

## Biblioteka spektralna gatunków zielnych Ogródu Botanicznego Uniwersytetu Warszawskiego

*Spectral library of herbaceous species of the University of Warsaw's Botanic Garden*

Bogdan ZAGAJEWSKI, Zenon SĘDZIKOWSKI

**Słowa kluczowe:** biblioteka spektralna, dane hiperspektralne, spektrometry hiperspektralne, ASD, gatunki zielne, Ogród Botaniczny UW

**Key words:** spectral library, endmembers, Imaging Spectroscopy, field spectrometers, ASD, herbaceous species, Botanic Garden

An objective of this paper is to form a spectral library of endmembers of the Polish Lowland vegetation species, which were collected in the Botanic Garden of the University of Warsaw, which is one of the oldest (it was founded in 1818) and the smallest (5 ha) botanic gardens in Poland. For the data acquisition ASD FieldSec3 JR, Chlorophyll Content Meter CCM-200 and a digital camera were used. Each spectral library set contains: 300 separate spectrometric measurements (100 dark current, 100 white reference and 100 ASD Plant

Probe Leaf Clip); Chlorophyll Content Index and biometric information (e.g. LAI, fAPAR); 3 digital photos, time and localisation data.

The spectral library contains 73 characteristics of the most important plant species (from the "red list" of protected plants and the most famous plants of the Polish Lowland Flora). Now all these data will be upgrading the Swiss SPECCHIO library as a local Polish input to the European spectral database.

Teledetekcja hiperspektralna należy obecnie do najprężniej rozwijających się kierunków w teledetekcji. Jej główną cechą jest ogromna rozdzielczość spektralna (dziesiątki, czy nawet setki bardzo wąskich kanałów) oraz radiometryczna (dziesiątki tysięcy stopni pomiędzy czernią i bielą). Zapis interferującego promieniowania elektromagnetycznego z molekułami znajdującymi się wewnątrz i na powierzchni roślin sprawia, że możliwe jest rozróżnienie poszczególnych procesów fizjologicznych (np. fotosyntezy, wymiany ciepła), substancji biochemicznych (np. chlorofili, karotenoidów, celulozy, nutrientów) oraz struktur komórkowych, np. woski (Gitelson, Marzlyak, 1997). Wszystkie te elementy sprawiają, że ciągłe widmo elektromagnetyczne pozwala na identyfikację gatunków roślinnych przez sensory hiperspektralne. Koncepcja badań teledetekcyjnych bazuje na założeniu, że każdy foton światła emituje określoną długość fali, która jest bezpośrednio powiązana ze ściśłą ilością określonej energii. Przy zetknięciu z danym ciałem stałym, cieczą bądź gazem fotony są pochłaniane,

odbijane lub/i transmitowane. Fotony są absorbowane przez różne materiały w różny sposób, zależny ściśle od długości fali (Clark, 1999).

Za początki analizy hiperspektralnej przyjmuje się lata 70 i początek lat 80 XX w. Grupy prowadzone przez Alexandra Goetza, Grahama Hunta i Johna Salisbury'ego przeanalizowały odbicie spektralne minerałów i skał oraz opracowały teorię interpretacji charakterystyk spektralnych w kwestii podstaw procesów mechaniki kwantowej. Publikacja szczegółów absorpcji poszczególnych molekuł w zakresie widzialnym średniej podczerwieni (VIS – SWIR) zapoczątkowały rozwój spektrometrów hiperspektralnych (van der Meer i inni, 2001).

Rejestracja widma elektromagnetycznego odbywa się za pomocą spektrometrów. Dzielią się one na obrazujące i nieobrazujące oraz w zależności od pułapu: naziemne, lotnicze i satelitarne. Geneza hiperspektralnych spektrometrów obrazujących wiąże się z zastosowaniami wojskowymi oraz geologicznymi (np. badania

spektrometrem profilującym GERS w końcu lat siedemdziesiątych XX w.) (van der Meer i inni, 2001). Obecnie wiele agencji kosmicznych oraz firm prywatnych posiada własne konstrukcje oraz laboratoria, w których pracuje się nad nowymi konstrukcjami (van der Meer i inni, 2001).

Poza spektrometrami obrazującymi, istnieją także spektrometry naziemne. Mogą być wykorzystywane w laboratoriach, jak również w terenie. Jednymi z najbardziej znanych producentów takich urządzeń są: Analytical Spectral Devices Inc. (ASD), *Geophysical and Environmental Research Corp.* (GER). Umożliwiają one dokładniejsze pozyskanie krzywej spektralnej dzięki bardzo gęstemu próbkowaniu wynoszącemu 1.2 nm. (Hejmanowska, Głowienka, 2004).

Spektralne pomiary terenowe próbek umożliwiają (Zagajewski i in., 2008):

- kalibrację i weryfikację lotniczych i satelitarnych obrazowań,
- analizę studium możliwości identyfikowania obiektów w misjach lotniczych i satelitarnych,
- badanie podstawowych zależności pomiędzy fizycznymi i biochemicznymi właściwościami a odbitym od danych obiektów promieniowaniem elektromagnetycznym,
- definiowanie uwarunkowania odbicia od obiektów a geometrii pomiarowej (BRDF).

### Biblioteki spektralne

Biblioteka spektralna to baza danych<sup>1</sup> profili spektralnych badanych materiałów (gazów, cieczy, ciał stałych) wraz z metadanymi, które je opisują.

Typowa biblioteka spektralna powinna zawierać (Milton, 2004):

- lokalizację obszaru badań i poboru próbki (długość i szerokość geograficzną, wysokość nad poziomem morza),
- szczegółowy opis obszaru badań,
- czas pomiarów (skoordynowany czas uniwersalny UTC),
- opis zachmurzenia nieba (typ chmur według podziału WMO, wartość zachmurzenia w oktantach, informacja czy słońce jest przesłonięte),
- dane meteorologiczne (temperaturę powietrza w °C, wilgotność względną w %, ciśnienie powietrza, proporcje promieniowania bezpośredniego do rozproszonego, gęstość optyczną aerosoli w atmosferze, ilość parowania wody w cm),
- parametry instrumentu pomiarowego (model i numer seryjny, data ostatniej kalibracji, kąt pola widzenia, odpowiedź spektralną każdego kanału, częstotliwość próbkowania i szerokość polową detektora),

<sup>1</sup> Baza danych to zbiór danych o określonej strukturze wraz z systemem zarządzania, dzięki czemu możliwe jest ich szybkie przetwarzanie (Adamczewski, 2005).

- sposób pozyskania sygnału (wykorzystane akcesoria, źródło promieniowania).

Przykładem dostawcy komercyjnych bibliotek spektralnych jest firma Nicodom, która posiada ponad 140 000 profili spektralnych. Badane odbicia spektralne dotyczą między innymi: polimerów, włókien, farmaceutyków, leków, kamieni nerkowych, dodatków żywnościowych, składników kosmetyków, farb, pigmentów (Nicodom, 2008).

Wykorzystanie bibliotek spektralnych w teledetekcji środowiska jest również szerokie. Dominującymi materiałami w bibliotekach spektralnych są minerały i skały. Następnie pod względem występowania są: krzywe spektralne gleb, cieczy, materiałów antropogenicznych oraz roślin (Jet Propulsion Laboratory (JPL) Spectral Library, Johns Hopkins University (JHU) Spectral Library, United States Geological Survey (USGS - Reston) Spectral Library). Biblioteki spektralne tworzone są w głównej mierze na potrzeby prac badawczych, studiów dotyczących konkretnych obszarów (tworzy się tak zwane lokalne biblioteki spektralne). Są to bazy danych obejmujące krzywe spektralne gatunków występujących zazwyczaj tylko na wybranym obszarze, obejmujące gatunki charakterystyczne bądź nawet endemiczne.

