

Wykorzystanie teledetekcji hiperspektralnej w analizie roślinności zanieczyszczonej metalami ciężkimi

Application of Imaging Spectroscopy in analysis of heavy metals contaminated plants

Bogdan ZAGAJEWSKI
Jerzy LECHNIO
Marcin SOBCZAK

The problem of heavy metal pollution of the environment is getting an increasing attention in research. To solve it, a close cooperation of international partners adopting and combining various research methods is required. The Hungarian Geological Institute (MAFI) together with the International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), the Netherlands, and the Warsaw University Remote Sensing of Environment Laboratory (WURSEL), Poland, carried out studies to develop remote sensing methods of detecting vegetation pollution caused by heavy metals.

The possibility of using remote sensing in analysis of plant contamination by heavy metals is confirmed by many studies carried out in recent years. Many publications can be found in literature describing methods of assessment of the pollution by means of remote sensing. Results of this also confirm the usefulness of remote sensing techniques in vegetation contamination analysis.

The main research area is located in northern Hungary, near the village Gyongyosoroszi, on the tailings of an old zinc and lead mine. The heavy metal contaminated materials of the tailings was re-cultivated by an uncontaminated soil cover. Some depressions collected rainwater on top of the tailings in the form of small lakes surrounded by reed beds (*Phragmitetum communities*).

The following measurements characterising different aspects of the vegetation and its habitat condition were carried out:

- hyperspectral measurements – allowing for recognition of spectral signatures of researched plants and communities;
- measurements of Accumulated Photosynthetic Active Radiation (APAR) – balance allowing crop yield analysis;
- survey of Leaf Area Index (LAI) – characterising biomass, plant coverage compactness and vegetation canopy structure;

- dry/fresh steams index;
- plant heat and water balance assessment – leaf and air temperatures;
- heavy metal content in soil and leaves of *Phragmites australis*.

The statistical analysis of measured spectral curves of analysed vegetation was performed using the t-Student test. Results showed a statistically significant difference between plants with more and less contamination. The value of 0.05 was chosen as the main significance level at which the difference was analysed. Also the 0.01 and 0.001 levels were tested to show how the phenomenon behave when more restriction is applied.

Results using all three significance levels confirmed that in most cases functionality of the photosynthetic apparatus of contaminated vegetation is reduced due to heavy metals content. This can be measured both as a result of cell structure changes and in water management change, which give direct impact on physiological and biometrical indices that can be quantitatively measured by the instruments.

Application of presented method requires further research, leading to identification of useful spectral bands of hyperspectral images. Proper band combination will help in better mapping of polluted plants. However, the spectral measurements, which play a superior role in presented research, would not provide an adequately broad perspective of the method. Plant physiology studies as well as detailed chemical analyses are required to fulfil the task of heavy metal contamination studies

Special thanks to Dr. Peter Kardevan (MAFI, Budapest), Dr. Zoltan Vekerdy, MSc. Jeanna Hyde Hecker and colleagues from the ITC, the Netherlands for great field campaign and significant scientific support for the paper.

Wstęp

Współczesne badania środowiska wymagają zaangażowania metod czerpiących z wielu dyscyplin naukowych. Pozwala to na szczegółowe rozpoznanie badanych zjawisk oraz integrację uzyskanych danych i syntetyzowanie wniosków. Względny użyteczny, w tym wymagana wysoka operacyjność wyników wielowątkowej analizy stanu środowiska, sprawiają, że funkcję spinającą w tym względzie może spełniać teledetekcja hiperspektralna. Analiza widma elektromagnetycznego w kilkuset wąskich (1-2 nm) zakresach promieniowania dostarcza szczegółowych informacji o badanym obiekcie. Wiąże bowiem strukturę widma elektromagnetycznego z specyficznymi cechami, takimi jak chociażby związki budujące badane obiekty i pokrywające ich powierzchnię oraz procesy chemiczne w nich zachodzące (np. w przypadku roślinności: fotosynteza, barwniki fotosyntetyczne czynne, struktury komórkowe roślin).

Niniejsza publikacja jest przykładem teledetekcyjnych badań naziemnych, które wykorzystują metody badawcze teledetekcji, fizjologii roślin oraz geochemii i chemii analitycznej, do oceny stanu i kondycji roślinności poddanej działaniu substancji toksycznych, jakimi są metale ciężkie. Mieści się zatem w nurcie szeroko pojmowanych badań indykacyjnych. Służy doskonaleniu metod pozwalających na interpretację uzyskanych wyników badań biomonitringowych chociażby w aspekcie automatyzacji wnioskowania czy podniesienia walorów operacyjnych przeprowadzanych badań (Madejón, Marañoń, Murillo, Robinson, 2006; Mertens, Luysaert, Verheyen, 2005).

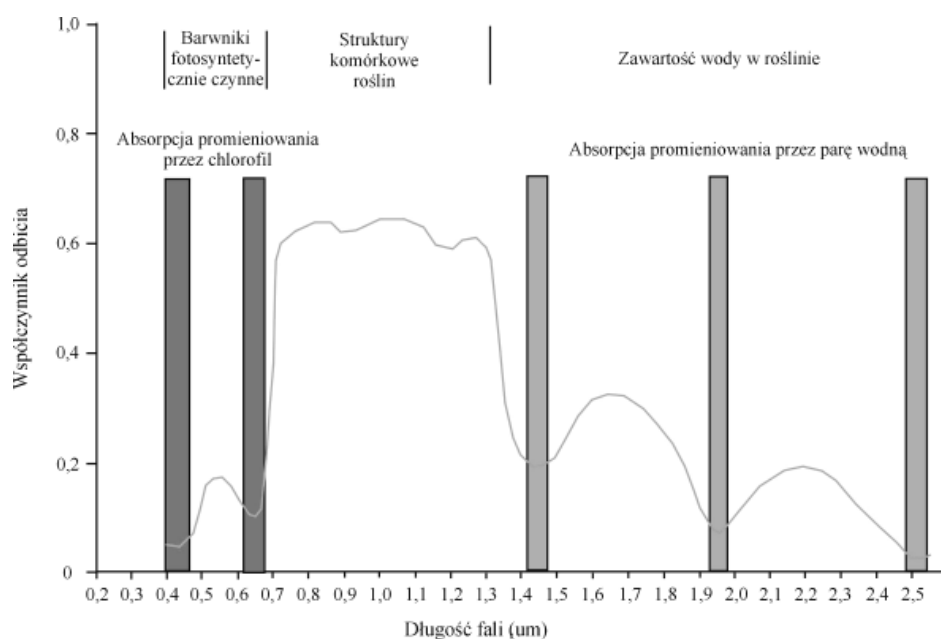
W tego typu badaniach należy brać pod uwagę specyficzne właściwości biogeochemiczne badanych roślin, w tym przypadku, ze względu na cel prowadzonych analiz, nie ma to podstawowego znaczenia, gdyż główny nacisk położony jest na określenie możliwości wykorzystania teledetekcji hiperspektralnej do identyfikacji zanieczyszczenia roślinności metalami ciężkimi, a nie stwierdzenia ilościowego związku z poziomem antropopresji. Niniejsze badania należą do grupy podstawowych, testujących możliwość stosowania metody do zobrażeń lotniczych i satelitarnych.

Poszczególne gatunki roślin charakteryzują odmienne zdolności do pochłaniania i neutralizacji zanieczyszczeń. Wynika to zarówno ze specyfiki poszczególnych gatunków roślin, jak i odmiennych funkcji fizjologicznych określonych

pierwiastków i związków chemicznych, w tym ich oddziaływań fitopatologicznych. Czynniki te, uzewnętrzniające się poprzez procesy fizyko-chemiczne, fizjologiczne i patologiczne w postaci zmian dystrybucji promieniowania odbitego, transmitowanego oraz absorbowanego przez rośliny, mogą być rejestrowane przy zastosowaniu metod hiperspektralnych. Powinno się zatem pamiętać o tym, że wybrane gatunki roślin mogą być reprezentatywne w stosunku do ściśle określonych typów zanieczyszczeń. Innymi słowy nie ma biowskaźnika, który byłby w stanie reprezentować bardzo szerokie spektrum oddziaływań antropogenicznych w sensie ich jednoznacznej relacji do rejestrowanych poziomów koncentracji w wybranych bioakumulatorach (Mertens, Luysaert, Verheyen, 2005)

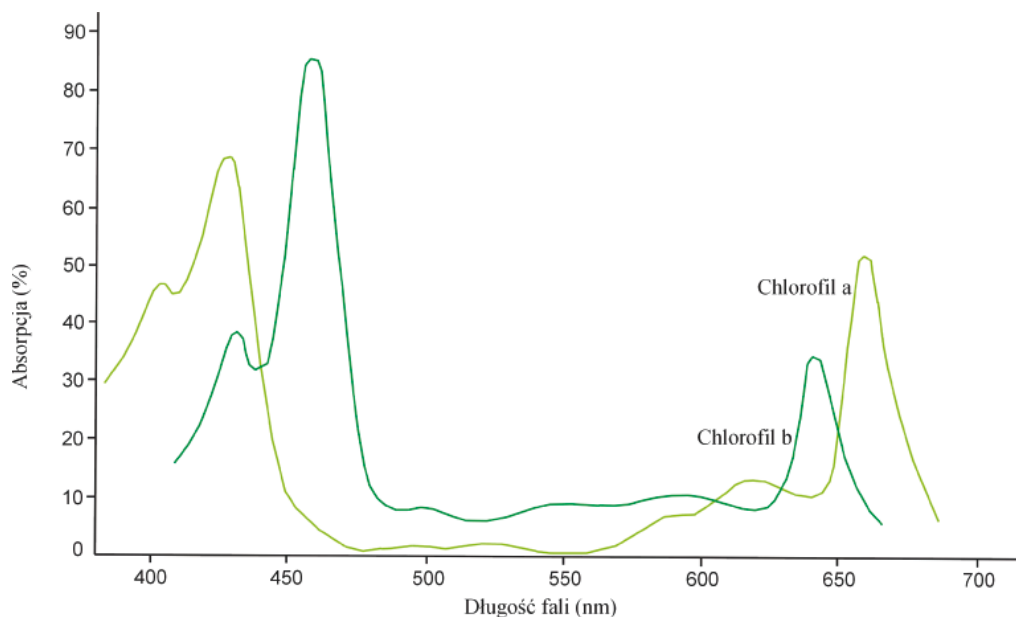
W wielu przypadkach obecność substancji toksycznych jest stosunkowo łatwo neutralizowana przez rośliny gdyż np. są wbudowywane w struktury komórkowe (ściany komórkowe, wakuola) lub zachodzi zmiana formy ich występowania (np. związki kompleksowe), co sprawia, że nie biorą one aktywnego udziału w fundamentalnych procesach życiowych roślin. W sytuacji dużej tolerancji na znaczne stężenia substancji toksycznych, ich nienaturalnie wysoka zawartość nie musi się przekładać na obserwowaną intensywność wegetacji, nawet, gdy substancje te oddziałują na rośliny przez długi czas.

Powyższe względy sprawiają, że w biomonitringu konieczne jest uwzględnianie cech gatunkowych roślin, ale jednocześnie muszą być spełnione inne warunki. Kluczowe znaczenie odgrywa w tym przypadku dobór biowskaźników, charakteryzujących cały teren (Wolterbeek, 2002).



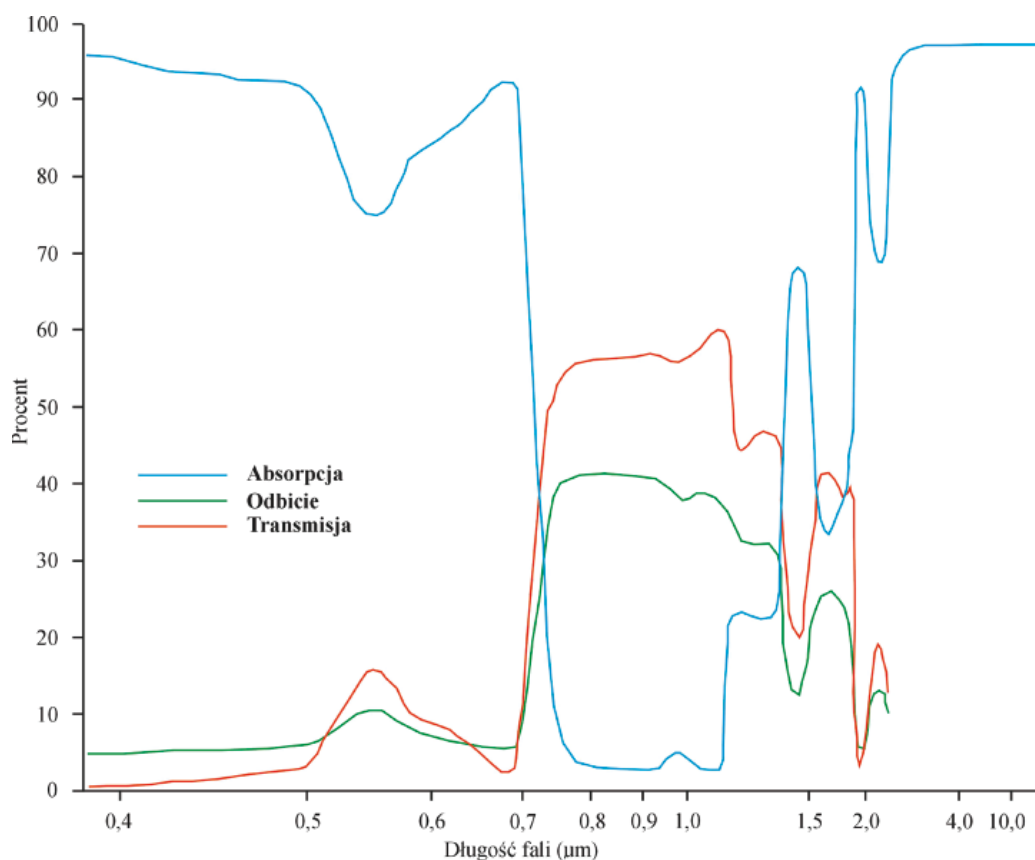
Ryc. 1. Czynniki determinujące kształt i wielkość odbicia spektralnego roślinności (źródło: Gates, Keegan, Schleter, Weidner, 1965, zmodyfikowane)

Fig. 1. Factors determining shape and amount of vegetation spectral reflectance curve (source: Gates, Keegan, Schleter, Weidner, 1965, modified)



Ryc. 2. Absorpcja promieniowania elektromagnetycznego przez chlorofil a i b pomierzona w spektrofotometrze (Hoag et al., 2000 zmodyfikowane).

