

Określenie możliwości detekcji ołowiu w trawach* za pomocą spektrometru SPZ-5

*A possibility assessment of the lead detection in grasses
using spectrometer SPZ-5*

Bogdan ZAGAJEWSKI

The development of environmental studies inspires to undertake efforts at detecting heavy metals using remote sensing techniques. This paper discusses a concept of lead detection in grass vegetation using 24-channel spectrometer SPZ-5 in the range 400–1025 nm. The research was conducted on two samples of plants placed in containers with the dimensions 80 × 40 × 30 cm. One sample was a control one, whereas to the other a solution of $Pb(NO_3)_2$ was added. The time schedule of the experiment was the following: in the first stage, soil samples with unchanged structure were collected and placed in the aforementioned containers. This was followed by a series of spectrometric measurements of the soil, intended to determine the impact of humidity, caking etc. on the actual spectral response. Subsequently, a grass mix was planted, which had the following proportions: *Festuca rubra pennille* (40 per cent), *Festuca rubra tamara* (20 per cent), *Lolium perenne taya* (10 per cent), *Festuca ovina ridu* (20 per cent), *Poa pratensis balin/conni* (10 per cent). After approximately a month grass mowing began in order to help develop the roots. When this was effected, spectrometric measurements of grass were conducted prior to applying lead. Subsequently, lead was administered (first time

— to the leaves; second and third time — to the soil). Spectrometric measurements were done when the surface layer of grass was dried, and the grass height was about six centimetres. The first effects of the influence of lead on plant tissues could be observed after approximately a month. Subsequent measurement cycles did not bring any significant changes. After subsequent five to six months a stronger differentiation between the control group plants and the polluted plants could be observed, mainly in the infrared. Additionally, in the course of spectrometric measurements plant samples to measure the content of photosynthetic dyes and lead in tissues were collected. Upon conducting the final analyses it transpired that in the visible range, the curves of spectral reflection are almost parallel, while the reflection is lowered by approximately 15 to 20 per cent in plants subject to Pb influence. In the infrared range, the differentiation of the reflection coefficient values is higher and ranges between 27 to 36 per cent. Taking into account the standard deviation it can be concluded that the impact of lead on the spectral response is unquestionable. This has been corroborated by the results of biometric measurements.

Badania teledetekcyjne obszarów zanieczyszczonych metalami ciężkimi

W ostatnich latach daje się zauważyć szczególnie szybki rozwój teledetekcji, popularyzacja metod zdalnej detekcji wkracza w coraz to szersze kręgi badań. Tym nie mniej, nie udało się znaleźć w literaturze zbyt wiele

wiarygodnych informacji o zastosowaniu omawianej metody badań do identyfikacji obszarów zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Wydaje się, że taki stan rzeczy ma swoje uzasadnienie w tym, iż badania nad zanieczyszczeniami wywołanymi przez metale ciężkie są prowadzone w chwili obecnej głównie klasycznymi metodami, ponieważ nie są znane dokładnie mechanizmy mi-

* Artykuł jest publikacyjną wersją pracy magisterskiej wykonanej w 1998 r. na Międzywydziałowych Studiach Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego, pod kierunkiem prof. J.R. Olędzkiego.

gracji, wpływu oraz interakcji zanieczyszczeń, wywołanych przez metale ciężkie. Autorzy badań są często sprzeczni w opiniach dotyczących oddziaływań danego pierwiastka na procesy fizjologiczne, a obserwowane reakcje są sprzecznie interpretowane.

Z danych zawartych w literaturze (Coulson, Bridges, 1984; Jago, Curran, 1995) jasno wynika, że były wykonywane eksperymenty, w których starano się dokonać detekcji obszarów zanieczyszczonych przez metale ciężkie. Próby te były przeprowadzane na podstawie zobrażeń wykonanych przez lotniczy skaner MSS-82 (o terenowej rozdzielczości 2–5 m), wykorzystanie 4, 5, 7 kanału TM z satelity Landsat oraz badań terenowych. Na podstawie pozyskanych informacji, wyżej wymienionym autorom udało się wykonać mapę zanieczyszczeń w skali 1:3500. Zobrazowanie MSS-82 pozwala wykonać mapę w skali 1:2500. Przy tym opracowaniu należy zauważyć, iż występujące zanieczyszczenie gleb ołowiem wahało się w granicach 262–11390 ppm. Średnie zanieczyszczenie gleb w powierzchniowej warstwie wynosiło około 3000 ppm. Średnie zanieczyszczenie gleb w Polsce wynosi około 20 ppm.

W drugim cytowanym eksperymencie, dla uchwycenia zmian biochemicznych w roślinie, została wykorzystana wysoka rozdzielczość spektralna. Autorzy (Jago, Curran, 1995) za punkt wyjścia wzięli koncentrację chlorofilu w roślinie, który jest wrażliwym indykatorem kondycyjnego stanu rośliny oraz zakres spektralny 400–1100 nm. Do zobrażeń obszaru badań została wykorzystana kamera CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), a do pomiarów promieniowania spektrometr SE-590.

Źródłem zainteresowania była zależność pomiędzy zanieczyszczeniem środowiska, zawartością chlorofilu, odpowiedzią spektralną uzyskaną od rośliny oraz zarejestrowaną odpowiedzią przez detektor. Pośrednią informacją mierzoną w środowisku był LAI (*Leaf Area Index*), zawartość chlorofilu oraz zawartość metali ciężkich.

Reasumując, do eksperymentu zostały wykorzystane dane pochodzące z pomiarów naziemnych: pomiary spektrometryczne, biochemiczne, LAI oraz z zobrażeń lotniczych, o rozdzielczości 2 m. W opinii autorów badań udało się uchwycić prawidłowości, wiążące wszystkie omawiane pomiary.

Wśród innych interesujących publikacji należy wymienić *Optical Remote Sensing of the Earth* autorstwa A.F.H. Goetz, J.B. Wellman, oraz W.L. Barnes (1985), w której przedstawiono wpływ poszczególnych elementów pochodzących od procesów roślinnych na uzyskiwaną odpowiedź spektralną. Dla przykładu można podać, że zmiany w funkcjonowaniu barwników można badać w zakresie 400–700 nm, zmiany strukturalne w komórce są uwidocznione w przedziale od 700–1250 nm, zaburzenia w gospodarce wodnej najlepiej uwidoczniają się w zakresie 1250–2500 nm. Na podstawie powyższych wywodów można stwierdzić, że techniki teledetekcyjne są wykorzystywane do prób zdalnej detekcji metali ciężkich. Podjęcie więc własnych badań eksperymentalnych w tym zakresie było w pełni uzasadnione.

Metodyka badań

Problem zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi jest zagadnieniem, któremu poświęca się coraz więcej uwagi w pracach naukowo-badawczych (Zagajewski, 1998). Wynika to z dużej szkodliwości oraz szerokiego rozpowszechnienia tej grupy pierwiastków. Mierzone stężenia ołowiu w środowisku waha się w dużych granicach, począwszy od obszarów, w których nie rejestruje się przekroczenia tła geochemicznego, aż do miejsc, w których udział ołowiu wynosi dziesiątki procent ogólnej masy gleby. Najczęściej ma to miejsce w bezpośrednim sąsiedztwie obiektów przemysłowych lub też wychodni naturalnych złóż minerałów zawierających w swym składzie ołów. Obszary te są zinwentaryzowane i monitorowane przez służby ochrony środowiska. Problemem są natomiast obszary wzdłuż tras komunikacyjnych, zanieczyszczane przez pojazdy napędzane benzyną, zawierającą w swym składzie czteroetylen ołowiu. Jak wynika z badań prowadzonych w Katedrze Gleboznawstwa Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, w pasie kilkuset metrów po obu stronach jezdnii występują znaczne zanieczyszczenia metalami ciężkimi. Niestety, w większości przypadków, nikt nie monitoruje stopnia zagrożenia wynikłego z obecności metali ciężkich, przez co tereny te są wykorzystywane do produkcji rolnej, stwarzając poważne źródło zagrożenia dla konsumenta.