Jak wcześniej wspomniano biblioteki spektralne (powstające najczęściej z pomiarów naziemnych) tworzy się nie tylko w celu kalibracji urządzeń i weryfikacji obrazowań lotniczych i satelitarnych, ale również w celu badań podstawowych zależności pomiędzy fizycznymi i biochemicznymi właściwościami, a odbitym od nich promieniowaniem elektromagnetycznym. Badania tego typu są przeprowadzane między innymi poprzez korelację krzywych spektralnych z innymi wskaźnikami charakteryzującymi stan roślinności np. zawartość wody w roślinie bądź poziom chlorofilu czy zdolność akumulacji energii fotosyntetycznie czynnej (APAR) oraz produkcji biomasy (Carter, 1997).

Ostatnimi laty nastąpił gwałtowny rozwój metod automatycznej identyfikacji roślin w badaniach rolniczych. W poszukiwaniach efektywnych kosztowo i czasowo metod identyfikacji różnych typów upraw sięgnięto po techniki hiperspektralne, w których pożądaną informację pochodzą z charakterystyk spektralnych różnych upraw zebranych w terenie z odbiciem spektralnym tychże roślin pochodzącym z satelitarnych sensorów hiperspektralnych (Rao i in., 2007). Ta czynność jest bardzo ważna przy automatycznej identyfikacji i ujęciu ilościowym różnych typów roślinności na danym obszarze. Jedyną drogą łączenia pomiarów terenowych z pomiarami lotniczymi bądź satelitarnymi jest stworzenie biblioteki spektralnej różnych interesujących nas cech powierzchni (Rao i in., 2007).

Według N.R. Rao (za: Price, 1992) stworzenie dostatecznie obszernej biblioteki spektralnej dla upraw, obejmującej takie czynniki jak porę roku, fazę wzrostu, odmianę, glebę, klimat pozwala na wygenerowanie nieznanego profilu spektralnego uprawy (weryfikacja odbywa się przez porównanie jego charakterystyki spektralnej do pozyskanych wcześniej danych hiperspektralnych).

Kilka bibliotek spektralnych jest powszechnie dostępnych do użytku publicznego w Internecie. USGS spectral library (Clark i in., 2007), Johns Hopkins University (JHU) Spectral Library, Jet Propulsion Laboratory (JPL) Spectral Library, wymienione powyżej biblioteki tworzą jedną bibliotekę spektralną ASTER (California Institute of Technology, 2000)<sup>2</sup>. Przytoczone biblioteki, zawierają w większości profile spektralne minerałów. Krzywe spektralne roślinności są słabo reprezentowane. Ze względu na kompleksowość rozwiązań, na uwagę zasługują biblioteki spektralne stanowiące dodatek w postaci bazy danych do komercyjnych programów służących do analizy obrazowań hiperspektralnych. Przykładowymi programami są ENVI™, TNTmips™. Te specjalistyczne programy służą do kompleksowej analizy obrazowań hiperspektralnych.

Biblioteka USGS z 2007 roku. Zawiera ponad 1300 krzywych spektralnych. Dane zostały pozyskane w zakresie od UV do średniej podczerwieni (SWIR). Włączono do niej krzywe z biblioteki wydanej w 2003 roku, gdzie zostały pozyskane w zakresie widma od widzialnego do bliskiej podczerwieni. W gromadzeniu danych zostały wykorzystane spektrometry: Beckman 5270 (0,2-3 mikrometry), ASD field spectrometer (0,35-2,5 mikrometra), Nicolet Fourier Transform Infra-Red interferometr Spectrometr (0,4-2,5 mikrometra) oraz AVIRIS 0,4-2,5 mikrometra.

Informacje dotyczące roślinności zawierają: tytuł próbki, nazwę rośliny (w narodowym języku), nazwę łacińską, lokalizacja pomiaru, opis próbki, w niektórych przypadkach są dołączone zdjęcia wykonane podczas pobierania próbki. Biblioteka jest w formie tabelarycznej, w pierwszej kolumnie jest nazwa badanego materiału, w kolejnych: opis, dane w formacie ASCII, krzywa spektralna (w kilku zakresach: 0,2-3,0, 1,5-6,0, 5-25, 25-150) (Clark i in., 2007). Niestety nie występuje na stronie wyszukiwarka pozwalająca na szybkie odnalezienie szukanego spektrum.

Jednym z przykładów użycia bibliotek spektralnych do badań rolniczych jest biblioteka spektralna roślin uprawnych (odmiany ryżu, trzciny cukrowej, chili oraz bawełny). Jest ona pierwszą biblioteką traktującą o tym zagadnieniu. W czasie pomiarów rośliny były w dojrzałej fazie. Dane zostały pozyskane z Hyperiona oraz przy pomocy spektrometri GER 3700. Miejscem badań był dystrykt Gunter, stan Andora Pradesh w Indiach. Dane pozyskane zostały w okresie 26-30 września 2003 roku. Spektrogramy zarejestrowane są w 704 kanałach (szerokość połówkowa filtrów wynosi 1,5 nm dla VIS i 8,5 nm dla SWIR). Wykonywano od 5 do 8 pomiarów wzdłuż obranej marszruty. Pomiar dla upraw ryżu, chili i bawełny wykonywano z wysokości 1,2 m, dla trzciny cukrowej z wysokości 1,75 m. Typowa marszruta miała 20-60 metrów długości a każdy pomiar był wykonywany co 10 metrów. Biblioteka została stworzona przy pomocy programu ENVI™ 4.1 i obejmuje 2190 profili spek-

tralnych. Uzyskane dane pozwoliły na klasyfikację SAM (Spectral Angle Mapper) poszczególnych upraw. Ogólna dokładność klasyfikacji map wyniosła 86,5%, co wskazuje na ogromny potencjał technik hiperspektralnych w tym zastosowaniu. Uprawy bawełny posiadały najwyższą średnią dokładność 89,6%, następnie znalazły się uprawy chili 87,4% (Rao i in., 2007).

Kolejnym przykładem biblioteki spektralnej roślinności jest STIHL, czyli Strom Thurmond Institute Hyperspectral Library (Liu i in., 2005). Stworzona została w wyniku pomiarów naziemnych. Celem opracowania tej biblioteki była identyfikacja i kartowanie inwazyjnych gatunków, w tym krwawicy purpurowej. Uzyskana dokładność względem pomiaru naziemnego przewyższyła 90% (Liu i in., 2005).

Próbą stworzenia biblioteki spektralnej będącej zintegrowanym systemem bazodanowym jest SPECCHIO<sup>3</sup>. Pierwsza generacja systemu została stworzona w roku 2000 przez RSL University of Zurich (Szwajcaria). Był to relacyjny system baz danych pozwalający na zuniifikowane wprowadzanie informacji spektralnych oraz ich wyszukiwanie. Unikalną cechą pierwszej wersji tego systemu była możliwość dodawania oraz wyszukiwania danych przy pomocy sieci Internet (Bojinski i in., 2003).

Druga generacja SPECCHIO została ukończona w 2007 roku. Zostało w niej zawartych wiele ulepszeń, między innymi, system magazynowania nieredukowanych danych oraz wyszukiwanie danych (Hüni i in., 2007).

W ramach prac Katedry Geoinformatyki i Teledetekcji WGISR UW postawiono za cel stworzenie lokalnej biblioteki spektralnej gatunków zielnych Niżu Polskiego (Sędzikowski, 2008). Stworzona baza danych ma być integralną częścią SPECCHIO i służyć do:

- szczegółowej identyfikacji poszczególnych gatunków (np. do kartowania gatunków, bazując na klasyfikacji *Spectral Angle Mapper* lub *Spectral Unmixing*),
- analizie stanu fenologicznego i kondycyjnego danego gatunku,
- korekcji atmosferycznej obrazów hiperspektralnych (w przypadku braku terenowych, referencyjnych pomiarów spektrometrycznych istnieje możliwość określenia czystości spektralnej piksela (Pixel Purity Index), następnie na podstawie terenowej identyfikacji rodzaju pokrycia istnieje możliwość wykorzystania wzorcowego spektrum do korekcji atmosferycznej).