Fig. 2. Electromagnetic radiation absorption by chlorophyll a & b measured in spectrophotometer (Hoag et al., 2000 modified)



Ryc. 3. Krzywe dominujących procesów promieniowania rejestrowanych w analizie roślinności z wykorzystaniem narzędzi hiperspektralnych (źródło: Gates, Keegan, Schleiter, Weidner, 1965, zmodyfikowane)

Fig. 3. Spectral curves of dominating processes registered in vegetation analysis using hyperspectral tools (source: Gates, Keegan, Schleiter, Weidner, 1965, modified)

W badaniach teledetekcyjnych podstawowym elementem jest krzywa odbicia spektralnego. Uwidacznia ona właściwości bio-chemiczne, fizyko-chemiczne i bio-fizyczne badanych obiektów. Wyselekcjonowane długości fal elektromagnetycznych odzwierciedlają w stały i charakterystyczny sposób poszczególne procesy, charakter wiązań i typ molekuł chemicznych. To z kolei jest rejestrowane w postaci absorpcji lub emisji ściśle określonych częstotliwości fal i kwantów promieniowania, pozwalając na identyfikację poszczególnych obiektów i ich stanu (Petykiewicz, 1986; Bogusz, Garbarczyk, Krok, 1997).

W badaniach nad roślinnością, zakres widzialny promieniowania elektromagnetycznego charakteryzuje się niewielkim odbiciem i transmitancją ze względu na dużą absorpcję promieniowania przez nienasycony szkielet węglowy barwników fotosyntetycznie czynnych (Ryc. 1.) (Leopold, Kriedmann, 1975; Swain, Davis, 1978). Absorpcja promieniowania zachodzi w ściśle określonych przedziałach widma, co jest wynikiem przejścia elektronów (najczęściej n) w obrębie struktur molekularnych barwnika na wyższy poziom energetyczny (Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001)

W roślinach wyższych ze względu na ilość przetwarzanej energii najważniejszą rolę odgrywa chlorofil a, (maksymalna absorpcja przypadają dla długości fal 420, 490 i 660 nm (Ryc. 2.)). Wspomagającą rolę odgrywa chlorofil b (absorbancja dla 435 i 643 nm), barwniki pomocnicze i ochronne: karotenoidy (α -karoten: 420, 440 i 470 nm i β -karoten: 425, 450 i 480 nm), a także ksantofile (425, 450 i 475 nm), choć te ostatnie absorbują stosunkowo niewielkie ilości promieniowania (Belward, 1991).

W bliskiej podczerwieni absorpcja promieniowania jest stosunkowo niewielka (Ryc. 3). Odbicie promieniowania determinowane jest w tym przypadku głównie anatomią liścia. Pomiędzy górną a dolną epidermą (warstwą otaczającą liść) znajduje się miękisz asymilujący (mezofil) (Ryc. 4).

W zdecydowanej większości przypadków spotykane są dwie jego postacie: palisadowy i gąbczasty. Miękisz palisadowy występuje w formie jednej lub dwóch warstw pod górną epidermą. Jest on bogaty w chloroplasty i cechuje się dużym upakowaniem komórek, z niewielkimi przestrzeniami wypełnianymi powietrzem.

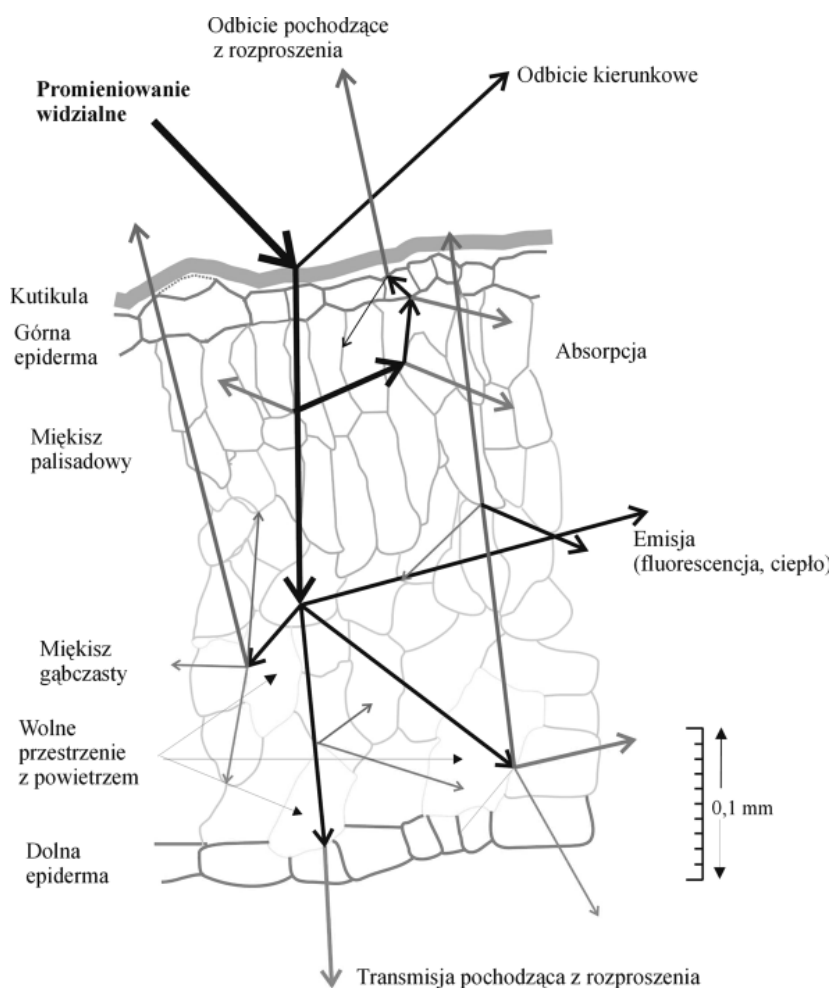
Z kolei miękisz gąbczasty luźno występuje w spodniej części liścia, tworząc przestrzenie wypełnione powietrzem, szczególnie w okolicach aparatów szparkowych (arenchyma).

W wielu przypadkach (np. trawy, rośliny wodne, nagozależkowe) nie obserwuje

się dużego zróżnicowania mezofilu na miękisz gąbczasty i palisadowy (Zurzycki, Michniewicz, 1985). Z punktu widzenia intensywności odbicia promieniowania podczerwonego, ważniejsza jest liczba przestrzeni, niż ich objętość, gdyż obniża to możliwość wysycenia tkanek wodą, a przez to wzmacnia odbicie promieniowania (Buschmann, Nagel, 1993). W przypadku roślin, u których dominuje bardziej luźne ułożenie miękiszu, odbicie promieniowanie sięga nawet 80 % (Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001).

U roślin iglastych dominującym rodzajem miękiszu jest miękisz palisadowy. Charakteryzuje się on ścisłym upakowaniem komórek (dzięki występowaniu wydłużonych i regularnie przylegających do siebie struktur). Ogranicza to ilość wolnych przestrzeni, relatywnie zwiększając zawartość wody (np. obecnej w wakuolach) oraz wzmagając absorpcję promieniowania podczerwonego.

Z punktu widzenia badań nad stanem i kondycją roślinności bardzo istotne jest przejście pomiędzy zakresem widzialnym i bliską podczerwienią. W roku 1978 W. Collins (Collins, 1978) zdefiniował ten przedział



Ryc. 4. Schematyczny przekrój poprzeczny przez liść wraz z lokalizacją odbicia, rozpraszania i absorpcji promieniowania (źródło: Gates, Keegan, Schleter, Weidner, 1965, zmodyfikowane)

Fig. 4. Leaf cross section with indication of reflectance, scattering and absorption of radiation (source: Gatek, Keegan, Schleter, Weidner, 1965, modified)

spektrum (690-720 nm) jako krawędź czerwieni (ang. *red-edge*) i wykazał, że jest to jeden z bardziej istotnych zakresów widma, ponieważ wiąże ze sobą w sposób jakościowy i ilościowy działanie chlorofilu (minimum przebiegu krzywej wynika z absorpcji promieniowania z czerwonego zakresu) oraz wewnętrznej struktury liścia definiowanej odbiciem w bliskiej podczerwieni. Laboratoryjne analizy hiperspektralne wykazały, iż możliwe jest określenie punktu przegięcia krzywej, co znacząco wpływa na walory indykacyjne metody w odniesieniu do badania kondycji roślinności. Pomiaru J. Clevers i C. Buekera (Clevers, Bueker 1991; Bueker, Clevers 1992) wykazały iż najbardziej istotny w analizie kondycji roślinności jest punkt przegięcia funkcjonujący w zakresie 670 i 780 nm (3):

$$\lambda_{\text{red-edge}} = 700 + 40((R_{\text{red-edge}} - R_{700}) / (R_{740} - R_{700})) \quad (3)$$

Gdzie:

$$\lambda_{\text{red-edge}} - \text{punkt przegięcia krawędzi czerwieni,}$$

$$R_{\text{red-edge}} = (R_{670} + R_{780}) / 2$$

$$R_{700, 740} - \text{spektralny współczynnik odbicia.}$$

Wielu badaczy podkreśla, że wskaźnik $R_{\text{red-edge}}$ jest lepszym indikatorem stanu barwników, w szczególności chlorofilu, niż powszechnie wykorzystywany NDVI. Podobnie wartość wskaźnika $\lambda_{\text{red-edge}}$ dobrze koreluje z zawartością chlorofilu w liściach (Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001).

W średniej podczerwieni, intensywność odbicia determinowana jest również zawartością wody, która silnie absorbuje promieniowanie. Zwiększona zawartość wody w tkankach nie tylko obniża odbicie w przedziałach absorpcji wodnej, ale także w innych zakresach, gdyż promieniowanie z tego zakresu oddziałuje z molekułami wody poprzez wibracje i rotacje substancji zawierających grupy hydroksylowe (Belward, 1991).

Z innych substancji obniżających odbicie należy wymienić ligninę, celulozę, skrobię, białko. Minima te na krzywej odbicia spektralnego nie są aż tak duże, jak dla wody, jednakże w przypadku suchych liści można je zarejestrować wykorzystując techniki hiperspektralne.

Głównym celem niniejszego artykułu jest metodyczna prezentacja badań zrealizowanych przez Zakład Teledetekcji Środowiska WGiSR UW w sierpniu 2002. Prace te zostały przeprowadzone wspólnie z kolegami z Węgierskiego Instytutu Geologicznego (MAFI) oraz ITC w ramach europejskiego projektu HySens. Pomiaru terenowe wykonano w okolicach miejscowości Gyöngyösorosi (północno-wschodnie Węgry) na obszarze byłej kopalni ołowiu i cynku.

Artykuł przedstawia zarys stosowanej metodyki oraz najważniejsze wyniki badań nad trzciną pospolitą porastającą brzegi zbiorników poflotacyjnych, traktowaną jako bioindykator zanieczyszczeń metalami ciężkimi.

Jak wiadomo, rośliny pobierają z gleby i wody nutrieny i substancje toksyczne, które dostają się przez korzenie do liści. Z punktu widzenia fizjologii roślin

podstawowe znaczenie odgrywają makro- i mikro- nutrieny, do których można zaliczyć np. azot, potas, wapń. Z kolei mikro- nutrieny, pobierane są w zależności od potrzeb rośliny i są istotne dla przebiegu wysublimowanych procesów życiowych (np. kobalt, miedź, żelazo, magnez, molibden i cynk). Wpływają one na syntezę białek i chlorofilu, oddychanie, wiązanie azotu i szereg innych, ważnych procesów. Istnieje ponadto grupa metali ciężkich, które w myśl współczesnej wiedzy nie spełniają żadnej pozytywnej funkcji fizjologicznej, są to tak zwane pierwiastki balastowe (np. Pb, Cd, Hg) (Conway, Pretty, 1991).

