). Wymienione krzewy występowały jedynie w obrębie stref uskokowych,

co wiązało się z panującym tam dogodnym reżimem wodnym (Dunn i in., 1992).

Na obszarach wyżej położonych (Gila Mountains w Arizonie), wymieniony *Prosopis* sp. jest zastępowany przez gatunek *Lycium* sp. (tomatilla); ten ostatni stanowi również bardzo dobry wskaźnik do określania przebiegu uskoków. Występuje tam również malwa (*Hibiscus denudatus* Bentham), której obecność wiąże się albo z większą wilgotnością gleby lub, co wydaje się bardziej prawdopodobne, z mineralizacją kruszczową towarzyszącą strefom uskokowym (Dunn i in., 1992).

Poszukiwanie złóż. Jednym z przykładów zastosowania zdjęć lotniczych (*Landsat multispectral scanner images*) i roślin w prospekcji złóż jest odkrycie złoża limonitu o powierzchni ok. 20 x 10 km na obszarze Lordsburg Mesa w Nowym Meksyku (Raines i in., 1985). W jego granicach zanotowano szczególnie duże nagromadzenia wspomnianego *Prosopis* sp..

Żółtozielony krzew *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq. rosnący na zboczach zwietrzałych kwarcowo-luszczykowych łupków metamorficznych z brekcją tektoniczną, został wykorzystany do wyznaczania stref występowania rud ołowiu w północnej części pustyni Sonora (pogranicze południowej Arizony i Meksyku). Zdaniem Dunna (Dunn i in., 1992) wymieniony krzew rośnie również na trzeciorzędowych cynośnych ryolitach, występujących w środkowo-wschodniej części Arizony. Inny gatunek *D. lobulata* F. Mueller pokrywa złotożółte doleryty Golden Mile na obszarze długości ok. 110 km między Kalgoorlie i Menzies (Australia). Na wschód od Coolgardie gatunek ten rośnie również na silu metagabrowo-dolerytowym; w rejonach płytko występujących porfirów zastępuje go asocjacja *Eucalyptus salmonophloia* F. Muell — *Atriplex hymenotheca* Moq.

Gatunek *Eriogonum ovalifolium* Nutt. występował nad żyłami zawierającymi mineralizację miedziową w Cotter Basin (Montana). Przebieg stref mineralizacji wyznaczono nie tylko na podstawie zasięgu tego gatunku i składu chemicznego gleby, lecz przede wszystkim obecności w niej wymienionych już bakterii *Bacillus cereus*.

W Górach Sweetwater na terenie Mono County w Kalifornii, Chaffee (inf. ustna) stwierdził występowanie *Eriogonum wrightii* Torr. ex Benth. Zasięg tego gatunku ograniczał się tylko do polany, położonej w obrębie kredowych monzonitów kwarcowych zawierających miedź i molibden. Brak drzew w tym miejscu był przypuszczalnie związany ze znacznym skażeniem gleb.

Badania prowadzone przez Chaffee (1975) w południowo-zachodniej części USA potwierdziły wcześniejsze obserwacje poczynione przez Cannon (1971, cyt. z Dunn i in., 1992) dotyczące związku między występowaniem maku kalifornijskiego (*Eschscholtzia mexicana* Greene) a obecnością w podłożu porfirowych złóż miedzi. Strefy zawierające mineralizację miedziową pokrywają się w okresie kwitnienia wymienionej rośliny charakterystycznym żółtym kobiercem.

W lasach północnej części Saskatchewan wykorzystuje się wyniki badań biogeochemicznych gałązek olchy, m. in. gatunku *Alnus crispa* (Ait.) Pursh, przy poszukiwaniu złóż złota, podobnie jak gałązek i pni świerku *Picea mariana* (Miller) BSP, sosny *Pinus banksiana* Lamb. i krzewu *Ledum groenlandicum* Oeder złóż platyny i palladu (Dunn, 1986). W obrębie obszarów perspektywicznych zawartość złota w popiele olchy dochodziła do 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (tło geochemiczne — 10 $\mu\text{g kg}^{-1}$), natomiast platyny i palladu w popiele gałązek

świerku osiągała odpowiednio 880 i 1350 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (tło — 10 i 2 $\mu\text{g kg}^{-1}$).

Purpurowo kwitnący gatunek pokrzywy *Haumaniastrum katangense* (S. Moore) Duvigneaud et Planck wykorzystano przy poszukiwaniu hutniczych artefaktów starożytnej kultury kabambijskiej w środkowej Afryce (Baker i in., 1988).

Rekultywacja biologiczna obszarów pogórnicych oraz terenów skażonych

Jak już wspomniano we wstępie rośliny są przydatne nie tylko w pracach geologicznych związanych z poszukiwaniem złóż surowców mineralnych i wytrasowaniem uskoków, lecz również przy biologicznej rekultywacji obszarów pogórnicych.