Tworzona baza danych ma stanowić źródło informacji o odbiciu spektralnym roślin w zakresie 350-2500 nm. Dodatkowe elementy, takie jak dokumentacja fotograficzna oraz nota informacyjna prezentująca podstawowe informacje gatunku. Uzupełnieniem informacji są dane biometryczne (np. zawartość chlorofilu, LAI, fAPAR). Stworzenie tego typu biblioteki ułatwi analizę

<sup>2</sup> California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, *ASTER Spectral Library*, <http://speclib.jpl.nasa.gov/>

<sup>3</sup> <http://www.specchio.ch/>



zależności pomiędzy odbiciami spektralnymi roślin, a ich kondycją. Pozwoli na skonfrontowanie odpowiedzi spektralnych roślin w stosunku do poziomu chlorofilu oraz innych cech biometrycznych roślin.

Jako teren badań wybrano dział Ogródu Botanicznego UW „Flora Nizowa Polski”. Wybrano ten obszar badawczy, ponieważ reprezentuje on gatunki, które występują na Niziu Polskim, obejmującym między innymi Nizinę Mazowiecką, krainę geograficzną, która jest najbliższa badaczom, co pozwala na stworzenie lokalnej bazy danych. Wybór Ogródu Botanicznego zapewnia stałość obserwacji i ich powtarzalność w kolejnych latach.

### Obszar badań: Ogród Botaniczny Uniwersytetu Warszawskiego

Ogród Botaniczny UW został utworzony 15 grudnia 1818 roku. Jego ówczesna powierzchnia była trzykrotnie większa od obecnej. Pierwszym kierownikiem był Michał Szubert, który zgromadził ponad 10 000 gatunków, co w ówczesnym czasie było wielkim osiągnięciem. Ogród Botaniczny usytuowany jest w Warszawie, na obszarze dzielnicy Śródmieście (Aleje Ujazdowskie 4). Teren ogrodu zajmuje 5,16 ha i leży na średniej wysokości 110,4 m n.p.m. Wschodnia granica ogrodu przebiega wzdłuż górnej krawędzi skarpy wiślanej, schodzącej stromo w stronę najniższego tarasu zalewowego Wisły. Typy gleb w ogrodzie to brunatne właściwe i wylugowane, miejscami przekształcone antropogenicznie. Klimat ogrodu jest podobny do klimatu Kotliny Warszawskiej, choć znacznie zmodyfikowany przez wpływ miasta (zanieczyszczenie powietrza, słaba wymiana, zmniejszony dopływ energii słonecznej, cieplejsze i bardziej suche powietrze). Według pomiarów z 44 lat (1946-89) ze stacji umieszczonej w ogrodzie średnia najcieplejszego miesiąca (lipca) wynosi 18.7°C, a najchłodniejszego (stycz-



Ryc. 1. Obszar badań: Ogród Botaniczny UW, dział Flora Nizowa Polski

Fig. 1. The research area of the Polish Lowland flora part of the Botanic Garden of the University of Warsaw

nia -3.2°C). Najsurowsza była zima 1987 r. ze średnią stycznią -12.5°C. Najniższą temperaturę odnotowano 8 stycznia -29.3°C. Najłagodniejsza zima była 1983 r., gdzie średnia styczni wyniosła +3.4°C. Przymrozki występują do drugiej dekady kwietnia, choć zdarzają się do 15 maja. Przymrozki jesienne występują w drugiej dekadzie października (mogą się zdarzyć w drugiej połowie września). Średnia suma opadów 1946-89 r. wynosiła 579 mm, suma w najbardziej suchym roku 1975 była równa 387 mm, a w najbardziej wilgotnym 1977 r. 1045 mm. Generalnie warunki dla rozwoju roślin pomimo zanieczyszczenia powietrza są dobre, jedynie budowa trasy Łazienkowskiej zachwiała stosunki wodne ogrodu (Werblan-Jakubiec, 1991). Miejsce badań obejmuje dział flory Niziu Polskiego (Ryc. 1).

### Metodyka badań

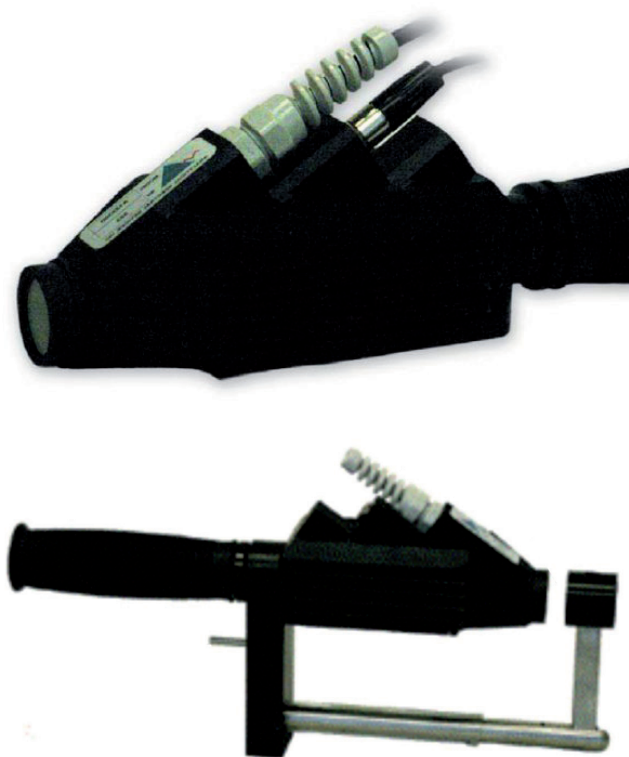
Badania nad utworzeniem biblioteki spektralnej gatunków zielnych Ogródu Botanicznego składały się z terenowych pomiarów spektrometrycznych, biometrycznych (chlorofilu) i dokumentacji fotograficznej. Faza badań laboratoryjnych opierała się na opracowaniu statystycznym wyników i opracowaniu metryk poszczególnych gatunków oraz zapisaniu spektr w formatach \*.asd i \*.txt.

### Badania terenowe

Główne badania terenowe odbyły się w dniu 9.05.2008 oraz 22.05.2009 r. Obejmowały pomiary spektrometryczne oraz biometryczne. Do hiperspektralnych badań terenowych został wykorzystany spektrometr hiperspektralny ASD FieldSpec 3 wersja JR wraz z sondą (Plant Probe) (Ryc. 2a), do której dołączono zacisk (Leaf Clip) (Ryc. 2b). Wszystkie instrumenty połączone były światłowodem, który rejestrował promieniowanie elektromagnetyczne ze skalibrowanej lampy halogenowej (Plant Probe). Większość badań była wykonana przy sztucznym świetle generowanym przez sondę ASD Plant Probe. Zawartość chlorofilu została zmierzona miernikiem Chlorophyll Content Meter 200 (CCM-200), a mierzoną wartością był Chlorophyll Content Index (CCI), który jest przeliczany na bezwzględne wartości przy wykorzystaniu krzywych kalibracyjnych z pomiarów laboratoryjnych.

Pomiar dokonywano poprzez wprowadzenie liścia rośliny do zacisku i naciśnięcie spustu (Ryc. 2b., Ryc. 3.).

