

Zintegrowane pomiary roślinności wysokogórskiej

Integrated measurements of high mountain vegetation

Bogdan ZAGAJEWSKI, Alicja FOLBRIER, Anna KOZŁOWSKA,
Marcin SOBCZAK, Magdalena WRZESIEN

Mountain plant species have very specific environmental adaptations (like for example increased carotenoid content) to protect them from harsh conditions: e.g. excessive sun radiation, high amplitudes of temperature, strong winds etc. Those adaptations result from plant physiology that is chemical and physical properties of the green, vegetative matter. Laboratory and field analyses of spectral properties of plants have shown, that identification of plants and vegetation communities in mountains is possible.

Spectral signature of a plant is distinctive and variable with wavelength, its characteristic absorption features being a direct result of its physiological process. Photosynthesis is based on conversion of radiation absorbed in blue and red parts of electromagnetic spectrum to energy. Chlorophyll a is the main factor in photosynthesis while chlorophyll b plays a secondary function, supporting chlorophyll a in light absorption. Carotenoids' role is to protect chlorophyll from photooxidation and thylakoid membranes from destruction resulting from excess sun radiation. High content of carotenoids is noted for plants subjected to extensive sun radiation (e.g. alpine species). Quantity of carotenoids increases also with plant senescence. Other pigments such as xanthophylls and anthocyanins can also contribute to absorption of visible radiation.

In addition to spectral characteristics of vegetation, there exists a wide range of supporting indices used in vegetation research, like: NDVI. The principal of a vegetation index is to define a simple relationship between the reflectance measured by a sensor in particular wavelengths and parameter directly characterising a plant (e.g. condition of a photosynthesising apparatus, efficiency of evapotranspiration process) or vegetation stand (biomass or canopy structure). Other commonly used biophysical vegetation characteristics which can be directly derived from remote sensing measurements include, among others: LAI (Leaf Area Index), fAPAR (fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation) and plant-air temperature difference.

In this paper methodology of vegetation monitoring using field remote sensing techniques is presented. This is the first stage of the assessment of the potential of hyperspectral data for analysis

and monitoring of mountain environments with a special focus on vegetation mapping and condition investigation. The research aims advanced field measurements, laboratory analysis of pigments (chlorophyll a, b and carotenoids), dry/fresh biomass.

The study was conducted in Tatra National Park ("High Tatras"). Field remote sensing measurements were carried out on July and August 2002. The year has been exceptionally good for vegetation development and the state of the researched vegetation was good. No vegetation in poor condition or under stress has been detected. Four sets of measurements characterising different aspects of vegetation and its habitat condition were carried out at both sites: spectrometric measurements; survey of Leaf Area Index (LAI); measurements of Accumulated Photosynthetic Active Radiation (APAR); plant heat and water balance assessment; fluorescence; biomass, water content in leaves, absorption of photosynthetic plant pigments; sun radiation and GPS measurements and detailed land-use and vegetation mapping.

Results of field campaign can be outlined: the qualitative and quantitative analysis of photosynthesising pigments showed significant differences between analysed species; field radiometric measurements confirmed the results achieved in the laboratory analysis of leaf pigment content; spectral signatures of researched communities are characteristic for plants in good condition; LAI index measured for all researched communities oscillates around an optimal value; productivity defined as an APAR/PAR0 ratio for all researched communities was very high; temperature differences between plant and air temperature for all plant communities were negative, which indicates good performance of the process of evapotranspiration of the plant species building the communities.

The applied methods of field measurements and laboratory analysis show a potential of remote sensing techniques for research and mapping of vegetation in mountainous environments. The next stages of research (analysis of the hyperspectral data) should show proper recognition and state of alpine plants and communities.

KEY WORDS: remote sensing, hyperspectral techniques, vegetation, mountainous environments.