Wydaje się więc celowe opracowanie zdalnej metody detekcji metali ciężkich, która pozwoliłaby różnicować obszary o większych i mniejszych skażeniach. Ułatwiłoby to monitorowanie dużych obszarów i wskazywanie najbardziej zanieczyszczonych do dalszych badań z wykorzystaniem bardzo precyzyjnych, ale też czasowo- i kosztochłonnych metod analizy chemicznej.

Próbując odpowiedzieć na pytanie, czy istnieje możliwość zdalnej detekcji metali ciężkich zawartych w roślinności trawiastej, przeanalizowano dostępną literaturę, z której wynikało, że nie ma danych dotyczących przebiegu krzywej odbicia spektralnego (współczynnik odbicia w funkcji długości fali) dla roślin poddanych działaniu ołowiu.

Pierwszym etapem było określenie przebiegu omawianej krzywej. Aby temu sprostać, należało przygotować próbki roślin, z których jedna spełniałaby funkcję kontrolną, a druga byłaby poddawana działaniu ołowiu. Urządzeniem rejestrującym był 24 kanałowy spektrometr SPZ-5. Mierzył on wartość energii odbitej od próbek oraz ekranu z bieli (BaSO_4), który służył jako wzorzec do kalibracji uzyskiwanych wyników (ryc. 1, 2). Pomiary te pozwoliły wykreślić przebieg krzywej odbicia spektralnego z dużą dokładnością.

Materiał badawczy

Przedmiotem badań była mieszanina traw o następującym składzie: *Festuca rubra pennille* — 40%, *Festuca rubra tamara* — 20%, *Lolium perenne taya* — 10%, *Festuca ovina ridu* — 20%, *Poa pratensis balin /conni* —

10%. Przy wyborze traw kierowano się: dużym udziałem powierzchniowym w ogólnym pokryciu terenu; dużą tolerancją na ścinanie, umożliwiającą zachowanie podobnego pokroju rośliny w toku całego eksperymentu; brakiem rozwiniętych organów spichrzowych, gromadzących metale ciężkie; łatwością utrzymania rośliny w dobrej kondycji fizjologicznej; dużą jednorodnością ilościową i jakościową; dużym udziałem powierzchni liści do całej rośliny; płytkim, a jednocześnie rozbudowanym systemem korzeniowym.

Ogólne założenia tego doświadczenia polegały na tym, iż do rozwiniętych traw podano trzykrotnie roztwór ołowiu $Pb(NO_3)_2$, a następnie badano odpowiedzi spektralne roślin zanieczyszczonych. Uzyskane wyniki porównano z odpowiedziami spektralnymi uzyskanymi od roślin wyhodowanych w identycznych warunkach, ale bez ołowiu.

Harmonogram eksperymentu

Pierwszym etapem prac doświadczalnych było przygotowanie pojemników na glebę. Zostały one wykonane z desek, jeden pojemnik był metalowy. Od wewnątrz wyłożono je folią ogrodową, w celu zapobieżenia migracji roztworów wodnych. Miały one różne rozmiary, ale nie mniejsze niż $80 \times 40 \times 30$ cm. Rozmiary te były wymuszone kątem widzenia oraz wysokością umieszczenia spektrometru. Tak przygotowane kuwety zostały napełnione glebą i zasiane mieszkanką traw.

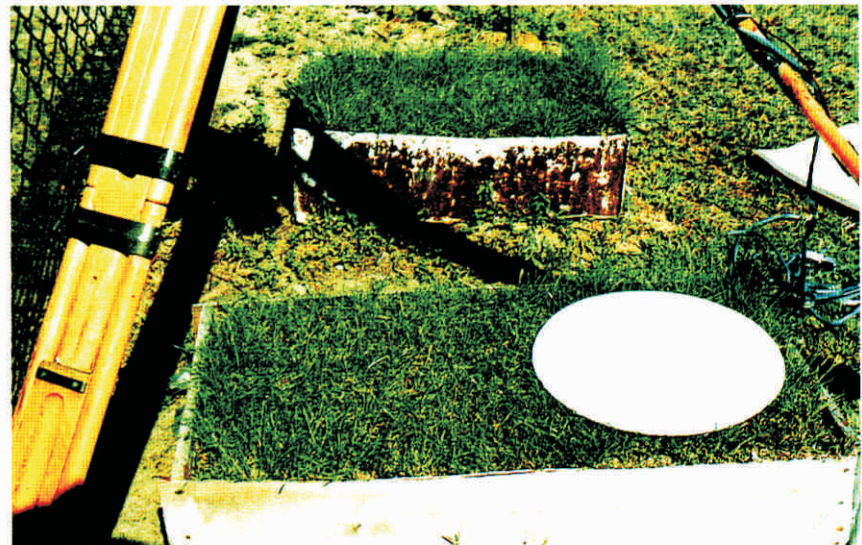
W drugim etapie rozpoczęła się seria wstępnych pomiarów spektrometrycznych, których celem było poznanie jakościowego wpływu różnych czynników na uzyskiwaną odpowiedź spektralną. Najprostszą sprawą było ustalenie wymogów dotyczących promieniowania słonecznego, ponieważ powszechnie uznaje się, że niebo powinno być bezchmurne. Pozwala to wykluczyć dodatkowe źródła promieniowania oraz rozpraszanie fal świetlnych. Kąt padania promieni słonecznych powinien być maksymalnie duży. Zatem idealnymi warunkami dla pomiarów spektrometrycznych są miesiące letnie, południowe godziny i bezchmurne niebo.

Następnym badanym elementem była wysokość źdźbeł traw. Doświadczenia te były przeprowadzone na trawie znajdującej się w ogrodzie, o takim samym składzie gatunkowym, jaki został zasiany do pojemników doświadczalnych.

Po kilku pomiarach okazało się, że optymalna wysokość kobierca traw wynosi około 5–7 cm. Pozwala to zachować pionowy pokrój rośliny. Ma to szczególnie



Ryc. 1. Zestaw doświadczalny do pomiarów spektrometrycznych Pb w trawach
Fig. 1. Experimental set to spectral measurements of grasses with lead



Ryc. 2. Ekran kalibracyjny na tle kuwet z trawami
Fig. 2. Calibration panel and container with grasses

ważne znaczenie, ponieważ do pomiarów spektrometrycznych badany obiekt powinien odbijać promieniowanie we wszystkich kierunkach równomiernie, to znaczy mieć charakter powierzchni lambertowskiej. Dodatkowym warunkiem dobrego pomiaru spektrometrycznego jest odpowiednio duża gęstość traw. Można ją osiągnąć poprzez częste podlewanie i koszenie. Zachowując przedstawione powyżej warunki uzyskuje się odpowiedź spektralną pochodzącą od roślin, minimalizując tym samym sygnał pochodzący od gleby.