Seria pomiarowa każdego gatunku składała się z 10 pomiarów wzorca czerni, następnie 10 pomiarów wzorca bieli oraz 10 pomiarów spektrum liścia, z tych wszystkich pomiarów pozyskiwana była uśredniona krzywa odbicia spektralnego. Każdy gatunek mierzony był 10 krotnie, co w sumie dawało 300 pomiarów na każdy gatunek (200 kalibracyjnych i 100 właściwych dla danego gatunku). Pomiary wykonano na różnych miejscach blaszek liściowych danego gatunku.



Ryc. 2. Sonda do spektrometrycznych pomiarów kontaktowych: a) ASD Plant Probe; b) ASD Plant Probe z przystawką Leaf Clip. Źródło: Analytical Spectral Devices, Inc, 2005, ASD Accessories (dokument PDF) zmodyfikowany Fig. 2. ASD Plant Probe (a) and ASD Plant Probe with the Leaf Clip (b). Source: Analytical Spectral Devices, Inc, 2005, ASD Accessories, PDF (modified)



Ryc. 3. Pomiar krzywych spektralnych przy użyciu spektrometrii ASD oraz akcesoria Leaf Clip dołączonego do Plant Probe Fig. 3. Data acquisition using ASD FieldSpec, ASD Plant Probe with Leaf Clip

Rolę referencyjną pełnił wzorzec bieli (spektralnon, politetrafluoroetylen) oraz wzorzec czerni (*dark current*). Miało na celu określenie napromienienia oraz eliminację sygnałów elektrycznych pochodzących z detektora (Analytical Spectral Devices, Inc., 2006).



Ryc. 4. Miernik zawartości chlorofilu CCM-200 (Chlorophyll Content Meter) (Źródło: <http://www.optisci.com/ccm.htm>) Fig. 4. Chlorophyll Content Meter CCM-200 (Source: <http://www.optisci.com/ccm.htm>)

Zawartość chlorofilu została pomierzona pięciokrotnie na każdym z trzech losowo wybranych liści danego gatunku miernikiem CCM-200 (Chlorophyll Content Meter 200, Ryc. 4.). Miernik podaje Chlorophyll Content Index (CCI) bazując na zjawisku absorpcji przez chlorofil określonych długości fali, gdzie maksima pochłaniania przypadają na 420, 435, 490, 643, 660 nm (Zagajewski i in., 2007).

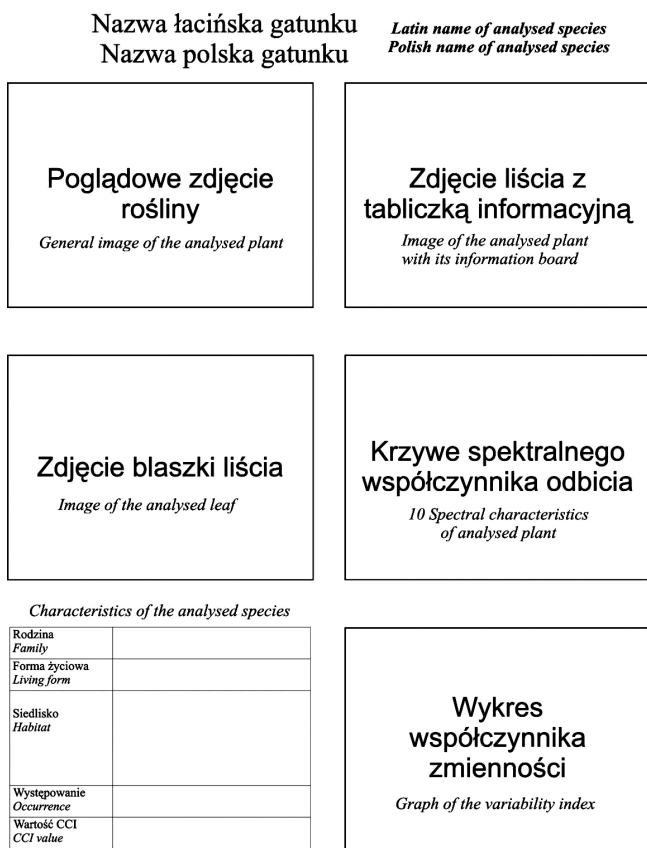
Do wyznaczenia absorpcji dioda umieszczona w urządzeniu emituje dwie długości fali tj.:

- pierwsza mająca swoje maksimum w zakresie 490-500 nm (pokrywająca się z długością fali absorpcji chlorofilu),
- druga z maksimum znajdującym się w zakresie 940-950 nm niezbędna do skompensowania różnic mechanicznych, takich jak miąższość tkanki liścia (Opti-Sciences, 2008).

#### Opracowanie laboratoryjne pomiarów terenowych

Uzyskane pomiary zostały wyeksportowane do standardu ASCII przez program ASD ProView, umożliwiło to ich import w programie MS Excel, gdzie obliczono wartości średnie, odchylenie standardowe i współczynnik zmienności dla każdej długości fali z 10 pomiarów, a następnie wygenerowano krzywe odbicia spektralnego oraz wykresy współczynników zmienności. Wykresy te stały się integralną częścią arkuszy (metryczek) biblioteki spektralnej (Ryc. 5.). Każdy gatunek posiada krzywą odbicia spektralnego zapisaną w formacie ASD.





Ryc. 5. Schemat metryczki informacyjnej mierzonego gatunku  
Fig. 5. Schema of information card of measured plant species

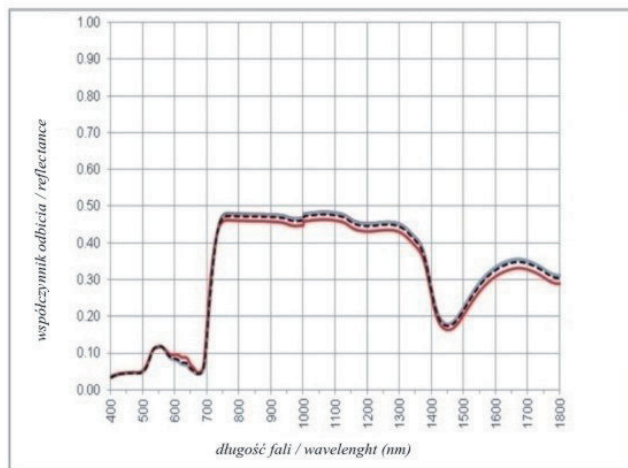
## Wyniki

W wyniku przeprowadzonych badań terenowych, powstała baza danych, która w każdym rekordzie (metryczce danego gatunku) zawiera następujące informacje:

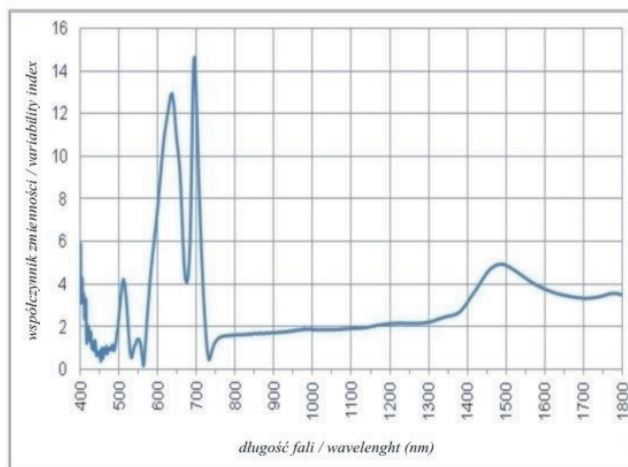
- łacińską i polską nazwę danego gatunku,
- wygląd rośliny, poprzez umieszczenie trzech zdjęć każdego gatunku,
- charakterystyki spektralne badanych gatunków, dla każdego został umieszczony wykres przedstawiający 10 pomiarów oraz ich średnią,
- wykres współczynnika zmienności,
- opis (nazwa rodziny po polsku i po łacinie, forma życiowa, wg występowanie i wybrane informacje o siedliskach roślin, wg Raunkiera pomierzone wartości CCI).