Wstęp

Monitoring środowiska wymaga pozyskiwania aktualnych informacji o jego stanie i procesach zachodzących w przyrodzie. Teledetekcja, wykorzystując różne zakresy widma elektromagnetycznego, dostarcza informacji, które mogą wesprzeć tradycyjne metody badawcze. Jest to szczególnie cenne na obszarach trudno dostępnych do eksploracji. Jest zatem szczególnie uzasadnione podjęcie badań, które umożliwią identyfikację zbiorowisk roślinnych, kartowanie i analizę stanu kondycyjnego za pomocą nieinwazyjnych, zdalnych technik teledetekcyjnych.

Głównym celem prezentowanych badań było zebranie dokumentacji spektralnej zbiorowisk naturalnych, oszacowanie stanu kondycyjnego obszarów chronionych, określenie produktywności wybranych zbiorowisk Tatr Wysokich oraz metodyczna ocena możliwości wykorzystania naziemnych i lotniczych technik hiperspektralnych do badania roślinności górskiej (analiza charakterystyk spektralnych).

Obszar Tatr: kartowanie i monitoring chronionej roślinności wysokogórskiej

Ze względu na przystosowania do środowiska alpejskiego, gatunki wysokogórskie wykazują istotne różnice w budowie anatomicznej i funkcjonalnej, co wyraża się poprzez zróżnicowanie wielu parametrów, np. ilościowej i jakościowej zawartości barwników fotosyntetycznych oraz ich zmienność, czy też fluorescencji oraz transpiracji i zawartości wody w tkankach. Badania prowadzone na dominujących gatunkach muraw alpejskich wykazały, że powyższe elementy mają bezpośredni wpływ na uzyskiwane charakterystyki spektralne (Jakomulska, 1999; Zagajewski, Sobczak, 2003). Na przebieg krzywej odbicia spektralnego roślin ma wpływ także struktura komórkowa liści oraz zawartość związków chemicznych w tkankach (Curran, Dungan i in., 1992; Fourty, Baret i in., 1965; Gates, Keegani in., 1965; Knipling, 1970). Przykładowo, zwiększony udział karotenoidów (barwniki chroniące przed nadmiernym promieniowaniem słonecznym), w sicie skucinie (*Juncus trifidus*), pozwalają na łatwą identyfikację tego gatunku w zakresach absorpcji karotenoidów (ok. 470 nm). Funkcjonalne zróżnicowanie zaobserwowane na poziomie gatunku zostało potwierdzone przez charakterystyki spektralne zbiorowisk oraz analizę zdjęć naziemnych i zdjęcia satelitarne (Jakomulska, 1999). Wyniki cytowanych badań utwierdzają w przekonaniu, że identyfikacja i monitoring alpejskich zbiorowisk roślinnych z poziomu lotniczego są możliwe. Opracowanie metody teledetekcyjnego kartowania i monitoringu roślinności na obszarze TPN wydaje się być tematem nie tylko możliwym do realizacji, ale również nagłym, gdyż do tej pory nie udało się przygotować szczegółowej mapy roślinności Tatr, głównie ze względu na specyficzne trudności kartowania terenowego. Dodatkowym bodźcem do badań jest znaczenie monitoringu roślinności wysokogórskiej w badaniach globalnych zmian klimatu, na które wrażliwa roślinność al-

pejska reaguje bardzo szybko. Badania na poligonie tatrzańskim miały na celu rozpoznanie szczegółowych charakterystyk spektralnych powszechnych, wysokogórskich gatunków i zbiorowisk roślinnych występujących w różnych sytuacjach topograficznych. W niniejszym opracowaniu analizy roślinne zostały przeprowadzone dla następujących gatunków: borówka czernica (*Vaccinium myrtillus*), kosmatka brunatna (*Luzula spadicosa*), trzcinik owłosiony (*Calamagrostis villosa*), sit skucina (*Juncus trifidus*), psia trawka (*Nardus stricta*). W chwili obecnej trwają prace nad analizą spektralną uzyskanych odpowiedzi w różnych etapach rozwoju fenologicznego wybranych roślin.