Wewnętrzny system regulacji, charakterystyczny dla danego gatunku ma znaczący wpływ na miejsce i sposób akumulacji szkodliwych jonów (np. wbudowanie ich w nieaktywne fizjologicznie struktury ścian komórkowych, czy wakuol). Nie wszystkie substancje są jednak neutralizowane, przez co obserwuje się negatywny wpływ na fizjologię, morfologię i fenologię roślin (Brooks, 1972; Wierzbicka 1995; Carranza, 2002). Charakter spowodowanych zmian wpływa więc na odpowiedź spektralną rejestrowaną spektrometrami (Zagajewski, 1998), pozwalając na wykorzystanie teledetekcji do badania zanieczyszczeń roślinności wywołanych przez metale ciężkie (Horler, Barber, Barringer, 1980; Zagajewski, 2002; Hyde Hecker 2003)

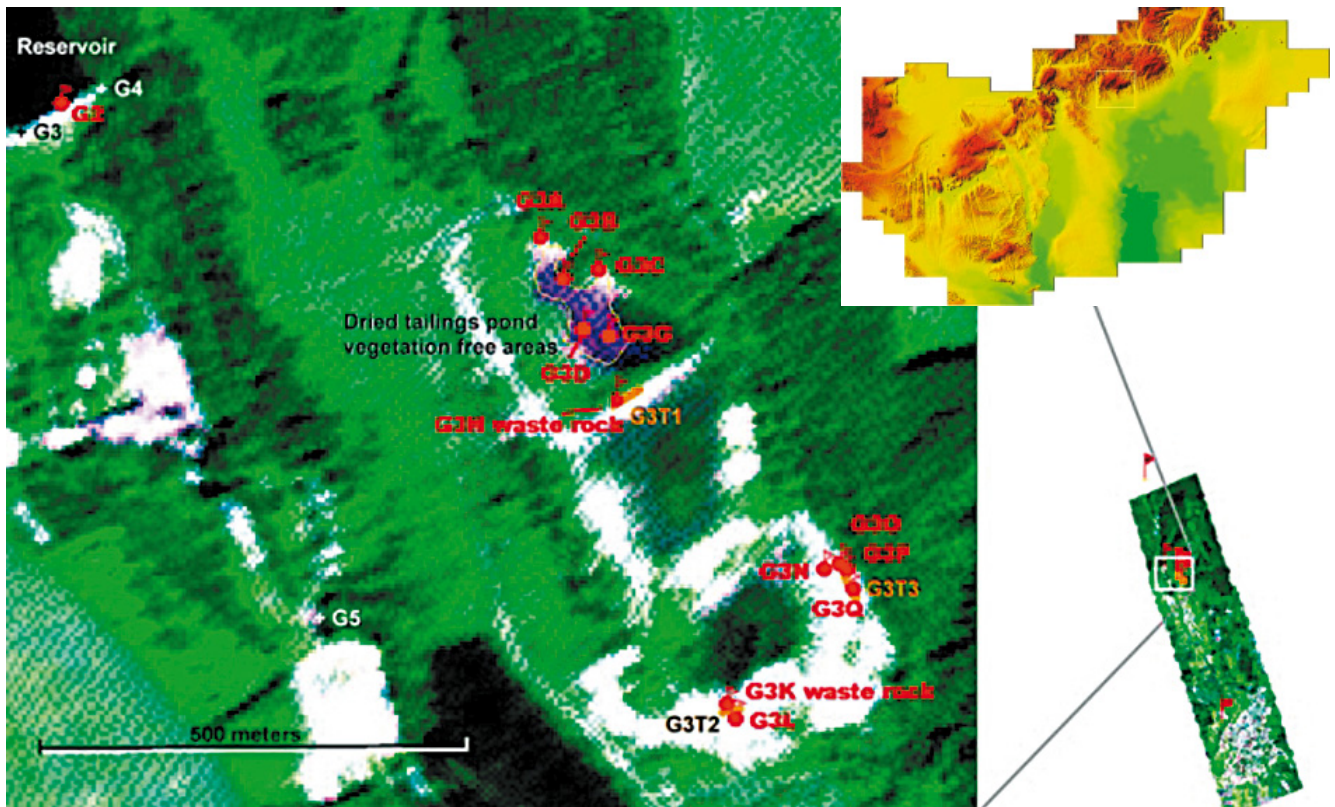
Obszar i obiekt badań

Badania prowadzono w północnych Węgrzech, w górach Matra. Na obszarze tym dominującymi utworami geologicznymi są stare subwulkaniczne i stratowulkaniczne andezyty. Są one zasobne w cynk i ołów oraz w mniejszych ilościach w miedź, srebro, złoto, arsen, kadm, bar. Teren ten był jednym z głównych obszarów wydobywania rud metali nie żelaznych.

Począwszy od 1952, w pobliżu miejscowości Gyöngyösorosi działał jeden z najważniejszych zakładów wydobywczych i przetwórczych rud cynku i ołowiu. W trakcie 34 lat pracy kopalni, przerobionych zostało około 3,5 mln ton rud, czyniąc tą kopalnię jedną z największych na Węgrzech. W 1986 roku zakład został zamknięty, a teren objęty programem rekultywacji. Prace te mają na celu podniesienie pH wód, które ługuje osady i jony metali ciężkich, a przez to ograniczenie zasięgu migracji toksycznych substancji na okoliczne tereny i ich oddziaływanie na cieki odwadniające ten obszar (z największą rzeką tego obszaru – Toka) (Odor, Csirik, Akos, 1998).

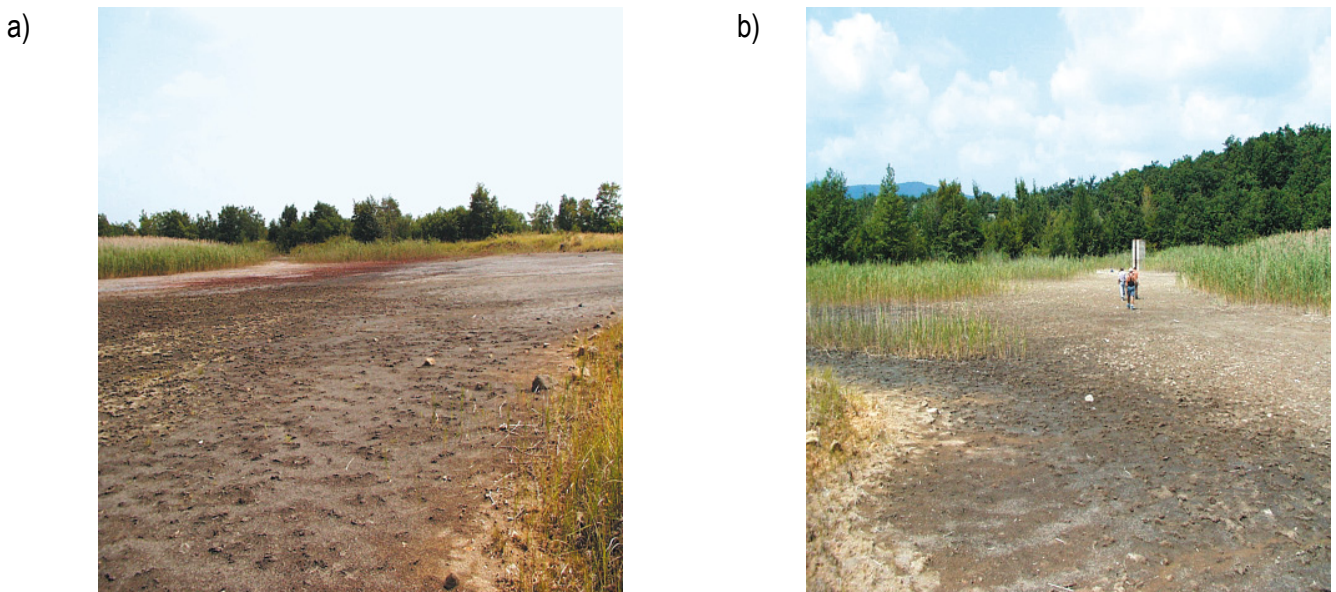
Badania terenowe objęły obszar o wymiarach 700 na 300 m, w obrębie którego zlokalizowane są 2 zrehabilitowane zbiorniki poflotacyjne (Ryc. 5.). Pierwszy zbiornik położony jest na wysokości 357 m n.p.m., zaś drugi w bezpośrednim sąsiedztwie pierwszego, na wysokości 340 m n.p.m. (według pomiarów GPS wykonanych przez ITC odbiornikiem Garmin 12XL).

Pomiaru spektralne i pobór próbek do badań chemicznych zostały przeprowadzone na brzegach zbiorni-



Ryc. 5. Obszar badań. W górnym prawym rogu znajduje się obraz numerycznego modelu terenu Węgier z orientacyjną lokalizacją obszaru badań. Poniżej kompozycja RGB z zobrazowania DAIS wykonanego w czasie prac terenowych przez DLR (Niemcy), po lewej stronie powiększenie obrazu DAIS z lokalizacją obu zbiorników poflotacyjnych z zaznaczonymi miejscami poboru próbek. Materiał opracowany przez: Henrik Hargitai, Budapest 2002 (źródło: Peter Kardevan, MAFI, Budapest 2002).

Fig. 5. Study area. Upper right: Digital Terrain Model of Hungary with study area location; Lower right: RGB composition of DAIS image acquired by DLR (Germany) during field campaign; Left: magnified DAIS image with points indicating location of samples collection in both areas. Data compiled by Henrik Hargitai, Budapest 2002 (source: Peter Kardevan, MAFI, Budapest 2002)



Ryc. 6 . Obiekt badań: a) roślinność znajdująca się wokół górnego zbiornika poflotacyjnego, b) na pierwszym planie tama neutralizacyjna oraz w oddali roślinność wokół dolnego zbiornika poflotacyjnego. Zdjęcia wykonane przez zespół ITC.

Fig. 6. Study subject: a) vegetation located around upper lake b) neutralizing dam (foreground) and vegetation located around lower lake (background). Pictures taken by ITC team.

ków, wzdłuż linii otaczających oba zbiorniki, w strefie obficie porośniętej przez trzcinę (Ryc. 6.).

Trzcina jest bardzo pospolitą rośliną wskaźnikową (liczba wskaźnikowa 5) zaliczaną do klasy szuwaru (*Phragmitetea*) i zespołu szuwaru pospolitego (*Phragmitetum australis*) (Matuszkiewicz, 2001.). W przypadku odpowiednich stosunków wilgotnościowych łatwo przystosowuje się do nowych warunków a jej areal wzrasta dynamicznie, ponieważ występuje zarówno na wilgotnych glebach, jak i w wodzie (wskaźnik wilgotności gleby 5-6). Jako roślina autotroficzna może przyswajając składniki znajdujące się w wodzie i glebie (geofit i hydrofit – pączki zimują w glebie i wodzie).



Ryc. 7. Badany szuwar pospolity (*Phragmitetum australis*)

Fig. 7. *Phragmitetum australis*

Metodyka badań

Prace terenowe zostały wykonane w ciągu tygodniowej kampanii pomiarowej. Obszar badań został podzielony na dwie główne powierzchnie, tj. górny i dolny zbiornik. W ich zasięgu wyznaczono transekty pomiarowe biegnące wzdłuż brzegów, w bezpośrednim sąsiedztwie lustra wody.

Roślinność porastająca brzegi zbiorników została scharakteryzowana w obrębie 42 poligonów testowych

o powierzchni 1m² każdy (21 poligonów wokół górnego i 21 wokół dolnego zbiornika), oddalonych od siebie co 10 m.

Co istotne, wszystkie powierzchnie zlokalizowane były w zasięgu homogenicznych zbiorowiskach trzcin pospolitej (*Phragmites australis*) ((Cav.) Trin. ex Steud) (Ryc. 7.).

Na każdym z poligonów badawczych wykonany został identyczny zestaw pomiarów: spektrometrycznych i biometrycznych. Pobrano również próbki gruntu (z głębokości 20, 60 i 100 cm) dla potrzeb analizy zawartości metali ciężkich. Ponadto z każdego poligonu testowego pobrano przypadkowo po 20 liści, które następnie zostały wysuszone i zabezpieczone dla potrzeb oceny zawartości metali ciężkich w tkankach roślin.

Ze względu na znaczny koszt chemicznej analizy próbek, liści zawartość metali ciężkich określona została dla co drugiej próbki (parzyste numery poligonów testowych).

Pomiary spektrometryczne

Pomiary spektrometryczne wykonane zostały przez zespół ITC pod kierunkiem dr Zoltana Vekerdy (Department of Water Resources, ITC, NL) przy użyciu hiperspektralnego spektrometru GER 3700. W obrębie każdego z poligonów przeprowadzono 75 pomiarów odbicia od roślin oraz 50 pomiarów kalibracyjnych wzorca bieli (spektralonu). Następnie obliczone zostały wartości średnie oraz odchylenia standardowe z pomiarów uzyskanych dla danego poligonu testowego. Wyniki wszystkich pomiarów, które nie zawierały się w zakresie średniej $\pm 1,5$ wartości odchylenia standardowego zostały odrzucone.

W celu znalezienia skorelowanych zakresów roślin bardziej i mniej zanieczyszczonych zbadany został typ rozkładu danych. Po potwierdzeniu, że jest to rozkład normalny, spektra obu grup roślin przebadano t-testem (hipoteza zerowa zakładała, że pomiędzy badanymi obiektami nie ma różnic spektralnych).

Należy podkreślić, że w czasie badań panowały wyjątkowo sprzyjające warunki pogodowe (nie było żadnych chmur), co dodatkowo wpłynęło na standaryzację uzyskanych wyników.

Pomiary biometryczne

Podstawowe funkcje życiowe rośliny polegają na poborze składników odżywczych i produkcji substancji budujących tkanki w procesie fotosyntezy. Pierwszym, wymiernym wskaźnikiem szkodliwego oddziaływania związków toksycznych jest spadek zawartość chlorofilu w liściach, co wpływa na zdolność akumulacji promieniowania z zakresu fotosyntezy. Osłabienie procesów fotosyntezy i asymilacji przekłada się na przyrost biomasy, która może być mierzona np. za pośrednictwem wskaźnika określającego ilość liści przypadających na jednostkową powierzchnię (LAI).

W przypadku roślin zanieczyszczonych metalami ciężkimi przydatnym wskaźnikiem może być również

indeks korzeniowy lub liściowy, określający stosunek świeżych i suchych liści (Wierzbicka, 1991; Woźny, 1995; Hyde Hecker, 2003).

Biorąc powyższe pod uwagę, pomiary zawartości chlorofilu a i b wykonane zostały przez laboratorium United States Environmental Protection Agency (zlecenie ITC) według standardowej procedury nr 2030 (Standard Operating Procedure SOP# 2030) (Hyde Hecker, 2003). Dla każdego poligonu testowego pomierzono 12-18 liści.