Z istotnych elementów pozostało jeszcze ustalenie optymalnej wilgotności dla roślin i gleby. Jest to bardzo istotny problem, ponieważ wilgoć zmienia rejestrowany sygnał. Duża różnica pomiędzy zawartością pary wodnej w powietrzu atmosferycznym i glebie powoduje nasilenie transpiracji wody przez rośliny, co z kolei powoduje szybszą migrację rozpuszczonych jonów ołowiu w roztworze glebowym. Istnieje zatem ścisłe powiązanie pomiędzy wilgotnością, a występowaniem ołowiu w tkance roślinnej.

Analizując powyższe wywody, nie sposób nie zauważyć, że ilość wody zarówno w glebie, jak i w roślinie (wigor) oraz powietrza atmosferycznym ma istotny wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów spektrometrycznych.

Podczas wykonywania eksperymentu istniała możliwość regulowania warunków, w jakich były przeprowadzane pomiary spektrometryczne. Pierwszym takim warunkiem, było sterowaniem podażą wody. Polegało to na podawaniu wody zgodnie z zapotrzebowaniem roślin. Analizując literaturę dotyczącą prawidłowego pielęgnowania roślin, można znaleźć prostą metodę określania optymalnej wilgotności gleby dla wymogów hodowanej rośliny. Polega ona na tym, iż wodę dostarczamy wtedy, gdy powierzchniowe zbrzylenie gleby jest suche i znajduje się na wilgotnym podłożu.

Pomiary spektrometryczne

Do pomiarów spektrometrycznych został wykorzystany 24 kanałowy spektrometr SPZ-5. Jest to urządzenie opracowane i skonstruowane w Zakładzie Teledetekcji Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk. Zespół Zakładu opracował ponadto metodykę wykonywania pomiarów i opracowywania wyników. Przed przystąpieniem do dalszych rozważań, należy się słowo komentarza dotyczącego używania nazwy „spektrometr”. Śledząc literaturę można znaleźć, kilka określeń na ten typ urządzenia: spektrometr, spektroalbedomierz, spektrofotometr, radiometr, itp. W. Marczewski (1997) definiuje spektrometr jako radiometr charakteryzujący źródło według spektralnej zawartości promieniowania. Niemniej występuje wiele kontrowersji w tej kwestii.

Dla potrzeb tego opracowania będzie stosowana nazwa producenta „spektrometr SPZ-5”. Spektrometr SPZ-5 wykorzystuje 23 przedziały spektrum o wąskich półokowych szerokościach filtrów, wynoszących $\Delta\lambda$ 8–17 μm , także maksima przepuszczanej energii wynoszą odpowiednio 400, 415, 418, 440, 455, 478, 499, 525, 549, 554, 568, 582, 598, 615, 638, 670, 703, 746, 784, 800, 860, 945, 1025 nm. Ponadto przed pierwszym kanałem umieszczony został dodatkowy, który nie ma żadnego znaczenia dla użytkownika. Analiza powyższych przedziałów jednoznacznie wskazuje, że pomiar jest wykonywany w zakresie widzialnym dla człowieka (400–670 nm) oraz bliskiej podczerwieni, której oko ludzkie nie rejestruje (703–1025 nm). Kąt widzenia spektrometru wynosi 15° , wysokość wykonywania pomiaru jest dowolna, ze względu na możliwość regulacji ustawienia statywu lub też mocowania spektrometru na dowolnym wysięgniku. Układ optyczny spektrometru zawiera kilka torów optycznych. Umożliwiają one jednoczesne prowadzenie pomiarów, dokonywania kalibracji uzyskiwanych wyników oraz obserwacji badanego obiektu. Układ optyczny spektrometru SPZ-5 jest identyczny jak w spektrometrze SPZ-2 (Rataj, Gadomski, Makal, Orleański, Tryburcy, 1988).

Powracając do głównego wątku pomiarów spektrometrycznych, należy stwierdzić, że napromieniowując obiekt znaną ilością energii (E_{nl}) o ściśle określonej długości

promieniowania, można następnie zmierzyć ilość energii odbitej (E_{ol}) od tego samego obiektu, w identycznych warunkach w jakich został on napromieniowany. Posiadając obie wartości można obliczyć dla danej długości fali (λ) spektralny współczynnik odbicia (W_{ol}):

$$W_{\text{ol}} = \frac{E_{\text{ol}}}{E_{\text{nl}}}$$

Analogicznie postępuje się dla każdej długości promieniowania elektromagnetycznego z badanego zakresu. Po uzyskaniu wszystkich danych nanosi się uzyskane wyniki na prostokątny układ współrzędnych „x, y”, gdzie na osi „y” znajdują się obliczone współczynniki odbicia (W_{ol}), na osi „x” kolejne przedziały spektrum. Łącząc naniesione punkty uzyskuje się tzw. krzywą odbicia spektralnego. Krzywa ta jest elementem charakterystycznym dla każdego obiektu.

W przypadku roślinności istnieje prawidłowość, że w zakresach promieniowania odpowiadających zielonej barwie istnieje maksimum odbicia, w zakresie odpowiadającym czerwonej barwie istnieje minimum odbicia, w podczerwieni natomiast roślinność prawie nie pochłania, co powoduje, że współczynnik odbicia osiąga największe wartości z całego spektrum elektromagnetycznego. Znając powyższą prawidłowość dla roślin zielonych można porównywać pomiary różnych grup roślinności, a następnie wnioskować, między innymi, o kondycji zdrowotnej poszczególnych zbiorowisk.

Przytoczony powyżej wywód jest pewnym uproszczeniem, a wnikanie w szczegóły w tym miejscu nie jest celowe. Zostało ono przytoczone dla jasności dalszych rozważań i sprecyzowania wykorzystywanych pojęć.

Dla pełni obrazu należy przedstawić także dwie inne jednostki powszechnie stosowane w teledetekcji: emitancję energetyczną i luminancję energetyczną (Rataj, 1997). Jednostki te można wyliczyć na podstawie pomiarów kalibracyjnych ekranu, wykonywanych podczas badań danego obiektu oraz danych zawartych w metryce ekranu, uzyskanej z laboratorium, wykonującego pomiar kalibracyjny danego ekranu.

Są to: emitancja energetyczna mierzona w: W/m^2 :

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$$

gdzie: M_e — emitancja energetyczna; $d\Phi_e$ — strumień energetyczny; dS — elementarna powierzchnia.

Drugą jednostką jest luminancja energetyczna mierzona w: $Wsr^{-1}m^{-2}$:

$$L_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega dS \cos\epsilon}$$

gdzie: $d\Phi_e$ — strumień energetyczny; $d\omega$ — elementarny kąt przestrzenny; dS — elementarna powierzchnia.

Jednakże dla oceny zjawisk zachodzących na powierzchni Ziemi i charakteryzowania jej powierzchni, najczęściej używa się współczynnika odbicia (Janowska, 1996). Stosowanie tego współczynnika ma poważną zaletę, a mianowicie eliminuje możliwość wprowadzenia kilku błędów związanych z kalibracją urządzenia, ekranu, itp. Posługując się wartościami współczynnika odbicia można precyzyjnie porównywać badane próby.