Metody teledetekcyjne

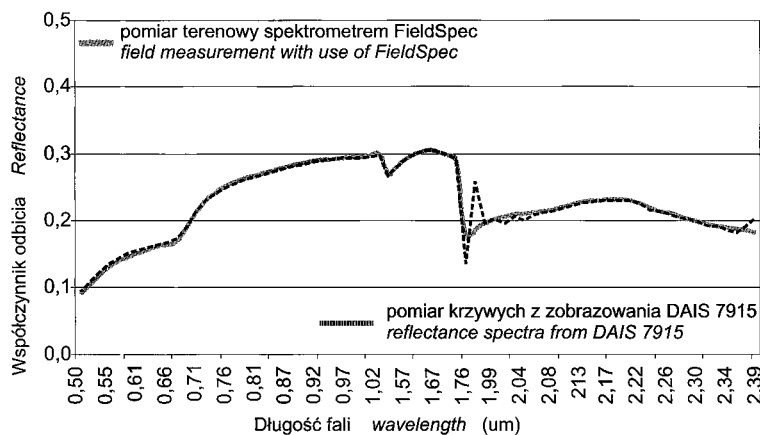
Wykorzystanie danych lotniczych i satelitarnych musi zostać poprzedzone szczegółowymi badaniami terenowymi, które pozwolą powiązać cechy obiektu z uzyskiwanymi odpowiedziami spektralnymi. Jednakże ze względu na fakt, iż mierzony sygnał pochodzi od grupy obiektów (np. woda, rośliny, gleba), problemem pozostaje ekstrakcja sygnałów będących przedmiotem badań. By tego dokonać, prowadzi się rejestrację sygnału w różnych przedziałach spektrum lub też silnie zawęża przedziały promieniowania elektromagnetycznego. Takie podejście stosowane jest w technikach hiperspektralnych, które dają szerokie możliwości szczegółowej analizy roślin, mimo że nadal pozostają w fazie badań eksperymentalnych. W przypadku skanerów hiperspektralnych radiometryczna zdolność rozdzielcza detektorów wynosi kilka nanometrów (2–3 nm w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni, a 10–30 nm w dalszej podczerwieni), a rejestrowany sygnał zapisywany jest w kilkudziesięciu bądź nawet kilkuset kanałach spektralnych. Przestrzenna rozdzielczość wynosi kilka metrów (1–5). Techniki te są odzwierciedleniem dużego postępu w teledetekcji, ponieważ dotychczasowym standardem była analiza widma ze zdolnością rozdzielczą rzędu 10–15 nm w paśmie widzialnym i bliskiej podczerwieni i 30–60 nm dla dalszej podczerwieni.

W przeciwieństwie do dobrze zbadanych i powszechnie znanych właściwości spektralnych minerałów (m.in. biblioteka spektralna minerałów United States Geological Service), które pozwalają na szczegółowe kartowanie skał, nie istnieje uniwersalna biblioteka spektralna roślin i zbiorowisk roślinnych. Wynika to z ogromnej różnorodności gatunków, szeregu możliwych ich kombinacji (zbiorowisk roślinnych), wpływu procentowego pokrycia terenu i biomasy na wielkość odbicia spektralnego, wpływu układu samych liści w stosunku do sensora, zmian fenologicznych roślin itd. Dlatego też praktyczne zastosowania spektrometrii obrazowej (technik hiperspektralnych) wymagają, aby równolegle do rozwoju skanerów hiperspektralnych i technik cyfrowego przetwarzania danych prowadzone były intensywne prace laboratoryjne i terenowe, mające na celu identyfikację właściwości spektralnych roślin i charakterystyk spektralnych zbiorowisk roślinnych pozwalających na określenie ich składu gatunkowego, kondycji oraz biomasy.

Stosunkowo niewiele jest badań, które stosują spektrometrię w celu identyfikacji gatunków. W pracach tych przodują kraje Europy Zachodniej i USA, których agencje kosmiczne opracowały własne konstrukcje obrazujących i polowych spektrometrów obrazowych (np. spektrometry: AVIRIS – NASA, USA; DAIS 7915 – DLR, Niemcy; CASI – Natural Environment Research Council i UK Environment Agency, Wielka Brytania; spektrometry polowe firm Analytical Spectral Devices Inc.; GER). Ciągłe nie liczne prace obejmują przeważnie analizy wybranych gatunków roślin (Skidmore, Schmidt, 1998; Turner, Dibley, Dury, 1998). Prace takie, choć w ograniczonym zakresie prowadzi się również w Polsce (Jakomulska, 1999; Zagajewski, Sobczak, 2003; Jakomulska, Zagajewski, Traut, 2002; Jakomulska, 1999; Zagajewski, 2001).