Najbardziej uciążliwa dla środowiska przyrodniczego jest eksploatacja odkrywkowa, która prowadzi m.in. do dewastacji obszarów leśnych i rolnych. Podstawowym celem rekultywacji obszarów pogórnicych (wyróbk, zwalów odpadów mineralnych i osadników) jest przywrócenie właściwej topografii terenu, uregulowanie stosunków wodnych, a także detoksykacja i odtworzenie żyzności podłoża. Po wykonaniu wstępnych zabiegów technicznych, odtwarza się warstwę glebową poprzez wprowadzenie odpowiednio dobranych gatunków roślin siedlisk ruderalnych (np. bylica pospolita, pokrzywa zwyczajna, perz właściwy). Do roślin pionierskich nadających się do zarastania terenów zdegradowanych należą na przykład: starzec lepki, podbiał pospolity, przymiotno kanadyjskie. Rośliny znajdują zastosowanie w trzech głównych etapach rekultywacji (Turski & Baran, 1995):

- 1) stabilizacji gruntów, zabezpieczenia przed erozją i poprawienia cech estetycznych krajobrazu,
- 2) zastosowania filtrów z roślinności wysokiej i niskiej w celu ochrony przed zanieczyszczeniami,
- 3) inicjowania i stymulowania procesów glebotwórczych na terenach bezglebowych i zdegradowanych.

W przypadku wytypowania obszaru zdegradowanego do zagospodarowania rolnego, jednym z najważniejszych problemów jest ocena nie tylko ilości metalu zakumulowanego w różnych częściach roślin przeznaczonych do spożycia, lecz również formy jego związania (Severson, 1990). Poszczególne organy roślin uprawnych ujawniają zróżnicowany stopień kumulacji metali śladowych. Tak np. odmiana dyni squash, pomidory, rzodkiewki, ziemniaki i zboża akumulują stosunkowo niewielkie ilości kadmu i cynku w częściach jadalnych, w porównaniu z częściami niejadalnymi lub liśćmi; różnica dochodzi do kilkudziesięciu razy (Pietz i in., 1983). Rozkład cynku, miedzi i ołowiu w różnych częściach anatomicznych wybranych roślin przedstawiono w tab. 3. Zwraca uwagę niska koncentracja wymienionych metali w nasionach w porównaniu z korzeniami, co wiąże się ze zwiększoną zdolnością do wiązania metali w ryzodermie korzeni, uniemożliwiając tym samym ich przenikanie do cytoplazmy. Podobne wyniki dały również oznaczenia metali śladowych w różnych częściach anatomicznych roślin uprawnych, wykonane w Agricultural University w Wageningen (Houba & Uittenbogaard, 1994).

Wpływ substratu glebowego i podłoża skalnego na skład chemiczny roślin determinuje wybór odpowiedniego spektrum taksonomicznego. Powinien on być poprzedzony szczegółowymi badaniami gleby i/lub skały, obejmującymi oznaczenia składu chemicznego i mineralnego, zawartości substancji organicznej i biomasy, zawartości kationów wymienionych (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), odczynu pH, kwasowości

hydrolitycznej (Hh), przewodnictwa elektrycznego, składu ziarnowego, itp (Williams & Schuman, 1987; Migaszewski, 1998a). Należy przy tym pamiętać, że niewielka zmiana właściwości fizyczno-chemicznych gleby, wywołana np. fluktuacją warunków klimatycznych, może wpłynąć na przebieg pobierania większości pierwiastków śladowych (w tym także biopierwiastków) (Kabata-Pendias & Pendias, 1992; Kabata-Pendias, 1993).

Najtrudniejsze do ponownego zagospodarowania są gleby, podłoże skalne i odpady zawierające znaczne koncentracje pierwiastków śladowych (As, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Tl, Zn) oraz substancji toksycznych pochodzenia nieorganicznego (cyjanków, azbestu) i organicznego (węglowodorów alifatycznych i pierścieniowych, chlorobifenili, fenoli, pestycydów) o średnim czasie pobytu w środowisku od kilkunastu do kilkuset lat (Manahan, 1994). Prowadzą one do chemicznej i biologicznej degradacji gleby, jednym z jej przejawów jest niszczenie bakterii przyswajających azot atmosferyczny. Jeśli skażenie objęło tylko cienką warstwę gleby, wówczas można zastosować zabieg całkowitego usunięcia tej warstwy lub też jej wymieszania z materiałem organicznym z domieszką wapna i fosforanów. Wapno zwiększa odczyn pH, a powstałe siarczany lub fosforany unieruchamiają większość metali śladowych. Stosowane są również warianty techniczne polegające na doprowadzeniu substancji toksycznych do formy rozpuszczalnej, a następnie ich wylugowania lub też na ich całkowitym unieruchomieniu. Przykładem takich rozwiązań są próby zmniejszenia nadmiernej koncentracji selenu w glebach Doliny San Joaquin w Kalifornii (Gough, 1993).