Równoległe z tymi pomiarami, pracownicy ZTŚ WGiSR UW dokonali oceny całkowitej zawartości chlorofilu. Użyto w tym celu terenowego miernika Chlorophyll Content Meter CCM-200 i dla każdego poligonu testowego wykonano pomiary dla 40 losowo wybranych liści.

Wartością rejestrowaną przez fotodiody CCM-200 jest względny wskaźnik CCI (Chlorophyll Content Index), który następnie został przeliczony na wartości bezwzględne dzięki ustaleniu krzywej regresji z zawartością chlorofilu z pomiaru kalibracyjnego w warunkach laboratoryjnych.

Pomiary zawartości chlorofilu wykonane zostały na 5 liściach, każdej z 20 losowo wybranych trzcin, w obrębie poszczególnych poligonów. Opracowanie wyników polegało na obliczeniu wartości średnich i odchyłeń standardowych.

W celu określenia wpływu zawartości chlorofilu na zdolność akumulacji energii z zakresu fotosyntezy (APAR) (Accumulated Photosynthetic Active Radiation) dla każdego poligonu badawczego wykonanych zostało po 12 pomiarów (4 powtórzenia w 3 miejscach) instrumentem AccuPARu model 80. Badanie polegało na rejestracji gęstości strumienia promieniowania bezpośredniego dochodzącego do roślin (PAR_0), przenikającego przez nie (PAR_t), odbitego od gleby (PAR_s) oraz górnej powierzchni roślin (PAR_c) dla zakresu 400-700 nm. Opracowanie wyników sprowadzało się do obliczenia bilansu energii zakumulowanej według wzoru (1):

$$APAR = (PAR_0 \downarrow + PAR_s \uparrow) - (PAR_t \downarrow + PAR_c \uparrow) \quad (1)$$

Jednostką względną tego pomiaru jest współczynnik fAPAR (frakcja APAR nazywana jest też produktywnością (p)). Jest on obliczany jako stosunek zakumulowanego promieniowania (APAR) do całkowitej energii dopływającej do powierzchni roślin (PAR_0)(2). fAPAR umożliwia zatem porównanie wyników z różnych obszarów, a ponadto różnych warunków oświetlenia.

$$p=fAPAR= APAR/ PAR_0 \quad (2)$$

Produkcja biomasy może być mierzona za pomocą wskaźnika projekcyjnego liści (LAI – Leaf Area Index), który określa sumaryczną powierzchnię liści jaka przypada na jednostkową powierzchnię terenu. Jego wartość można ustalić wykorzystując biometryczną metodę pomiaru, która polega na wycięciu i splanimetrowaniu powierzchni wszystkich liści porastających 0,25 m², a następnie ekstrapolacji uzyskanych wyników na po-

wierzchnię 1m². Technika ta jest destrukcyjna i bardzo pracochłonna, dlatego częściej stosuje się metodę teledetekcyjną, wykorzystującą instrument LAI-2000 Plant Canopy Analyser firmy Li-Cor. Mierzy on rozproszone promieniowanie z niebieskiego zakresu, docierające pod różnymi kątami do detektora (typu „rybie oko”). Poprzez porównanie promieniowania docierającego do górnej warstwy baldachimu roślinności i jego przestrzennego rozkładu w warstwie roślinności obliczany jest wskaźnik LAI wraz z oszacowaniem dokładności wykonanej rejestracji.

W przypadku omawianych prac terenowych, dla każdego poligonu zostały wykonane 2 lub 3 pomiary (jeden pomiar to 15 niezależnych rejestracji).

Badania własne (Jakomulska, Zagajewski, Traut, 2002) oraz opracowania innych autorów (Welles, Norman, 1991) potwierdzają dużą korelację ($R^2=0,96$) pomiaru teledetekcyjnego i biometrycznego (odchylenie standardowe oscyluje w zakresie 3-5%), uznano zatem, że postępowanie takie jest uzasadnione.

Kolejnym, istotnym wskaźnikiem kondycji roślinności jest wskaźnik temperaturowy t_s-t_a . Idea wskaźnika sprowadza się do pomiaru aktualnej temperatury termodynamicznej powietrza bezpośrednio zalegającego nad badaną roślinnością (t_a) oraz temperatury radiacyjnej baldachimu roślinności (t_s).

W normalnych warunkach rośliny powinny charakteryzować się niższą temperaturą (efekt ewapotranspiracji, podczas którego wraz z prądem wody wydane jest ciepło). W przypadku wstępowania niedoborów wody, będących np. efektem zaburzenia funkcji życiowych roślin, pojawia się stres wodny (wskaźnik temperaturowy t_s-t_a osiąga wartości dodatnie).

Badanie sprowadza się do pomiaru spektralnej luminancji energetycznej w zakresie podczerwieni termalnej (8-14 um), a następnie przeliczeniu jej na temperaturę według prawa Stefana-Boltzmana.

Pomiar temperatury radiacyjnej powierzchni liści został wykonany radiometrem iRtec MiniRay, a temperatury termodynamicznej powietrza zewnętrzną sondą iRtec MiniRay. Dla każdego poligonu pomiarowego wykonano kilkanaście powtórzeń. Opracowanie wyników polegało na obliczeniu: średniej temperatury radiacyjnej powierzchni liści danego punktu pomiarowego (t_s), średniej temperatury powietrza znajdującego się nad danym zbiorowiskiem (t_a) oraz wskaźnika t_s-t_a .

Pomiary zawartości metali ciężkich w glebie i liściach.

Pomiary zawartości metali ciężkich w próbach gruntu zostały wykonane aparatem NITON XL-700 Series Multi-Element Analyser. Pomiar polegał na równoległej rejestracji kilkunastu elementów, wykorzystując promieniowanie rentgenowskie wzbudzone przez izotopowe źródło ¹⁰⁹Cd, z maksymalną dawką 50mCi (1850 MBq) i 10 mCi (370 MBq).

Dokładność pomiaru zastosowanej metody oscyluje w granicach 95% względem wzorca określonego na pod-

stawie pomiaru referencyjnego z zastosowaniem techniki ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy). Pomiar referencyjny wybranych próbek był wykonany równolegle w tym samym laboratorium (Hyde Hecker, 2003)

Zawartość metali ciężkich w liściach określona została w Laboratorium Geoekologicznym WGiSR UW. Zebrane w terenie liście trzciny (*Phragmites communites*), zostały powtórnie wysuszone w temperaturze 90°C, a następnie rozdrobnione. Z każdej próby odważono porcje o wadze około 0,5 g. Naważki zalano stężonym kwasem azotowym (klasa czystości ultrapur) i poddano je mineralizacji ciśnieniowej w naczynkach teflonowych przy wykorzystaniu mineralizatora mikrofalowego firmy Anton Paar.

Roztwór do oznaczeń przygotowano używając wody demineralizowanej (18 MOhm). Do każdej z próbek dodano standard wewnętrzny (In).

Oznaczenia ogólnej zawartości metali (około 30, w tym Zn, Pb, Cd, Cu, Ni) wykonano przy wykorzystaniu indukcyjnego spektrometru masowego (ICP-MS: Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) firmy PerkinElmer/Sciex model Elan 6100 DRC.

Do kalibracji i kontroli pracy przyrządu w trakcie oznaczeń wykorzystano roztwory wzorców wieloelementowych firmy Merc, zawierających oznaczane metale ciężkie.

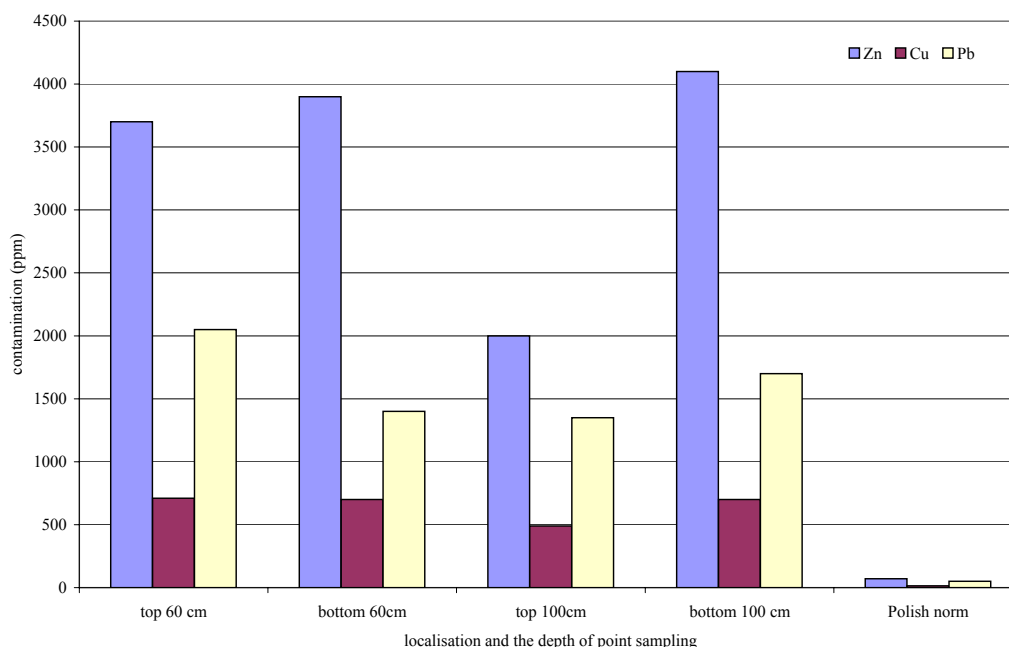
Wyniki

Wyniki pomiarów zawartości metali ciężkich

Zanieczyszczenie metalami ciężkimi na obu badanych obszarach osiąga bardzo wysokie stężenia (Hyde Hecker, 2003); zawartość ołowiu w glebie na głębokości 20 cm oscylowała w granicach 120-450 ppm, dla warstwy zalegającej na głębokości 60 cm zróżnicowanie było niższe i wahało się w granicach 125-230 ppm, natomiast na głębokości 100 cm mieściło się w przedziale 40-215 ppm (dopuszczalna polska norma zanieczyszczenia tym metalem wynosi 50 ppm).

Dopuszczalna zawartość cynku według polskiej normy wynosi 70 ppm, natomiast na badanym obszarze w warstwie powierzchniowej gruntu zanotowano stężenia 3000-8500 ppm, na głębokości 60 cm 2500-4000 ppm, a na głębokości 100 cm 500-4200 ppm. Podobnie stężenia innych metali ciężkich są wysokie a normy zanieczyszczeń są znacząco przekroczone (Hyde Hecker, 2003) (Ryc. 8.).

Odnosząc uzyskane wyniki do danych cytowanych przez innych autorów (Demirezen Aksoy, 2004; Deng, Ye, Wong, 2004; Lee, Yang, Yoon, Shim, Cho, Seo, Chung, Lee, 2004), należy stwierdzić, że układają się one na poziomie od 4 do 50 razy wyższym od zawartości rejestrowanych w przypadku obiektów naturalnych położonych w strefie terenów zanieczyszczonych metalami



Ryc. 8. Zawartość wybranych metali ciężkich w próbach gruntu pobranych z badanych poligonów. Oznaczenia „top” i „bottom” określają odpowiednio górny i dolny zbiornik poflotacyjny, zaś podane stężenia odpowiadają średniej wartości stężenia badanych metali w próbach pobranych z głębokości 60 lub 100 cm dla 21 poligonów testowych znajdujących się wokół górnego i dolnego zbiornika. Źródło: Hyde Hecker, 2003.

Fig. 8. Content of mean contamination by heavy metals in studied areas. „Top” means mean contamination value of particular heavy metal collected from depth of 60 or 100 cm from test areas located near upper lake; „Bottom” means mean contamination value of the heavy metal collected from lower lake test site. Source: Hecker, 2003

ciężkimi. Natomiast, w konfrontacji z wynikami dla terenów antropogenicznie przekształconych, uzyskane wartości zanieczyszczenia osiągają ilościowo porównywalny poziom (Samecka-Cymerman, Kempers, 2001; Stankovic, Vuckovic, Stojanovic, 2000).

Mimo, iż stężenia analizowanych metali ciężkich są wysokie, należy pamiętać, że obszar objęty badaniami jest zrehabilitowanym terenem dawnej kopalni metali nieżelaznych. Techniczny sposób jej wykonania obejmował m.in. zespół zabiegów geotechnicznych i geochemicznych, których zadaniem było ograniczenie zasięgu oddziaływania szkodliwych jonów, głównie rozprzestrzeniających się wraz ze strumieniem wód powierzchniowych i podziemnych. Reaktywacja niewątpliwie wpływa na dystrybucję i migrację zanieczyszczeń w glebie (tak w profilu wertykalnym, jak i horyzontalnym) oraz wodach, a tym samym limituje ilość dostępnej, znajdującej się w roztworze substancji toksycznych, która może być przyswajana przez poszczególne gatunki roślin.

Jak już wcześniej wspomniano, proces przyswajania metali ciężkich przez rośliny jest uzależniony od wielu czynników. Ponadto wpływ poszczególnych metali na wysublimowane procesy życiowe roślin jest różny zależnie od geochemicznej i cytoplazmatycznej równowagi jonowej, a stąd trudno jest wskazać na prosty związek przyczynowo-skutkowy między zanieczyszczeniem, a odpowiedzią fizjologiczną badanych roślin.