Pomiary terenowe

Badania terenowe zostały przeprowadzone na przełomie lipca i sierpnia 2002. W maju 2003 zostały wykonane pomiary testowe dla wybranych poligonów, natomiast na przełomie czerwca i lipca 2003 przeprowadzono zasadnicze, 10-dniowe kampanie pomiarowe. Na początku września wykonano również krótkie serie pomiarowe na wybranych poligonach. Zasadnicza baza danych pochodzi z miesięcy letnich i obejmuje ważniejsze gatunki bądź tworzone przez nie zbiorowiska. Do pomiarów terenowych wykorzystane zostały dane obrazowe z nalogu lotniczego wykonanego w roku 2002 (lipiec/sierpień) przez Niemiecką Agencję Kosmiczną DLR. Rejestracji promieniowania odbitego dokonano dwoma sensorami hiperspektralnymi. Pierwszy z nich, DAIS 7915, zobrazował obszar w 79 kanałach spektralnych (32 kanały w zakresie: 450–1050 nm; 8 kanałów: 1500–1800 nm; 32 kanały: 1900–2450 nm; 1 kanał – 3000–5000 nm i 6 kanałów: 8700–12300 nm) z rozdzielczością terenową wynoszącą 3 m. Drugi sensor, ROSIS, posłużył do rejestracji w 101 kanałach spektralnych w zakresie 430–860 nm z rozdzielczością terenową 1 m. Uzyskane charakterystyki spektralne z pomiarów lotniczych posłużyły także do rozbudowy bibliotek spektralnych zbiorowisk roślinnych (ryc. 1).



Ryc. 1. Porównanie krzywych odbicia spektralnego z pomiaru terenowego i lotniczego z DAIS7915.

Fig. 1. Comparison of spectral characteristic derived from field and airborne DAIS 7915 sensors.

Pomiary spektrometryczne

Pomiary spektrometryczne zostały wykonane spektrometrami FieldSpec Pro w zakresie 325–2500 nm (dzięki uprzejmości GeoForschungsZentrum w Poczdamie, dr Uta Heiden), GER3700 w zakresie 350–2500 nm (dzięki uprzejmości DLR Oberpfaffenhofen, dr Andreas Mueller i Martin Habermeyer), FieldSpec HH w zakresie 325–1075 nm, 4 spektrometrami SP1 (o zmiennych 4 przedziałach spektrum, w zależności od zastosowanych filtrów z zakresu 550–1950 nm, szerokości połówkowe od 10 do 80 nm) oraz 23 kanałowym SPZ5 w zakresie 500–1050 nm (Rataj, Gadomski i in., 1998). Badane zbiorowiska mierzone były w 10, 25 lub 50 powtórzeniach. Pomiar pozwolił obliczyć spektralny współczynnik odbicia, dzięki czemu możliwe było wykreślenie krzywych odbicia oraz obliczenie wartości współczynnika roślinności NDVI. Pomiar spektrometrem GER 3700 oraz FieldSpec Pro i HH umożliwił zebranie dokładnych charakterystyk spektralnych badanych obiektów, podczas gdy spektrometry SP1 pozwoliły jedynie na ogólną analizę odbicia w bardzo szerokich pasmach promieniowania elektromagnetycznego. Rolę wzorca kalibracyjnego pełnił spektralon.

Oznaczanie barwników asymilacyjnych

W trakcie badań terenowych były wykonywane pomiary zawartości całkowitej chlorofli metodą *in vivo* za pomocą urządzenia Chlorophyll Content Meter CCM200. Urządzeniem tym mierzono całkowitą zawartość chlorofilu dla każdego badanego obiektu. Wybrane rośliny były ścinane i w warunkach laboratoryjnych dokonywany był pomiar zawartości poszczególnych typów chlorofli i sumy karotenoidów. Zastosowana została metoda Lichtenthalera i Wellburna (Lichtenthaler., Wellburn, 1983), która polega na ekstrakcji barwników do 80% acetonu i pomiarze ekstynkcji w spektrofotometrze.