Zanieczyszczenia chemiczne można usunąć z gleb i podłoża skalnego również na drodze zabiegów fitomeliorycyjnych. Polegają one na uprawie szybko rosnących roślin, charakteryzujących się zwiększonymi zdolnościami pobierania pierwiastków śladowych (Maciak, 1996). Szczególnie przydatne są rośliny wyróżniające się dużym przyrostem masy zielonej, jak np.: gryka, koniczyzna, kukurydza, lucerna, owies, rzepak, rzepik, żyto. Po spaleniu tych roślin można odzyskać odpowiednie metale, np. Cu, Pb, Zn. Nie należy jednak obsadzać terenów zdegradowanych chemicznie gatunkami roślin, które stanowiłyby potencjalną przyczynę chorób u zwierząt i człowieka. Przykładem są rośliny z rodzajów *Haplopappus*, *Xylorhiza* lub *Astragalus* akumulujące do 1% Se (Emerick & DeMarco, 1991). Ich spożywanie wywołuje u bydła spadek wagi i prawdopodobnie reproduktowności oraz różne zaburzenia w centralnym układzie nerwowym (James i in., 1990).

Zakończenie

Jak wykazują podane wyżej przykłady, badania geobotaniczne i biogeochemiczne mają bardzo duże znaczenie przy poszukiwaniu złóż oraz zagospodarowaniu terenów pogórnicznych i skażonych. W przypadku prospekcji geologicznej trzeba jednak pamiętać, że o rozkładzie pierwiastków chemicznych w roślinach decyduje nie tylko substrat glebowy i podłoże skalne, lecz również emisje skażeń atmosferycznych. Te ostatnie odgrywają szczególnie dużą rolę na obszarach przyległych do aglomeracji miejsko-przemysłowych. Z tego też względu w pierwszej fazie badań biogeochemicznych należy określić czy istniejąca anomalia geochemiczna ma charakter naturalny czy antropogeniczny.

Wykorzystanie roślin do obsadzania terenów skażonych jest trudnym przedsięwzięciem z uwagi na fakt, że zachowanie się wielu gatunków zależy od koncentracji i formy

występowania pierwiastków śladowych, efektu antagonistycznego, synergistycznego lub addytywnego towarzyszących kationów i anionów, jak również od szeregu czynników klimatycznych, topograficznych, edaficznych, fizjologicznych i genetycznych. Każdy przypadek musi być badany oddzielnie, a wybór właściwego gatunku rośliny powinien nastąpić po szczegółowej analizie składu fizyczno-chemicznego i mineralno-petrograficznego gleby i skały.

Autorzy składają podziękowanie dr P. J. Lamothe i dr M. A. Chaffee ze Służby Geologicznej Stanów Zjednoczonych w Denver za dyskusję i nadesłaną literaturę. Szczególne podziękowania należą się Pani Cathy Ager z wymienionej Służby Geologicznej za korektę nazw łacińskich amerykańskich gatunków flory, jak również recenzentowi za wkliwie i krytyczne uwagi.