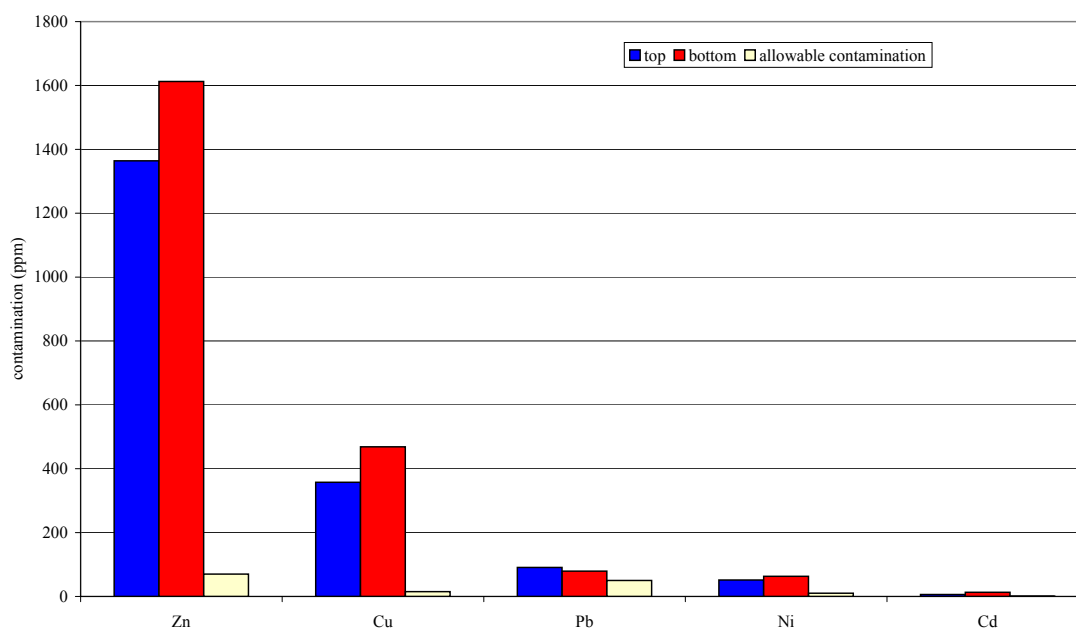
W analizowanym przypadku, obserwowany poziom zanieczyszczenia podłoża skalnego jednoznacznie potwierdza pozostający z nim w związku stan skażenia roślin. Co więcej jest on wysoki zarówno z punktu widzenia osiąganych wartości bezwzględnych, jak i dopuszczalnych wartości stężenia wg polskich norm.

W przypadku dolnego zbiornika, trzciny porastające podłoże bardziej zanieczyszczone, cechują się wzrostem zawartości metali w liściach roślin (Ryc. 8 i 9.). Jednocześnie pomierzone zawartości metali w liściach są o rząd wielkości niższe od wykrywanych stężeń w glebie.

Wyniki pomiarów spektrometrycznych

Wyniki pomiarów spektrometrycznych wykazują zróżnicowanie w obrębie zarejestrowanych odpowiedzi spektralnych trzciny porastających górny i dolny zbiornik poflotacyjny. Rośliny porastające dolny zbiornik charakteryzują się większym wewnętrznym zróżnicowaniem odpowiedzi spektralnej w porównaniu do trzciny rosnących wokół górnego zbiornika (Ryc. 10. i 11.).

Zaobserwowana prawidłowość dotyczy zarówno zakresu widzialnego, bliskiej i średniej podczerwieni. Zmienność spektralna w zakresie widzialnym dochodzi do 20 % dla roślin mniej zanieczyszczonych i do 30 %



Ryc. 9. Średnia zawartość wybranych metali ciężkich w liściach pobranych z badanych poligonów. Oznaczenia: „top” oznacza średnią wartość zanieczyszczenia danym metalem obliczoną dla próbek z poligonów testowych znajdujących się wokół górnego zbiornika poflotacyjnego, „bottom” oznacza średnią zawartość metalu ciężkiego w próbkach z poligonów testowych znajdujących się wokół dolnego zbiornika poflotacyjnego. Allowable contamination oznacza dopuszczalny poziom zanieczyszczenia gleby zgodnie z polską normą. Opracowanie własne.

Fig. 9. Mean content of heavy metals in leaves collected from test areas. “Top” indicates mean value of particular heavy metal contamination calculated from test polygons located near upper lake; “bottom” indicates mean value of particular heavy metal collected from test polygons located near lower lake; “allowable contamination” indicates allowable contamination of soil according to Polish norm.

dla trzciny o wyższym poziomie zanieczyszczenia (Ryc. 12.). Jednocześnie szczegółowa analiza krzywych spektralnych pozwala zauważyć, że dla zakresu zielonego wartości są porównywalne, zaś do fal o długości powyżej 550 nm rozkład znacząco zmienia się, osiągając maksimum różnicowania krzywych spektralnych w zakresie fal czerwonych, odpowiadających absorpcji promieniowania przez chlorofil. Z kolei w bliskiej podczerwieni, odwzorowującej strukturę komórkową, różnica ta jest stosunkowo stała i wynosi odpowiednio 5% dla trzciny z górnego i 10% dla roślin z dolnego zbiornika.

Podobne prawidłowości różnicowania obserwuje się w średniej podczerwieni (Ryc. 12.).

Charakter stwierdzonych zależności świadczy o tym, iż wykazana wcześniej prawidłowość związku wysokich stężeń metalami ciężkimi w podłożu i roślinach uwidacznia się również w pomiarach z wykorzystaniem spektrometrów hiperspektralnych.

Zbliżone obserwacje zostały poczynione w badaniach B. Zagajewskiego (1998), gdzie odpowiedzi spektralne traw zanieczyszczonych ołowiem porównywano z pomiarami referencyjnymi uzyskanymi dla czystych traw. Pomiary spektrometryczne 23 kanałowym spektrometrem SPZ-5 potwierdziły występowanie analogicznego różnicowania krzywych spektralnych. Zaznaczało się ono w zakresie 400-500 nm (7 kanałów spektralnych), gdzie osiągało kilka procent, a także w zakresie 500-700 nm, przy czym różnice dochodziły do 37%. Podobny poziom różnicowania charakterystyk odbicia występował również w bliskiej podczerwieni.

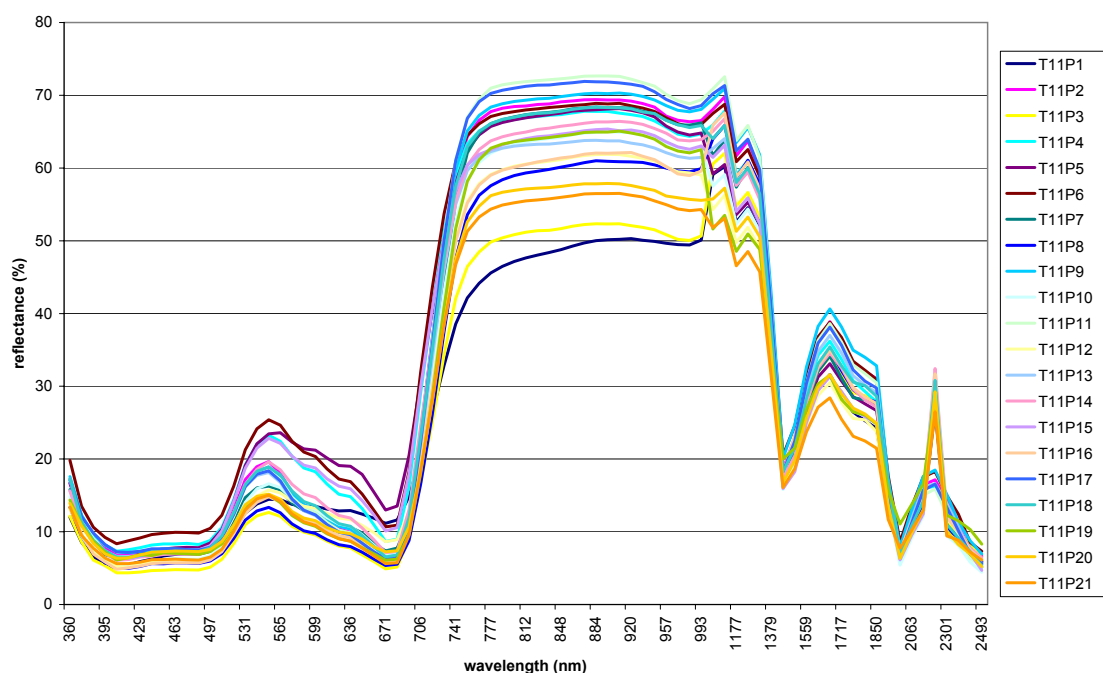
Opisane wyżej prawidłowości jakościowej charakterystyki różnic rozkładów spektralnych znajdują potwierdzenie w analizie z zastosowaniem metod statystycznych.

Weryfikacja cech rozkładu spektralnego z wykorzystaniem testu t-studenta na poziomie istotności wynoszącym 0,05 pozwala stwierdzić, że obszarami istotnymi statystycznie są fragmenty przedziałów spektralnych z zakresu fal widzialnych (charakteryzujące ilość i jakość barwników fotosyntetycznie czynnych), a także zakres czerwieni (red-edge), kilka węższych przedziałów widma obrazujących stan struktur komórkowych oraz uwodnienie komórek (Ryc. 13.).

Zaostrzenie kryteriów testu hipotezy zerowej do wartości 0,01 pozwoliło na dalsze uszczegółowienie wniosków. Istotnie statystycznie różnicowanie rozkładu nadal występowało w zakresie widzialnym i krawędzi czerwieni oraz w przedziałach promieniowania elektromagnetycznego odpowiadającego zawartości wody w tkankach, a także w średniej podczerwieni (Ryc. 14.).

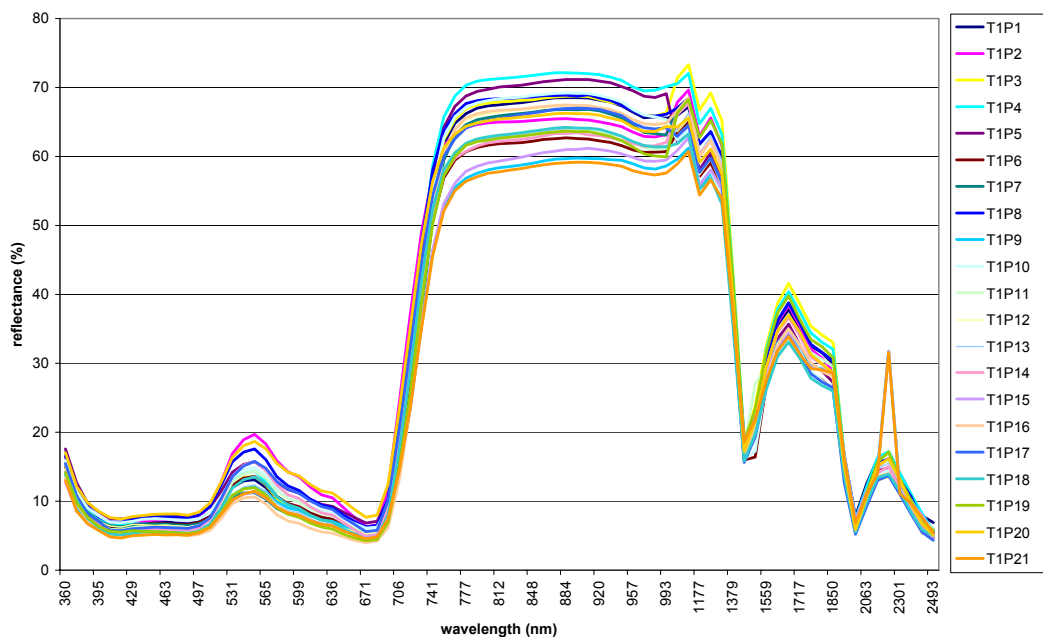
Dalsze zaostrzenie kryteriów testu do poziomu 0,001 wyłoniło z kolei trzy przedziały odbicia spektralnego: zakres widzialny odpowiedzialny za barwniki fotosyntetycznie czynne oraz rejon 1860-1980 nm, odpowiadający zawartości wody (Ryc. 15).