Cała biblioteka spektralna gatunków zielnych Ogrodu Botanicznego UW jest dostępna w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW na nośniku CD-ROM i obejmuje 73 gatunki roślin. W oddzielnych folderach, noszących nazwę poszczególnych badanych gatunków znajdują się metryczki badanych gatunków w formacie PDF wraz z dołączonymi krzywymi w formacie ASD i TXT. Obecnie baza danych zawiera następujące gatunki (czerwoną barwą oznaczono gatunki roślin objętych ochroną gatunkową całkowitą w Polsce): *Achillea ptarmica* L. (krwawnik kichawiec), *Agrimonia procera* Wallr. (rzepik wonny), *Anthericum ramosum* L.

(pajęcznica gałęzista), *Aquilegia vulgaris* L. (orlik pospolity), *Arctium nemorosum* Lej. (łopian gajowy), *Arctium tomentosum* Mill. (łopian pajęczynowaty), *Armoracia rusticana* P.Gaertn., B.Mey. & Scherb. (chrzan pospolity), *Astragalus cicer* L. (traganek pęcherzykowaty), *Astrantia major* L. (jarzmianka większa), *Barbarea vulgaris* R. Br. (gorczyznik pospolity), *Brachypodium pinnatum* (L.) P.Beauv. (kłosownica pierzasta), *Campanula trachelium* L. (dzwonek pokrzywolistny), *Carex repens* Bell. (turzyca poznańska), *Centaurea jacea* L. (chaber łąkowy), *Centaurea scambiosa* L. (chaber driakiewnik), *Chaerophyllum aromaticum* L. (świerżabek korzenny), *Cirsium arvense* (L.) Scop. (ostrożeń polny), *Clematis recta* L. (powojnik prosty) (Ryc. 6.), *Convallaria majalis* L. (konwalia majowa) (Ryc. 7.), *Dactylis glomerata* L. (kupkówka pospolita), *Dactylorhiza majalis* (Rchb.) P.F.Hunt & Summerh. (kukułka szerokolistna), *Digitalis grandiflora* Mill. (naparstnica zwyczajna), *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott. (nerecznica samcza), *Epilobium hirsutum* L. (wierzbowica kosmata), *Eupatorium cannabinum* L. (sadzic konopiasty), *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. (wiązówka błotna), *Filipendula vulgaris* Moench (wiązówka bulwkowa), *Fragaria viridis* Duchesne (poziomka twardawa), *Geranium sylvaticum* L. (bodziszek leśny), *Geum aleppicum* Jacq. (kuklik sztywny), *Geum urbanum* L. (kuklik pospolity), *Hedera helix* L. (bluszcz pospolity) (Ryc. 8.), *Helianthemum nummularium ssp. obscurum* (Celak.) J.Holub (posłonek pospolity), *Hieracium umbellatum* L. (jastrzębiec baldaszkowaty), *Hieracium vulgatum* Fr. (jastrzębiec zwyczajny), *Hierochloa odorata* (L.) Beauv. (turówka wonna) (Ryc. 9.), *Iris pseudacorus* L. (kosaciec żółty), *Lamium maculatum* L. (jasnota plamista), *Lapsana communis* L. (łoczyga pospolita), *Laserpitium latifolium* L. (okrzyń szerokolistny), *Lathyrus niger* (L.) Bernh. (groszek czerniejący), *Lathyrus vernus* (L.) Bernh. (groszek wiosenny), *Leontodon hispidus* L. (brodawnik zwyczajny), *Lysimachia vulgaris* L. (tojeść pospolita), *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt (konwalijka dwulistna), *Melilotus officinalis* (L.) Pall. (nostryk żółty), *Mercurialis annua* L. (Szczyr roczny), *Phalaris arundinacea* L. (mozga trzcinowata), *Plantago media* L. (babka średnia), *Potentilla alba* L. (pięciornik biały), *Potentilla rupestris* L. (pięciornik skalny), *Primula veris* L. (pierwiosnek lekarski) (Ryc. 10.), *Ranunculus lanuginosus* L. (jaskier kosmaty), *Rumex confertus* Willd. (szczaw omszony), *Rumex patientia* L. (szczaw żółty), *Salvia nemorosa* L. (szałwia omszona), *Salvia verticillata* L. (szałwia okrągowa), *Sanguinorba minor* Scop. (krwiściąg mniejszy), *Saponaria officinalis* L. (mydlnica lekarska), *Scrophularia nodosa* L. (trędownik bulwiasty), *Sedum spurium* M. Bieb (rozchodnik kaukaski), *Senecio jacobaea* L. (starzec jakubek), *Silene vulgaris* (Moench) Garcke (lepnica rozdęta), *Solidago gigantea* Aiton (nawłóć późna), *Thalictrum aquilegifolium* L. (rutewka orlikolistna), *Thalictrum flavum* L. (rutewka żółta), *Trifolium medium* L. (koniczyna pogięta), *Trifolium pratense* L. (koniczyna łąkowa), *Urtica dioica* L. (pokrzywa zwyczajna), *Vaccinium uliginosum*

*Clematis recta* L.Powojnik prosty (*Ground virginsbower*)

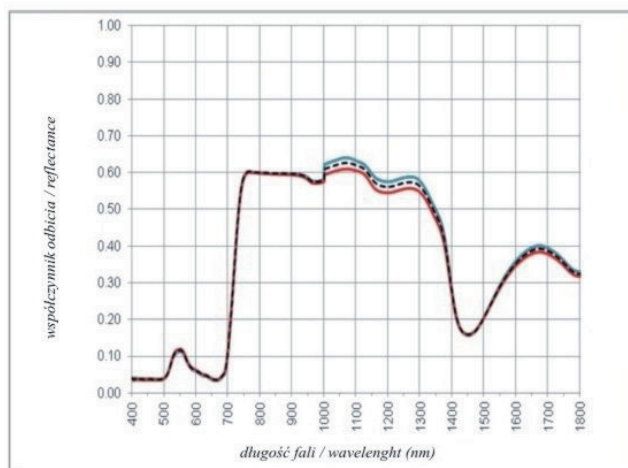
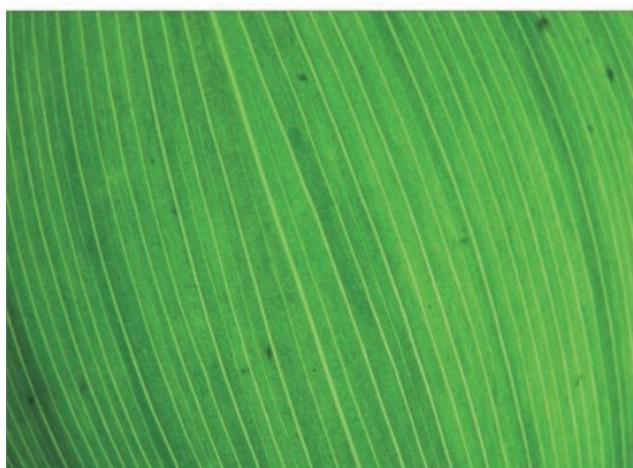
Rodzina <i>Family</i>	<b>Ranunculaceae</b>
Forma życiowa <i>Living form</i>	<b>Hemikryptofit Hemicryptophyte</b>
Siedlisko <i>Habitat</i>	<b>Kserotermiczne Xerothermic</b>
Występowanie <i>Occurrence</i>	<b>Zbiorowisko okrajkowe On the margins of woodland areas</b>
Wartość CCI <i>CCI value</i>	<b>21.26</b>

Ryc. 6. Metryczka: powojnik prosty (*Clematis recta* L.)Fig. 6. Information card of the Ground virginsbower (*Clematis recta* L.)