Pomiary akumulowanej energii fotosyntetycznej APAR

Pomiar akumulowanej radiancji z zakresu fotosyntezy APAR (Accumulated Photosynthetic Active Radiation) został wykonany za pomocą przyrządu AccuPAR. Badanie polegało na rejestracji gęstości strumienia bezpośredniego promieniowania słonecznego z zakresu 400–700 nm dochodzącego do roślin (PAR_0), przenikającego przez nie (PAR_d), odbitego od gleby pod rośliną (PAR_g) oraz odbitego od górnej powierzchni roślin (PAR_c). Następnie obliczono bilans strumienia 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)), obliczony jako stosunek zakumulowanego promieniowania (APAR) do

całkowanej energii dopływającej do powierzchni roślin (PAR_0) (2).

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

Każdy punkt pomiarowy został scharakteryzowany poprzez wykonanie 4 powtórzeń w 3 różnych miejscach typowych dla danego typu roślinności. Na opracowanie wyników składało się obliczenie wskaźnika APAR i jego względnej postaci $fAPAR$, umożliwiającej porównanie wyników z różnych warunków oświetlenia.

Pomiary LAI

Pomiary wskaźnika powierzchni projekcyjnej liści (LAI – Leaf Area Index) polegało na obliczeniu sumarycznej powierzchni liści przypadających na jednostkową powierzchnię terenu. Wykorzystany został instrument LAI-2000 Plant Canopy Analyser firmy Li-Cor. Dla każdego punktu pomiarowego zostały wykonane 2–3 powtórzenia (jedno powtórzenie to 15 niezależnych rejestracji). Własne doświadczenia przeprowadzone na polu testowym w Szymbarku jak i przegląd literatury (Welles, Norman, 1991) potwierdzają dużą korelację ($R^2 = 0,96$) pomiaru teledetekcyjnego i biometrycznego (wycięcie i planimetria liści znajdujących się na danej powierzchni jednostkowej) (Jakomulska, Zagajewski, Traut, 2002). Dlatego podczas niniejszych analiz bazowano na pomiarze teledetekcyjnym, który nie niszczy roślin i pozwala szybko, z dużą dokładnością wykonać pomiary (odchylenie standardowe wykonanych pomiarów było niższe niż 3–5%).

Pomiary temperatury radiacyjnej i termodynamicznej powietrza

Pomiar temperatury termodynamicznej powietrza (t_a) oraz radiacyjnej powierzchni liści (t_s) został wykonany radiometrem iRtec MiniRay. Idea badania sprowadza się do pomiaru spektralnej luminancji energetycznej w zakresie podczerwieni termalnej (8–14 μm) i przeliczeniu jej na temperaturę według prawa Stefana-Boltzmana. Temperatura termodynamiczna powietrza (t_a) została zmierzona sondą zewnętrzną do pomiarów powietrza iRtec MiniRay. Dla każdego punktu pomiarowego wykonano kilka 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 $t_s - t_a$.

Celowość pomiaru polega na fizjologicznej prawidłowości wynikającej z faktu chłodzenia się roślin w procesie ewapotranspiracji. Wraz z wodą wydalone zostają znaczne ilości ciepła. Przy założeniu, że istnieje dostateczna ilość wody w gruncie, proces ten u roślin zdrowych zachodzi bez zaburzeń. Wymiernym wskazaniem jest obniżenie temperatury powierzchni roślin (różnica temperatur uzyskuje wartości ujemne).

Wskaźnik $t_s - t_a$ przybiera wartości dodatnie w sytuacji występowania stresu wodnego.