Wyniki analizy statystycznej pozwalają na sformułowanie wniosku, że zmiana poziomu zanieczyszczenia metalami ciężkimi w przypadku trzciny porastających górny i dolny zbiornik poflotacyjny uwidacznia się przede wszystkim w zakresie widzialnym, łączonym z jakością i ilością chlorofilu i karotenoidów. Potwierdza się zatem, że krawędź czerwieni oraz punkt przegięcia krawędzi są jednymi z najlepszych indykatorów kondycji roślin, przede wszystkim w odniesieniu do zawartości chlorofilu w liściach, którego ilość jest limitowana przez fitopatologiczny poziom stężeń badanych pierwiastków (Clevers, Bueker, 1991). W przypadku trzciny z górnego



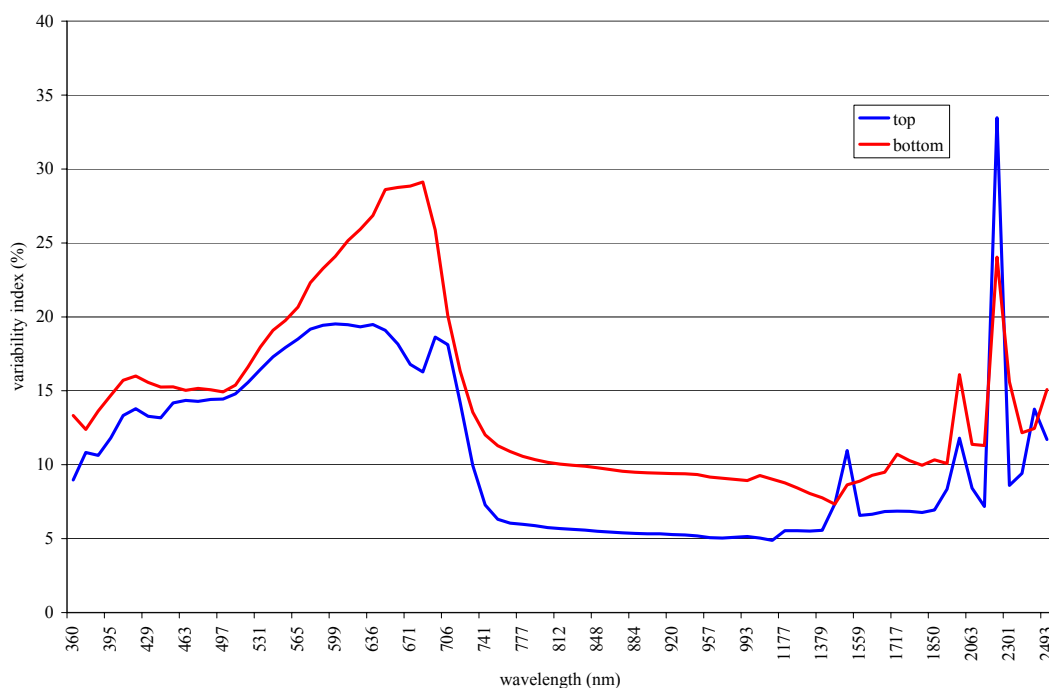
Ryc. 10. Krzywe odbicia spektralnego trzciny porastających wokół dolnego zbiornika poflotacyjnego

Fig. 10. Spectral reflectance curves of reeds near lower lake



Ryc. 11. Krzywe odbicia spektralnego trzcin rosnących wokół górnego zbiornika poflotacyjnego

Fig. 11. Spectral reflectance curves of reeds near upper lake



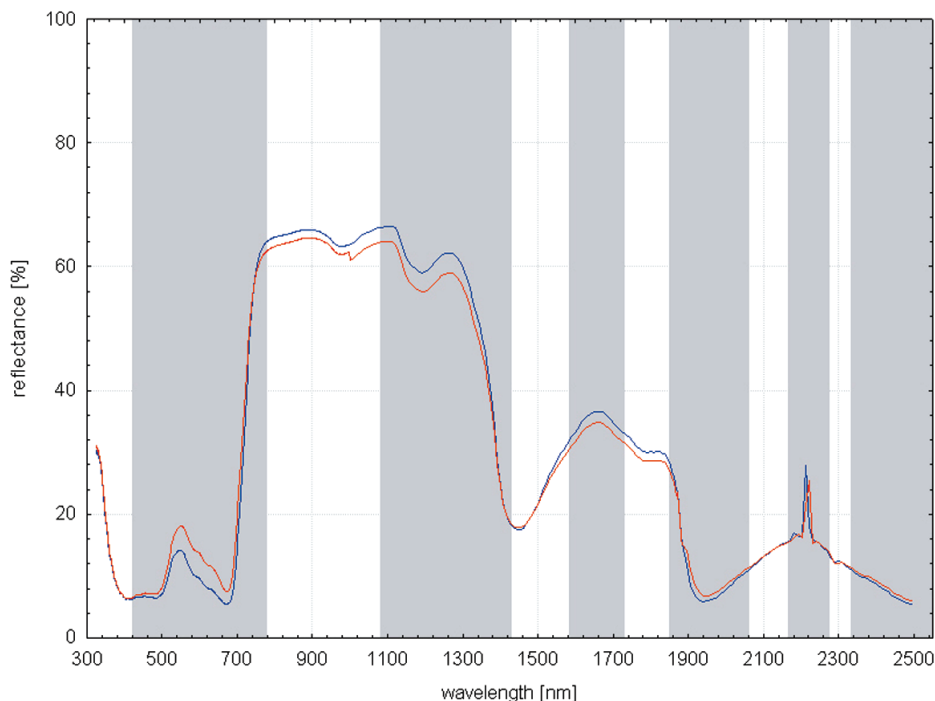
Ryc. 12. Współczynnik zmienności średnich z pomiarów spektrometrycznych trzcin rosnących wokół górnego i dolnego zbiornika poflotacyjnego

Fig. 12. Variability index of means of spectral measurements of reeds near upper and lower lake.

zbiornika średnia wartość odpowiadająca punktowi przełamania krawędzi odpowiada długości fali wynoszącej 722,6 nm, natomiast dla roślinności bardziej zanieczyszczonej, długości 719,9 nm (Ryc. 16).

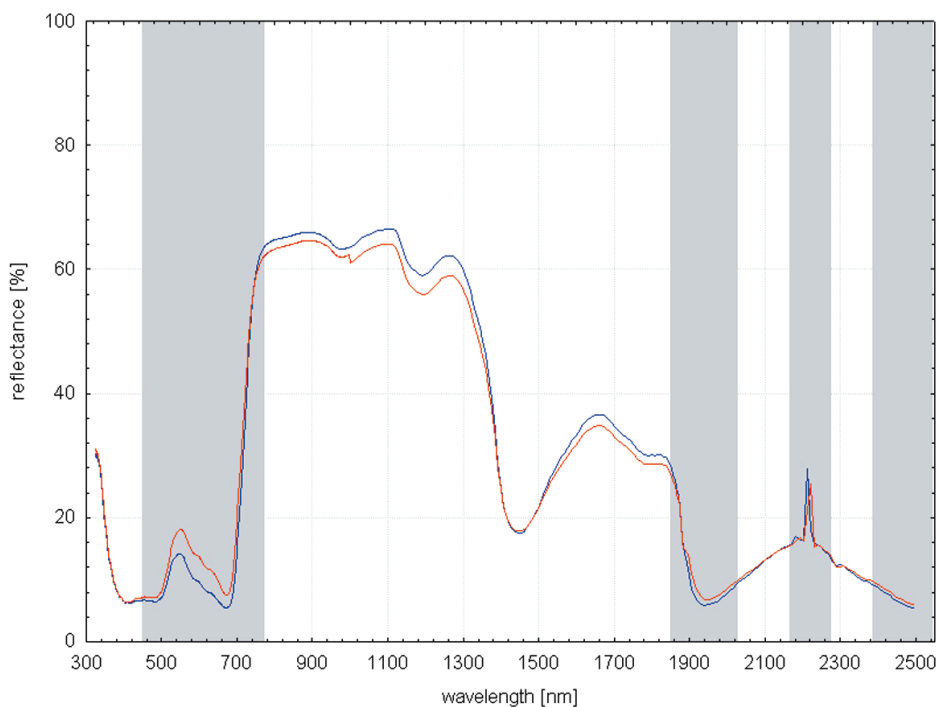
Potwierdza to prawidłowość ustaloną przez innych autorów (Collins, 1978; Clevers, Bueker 1991;

Bueker, Clevers 1992; Kumar, Schmidt, Dury, Skidmore, 2001), że w przypadku roślin wykazujących cechy uszkodzenia krzywa odbicia spektralnego w obszarze 670-740 nm przesuwa się ku krótszym zakresom fal elektromagnetycznych, a dla roślin zdrowych ku podczerwieni.



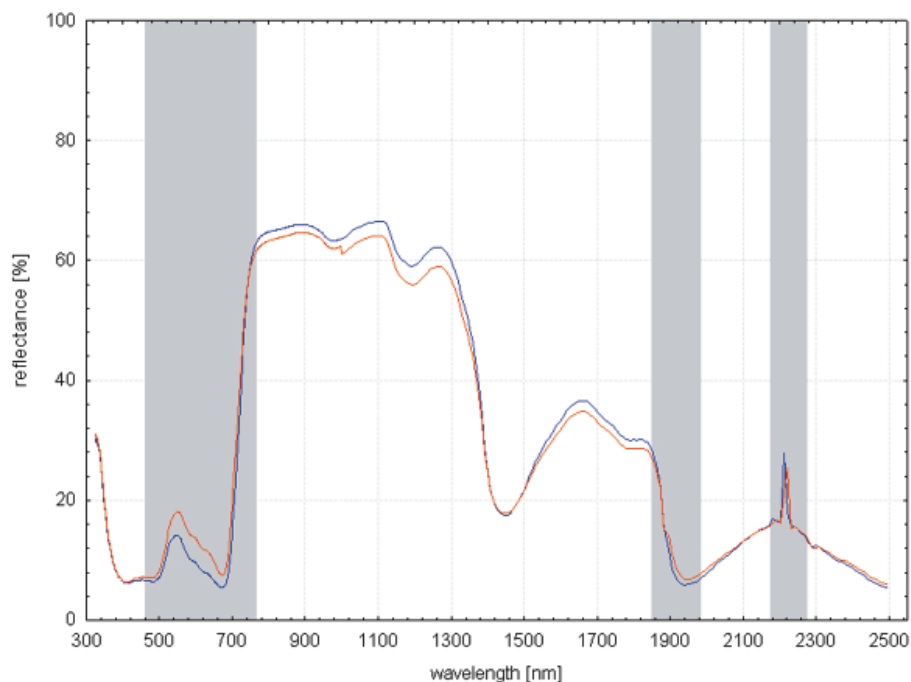
Ryc. 13. Test t-studenta przy poziomie istotności 0,05. Szarym tonem zaznaczone zostały przedziały widma istotne statystycznie. Oznaczenia: linia niebieska – średnia odbicia dla trzciny porastających górny zbiornik poflotacyjny, linia czerwona – średnia odbicia roślin porastających dolny zbiornik

Fig. 13. T-Student statistical test with significance level of 0.05. In gray were indicated statistically significant spectral range. Blue line: mean reflectance curve of reeds in upper lake; Red line: mean reflectance curve of vegetation in lower lake



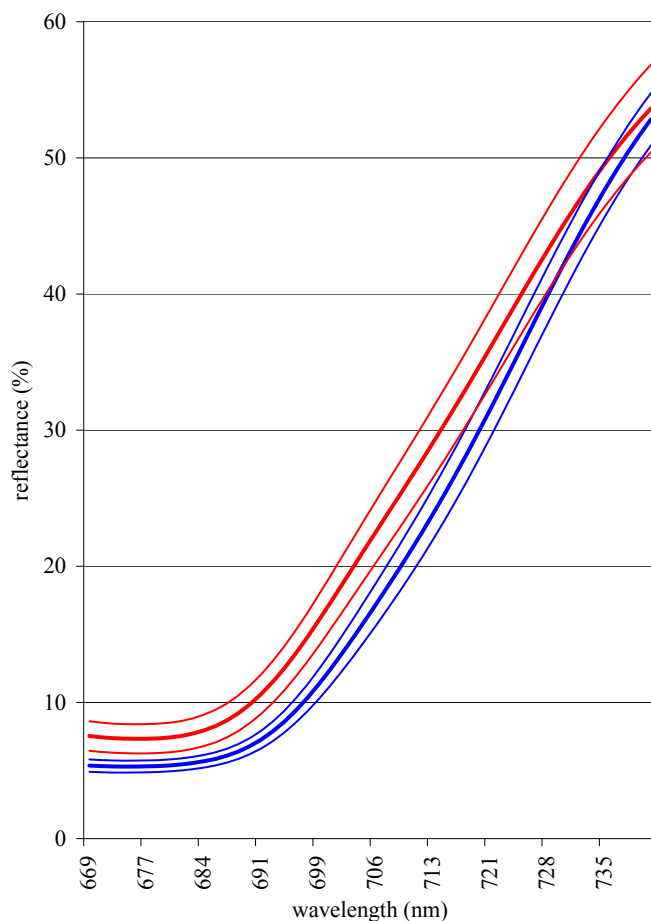
Ryc. 14. Test t-studenta przy poziomie istotności 0,01. Szarym tonem zaznaczone zostały przedziały widma istotne statystycznie. Oznaczenia: linia niebieska – średnia krzywa odbicia dla trzciny porastających górny zbiornik poflotacyjny, linia czerwona – średnia krzywa odbicia roślin porastających dolny zbiornik

Fig. 14. T-Student statistical test with significance level of 0.01. In gray were indicated statistically significant spectral range. Blue line: mean reflectance curve of reeds in upper lake; Red line: mean reflectance curve of vegetation in lower lake



Ryc. 15. Test t-studenta przy poziomie istotności 0,001. Szarym tonem zaznaczone zostały przedziały widma istotne statystycznie. Oznaczenia: linia niebieska – średnia krzywa odbicia dla trzcin porastających górny zbiornik poflotacyjny, linia czerwona – średnia krzywa odbicia roślin porastających dolny zbiornik

Fig. 15. T-Student statistical test with significance level of 0.001. In gray were indicated statistically significant spectral range. Blue line: mean reflectance curve of reeds in upper lake; Red line: mean reflectance curve of vegetation in lower lake



Ryc. 16. Krzywe czerwieni (red-edge) dla badanych zbiorników. Gruba niebieska linią odpowiada średniej odbicia spektralnego obliczonej z pomiarów dla roślin porastających górny zbiornik poflotacyjny. Dwie cienkie, niebieskie linie, oznaczają wartość średnią $\pm 0,5$ wartości odchylenia standardowego z pomierzonych spektr na tym obszarze. Analogicznie kolorem czerwonym zaznaczono średnią $\pm 0,5$ odchylenia standardowego dla pomiarów zarejestrowanych w zasięgu dolnego zbiornika.

Fig. 16. Red-edge position for analysed vegetation. Bold blue line: mean reflectance curve of vegetation in upper lake, thin blue lines indicate ± 0.5 standard deviation from the mean; Red line indicates measurements for vegetation in lower lake.