Idea działania spektrometru SPZ-5 opiera się o umieszczenie 24 filtrów na obracającej się tarczy, powyżej której znajduje się detektor połączony z układami elektronicznymi, które zamieniają impulsy promieniowania elektromagnetycznego na elektroniczny zapis cyfrowy. Zapis każdego impulsu elektromagnetycznego odbywa się na jednym z 65536 stopni (2^{16}). Pozwala to na uchwycenie dużej zmienności rejestrowanego sygnału.

Całością prac wykonywanych przez spektrometr SPZ-5 steruje komputer (notebook) za pomocą programu spz5.exe. Omawiane rozwiązanie pozwala na pełną kontrolę i wstępną analizę przesyłanych danych, które następnie mogą zostać zapisane w pamięci komputera i opracowywane w dowolnie wybranym arkuszu kalkulacyjnym.

Przebieg pomiaru jest następujący:

1. Ustawienie statywu podtrzymującego spektrometr;
2. Umieszczenie spektrometru na stelażu powyżej obiektu badań;
3. Ustawienie spektrometru tak, aby cały badany obiekt znajdował się w polu pozyskiwania danych;
4. Podłączenie przewodów: RS232 (komputerowego), startowego, zasilającego (z baterii lub zasilacza);
5. Włączenie komputera, zasilania, spektrometru, układu przesyłania danych;
6. Uruchomienie programu obsługującego spektrometr (spz5.exe) na komputerze pracującym w oparciu o DOS;
7. Ustawienie parametrów pomiarowych (data, godzina, współrzędne geograficzne, ilość pomiarów, podanie pliku, w którym mają zostać zapisane dane, wybranie opcji wykonywania pomiarów);
8. Wykonanie pomiarów badanego obiektu;
9. Zapisanie danych;
10. Wykonanie pomiarów kalibrujących (ekran z bieli) dla danych z badanego obiektu;
11. Zapisanie danych;
12. Rozmontowanie sprzętu.

Po zapisaniu danych następuje opracowanie wyników w arkuszu kalkulacyjnym, na przykład MS Excel. Problem analizy wyników zostanie przybliżony w części poświęconej wynikom.

Metody statystyczne opracowania wyników pomiarów spektrometrycznych

Przy opracowywaniu uzyskanych wyników w pomiarach spektrometrycznych posłużono się metodami statystycznymi (Guilford, 1964).

Do obliczenia średniej arytmetycznej wykorzystano wzór:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

gdzie: \bar{x} — średnia arytmetyczna; x_i — kolejny pomiar (od $i = 1$ do n); n — ilość pomiarów, a do obliczenia odchylenia standardowego:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n}}$$

gdzie: σ — odchylenie standardowe, \bar{x} — średnia arytmetyczna; x_i — kolejny pomiar (od $i = 1$ do n), n — ilość pomiarów.

Do obliczenia współczynnika zmienności (V) zastosowano wzór:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

gdzie: V — współczynnik zmienności, σ — odchylenie standardowe, \bar{x} — średnia arytmetyczna.

Na potrzeby poniższej pracy jest także wprowadzona zmodyfikowana postać współczynnika zmienności. Oznaczony jest on symbolem D . Współczynnik ten określony będzie następującym wzorem:

$$D = \frac{W_{oA}}{W_{oB}} \cdot 100\%$$

gdzie: D — współczynnik zmienności, W_{oA} — współczynnik odbicia obiektu A, W_{oB} — współczynnik odbicia obiektu B.

Analizując znaczenie współczynnika zmienności D można stwierdzić, że jeśli nie występuje żadna różnica pomiędzy badanymi współczynnikami odbicia, to wartość współczynnika zmienności D wynosi 100 (%), jeśli natomiast występuje zmienność pomiędzy badanymi zjawiskami (A, B) to współczynnik zmienności D wskaże, w jakim procencie występuje różnica pomiędzy zjawiskiem B i A.

Pomiary zawartości ołowiu w badanych próbach

W celu określenia rzeczywistej ilości ołowiu w badanych próbach wykonano pomiary z wykorzystaniem analizy chemicznej (Atomowa Absorpcyjna Spektrometria — ASA). Skorzystano w tym przypadku z doświadczeń oraz aparatury znajdującej się w Katedrze Gleboznawstwa Wydziału Rolniczego Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Do pomiarów pobrano tylko próby badanych roślin, ponieważ gleby, ze względu na brak spektrometrycznej detekcji zanieczyszczeń ołowiu z wykorzystaniem spektrometru SPZ-5, nie były dalej analizowane chemicznie. Pobrane w czasie pomiarów spektrometrycznych próby traw zostały zamrożone, w celu przechowania do końca pomiarów spektrometrycznych. Następnie wysuszono je w temperaturze 900° i 1450°C oraz zmielone na proszek, z którego odważono po 1 g naważek do porcelanowych pojemników i spalono je na płycie kuchennej elektrycznej. Po wystygnięciu, próbki zostały spopielone w piecu muflowym. Następnie do każdego pojemnika dodano po 5 ml 10% HCl, w celu rozpuszczenia i wymycia ołowiu. Po podgrzaniu uzyskany roztwór został przeniesiony na lejek i był filtrowany przez bibułę filtracyjną. W celu całkowitego wymycia ołowiu, cały układ był wielokrotnie przemywany gorącym i zakwaszonym roztworem wody destylowanej (1 dm^3 wody i 5 ml 10% HCl). Uzyskany przesącz (100 cm^3) został dokładnie wymieszany i pozostawiony do wykonania ilościowego oznaczenia Pb. Wyniki zostały podane w ppm.

Pomiary biometryczne

W celu oznaczenia barwników asymilacyjnych zastosowano metodykę Lichtenthalera i Wellburna (1983), wykorzystywaną w Zakładzie Fizjologii Roślin II, Wydziału Biologii Uniwersytetu Warszawskiego.

Po odważeniu 2-gramowych prób traw i grochu, zostały one dokładnie rozarte w moździerzu razem z: 5 ml 100% acetonu, w celu wymycia barwników z tkanek; szczyptą węgla wapnia, aby zapobiec przekształcaniu się chlorofilu w feofitynę; niewielką ilością piasku kwarcowego, dla szybszego roztarcia tkanek roślinnych. Wszystkie omawiane prace zostały wykonane przy słabym oświetleniu oraz w niskiej temperaturze (około 40°C). Po uzyskaniu homogenatów, zostały one przeniesione ilościowo na lejek Schotta G-4 i przesączone pod obniżonym ciśnieniem za pomocą pompki wodnej. Pozostałość na filtrze Schotta została przemyta niewielkimi ilościami schłodzonego 80% acetonu. Następnie przesącz został przeniesiony do kolbki miarowej i uzupełniony do końcowej objętości 25 ml.

Do ilościowego oznaczania barwników asymilacyjnych pobrano po 1 ml acetonowego ekstraktu barwników. Zostały one rozcieńczone 20-krotnie tak, aby mie-

rzona ekstynkcyja w spektrofotometrze (Shimadzu UV — 160A) mieściła się w granicach 0,1–0,5. Następnie został wykonany pomiar ekstynkcji przy długości fali wynoszącej 663,2 i 646,8 nm dla chlorofilu oraz 470 nm dla karotenoidów. Wszystkie pomiary były wykonywane wobec ślepej próby (80% roztwór wodny acetonu). Uzyskane wyniki zostały wydrukowane z drukarki sprzężonej ze spektrofotometrem.