Pomiary biomasy

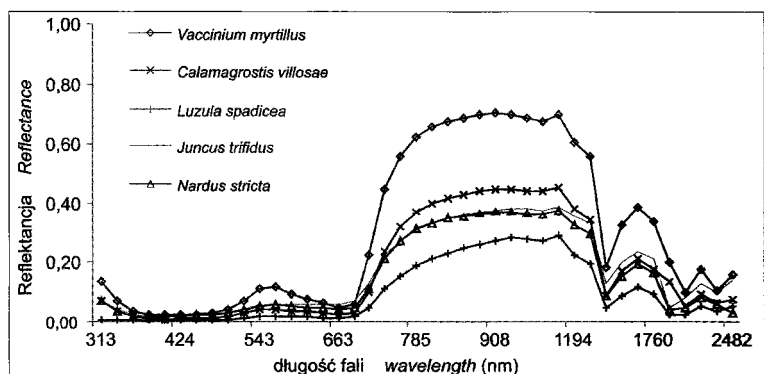
Na powierzchni 25 m^2 bądź 1 m^2 (wybrane uprawy) zostało wykonane zdjęcie fitosocjologiczne, a następnie obliczono udział procentowy poszczególnych gatunków roślinnych oraz gleby. Dodatkowo z powierzchni 0,25 m^2 została ścięta i zważona biomasa. Po wysuszeniu w temperaturze 105°C obliczono zawartość wody w tkankach oraz zawartość suchej biomasy. Zawartość wody w roślinie jest charakterystyczna dla danego gatunku i może zostać skorelowana z odpowiedziami spektralnymi w zakresie podczerwieni (SWIR).

Wyniki pomiarów terenowych

Warunki pogodowe w czasie badań terenowych były stosunkowo dobre. Zapis spektralnego kanału „słonecznego” w spektrometrze SP1 oraz rekalkibracja ekranu słonecznego w spektrometrach FieldSpec i GER3700, pozwoliły na kontrolę prowadzonych pomiarów i prawidłową analizę wyników.

Charakterystyki spektralne

Uzyskane dane potwierdzają możliwość teledetekcyjnego zróżnicowania większości badanych obiektów (ryc. 2). Największe różnice można zaobserwować w zakresie podczerwieni oraz w zielonym zakresie widma elektromagnetycznego. Jest to dobrze widoczne w przypadku borówki czernicy (*Vaccinium myrtillus*), gdzie odbicie w kanale zielonym jest prawie dwukrotnie większe niż pozostałych analizowanych gatunkach. Podobnie w przypadku zakresu podczerwonego, gdzie poziom odbicia sięga blisko 70%. Najniższe odbicie zarejestrowane zostało dla kosmatki brunatnej (*Luzula spadiacea*). W widzialnym zakresie widma charakteryzuje ona się niskim poziomem odbicia (kilka procent), natomiast w podczerwieni poziom ten wzrasta do około 30%. Pozostałe analizowane gatunki mają zbliżony poziom odbicia, ale analiza wybranych kanałów wraz z innymi danymi, np. proporcje barwników



Ryc. 2. Krzywe odbicia spektralnego gatunków wysokogórskich
Fig. 2. Spectral characteristics of high mountain species.

(zakres widzialny) czy zawartość wody w tkankach (podczerwień) umożliwia ich zróżnicowanie.

Dla wszystkich badanych gatunków wskaźnik NDVI osiąga wysokie wartości. Najwyższe wartości zarejestrowano dla *Luzula spadicea* (0,92) i *Calamagrostis villosae* (0,90), a najniższą dla *Juncus trifidus* (0,73). Wszystkie one są charakterystyczne dla roślin w dobrym stanie kondycyjnym. Istotnym faktem jest to, że współczynniki zmienności wykonanych pomiarów (odchylenie standardowe wyrażone w procentach względem średniej arytmetycznej) są niewielkie, wahając się na poziomie kilku procent. Najwyższe – 10,5% osiągnięto w przypadku pomiarów situ skuciny (*Juncus trifidus*), najniższe natomiast dla *Vaccinium myrtillus* (0,45%) i *Nardus stricta* (0,65%).