Wyniki biometryczne

Metale ciężkie wywołują chlorozę liści i zanik chlorofilu m.in. za sprawą ograniczenia aktywność grup sulfhydrylowych, co prowadzi do zmniejszenia jego produkcji (Bargagli, 1998). Efektem obecności toksycznych jonów cynku, choć również arsenu, manganu, i rubidu, jest blokowanie pobierania fosforu, magnezu i potasu ze względu na ich antagonistyczne działanie. W konsekwencji doprowadza to do deficytu nutrietów, co ostatecznie skutkuje zablokowaniem procesów syntetyzowania związków organicznych (Brooks, 1972; Marschner 1995). Z punktu widzenia możliwości detekcyjnych objawia się to utratą pełnej możliwości pochłaniania promieniowania z zakresu fotosyntezy (PAR).

Opisane wyżej zjawisko uwidacznia się w wynikach przeprowadzonych pomiarów wykonanych dla każdego poligonu testowego wzdłuż transektów badawczych górnego i dolnego zbiornika (Ryc. 17). Na uwagę zasługuje fakt, iż największe zróżnicowanie zawartości chlorofilu występuje w środkowej partii transektu zbiornika górnego, przebiegającej w bezpośrednim sąsiedztwie lustra wody. Pomimo tego, że korzenie wszystkich badanych roślin znajdowały się poniżej lustra wody, przypuszczalnie panują w tej strefie najkorzystniejsze warunki wodno-powietrzne, które wpływają na zasięg ryzosfery i przebieg pobierania przez rośliny substancji mineralnych.

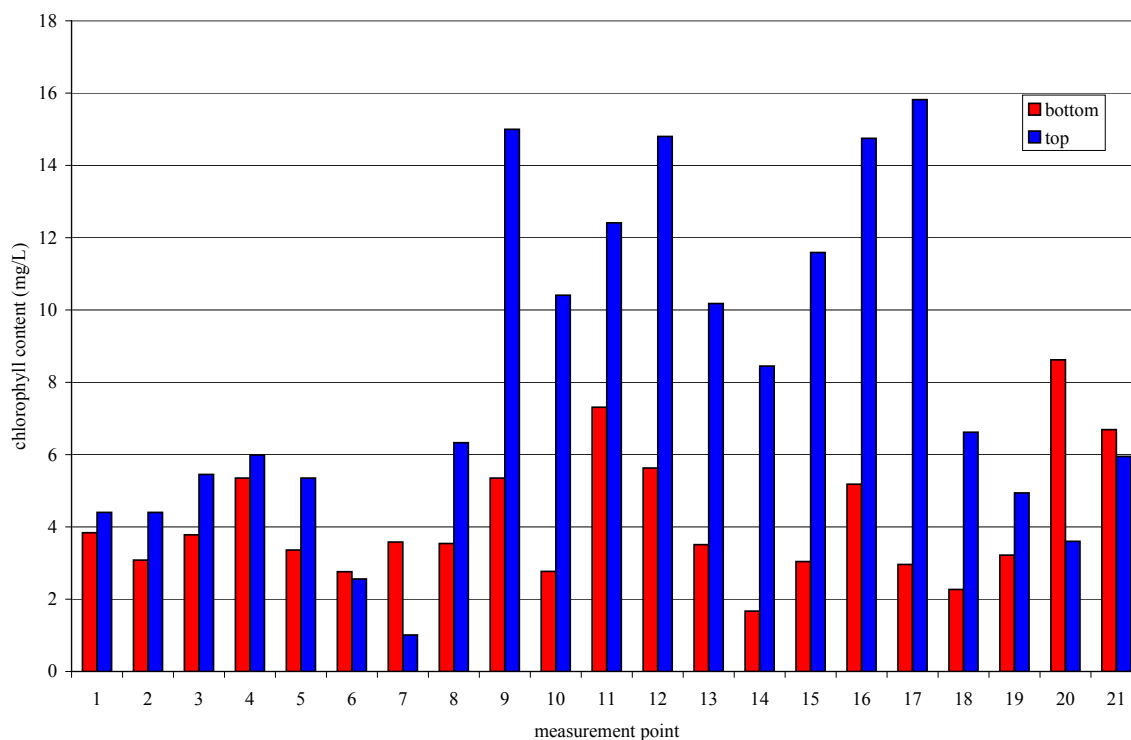
Zarejestrowana zawartość i aktywność barwników fotosyntetycznych czynnych bezpośrednio przekłada się

na zdolność akumulacji energii na potrzeby fotosyntezy (PAR), a to z kolei decyduje o wielkości produkcji biomasy (Zagajewski, Sobczak, Wrzesień, Kozłowska, 2006). Zależność tych zjawisk uwidacznia Rycina 18.

Na uwagę zasługuje fakt, iż w optymalnych warunkach roślinność akumuluje powyżej 90 % dochodzącej do niej energii ($fAPAR > 0,9$), a optymalna ilość liści przypadająca na jednostkową powierzchnię powinna zawierać się w granicach 3-5.

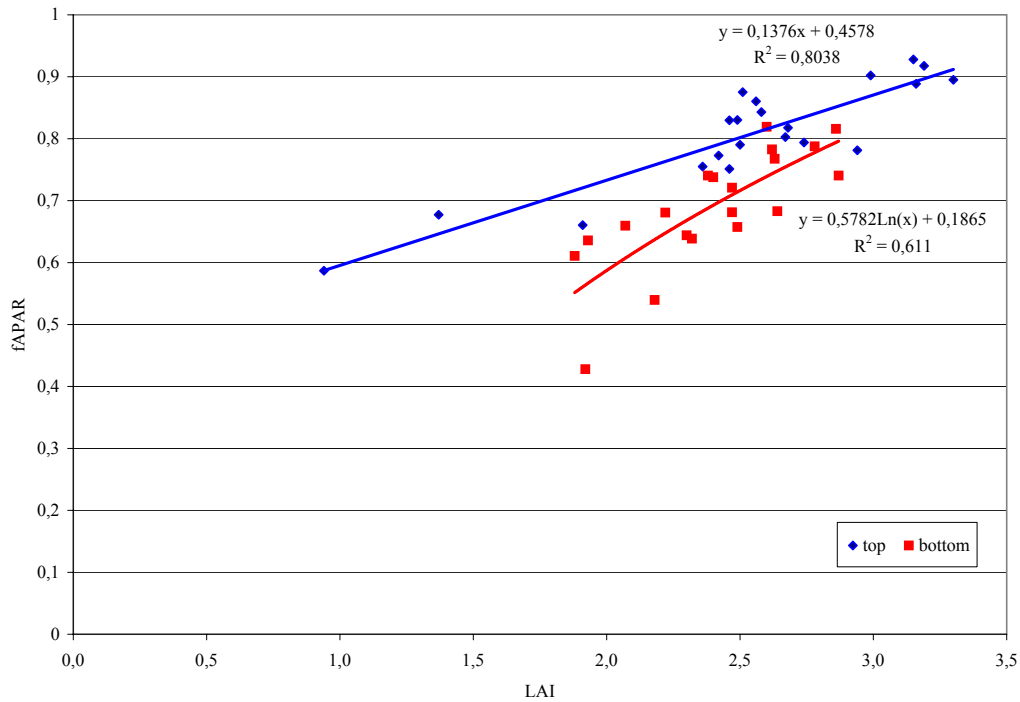
W grupie analizowanych poligonów, w zasięgu dolnego zbiornika, pomierzone wartości zakumulowanej energii z zakresu fotosyntezy ($fAPAR$) oraz biomasy wyrażonej wskaźnikiem powierzchni projekcyjnej liści (LAI) w żadnym z przypadków nie mieszczą się w zakresie wartości optymalnych. Na poligonach testowych znajdujących wokół górnego zbiornika w 5 przypadkach zanotowano natomiast wartości wskaźników, które można uznać za optymalne.

Kolejnym parametrem dobrze obrazującym stan kondycji roślin jest zależność pomiędzy NDVI (lub $fAPAR$), a wskaźnikiem temperaturowym t_s-t_a . Roślinność w dobrym stanie kondycyjnym powinna uzyskiwać ujemne wartości wskaźnika temperaturowego, co świadczy o braku stresu wodnego, oraz wysokie wartości NDVI (w przypadku technik hiperspektralnych określa się wartość optymalną powyżej 0,8). Jeśli wartości NDVI są niższe od podanej wartości, oznacza to pojawienie się warunków stresogennych dla roślin.



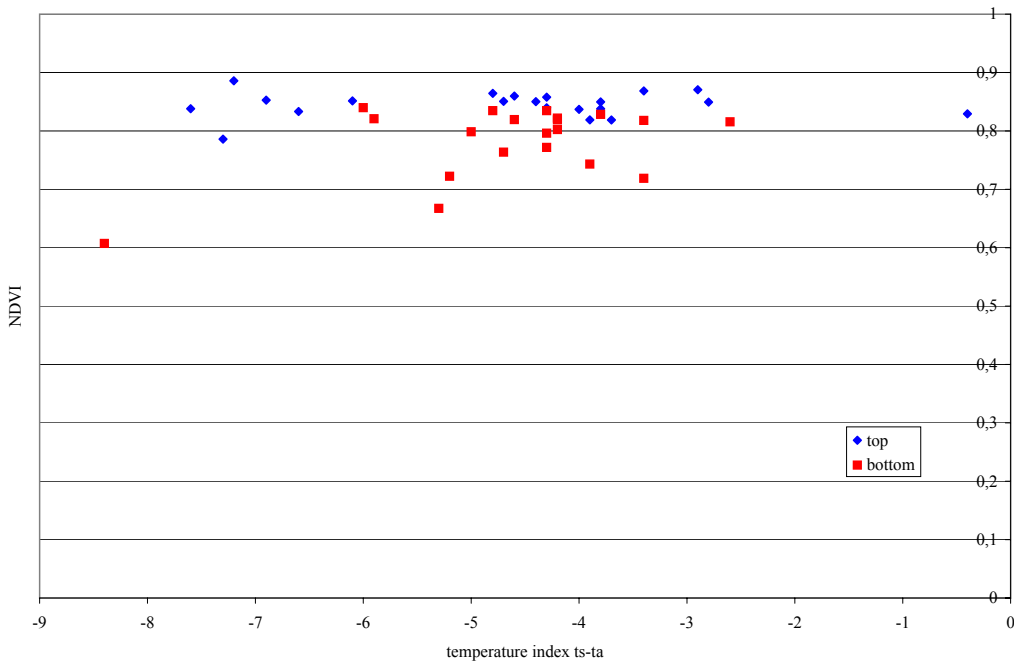
Ryc. 17. Zawartość chlorofilu w badanych liściach trzcin wzdłuż transektów: górnego (oznaczony niebieskimi słupkami) i dolnego (czerwone). Źródło Hyde Hecker, 2003

Fig. 17. Chlorophyll content in analysed reed leaves along transects: upper (blue bars) and lower (red bars). Source: Hyde Hecker, 2003



Ryc. 18. Zależność pomiędzy zakumulowaną energią na potrzeby fotosyntezy (fAPAR), a biomasa mierzona wskaźnikiem powierzchni projekcyjnej liści (LAI). Oznaczenia: barwą niebieską oznaczono wyniki pomiarów wykonanych wzdłuż górnego transektu, barwą czerwoną – dolnego.

Fig. 18. Correlation between fraction of accumulated photosynthetically active radiation (fAPAR) and biomass measured as leaf area index (LAI). In blue: results of measurements taken along upper transect; In red: results of measurements taken along lower transect



Ryc. 19. Zależność pomiędzy wskaźnikiem zieleni (NDVI), a wskaźnikiem temperaturowym ts-ta mierzącym stres wodny roślin. Oznaczenia: barwą niebieską oznaczono wyniki pomiarów wykonanych wzdłuż transektu górnego zbiornika, barwą czerwoną – dolnego.

Fig. 19. Correlation between NDVI and temperature index measuring vegetation water stress. In blue: results of measurements taken along upper transect; In red: results of measurements taken along lower transect

Rycina 19. potwierdza przedstawione powyższe spostrzeżenia, które wskazują na relatywnie lepszą kondycję zbiorowiska występującego wokół górnego zbiornika. Jednocześnie na podstawie pomiaru NDVI można stwierdzić, że część poligonów w zasięgu dolnego zbiornika charakteryzuje się porównywalnie dobrą kondycją jak zbiorowiska zbiornika górnego.

Na podkreślenie zasługuje ponadto fakt, że w żadnym przypadku nie zaobserwowano stresu wodnego. Z obserwacji terenowych wiadomo, że wszystkie poligony znajdowały się w bezpośrednim sąsiedztwie wody, która pokrywała korzenie badanych roślin. Z drugiej strony zastanawia fakt, że charakterystyka ta nie odzwierciedla wniosków dotyczących stopnia przekształcenia roślinności, których dostarczyła analiza innych, wcześniej omawianych wskaźników i parametrów.

Podsumowanie i Wnioski

Główną intencją autorów niniejszej publikacji było zaprezentowanie zintegrowanych metod badawczych mających swoje korzenie w teledetekcji, biometrii, fizjologii roślin, geochemii i analizie chemicznej. Każda z tych metod wykorzystuje specjalistyczny zestaw narzędzi, które w znacznej części bazują na promieniowaniu elektromagnetycznym. Jest ono nośnikiem sygnałów absorbowanych, odbijanych i rozpraszanych przez obiekty występujące w przyrodzie. Każda z metod potwierdziła obecność szkodliwych substancji i ich oddziaływanie na roślinność. Stres wyrażający się w postaci wysublimowanych reakcji fizjologicznych może być badany przez zaawansowane metody teledetekcji środowiska. Przykładem służyć może punkt przegięcia krzywej czerwieni, gdzie zarejestrowane różnice dla roślin mniej i bardziej zanieczyszczonych wynoszą około 3 nm. Może wydać się to wartością stosunkowo niewielką, zważywszy na rozdzielczość skanerów lotniczych (Rosis 4nm), czy satelitarnych (Hyperion 11 nm), jednakże w przypadku pomiarów naziemnych, punkt przegięcia przesuwają się blisko o 3 kanały spektralne. W przypadku stosowania tradycyjnych urządzeń teledetekcyjnych byłoby to niemożliwe do rejestracji. Natomiast urządzenia hiperspektralne, bazując na szerokościach połówkowych filtrów 1,2-1,5 nm (VIS, NIR), umożliwiają detekcję i analizę takich anomalii. Wyniki badań nad krzywą i punktem przełamania krawędzi czerwieni potwierdziły, że możliwe jest stwierdzenie różnic kondycji między badanymi grupami roślin, nawet w sytuacji, kiedy rejestrowany poziom zanieczyszczenia nie powoduje zauważalnych makroskopowo uszkodzeń.