Wyniki badań eksperymentalnych

Pomiary spektrometryczne traw przed zadaniem ołowiu

Podczas wykonywania pomiarów spektrometrycznych traw obliczono: wartość średnią z pomiarów \bar{x} , odchylenie standardowe σ , współczynnik zmienności V , współczynnik zmienności D oraz współczynnik odbicia. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 1. Wydzielenie „Trawa 1” dotyczy pomiaru roślin kontrolnych, natomiast wyniki reprezentowane przez wyróżnienie „Trawa 2” dotyczą danych uzyskanych z pojemnika, do którego został później podany ołów.

Analizując wyżej wymienione wyniki należy zwrócić

Tabela 1.

Wyniki z pomiarów spektrometrycznych traw przed podaniem ołowiu
Results of spectrometer measurements of grasses before application of lead

Długość fali Wavelength [nm]	Trawa 1 (T.1) Grass 1			Trawa 2 (T.2) Grass 2			Ekran kalibrujący Calibration panel		Współczynnik odbicia Reflectivity coefficient		Współczynnik zmienności D Coefficient of variation D
	\bar{x}	σ	V [%]	\bar{x}	σ	V [%]	\bar{x}	V [%]	T.1	T.2	
400	6,54	4,67	71,41	6,45	4,54	70,39	94,51	17,06	0,069	0,068	101,32
415	10,18	4,25	41,77	10,26	4,20	40,91	196,36	9,00	0,052	0,052	99,18
418	8,87	4,32	48,73	8,23	4,08	49,49	187,24	5,56	0,047	0,044	107,73
440	14,81	3,88	26,22	14,90	3,83	25,73	521,67	4,80	0,028	0,029	99,35
455	17,75	3,75	21,10	17,87	4,20	23,50	617,71	4,95	0,029	0,029	99,32
478	40,85	5,25	12,86	38,99	4,17	10,68	1300,29	5,12	0,031	0,030	104,78
499	92,72	8,93	9,64	84,50	4,72	5,58	2561,24	5,26	0,036	0,033	109,72
525	254,61	23,37	9,18	280,42	17,12	6,10	3933,39	5,37	0,065	0,071	90,79
549	234,62	22,46	9,57	240,86	16,06	6,67	2790,69	5,47	0,084	0,086	97,41
554	219,01	21,99	10,04	231,83	16,09	6,94	2539,31	5,52	0,086	0,091	94,47
568	217,93	20,59	9,45	230,45	17,30	7,51	2980,83	5,55	0,073	0,077	94,57
582	193,19	18,24	9,44	193,19	14,52	7,52	2928,31	5,62	0,066	0,066	100,00
598	163,44	15,76	9,64	163,44	15,39	9,42	2692,64	5,69	0,061	0,061	100,00
615	750,82	73,22	9,75	769,42	21,75	2,83	9298,64	5,76	0,081	0,083	97,58
638	648,87	65,47	10,09	633,22	20,62	3,26	6888,81	5,81	0,094	0,092	102,47
670	440,63	44,27	10,05	437,37	17,29	3,95	4978,85	5,86	0,089	0,088	100,75
703	415,14	43,50	10,48	416,28	15,15	3,64	1895,94	5,81	0,219	0,220	99,73
746	3600,94	363,72	10,10	3547,18	57,10	1,61	8318,86	5,68	0,433	0,426	101,52
784	4772,60	489,01	10,25	4689,78	77,12	1,64	10310,99	5,72	0,463	0,455	101,77
800	9077,89	925,79	10,20	9566,61	194,77	2,04	19866,35	5,78	0,457	0,482	94,89
860	4773,68	495,05	10,37	4776,73	70,05	1,47	9477,39	5,78	0,504	0,504	99,94
945	807,97	85,34	10,56	801,37	22,98	2,87	1501,11	6,02	0,538	0,534	100,82

uwagę na fakt, iż istnieje podobny rozrzut wyników pomiarowych jak w badaniach gleb, kolumny V. Współczynnik zmienności, w przypadku pomiarów dla „Trawy 1” przy dłuższych falach (> 500 nm), jest stały i wynosi około 10 %. Współczynnik zmienności dla „Trawy 2” jest zróżnicowany, ale na ogół niższy niż dla „Trawy 1”. Wartości współczynników odbicia dla pomiarów traw są zbliżone do siebie. Wartości współczynnika zmienności D wahają się w granicach kilku procent.

Przebieg krzywej odbicia spektralnego dla traw, został przedstawiony na ryc. 3.

Pomiary spektrometryczne traw po zadaniu ołowiu

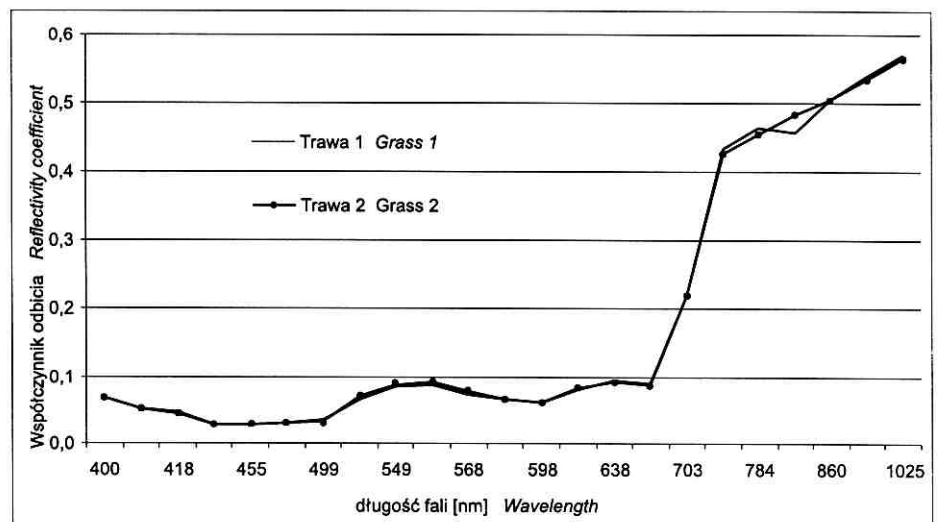
W tej części opracowania przedstawiono dwie serie pomiarowe traw z 6 i 11 tygodnia po zadaniu Pb. Układ oraz metodyka przetworzenia danych została zachowana z poprzednich pomiarów. Kontynuacją wyróżnienia „Trawa 1”, jest „Trawa bez Pb”, natomiast wydzielenie „Trawa z Pb” oznacza wyniki pomiarów spektrometrycznych roślin zanieczyszczonych ołowiem z pojemnika zawierającego „Trawę 2”. Do każdego wyróżnienia („Trawa bez Pb”, „Trawa z Pb”) dodane zostały indeksy, oznaczające tydzień wykonania pomiaru od pierwszego zadania ołowiu. Uzyskane

informacje zostały zebrane w tabelach 2 oraz 3. Graficzną ilustrację zmienności współczynnika odbicia, w funkcji długości fali, przedstawiono na rycinach 4 i 5.