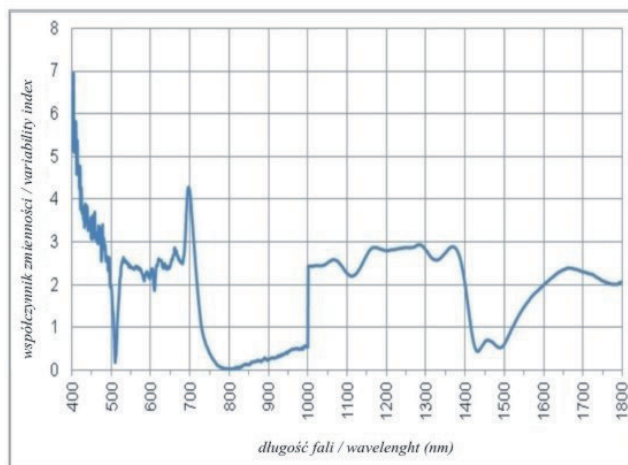


## *Convallaria majalis* L.

### Konwalia majowa (lily of the valley)



Rodzina <i>Family</i>	<i>Liliaceae</i>
Forma życiowa <i>Living form</i>	Geofit <i>Geophyte</i>
Siedlisko <i>Habitat</i>	Dąbrowy świetliste, umiarkowanie żyzne suche gleby <i>Dry shady woodland, usually on calcareous soils</i>
Występowanie <i>Occurrence</i>	Półkula Północna <i>Northern Hemisphere</i>
Wartość CCI <i>CCI value</i>	27,64



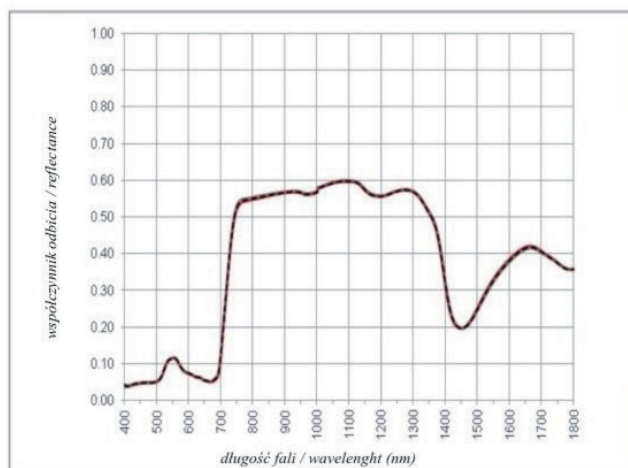
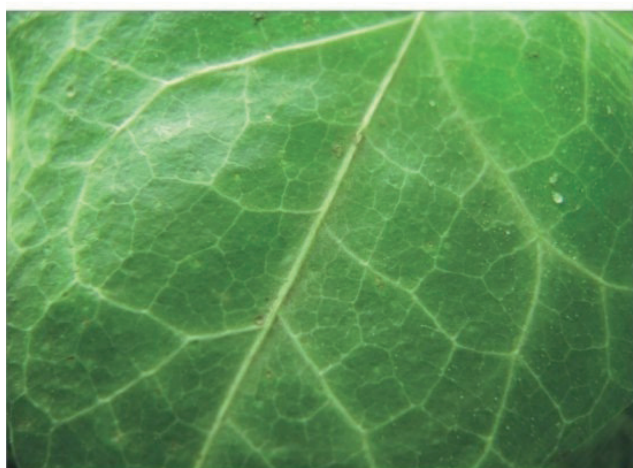
Ryc. 7. Metryczka: konwalia majowa (*Convallaria majalis* L.)

Fig. 7. Information card of the lily of the valley (*Convallaria majalis* L.)

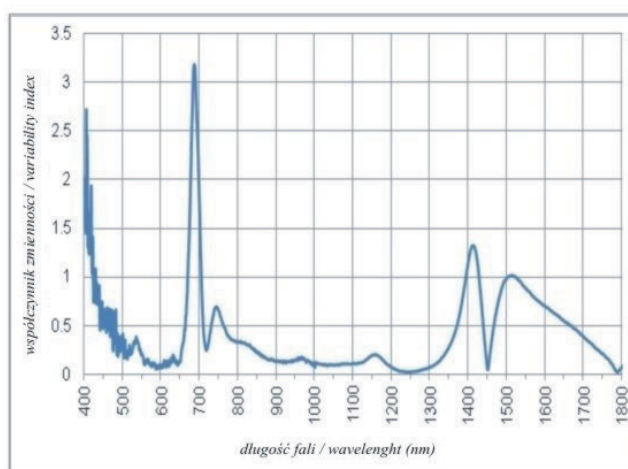


## *Hedera helix* L.

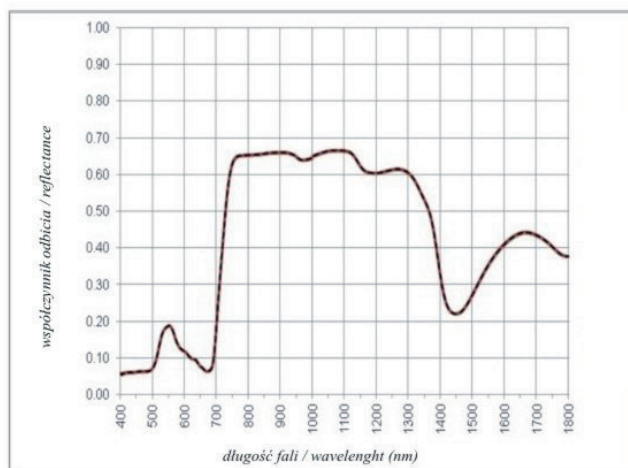
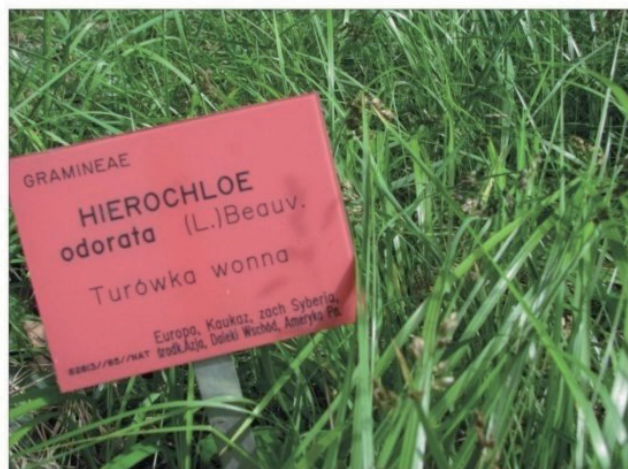
### Bluszcz pospolity (common Ivy)



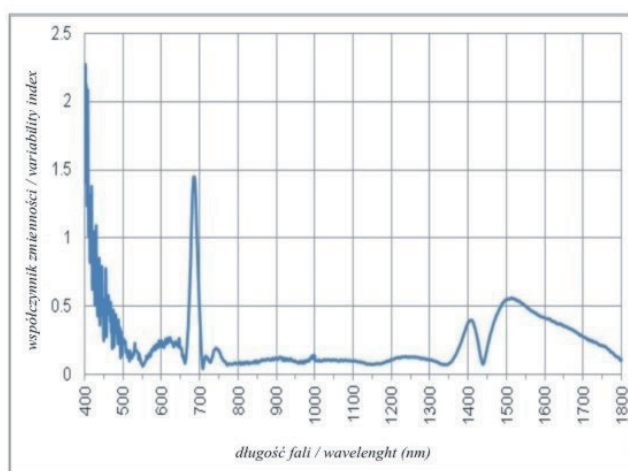
Rodzina <i>Family</i>	<b><i>Araliaceae</i></b>
Forma życiowa <i>Living form</i>	<b>Chemafit <i>Chemaphyte</i></b>
Siedlisko <i>Habitat</i>	Żyzne, świeże gleby. Współwystępuje z np. buczyną niżową typu pomorskiego <i>Fresh, rich soils. Lightly wooded grassland</i>
Występowanie <i>Occurrence</i>	Europa, Zachodnia Azja <i>Europe, Western Asia</i>
Wartość CCI <i>CCI value</i>	80,70



Ryc. 8. Metryczka: bluszcz pospolity (*Hedera helix* L.)  
Fig. 8. Information card of the Common Ivy (*Hedera helix* L.)