Literatura

- BAKER A. J. M., BROOKS R. & REEVES R. 1988 — Growing for gold ... and copper .. and zinc. *New Scientist*, 117 (1603): 44–48.
- BOWEN H. J. M. 1985 — The cycles of copper, silver and gold. [W:] *The Natural Environment and the Biogeochemical Cycles 1* (D). Hutzinger (ed.). Springer-Verlag, Bayreuth, Germany: 1–27.
- BROOKS R. R. 1979 — Indicator plants for mineral prospecting — a critique. *J. Geochem. Exploration*, 12: 67–78.
- CANNON H. L. 1957 — Description of indicator plants and methods of botanical prospecting for uranium deposits on the Colorado Plateau. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1030M: 399–516.
- CANNON H. L. 1960 — The development of botanical methods of prospecting for uranium on the Colorado Plateau. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1085A: 1–50.
- CASE J. W. & KROUSE H. R. 1980 — Variations in sulphur content and stable sulphur isotope composition in vegetation near an SO₂ source at Fox Creek, Alberta, Canada. *Oecologia* (Berlin), 44: 248–257.
- CHAFFEE M. A. 1975 — Geochemical exploration techniques applicable in the search for copper deposits. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 907-B: 1–26.
- DUNN C. E. 1986 — Biogeochemistry as an aid to exploration for gold, platinum and palladium in the northern forests of Saskatchewan, Canada. *J. Geochem. Exploration*, 25: 21–40.
- DUNN C. E., ERDMAN J. A., HALL G. & SMITH S. C. 1992 — Biogeochemical Exploration Simplified. Notes for a short course on methods of biogeochemical and geobotanical prospecting — with emphasis on arid terrains: 1–187 (niepubl.).
- EMERICK J. C. & DeMARCO L. S. 1991 — Geobotany of Selenium. *U.S. Geol. Surv. Circular*, 1064: 35–41.
- GOUGH L. P. 1993 — Understanding Our Fragile Environment. Lessons from Geochemical Studies. *U.S. Geol. Surv. Circular*, 1105: 1–34.
- HERRING J. R. 1991 — Selenium Geochemistry — A Conspectus. *U.S. Geol. Surv. Circular*, 1064: 5–24.
- HOUBA V. J. G. & UITTENBOGAART J. 1994 — Chemical composition of various plant species. *International Plant-Analytical Exchange (IPE)*. Department of Soil Science and Plant Nutrition. Wageningen Agricultural University: 1–226.
- JAMES L. F., MAYLAND H. F. & PANTER K. E. 1990 — Selenium Poisoning in Livestock. *U.S. Geol. Surv. Circular*, 1064: 75–79.
- KABATA-PENDIAS A. & PENDIAS H. 1992 — Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Inc.: 1–365.
- KABATA-PENDIAS A. 1993 — Behavioural properties of trace metals in soils. *Applied Geochemistry*, Suppl. Issue, 2: 3–9.
- KING H. D., CURTIN G. C. & SHACKLETTE H. T. 1984 — Metal Uptake by Young Conifer Trees. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 1684: 1–23.
- KOVALEVSKII A. L. 1987 — Biogeochemical Exploration for Mineral Deposits (Second Ed.). VNU Science Press, Utrecht, The Netherlands: 1–224.
- MACIAK F. 1996 — Ochrona i rekultywacja środowiska. Wyd. SGGW. Warszawa: 1–348.
- MANAHAN S. E. 1994 — Environmental Chemistry. CRC Press, Inc.: 1–811.
- MIGASZEWSKI Z. M. 1997 — Wpływ pierwiastków chemicznych i izotopów siarki na środowisko przyrodnicze Gór Świętokrzyskich. Podsumowanie. *Arch. PIG w Kielcach* nr 1436: 1–40 + aneks: 1–40.
- MIGASZEWSKI Z. M. 1998a — Metodologia badań geochemicznych gleb i biowskaźników roślinnych. *Prz. Geol.*, 46: 159–163.
- MIGASZEWSKI Z. M. 1998b — Determining Organic Compound Ratios

in Soils and Vegetation of the Holy Cross Mts, Poland. Water, Air, and Soil Pollut. (w druku).

MIGASZEWSKI Z. M. & GAŁUSZKA A. 1997 — Wykorzystanie sosny do badań bioindykacyjnych. *Prz. Geol.*, 45: 403–407.

MIGASZEWSKI Z. M. & PASIĄWSKI P. 1996 — Trace element and sulfur stable isotope ratios in soils and vegetation of the Holy Cross Mountains. *Geol. Quart.*, 40: 575–594.

PIETZ R. I., PETERSON J. R., HINESLY T. D., ZIEGLER E. L., REDBORG K. E. & LUE-HING C. 1983 — Sewage sludge application in calcareous strip-mine spoil: II. Effects on spoil and corn cadmium, copper, nickel and zinc. *J. Environm. Quality*, 12: 463–467.

RAINES G. L., ERDMAN J. A., McCARTHY J. H. & REIMER G. M. 1985 — Remotely sensed limonite anomaly on Lordsburg Mesa, New Mexico: possible implications for uranium deposits. *Economic Geology*, 80: 575–590.

SEABROOK J. 1989 — A reporter at large— Invisible gold. *The New Yorker* (24. 04): 69–81.

SEVERSON R. C. 1990 — Characteristics of Coal-Mine Wastes for Rehabilitation Work. *U.S. Geol. Surv. Circular*, 1033: 11–19.

SIUTA J. 1990 — Struktura przestrzenna degradacji i odnowa biologicznie czynnej powierzchni ziemi w Polsce. *IOŚ. Warszawa*: 1–128.

THURMAN D. & HARDWICK K. 1988 — How plant survive an overdose of metal. *New Scientist*, 117 (1603): 44–45.

TURSKI R. & BARAN S. 1995 — Degradacja, ochrona i rekultywacja gleb. *WAR. Lublin*: 1–163.

VIKTOROV S. V. 1961 — A brief history review and the present status on the geobotanical method in geology. *Intern. Geology Review*, 3: 408–411.

WILLIAMS R. D. & SCHUMAN G. E. 1987 — Reclaiming mine soils and overburden in the western United States. *Analytic parameters and procedures. Soil Conservation Society of America*: 1–336.