W wyniku analizy tabel 1, 2 i 3 stwierdzono, że trawy kontrolne wszystkich trzech prezentowanych pomiarów spektrometrycznych („Trawa 1”, „Trawa bez Pb(6)”) oraz „Trawa bez Pb (11)”) nie wykazują dużych różnic pomiędzy sobą. Współczynniki zmienności są na podobnym poziomie, wynoszącym kilka procent. Ciekawie natomiast zachowała się trawa, która została zanieczyszczona ołowiem. Przed podaniem metalu, współczynnik zmienności wykazywał bardzo dużą stałość (około 6%, dla kanałów powyżej 500 nm). Współczynnik zmienności D , porównujący w sposób bezpośredni „Trawę 1” i „2”, wykazuje wahania na poziomie kilku procent, bez zaznaczenia wyraźnych tendencji zmian. Po zadaniu ołowiu, po okresie około 4 tygodni, uzyskiwane wyniki pomiarów spektrometrycznych dla próbki kontrolnej i badanej zaczęły się różnić. Wyraźnie zaznaczyło się to po około 6 tygodniach (tabela 2 oraz ryc. 4). Można spostrzec, że największe różnice pomiędzy „Trawą bez Pb (6)”, a „Trawą z Pb (6)”, zaznaczają się w zakresie widzialnym, który jest odzwierciedleniem stanu kondycyjnego barwników fotosyntetycznie czynnych, a w przy-

Ryc. 3. Krzywe odbicia spektralnego dla traw przed zadaniem ołowiu

Fig. 3. Spectral reflectance of grasses before application of lead



Ryc. 4. Krzywe odbicia spektralnego dla traw w 6 tygodniu po zadaniu ołowiu

Fig. 4. Spectral reflectance of grasses 6 weeks after lead application

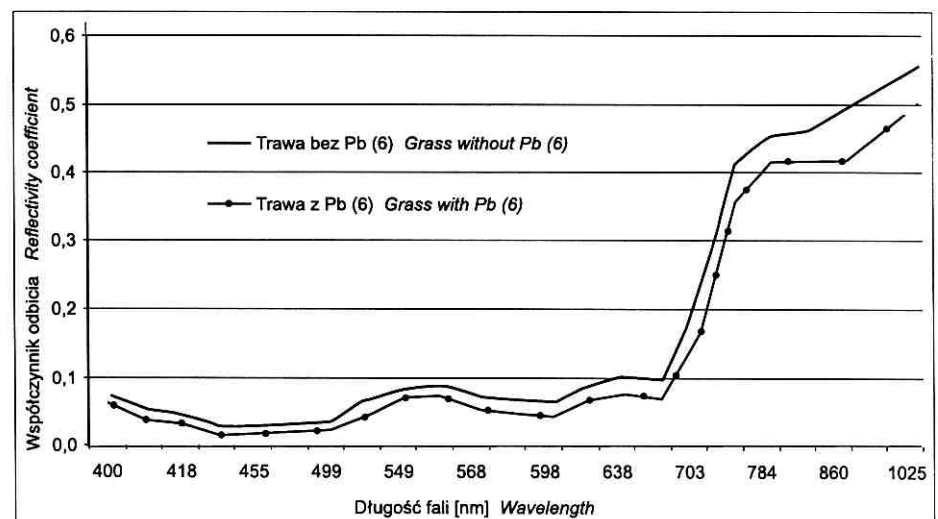


Tabela 2.

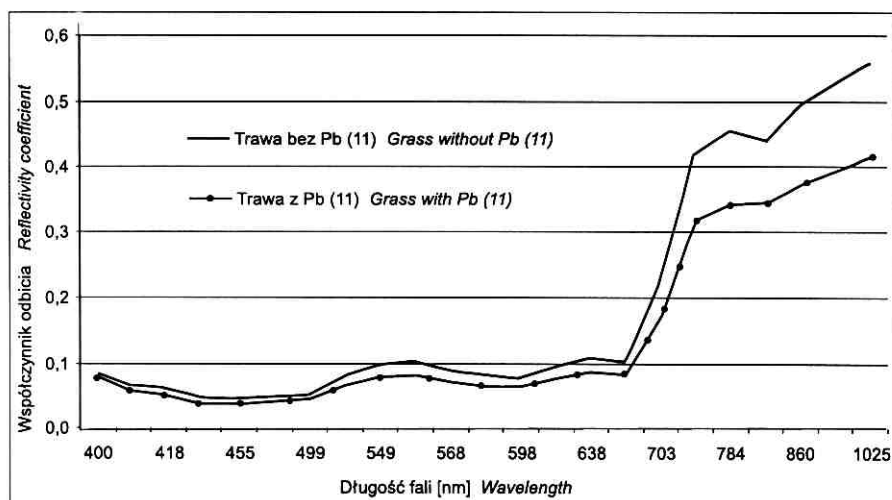
Wyniki pomiarów spektrometrycznych dla traw w 6 tygodniu po zadaniu ołowiu
Results of spectrometer measurements of grasses 6 weeks after lead application

Długość fali Wavelength [nm]	Trawa bez Pb (6) (T.k.) Grass without Pb			Trawa z Pb (6) (T. z Pb.) Grass with Pb			Ekran kalibrujący Calibration panel		Współczynnik odbicia Reflectivity coefficient		Współczynnik zmienności D Coefficient of variation D
	\bar{x}	σ	V [%]	\bar{x}	σ	V [%]	\bar{x}	V [%]	T.k.	T. z Pb.	
400	7,18	3,70	51,61	6,05	3,24	53,47	92,35	19,40	0,078	0,066	118,593
415	10,92	3,28	30,07	7,41	4,01	54,14	195,98	10,02	0,056	0,038	147,313
418	9,23	3,36	36,36	6,70	2,87	42,80	191,56	6,04	0,048	0,035	137,765
440	17,25	2,91	16,87	9,68	2,90	29,94	534,87	5,20	0,032	0,018	178,162
455	20,30	2,77	13,66	11,44	2,76	24,15	610,77	5,00	0,033	0,019	177,427
478	48,88	4,30	8,79	29,86	3,65	12,24	1354,29	4,92	0,036	0,022	163,697
499	93,23	8,01	8,60	63,43	4,65	7,34	2531,72	5,32	0,037	0,025	146,976
525	267,89	22,60	8,44	175,45	14,02	7,99	3943,46	5,35	0,068	0,044	152,691
549	237,52	21,67	9,12	188,94	12,82	6,79	2761,39	5,53	0,086	0,068	125,711
554	230,19	23,29	10,12	187,21	12,28	6,56	2565,31	5,47	0,090	0,073	122,953
568	207,77	21,74	10,46	147,71	10,02	6,78	2810,45	5,90	0,074	0,053	140,655
582	195,84	19,13	9,77	142,38	9,95	6,99	2932,64	5,62	0,067	0,049	137,551
598	168,97	16,38	9,69	115,85	8,01	6,92	2726,39	5,62	0,062	0,042	145,847
615	798,03	80,16	10,04	617,58	42,01	6,80	9318,53	5,75	0,086	0,066	129,219
638	762,97	65,11	8,53	558,27	38,98	6,98	7695,68	6,77	0,099	0,073	136,667
670	467,60	43,71	9,35	329,36	20,98	6,37	5001,68	5,95	0,093	0,066	141,974
703	403,57	42,93	10,64	301,78	19,00	6,30	1879,99	5,98	0,215	0,161	133,729
746	3356,89	290,18	8,64	2857,74	192,02	6,72	8308,39	5,80	0,404	0,344	117,467
784	1764,66	144,22	8,17	1618,93	108,84	6,72	4012,49	5,01	0,440	0,403	109,001
800	3565,60	283,91	7,96	3208,76	217,03	6,76	8006,21	5,15	0,445	0,401	111,121
860	2317,17	182,77	7,89	1946,32	134,02	6,89	4845,09	5,20	0,478	0,402	119,054
945	384,38	31,20	8,12	334,30	21,94	6,56	754,46	5,21	0,509	0,443	114,981
1025	969,39	84,97	8,77	870,39	53,54	6,15	1809,44	5,11	0,536	0,481	111,374

padku Pb, chlorofilu a (tabela 4). W mniejszym stopniu zaś można zaobserwować zmiany strukturalne komórki, które odzwierciedlają się w kanałach podczerwonych (700–1025 nm).