*Hierochloë odorata* (L.) P. Beauv.Turówka wonna (*holy grass*)

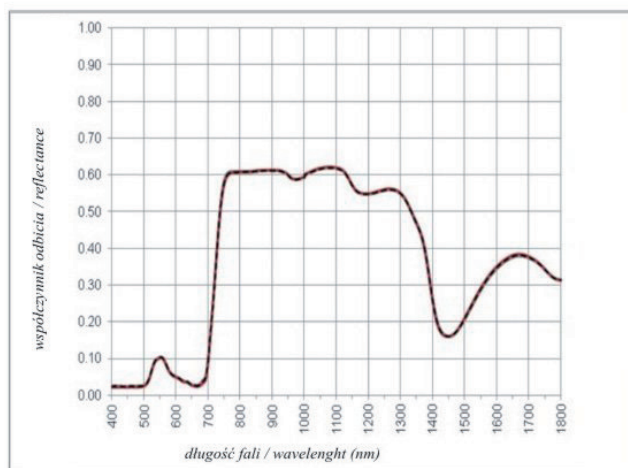
Rodzina <i>Family</i>	<b>Gramineae</b>
Forma życiowa <i>Living form</i>	<b>Geofit Geophyte</b>
Siedlisko <i>Habitat</i>	<b>Łąki, południowe zbocza Meadows, southern slopes</b>
Występowanie <i>Occurrence</i>	<b>Eurazja, Północna Ameryka Eurasia, North America</b>
Wartość CCI <i>CCI value</i>	<b>23,28</b>

Ryc. 9. Metryczka: turówka wonna (*Hierochloe odorata* (L.) Beauv.)Fig. 9. Information card of the sweet grass (*Hierochloe odorata* (L.) Beauv.)

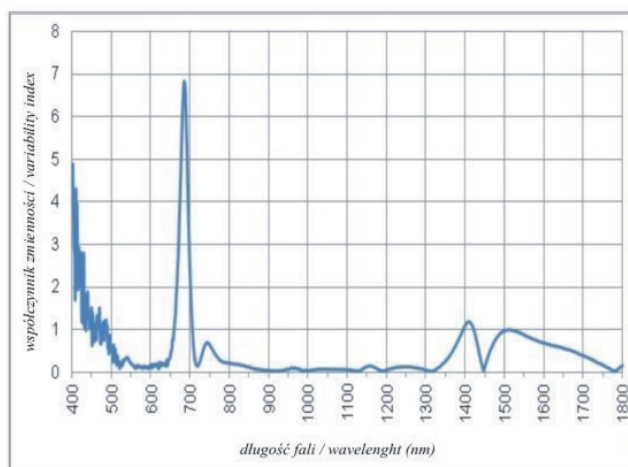


## *Primula veris* L.

### Pierwiosnek lekarski (Cowslip)



Rodzina <i>Family</i>	<i>Primulaceae</i>
Forma życiowa <i>Living form</i>	Hemikryptofit <i>Hemicryptophyte</i>
Siedlisko <i>Habitat</i>	Xerotermiczne obszary leśne i łąkowe. <i>Xerothermic open fields and forest meadows, coastal dunes and clifftops</i>
Występowanie <i>Occurrence</i>	Europa, Azja <i>Eurasia</i>
Wartość CCI <i>CCI value</i>	4,6



Ryc. 10. Metryczka: pierwiosnek lekarski (*Primula veris* L.)  
Fig. 10. Information card of the Cowslip (*Primula veris* L.)

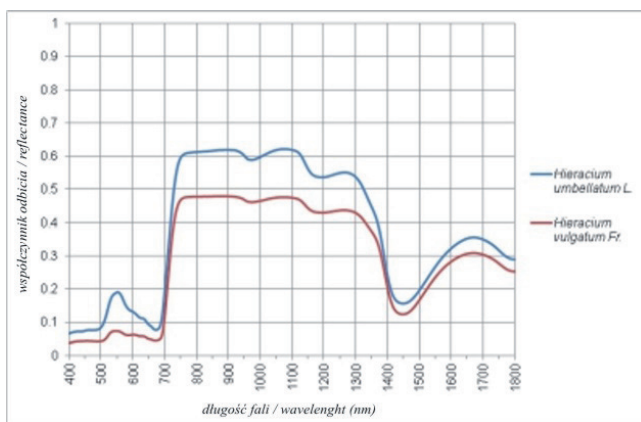
L. (borówka bagienna), *Verbascum nigrum* L. (dziewanna pospolita), *Veronica longifolia* L. (przetacznik długolistny), *Vincetoxicum hirundinaria* Medik. (ciemniężyk białokwiatowy).

## Wnioski i podsumowanie

Biblioteka spektralna roślin zielnych Ogrodu Botanicznego Uniwersytetu Warszawskiego stanowi dobre źródło do analiz spektralnych, szczególnie do identyfikacji gatunków, tworzonych przez nie zbiorowisk roślinnych oraz do analizy stanu i kondycji. Opracowana baza danych integruje krzywe spektralne z rzeczywistym wyglądem badanej próbki oraz jej opisem. Pozwala dowolnie porównywać profile spektralne roślin. Dzięki zapisowi w formacie ASD baza danych może być czytana do dowolnego oprogramowania i standardu (w tym ENVI™). Wyliczony współczynnik zmienności pozwala określić zmienność kolejnych pomiarów, w tym wykonanych na gatunkach innych siedlisk. Do analizy stanu fenologicznego źródłem danych referencyjnych może być zawartość chlorofilu w liściach.

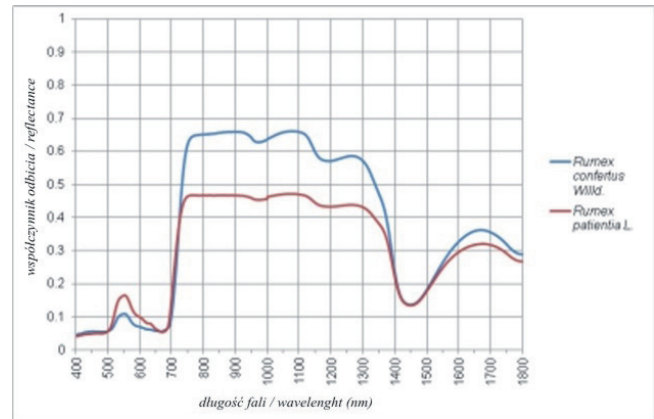
Z przeprowadzonych analiz krzywych spektralnych wynika, iż techniki hiperspektralne pozwalają na rozróżnienie wybranych gatunków w obrębie jednego rodzaju, np. jastrzębica baldaszkowatego *Hieracium umbellatum* L. i jastrzębca zwyczajnego *Hieracium vulgatum* Fr., szczawiu omszonego *Rumex confertus* Willd. i szczawiu żółtego *Rumex patientia* L. (Ryc. 11, Ryc. 12). Części gatunków zdecydowanie nie można rozróżnić, np. koniczyny pogiętej (*Trifolium medium* L.) i koniczyny łąkowej (*Trifolium pratense* L.) (Ryc. 13).