Wydaje się, że metody odnoszące się bezpośrednio do analizy rozkładu odbicia spektralnego charakteryzuje większa rozdzielczość od tych, które wykorzystują uśrednione wartości pomiarów i wskaźniki będące efektem ich przetworzenia.

Połączenie uzyskanych wyników pozwala w sposób wiarygodny i obiektywny ocenić stan środowiska. Jest to bardzo istotny aspekt monitoringu z wykorzystaniem bioindykatorów, które mogą być cenne w badaniach

prowadzonych na dużych obszarach, na których zanieczyszczenie środowiska nie jest, aż tak duże, a poziom kontroli instrumentalnej stanu zanieczyszczenia wymaga ekstrapolacji pomiarów punktowych. Wcześniejsze doświadczenia (Zagajewski, 1998) potwierdziły, iż badania biomonitoringowe mogą być prowadzone na terenach skażonych dawkami porównywalnymi z górnymi zakresami dopuszczalnych stężeń.

Wykorzystanie metod biometrycznych, geochemicznych i analizy chemicznej potwierdza i tłumaczy zarejestrowane teledetekcyjnie charakterystyki spektralne. Metody statystyczne wskazały natomiast na konkretne przedziały widma elektromagnetycznego, w których należy poszukiwać korelacji z innymi danymi wspierającymi proces analizy badanych obiektów.

Autorzy zdają sobie sprawę, iż przedstawiony w niniejszym artykule materiał jest rodzajem wprowadzenia wymagającym dalszych i dokładniejszych analiz. Powinny one zmierzać do potwierdzenia dokonanych obserwacji na innych typach roślinności, różnych stężeniach substancji toksycznych oraz sprawdzenia czy podobnych reakcji nie dają inne czynniki stresogenne. Absolutnie koniecznym jest znalezienie referencyjnych, pozbawionych szkodliwych oddziaływań grup obiektów, które mogłyby służyć do ilościowej standaryzacji opracowywanych metod.

Drugi kierunkiem badań, który powinien być bezpośrednim następstwem niniejszych opracowań musi być analiza danych obrazowych, pozyskanych z poziomu lotniczego. Wydaje się, że ze względu na parametry techniczne, idealnym sensorem do tego celu mógłby być wysokorozdzielczy skaner hiperspektralny ROSIS (DLR, Niemcy), który w założeniach konstrukcyjnych był dedykowany do badań nad roślinnością.

Reasumując należy stwierdzić, iż:

- Najważniejszym zadaniem badań teledetekcyjnych jest pozyskanie charakterystyk spektralnych badanych obiektów, gdyż na podstawie krzywych odbicia możliwy jest wybór odpowiednich przedziałów widma, umożliwiających indykację badanych procesów i zjawisk. Techniki hiperspektralne, pozwoliły zarejestrować charakterystyki spektralne badanych obiektów różniące się w sposób istotny dla obu grup roślinnych,

- Niezależnie od wpływu specyficznych warunków środowiskowych na zarejestrowane poziomy stężenie metali ciężkich w materiale roślinnym, zastosowana metoda i biologiczny wskaźnik stanu skażenia terenu potwierdziły swoją przydatność z punktu widzenia stosowania metod zdalnej rejestracji stanu zanieczyszczenia środowiska

- Zarejestrowane różnice w cechach spektralnych zostały potwierdzone badaniami biometrycznymi i geochemicznymi oraz bardzo szczegółowymi analizami chemicznymi,

- W przypadku analiz chemicznych pożądaną dokładność oznaczeń mikrośladów zapewnia stosowanie najnowszej generacji aparaty ICP-MS oraz metod mikrofalowej mineralizacji próbek.

– Wykorzystanie technik hiperspektralnych do oceny stanu środowiska wymaga stosowania metod i technik prac terenowych i laboratoryjnych, które zapewniają uzyskanie szczegółowej informacji referencyjnej pozwalającej na identyfikację badanych obiektów i poziomu ich zanieczyszczenia.

– Uzyskane wyniki spektrometrycznych pomiarów terenowych i zebrane charakterystyki spektralne badanych gatunków i zbiorowisk mogą być traktowane jako materiał referencyjny do kalibracji obrazów hiperspektralnych (np. ROSIS).

Literatura:

- Bargagli, R. 1998, *Trace Elements in Terrestrial Plants, An Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery*, Springer, Ss. 324
- Belward A.S., 1991, Spectral characteristics of vegetation, soil and water in the visible, near-infrared and middle-infrared wavelengths, W: Belward A.S., Valenzuela C.R., (red), *Remote sensing and Geographic Information Systems for resource management in developing countries*, Kluwer, Netherlands, Ss. 508
- Bogusz W., Garbarczyk J., Krok F., 1997, *Podstawy fizyki*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Ss. 569
- Brooks R.R., 1972, *Geobotany and biogeochemistry in mineral exploration*, Harper&Row Publishers, Inc., New York
- Bueker C., Clevers J.G.P.W., 1992, *Imaging spectroscopy for agricultural applications*, Report LUW-LMK-199206, Wageningen Agricultural University, Ss. 88
- Buschmann C., Nagel E., 1993, In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation, *International Journal of Remote Sensing* 14, Ss. 711-722
- Carranza E.J.M., 2002, Geologically-constrained mineral potential mapping: examples from the Philippines, Manuscript rozprawy doktorskiej (wersja pdf), Technical University of Delft and ITC, Delft, Enschede
- Clevers J.G.P.W., Bueker C., 1991, Feasibility of the red-edge index for the detection of nitrogen deficiency, *Proceedings 5th International Colloquium – Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France, 14-18 January 1991 (ESA SP-319), Ss. 165-168
- Collins W., 1978, Remote sensing of crop type and maturity, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43, Ss. 43-55
- Conway G.R., Pretty J.N., 1991, *Unwelcome Harvest, Agriculture and Pollution*, Earthscan Publications Ltd., London
- Demirezen D., Aksoy A., 2004, Accumulation of heavy metals in *Typha angustifolia* (L.) and *Potamogeton pectinatus* (L.) living in Sultan Marsh (Kayseri, Turkey), *Chemosphere* 56, Ss. 685–696.
- Deng, H., Ye, Z.H., Wong M.H., 2004, Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China, *Environmental Pollution* 132, Ss. 29-40.
- Gates D.M., Keegan H.J., Schleiter J.C., Weindner V.R., 1965, Spectral properties of plants, *Applied Optics* 4(1), Ss. 11-20
- Hoag N.A., Slaven K.J., Stellway K.L., Mackiewicz J., Sridhar P., Lea M., Metzler R.M., Greene L.M., Labowitz K.M., Sanders H., Padilla P., Smith T., 2000, *Satellites and Oceanography, Marine Phytoplankton and the Biosphere*, UCSC, Santa Barbara, <http://www.mbari.org/staff/ryjo/cosmos/it/ite.html>, aktualność 10.10.2007
- Horler D.N.H., Barber J., Barringer A.R., 1980, Effects of heavy metals on the absorbance and reflectance spectra of plants, *International Journal of Remote Sensing* 1(2), Ss. 121-136
- Hyde Hecker J., 2003, Investigation of the relationship between chlorophyll concentration and high spectral resolution data of *Phragmites australis* in heavy metal contaminated sites, *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation ITC*, Enschede, the Netherlands
- Jakomulska A., Zagajewski B., Traut A., 2002, Application of field remote sensing techniques for vegetation investigation, Case study of Siwica Glade Reserve. W: *Miscellanea Geographica Vol. 10*. Warsaw University, Faculty of Geography and Regional Studies. Warsaw
- Kumar L., Schmidt K., Dury S., Skidmore A., 2001, *Imaging Spectrometry and Vegetation Science*, W: van der Meer F.D., de Jong S.M., (red.), *Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications*, Kluwer Academic, Ss. 405
- Lee K.Y., Yang M.K., Yoon Y.Y., Shim S.K., Cho S.Y., Seo B.K., Chung Y.S., Lee J.H., 2004, Biomonitoring of environmental pollution based on studies of trace elements in soil and crops, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol., 259, No. 1., Ss. 69-74
- Leopold A.C., Kriedmann P.E., 1975, *Plant Growth and Development*, 2nd edition, McGraw-Hill Company, Ss. 545
- Madejón P., Marañón T., Murillo J., M., Robinson B., 2006, In defence of plants as biomonitors of soil quality, *Environmental Pollution* 143, Ss. 1-3.
- Marschner H., 1995, *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd edition, Academic Press Ltd., London
- Matuszkiewicz W., 2001, *Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski*, PWN, Warszawa
- Mertens J., Luyssaert S., Verheyen K., 2005, Use and abuse of trace metal concentrations in plant tissue for biomonitoring and phytoextraction, *Environmental Pollution* 138, Ss. 1-4
- Odor L., Csirik G., Akos E.V., 1998, Field trip guide: Geology, ore mineralization, and some aspects of environmental impacts (Matra Mountains, Hungary), Geological Institute of Hungary and Hungarian Geological Survey, Budapest.
- Petykiewicz J., 1986, *Optyka falowa*, Wydanie 2 zmienione, PWN, Warszawa, Ss. 278
- Samecka-Cymerman, A., Kempers, A.J., 2001, Concentrations of heavy metals and plant nutrients in water, sediments and aquatic macrophytes of anthropogenic lakes (former open cut brown coal mines) differing in stage of acidification, *The Science of the Total Environment* 281, Ss. 87-98
- Stankovic Z., Pajevic S., Vuckovic M., Stojanovic S., 2000, Concentrations of trace metals in dominant aquatic plants of the Provala (Vojvodina, Yugoslavia), *Biol. Plant* 43 (4), Ss. 583–585.
- Swain P.H., Davis S.M., 1978, *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, McGraw-Hill Inc, Ss. 396
- Welles J.M., Norman J.M., 1991, Measurement of canopy architecture, *Agronomy Journal*, Vol. 83, No. 5

- Wierzbicka M., 1991. Skażenie roślin ołowiem, Materiały konferencyjne Zanieczyszczenie Środowiska, a Fizjologia Roślin, Polskie Towarzystwo Botaniczne, Sekcja Fizjologii i Biochemii Roślin Oddział Warszawski, 10-11.05.1991
- Wierzbicka M., 1995, Oddziaływanie metali ciężkich na rośliny, PTP im. Kopernika, Nr 44 (3-4), Ss. 639-651
- Wolterbeek B., 2002, Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives, Environmental Pollution 120, Ss. 11–21.
- Woźny A. (red.), 1995, Ołów w komórkach roślinnych, Pobieranie, reakcje, odporność, Sorus, Poznań
- Zagajewski B., 1998, Określenie możliwości detekcji ołowiu w roślinności i glebie za pomocą technik teledetekcyjnych, Maszynopis pracy magisterskiej wykonanej pod opieką prof. dr hab. Jana R. Olędzkiego na Międzywydziałowych Studiach ochrony Środowiska UW, Warszawa
- Zagajewski B., 2000, Remote sensing measurements of lead concentrations in plants, W: Miscellanea Geographica Vol. 9., Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw University, Warsaw, Ss. 267-280
- Zagajewski B., Sobczak M., Wrzesień M., Kozłowska A., 2006, Badania górskich zbiorowisk roślinnych z użyciem naziemnych technik hiperspektralnych, W: Mirek Z., Godzik B., (red.), Tatrzański Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych, Tom II, Nauki biologiczne, TPN, PTPNoZ – Oddział Krakowski, Zakopane, Ss. 125-136
- Zurzycki J., Michniewicz M., 1985, Fizjologia roślin, PWRiL Warszawa, Ss. 726.



Dr Bogdan Zagajewski, absolwent Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska UW. Od 15.11.1995 r. zatrudniony w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji (wcześniej Zakład Teledetekcji Środowiska) Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół teledetekcji i SIG i ich zastosowań w badaniach środowiska. Od roku 2002 zajmuje się technikami hiperspektralnymi w badaniach nad roślinnością. Dane kontaktowe: e-mail: bogdan@uw.edu.pl, tel. 022 5521507, fax 022 5521521, http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/bz_pl.html



Mgr Jerzy Lechnio jest absolwentem Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW. W latach 1986 -1993 był pracownikiem Mazowieckiego Obserwatorium Geograficznego WGiSR UW. Od 1993 roku jest zatrudniony w Zakładzie Geoekologii WGiSR UW. Począwszy od 2001 roku jest kierownikiem Laboratorium Geoekologicznego. Jego zainteresowania koncentrują się na problemach oceny poziomu zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi oraz substancjami pochodzącymi z emisji gazowej, a także problemach zintegrowanej oceny procesów w krajobrazie. Odrębną sferę zainteresowań stanowi problematyka chemicznej analizy próbek środowiskowych z zastosowaniem spektrometrii UV/VIS, absorpcji atomowej i spektrometrii masowej (ICP-MS). E-mail: jrlechni@uw.edu.pl



Mgr Marcin Sobczak, absolwent Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych (MISMaP), pracę magisterską wykonał w Zakładzie Teledetekcji Środowiska Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół teledetekcji, a w szczególności metod klasyfikacji danych hiperspektralnych. E-mail: marcinsobczak@yahoo.es