W przypadku wyników uzyskanych 11 tygodni po zadaniu ołowiu, sytuacja zaczęła się powoli zmieniać.

Nie obserwuje się tak dużych różnic w zakresie widzialnym, natomiast zmiany, jakie zachodzą w strukturze komórki, zostają bardzo dobrze odzwierciedlone w podczerwieni. Jeżeli się uwzględni, że współczynnik zmienności „Trawy bez Pb (11)” oraz „Trawy z Pb (11)” jest na poziomie 10 i 6%, a współczynnik zmienności D wynosi około 35%,



Ryc. 5. Krzywe odbicia spektralnego dla traw w 11 tygodniu po zadaniu ołowiu
Fig. 5. Spectral reflectance of grasses 11 weeks after lead application

Tabela 3.

Wyniki pomiarów spektrometrycznych dla traw w 11 tygodniu po zadaniu ołowiu

Results of spectrometer measurements of grasses 11 weeks after lead application

Długość fali Wavelength [nm]	Trawa bez Pb (11) (T.k.) Grass without Pb			Trawa z Pb (11) (T. z Pb.) Grass with Pb			Ekran kalibrujący Calibration panel		Współczynnik odbicia Reflectivity coefficient		Współczynnik zmienności D Coefficient of variation D
	\bar{x}	σ	V [%]	\bar{x}	σ	V [%]	\bar{x}	V [%]	T.k.	T. z Pb.	
400	6,57	3,67	55,83	6,21	4,18	67,36	94,51	17,06	0,069	0,066	105,29
415	10,16	3,25	31,99	9,08	4,53	49,89	196,36	9,00	0,052	0,046	112,05
418	8,89	3,32	37,39	6,96	3,68	52,87	187,24	5,56	0,047	0,037	127,43
440	15,06	2,88	19,14	12,92	4,32	33,45	521,67	4,80	0,028	0,025	114,61
455	17,35	2,75	15,83	14,36	4,31	30,03	617,71	4,95	0,029	0,023	123,58
478	41,85	4,25	10,16	33,63	4,78	14,22	1300,29	5,12	0,031	0,026	121,46
499	86,93	7,93	9,13	68,58	5,19	7,57	2561,24	5,26	0,034	0,027	127,72
525	258,95	22,37	8,64	203,87	11,69	5,73	3933,39	5,37	0,067	0,052	128,74
549	238,20	21,46	9,01	186,19	10,86	5,83	2790,69	5,47	0,086	0,067	129,01
554	232,09	20,99	9,04	176,20	10,97	6,23	2539,31	5,52	0,090	0,069	129,45
568	221,59	19,59	8,84	168,42	10,22	6,07	2980,83	5,55	0,073	0,057	129,39
582	191,85	17,24	8,98	148,26	9,02	6,08	2928,31	5,62	0,066	0,051	130,30
598	163,52	14,76	9,02	125,72	8,11	6,45	2692,64	5,69	0,061	0,047	130,00
615	748,24	72,22	9,65	570,74	32,70	5,73	9298,64	5,76	0,081	0,061	131,55
638	651,70	64,47	9,89	494,63	29,96	6,06	6888,81	5,81	0,094	0,072	131,18
670	441,30	43,27	9,81	335,16	20,29	6,05	4978,85	5,86	0,089	0,067	131,47
703	411,91	42,50	10,32	312,12	19,68	6,31	1895,94	5,81	0,219	0,165	133,01
746	3498,92	362,72	10,37	2641,26	161,84	6,13	83118,86	5,68	0,426	0,318	134,30
784	4777,78	488,01	10,21	3563,79	220,94	6,20	10310,99	5,72	0,463	0,346	133,92
800	8839,98	924,79	10,46	6930,19	433,78	6,26	19866,35	5,78	0,445	0,349	127,52
860	4774,07	494,05	10,35	3561,69	224,80	6,31	9477,39	5,78	0,504	0,376	134,03
945	806,02	84,34	10,46	594,20	39,99	6,73	1501,11	6,02	0,538	0,396	135,98
1025	3199,97	338,53	10,58	2360,83	153,30	6,49	5622,43	5,95	0,570	0,420	135,83

to różnice pomiędzy poszczególnymi wydzieleniami wydają się dość duże.

Podsumowując, należy podkreślić fakt, iż wszystkie uzyskane wyniki z pomiarów spektrometrycznych z kanałów o długościach fal poniżej 455 nm, obarczone są dużymi rozrzutami. Oznacza to, że dane te nie są w pełni wiarygodne. Zakres fal dłuższych (455–700 nm) zaznaczył się największym zróżnicowaniem badanych prób tylko w pierwszym etapie eksperymentu. Długookresowe (11 tygodni) zmiany zaznaczyły się w podczerwieni. W większości przypadków współczynniki odbicia dla badanych prób wykazują stałe wartości względem siebie, co na prezentowanych rycinach 4 i 5 odzwierciedla się równoległym przebiegiem krzywych.

Pomiary zawartości barwników fotosyntetycznych i ołowiu

Równocześnie z wykonywanymi pomiarami spektralnymi roślin były pobierane próby na określenie zawartości barwników fotosyntetycznych oraz ołowiu w tkankach liści. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w tabeli 4. Przedstawia ona zawartości barwników, wyrażonych w jednostkach świeżej (ś.m) i suchej masy

(s.m), (chlorofil a, b, karotenoidy) oraz wskaźniki: chlorofil a + b, chlorofil a/b i sumę chlorofilu/karotenoidów. Ostatni wiersz przedstawia zawartość ołowiu zmierzona przez ASA.

Przeglądając tabelę 4 można zauważyć, że największe zawartości barwników znajdują się w próbce zawierającej „Trawę przed pomiarami”. Wiąże się to z tym, że w trakcie pierwszej fazy eksperymentu występowały znaczne opady i niezbyt duże nasłonecznienie. Warunki takie wydają się być optymalne do produkcji zielonej biomasy. Następne dwa wydzielenia, „Trawa bez Pb” oraz „Trawa z Pb”, pobierane były na przełomie sierpnia i września, podczas dużej insolacji i sztucznego nawodnienia, w 6 tygodniu po zadaniu ołowiu. Interesujący jest fakt, iż wartości barwników podawane w mg/g ś.m są wyższe niż przeliczone na suchą masę. W omawianych wydzieleniach potwierdza się prawidłowość, że działanie ołowiu w pierwszej kolejności daje się zaobserwować w zmniejszonej ilości chlorofilu a. Podobna sytuacja ma miejsce w badanych próbach grochu.

Podsumowując uzyskane wyniki zawartości chlorofilu a, b oraz karotenoidów, należy stwierdzić, iż są one generalnie zbieżne z danymi publikowanymi przez innych autorów.

Tabela 4.