Na chwilę obecną w opracowanej bibliotece spektralnej brakuje możliwości wyszukiwania, konkretnych informacji, np. siedlisk. Element ten jest obecnie dopracowywany, gdyż z punktu widzenia użytkownika istotnym elementem jest możliwość znalezienia gatunków porastających dane siedlisko. Podobnie sytuacja wyglą-



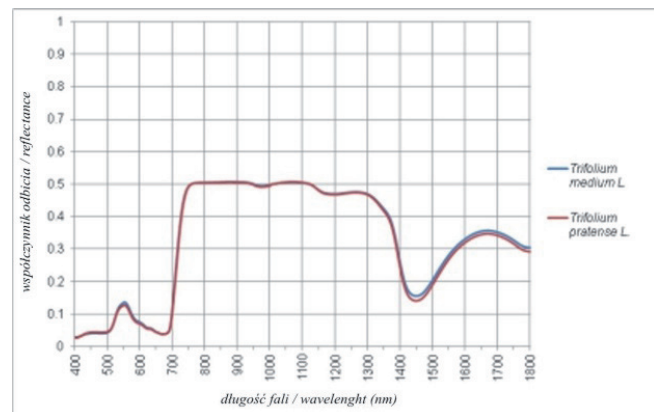
Ryc. 11 Krzywe spektralne jastrzębca baldaszkowatego (*Hieracium umbellatum* L.) oraz jastrzębca równolodygowego (*Hieracium vulgatum* Fr.)

Fig. 11. Spectral characteristics of the Canada Hawkweed (*Hieracium umbellatum* L.) and Hawkweed flower (*Hieracium vulgatum* Fr.)



Ryc. 12. Krzywe spektralne prezentujące szczawiu omszony (*Rumex confertus* Willd.) i szczawiu żółty (*Rumex patientia* L.).

Fig. 12. Spectral characteristics of the Asiatic Dock (*Rumex confertus* Willd.) and the Patience Dock (*Rumex patientia* L.).



Ryc. 13. Krzywe spektralne koniczyny pogiętej (*Trifolium medium* L.) oraz Koniczyny łąkowej (*Trifolium pratense* L.).

Fig. 13. Spectral characteristics of the zigzag clover (*Trifolium medium* L.) and the red clover (*Trifolium pratense* L.).

da z modelowaniem sygnałów dwukierunkowości odbicia (BRDF), który uwzględniałby geometrię układu źródło promieniowania – obiekt – detektor. Wytlumaczeniem tego stanu na chwilę obecną jest fakt, iż wszystkie pomiary zostały wykonane w takiej samej konfiguracji wynikającej z zastosowania sztucznego oświetlenia i sondy Plant Probe, deniwelując wpływ warunków zewnętrznych na wyniki pomiarów. Dlatego, też umieszczanie metadanych o pomiarach w sporządzonej bibliotece spektralnej było zbędne. Jednakże w najbliższej perspektywie planuje się zastosować naturalne warunki pomiarów (w pełnym, słonecznym oświetleniu).

## Podziękowania

Niniejsza praca powstała dzięki ogromnemu wsparciu Ogrodu Botanicznego UW. Szczególne podziękowania kierujemy do Pani Dyrektor - dr Hanny Werblan-Jakubiec oraz Pani mgr Izabelli Kirpluk za otwarcie, chęć pomocy oraz umożliwienie wykonywania badań.



## Literatura

- Adamczewski P., 2005, *Słownik informatyczny*. Helion, Gliwice.
- Analytical Spectral Devices, Inc., 2006. *FieldSpec® 3 User Manual*. ASD Inc., Boulder, USA. Dokument PDF.
- Bojinski S., Schaepman M., Schläpfer D., Itten K., 2003, SPECCHIO: a spectrum database for remote sensing applications. *Computers & Geosciences*, Vol. 29 No. 1. Ss. 27-38.
- Carter G.A., 1994, Ratios of leaf reflectance in narrow wavebands indications of plant stress. *International Journal of Remote Sensing*, 15. SS. 1515-1521.
- Clark R. N., 1999, Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. W: Rencz A.N. [red.], *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences*, John Wiley and Sons, New York, strony 3-58.
- Gitelson A.A., Marzlyak M.N., 1997, Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 1366-5901, Vol. 18, Issn 12, Ss. 2691-2697.
- Hejmanowska B., Głowienka E., 2004, Wstępne wyniki pomiarów spektrometrycznych i klasyfikacji obrazów hiperspektralnych. *Geoinformatica Polonica*, Tom 6, Kraków.
- Hüni A., Nieke J., Schopfer J., Kneubühler M., Itten K., 2007. *2<sup>nd</sup> generation of RSL's spectrum database "SPECCHIO"*. [ftp://ftp.geo.unizh.ch/pub/rs12/paper/2007/ISPMSRS\\_SPECCHIO\\_Hueni\\_el\\_al.pdf](ftp://ftp.geo.unizh.ch/pub/rs12/paper/2007/ISPMSRS_SPECCHIO_Hueni_el_al.pdf).
- Karpowiczowa L., 1967, *150 lat ogrodu botanicznego Uniwersytetu Warszawskiego*. PWN, Warszawa. Ss. 71.
- Liu G., Allen J., Lu K., Kleppel G., Newman D. i Parkey J., 2005, Using a self-built hyperspectral library for identifying and mapping the invasive species purple loosestrife. *Global Priorities in Land Remote Sensing*, Sioux Falls, South Dakot.
- <http://www.strom.clemson.edu/staff/gliu/papers/LiuGPecora16.pdf>.
- Milton E.J., 2004, Field spectroscopy. W: Atkinson, P. (red.), *Geoinformatics, Encyclopaedia of Life Support Systems (EOLSS)*, EOLSS Publishers, Oxford, UK. Ss. 28.
- Nicodom, 2008, *FTIR Spectra, IR Spectra, Infrared spectra. FT-IR Database*, [Online, Kwiecień 2008] <http://www.ir-spectra.com/>.
- Opti-Sciences, 2008, *Optiscences CCM-200 Chlorophyll Meter Operation Manual*, (pdf), <http://www.optisciences.com/manuals/ccm200.pdf>.
- Price, J. C., 1992, Variability of high resolution crop reflectance spectra, *International Journal of Remote Sensing*. Ss. 2593-2610.
- Rao N. R., Garg, P. K. i Ghosh S. K., 2007, Development of an agricultural crops spectral library and classification of crops at cultivar level using hyperspectral data. *Precision Agriculture*, October, Vol 8, Issue 4-5. Ss. 173-185.
- Sędzikowski Z., 2008, *Biblioteka spektralna gatunków zielnych Ogródu Botanicznego Uniwersytetu Warszawskiego*. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji, Warszawa. Ss. 47. Maszynopis pracy licencjackiej wykonanej pod opieką dr B. Zagajewskiego.
- van der Meer F.D., de Jong S.M. (red.), 2001, *Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications*. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, Ss. 405.
- Werblan-Jakubiec H. (red.), 1991. *Przewodnik po Ogródku Botanicznym Uniwersytetu Warszawskiego*. UNIWA, Warszawa. Ss. 203.
- Zagajewski B., Lechnio J., Sobczak M., 2007, Wykorzystanie teledetekcji hiperspektralnej w analizie roślinności zanieczyszczonej metalami ciężkimi. *Teledetekcja Środowiska*, Tom 37, Klub Teledetekcji Środowiska PTG, Warszawa. Ss. 82-100.
- Zagajewski B., Jarocińska A., Olesiuk D., 2008, *Metody i techniki badań geoinformatycznych*. WGiSR UW, Warszawa, Ss. 100.



Dr Bogdan Zagajewski, adiunkt 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](http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/bz_pl.html)



Zenon Sędzikowski, magistrant w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje na wykorzystaniu teledetekcji hiperspektralnej, fotointerpretacji oraz GIS w badaniach środowiskowych. E-mail: [sedzikowski@o2.pl](mailto:sedzikowski@o2.pl)