Zawartości barwników fotosyntetycznych i ołowiu w badanych próbach
Contents of photosynthetic dyes and lead in samples

Barwniki <i>Dyes</i>	Trawa przed pomiarami <i>Grass before measurements</i>		Trawa bez Pb <i>Grass without Pb</i>		Trawa z Pb <i>Grass with Pb</i>	
	mg/g ś.m. <i>mg/g fresh mass</i>	mg/g s.m. <i>mg/g dry mass</i>	mg/g ś.m. <i>mg/g fresh mass</i>	mg/g s.m. <i>mg/g dry mass</i>	mg/g ś.m. <i>mg/g fresh mass</i>	mg/g s.m. <i>mg/g dry mass</i>
Chlorofil <i>Chlorophyll a</i>	2,19	0,82	2,05	0,47	1,57	0,51
Chlorofil <i>Chlorophyll b</i>	0,84	0,32	0,79	0,20	0,68	0,19
Chlorofil <i>Chlorophyll a + b</i>	3,03	1,14	2,84	0,67	2,25	0,70
Chlorofil <i>Chlorophyll a/b</i>	2,61	2,56	2,59	2,35	2,31	2,68
Karotenoidy <i>Carotenoids</i>	0,48	0,18	0,38	0,09	0,35	0,10
Chlorofil a + b/Karotenoidy <i>Chlorophyll a + b/Carotenoids</i>	6,31	6,33	7,47	7,44	6,43	7,00
Zawartość Pb [ppm] w s.m. <i>Contents Pb in fresh mass</i>	3,25		3,25		48,37	

Interesujący jest ostatni wiersz tabeli 4, w którym zaprezentowano wyniki zawartości ołowiu w tkankach badanych roślin. W przypadku roślin kontrolnych stężenie metalu jest niskie i wynosi 3,25 ppm, w próbce traw poddanych działaniu Pb stężenie tego pierwiastka wynosi 48,37 ppm w s.m. Pozbawiony korzeni groch przyjął 484,12 ppm Pb w s.m.

Wnioski

Interdyscyplinarne podejście do badań, polegające na powiązaniu pomiarów spektrometrycznych z zagadnieniami z zakresu fizjologii roślin, hydro i geochemii, dało bardzo pozytywne wyniki, aczkolwiek w wielu sytuacjach zarysowały się trudności w w nich interpretacji, co związane jest z głęboką specjalizacją poszczególnych dziedzin.

Kończąc pewien etap prac należy stwierdzić, że:

- Spektrometr SPZ-5 umożliwił uzyskanie wyników, odnośnie przytoczonych wyżej charakterystyk, dla roślin kontrolnych i zanieczyszczonych ołowiem.
- Omawiane różnice wynoszą od kilku do kilkunastu procent.
- Uzyskiwane wyniki dla wszystkich badanych obiektów, w tym i ekranu, obarczone są dość dużymi rozrzutami w kanałach o krótszych falach (poniżej 500 nm).
- Kanały dłuższych fal, powyżej 500 nm, dają niewielkie błędy, kilku procent, dla wszystkich badanych prób.
- Największe różnice pomiędzy roślinami zdrowymi i zanieczyszczonymi zaznaczyły się w zakresach 700–1025 nm.
- W całym toku badań, zakres 400–700 nm nie różnicował wyraziście traw poddanych działaniu Pb od prób kontrolnych, jednakże okresowo rejestrowane zmiany zawartości barwników były dość wyraźnie zauważane przez spektrometr SPZ-5.
- Badania towarzyszące, pomiary zawartości ołowiu i barwników fotosyntetycznych, potwierdziły wyniki uzyskane ze spektrometru SPZ-5.

Podsumowanie

Zastosowana metodyka przyniosła spodziewany efekt, ponieważ wyniki badań pozwoliły na stwierdzenie, że zdalne metody, pomiary spektrometrem SPZ-5, pozwalają na detekcję zanieczyszczeń ołowiu występujących w badanych roślinach. Aplikacyjne zastosowanie zdalnych metod detekcji do omawianych celów wymagać będzie dalszych badań. Przeprowadzone analizy w podczerwieni i dostępna literatura wykazały, że bardzo perspektywnym zakresem wydają się fale dłuższe, powyżej 700 nm. Być może rejestracja danych w tym zakresie umożliwi uzyskanie takiego zróżnicowania odpowiedzi spektralnych, że punktowe naziemne pomiary spektrometryczne i analizy laboratoryjne będą mogły być eks-
trapolowane na inne teledetekcyjne źródła pozyskiwania informacji, takie jak zdjęcia lotnicze i satelitarne.

Literatura

- Coulson M.G., Bridges E.M., 1984: The remote sensing of contaminated land. *Int. J. Remote Sensing*. Vol. 5, No. 4. 659–669.
- Goetz A.F.H., Wellman J.B., Barnes W.L., 1985: Optical Remote Sensing of the Earth. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 73. No. 6.
- Guilford J.P., 1964: *Podstawowe metody statystyczne w psychologii i pedagogice*. PWN, Warszawa.
- Jago R.A., Curran P.J., 1995: The effect of land contamination on the relationship between the red edge and chlorophyll concentration of a grassland. *Remote Sensing Society in Action, Proceedings of the 21st Annual Conference of the Remote Sensing Society*, Nottingham.
- Janowska M., 1996: *Radiometryczne pomiary powierzchni Ziemi*. IGiK. Zintegrowane techniki pomiarowe MSOŚ. Szymbark. Maszynopis w Zakładzie Teledetekcji Środowiska WGiSR Uniwersytetu Warszawskiego.
- Lichtenthaler H.K., Wellburn R.R., 1983: Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b in leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.*, 603.
- Marczewski W., 1997: *Radiometr jako narzędzie w teledetekcji. Rozważania podstawowe*. Notatki do wykładu. Zintegrowane techniki pomiarowe MSOŚ. Szymbark. Maszynopis w Zakładzie Teledetekcji Środowiska, WGiSR Uniwersytetu Warszawskiego.
- Rataj M., 1997: *Teledetekcja. Zestaw materiałów do instruktażu*

radiometrycznego. CBK PAN. Zintegrowane techniki pomiarowe MSOŚ. Szymbark. Maszynopis w Zakładzie Teledetekcji Środowiska, WGiSR Uniwersytetu Warszawskiego.

Rataj M., Gadomski S., Makal S., Orleański P., Tryburcy M., 1988: Spectrometer SPZ-02 for remote sensing measurements. *Scientific Instrumentation*, No. 3, 3.



Mgr Bogdan Zagajewski — absolwent Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego. Od listopada 1995 r. zatrudniony w Zakładzie Teledetekcji Środowiska Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Od października 1998 r. doktorant Studium Doktoranckiego Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Laureat II

Zagajewski B., 1998: *Określenie możliwości detekcji ołowiu w roślinności i glebie za pomocą technik teledetekcyjnych*. Praca Magisterska, Międzywydziałowe Studia Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego, maszynopis w Zakładzie Teledetekcji Środowiska, WGiSR Uniwersytetu Warszawskiego.

Edycji Konkursu na najlepszych absolwentów wyższych uczelni w dziedzinie ochrony środowiska, zorganizowanego przez Fundację im. Nowickiego oraz Deutsche Bundesstiftung Umwelt. W roku 1999 stypendysta Fundacji Na Rzecz Nauki Polskiej. Specjalizuje się w zakresie teledetekcji i geoinformacji.

Adres: Zakład Teledetekcji Środowiska WGiSR UW, Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa, tel. 6200-381 wew. 654, e-mail: bzag@wgsr.uw.edu.pl