Barwniki fotosyntetyczne

Badania zawartości barwników fotosyntetycznych wykazały znaczne zróżnicowanie między badanymi gatunkami. Dotyczy to zarówno analizy ilościowej, jak i jakościowej. Największą zawartością chlorofilu a, będącego podstawą procesów fotosyntezy, charakteryzuje się psia trawka (*Nardus stricta*) oraz kosmatka brunatna (*Luzula spadicea*) – około 2 mg/g świeżej masy. Blisko o połowę mniejsze stężenie występuje w liściach borówki czernicy (*Vaccinium myrtillus*) oraz situ skuciny (*Juncus trifidus*) (ryc. 3). Podobne proporcje występują w przypadku chlorofilu b i sumy zielonych barwników (chlorofil a+b). Uwzględniając karotenoidy, których stężenie jest zbliżone do chlorofilu b, można stwierdzić, że najbardziej optymalny ich skład posiada trzcinnik owłosiony (*Calamagrostis villosae*) (ryc. 4). Twierdzenie to opiera się na wynikach badań mówiących o tym, że w zdrowych ro-

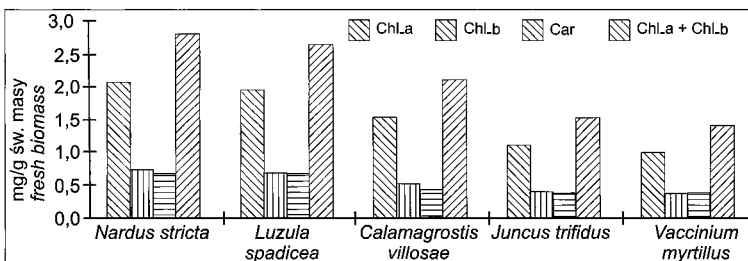
ślinach chlorofilu a jest około 3 razy więcej niż chlorofilu b, a ich suma jest około 5 razy większa niż zawartość karotenoidów. Jeśli ten pierwszy warunek nie jest spełniony, oznaczać to może stan stresowy dla rośliny. Zwiększona zawartość karotenoidów jest charakterystyczna dla roślin starzejących się bądź narażonych na czynnik stresowy, np. wysokie napromienienie słoneczne.

Akumulowana energia z zakresu fotosyntezy APAR

Sprawność aparatu fotosyntetycznego może być rejestrowana poprzez akumulowaną energię. W przypadku badanych roślin ilość wykorzystywanej energii na potrzeby fotosyntezy waha się w granicach 85–95% względem potencjalnie dostępnej, co potwierdza ich dobrą kondycję. Rozrzut pomiędzy poszczególnymi pomiarami jest niewielki i waha się w granicach 0,39–6,45%. Nie dotyczy to tylko situ skuciny (*Juncus trifidus*), ponieważ rejestrowane różnice wynoszą 11,2% i oscylują wokół 60% wykorzystywanej energii PAR (tab. 1).

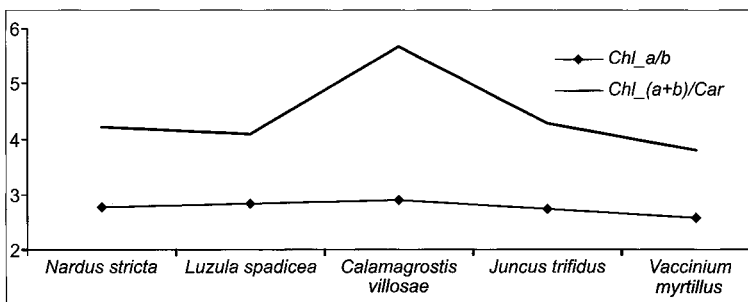
Tabela 1. Akumulowana energia z zakresu fotosyntezy
Table 1. Accumulated Photosynthetic Active Radiation

	fAPAR	Odchylenie standardowe Standard deviation	Współczynnik zmienności (%) Variability index
<i>Nardus stricta</i>	0,85	0,02	2,43
<i>Luzula spadicea</i>	0,89	0,05	6,15
<i>Calamagrostis villosae</i>	0,88	0,04	4,29
<i>Juncus trifidus</i>	0,64	0,07	11,22
<i>Vaccinium myrtillus</i>	0,95	0,00	0,39



Ryc. 3. Zawartość barwników fotosyntetycznych.

Fig. 3. Content of photosynthetic active pigments.



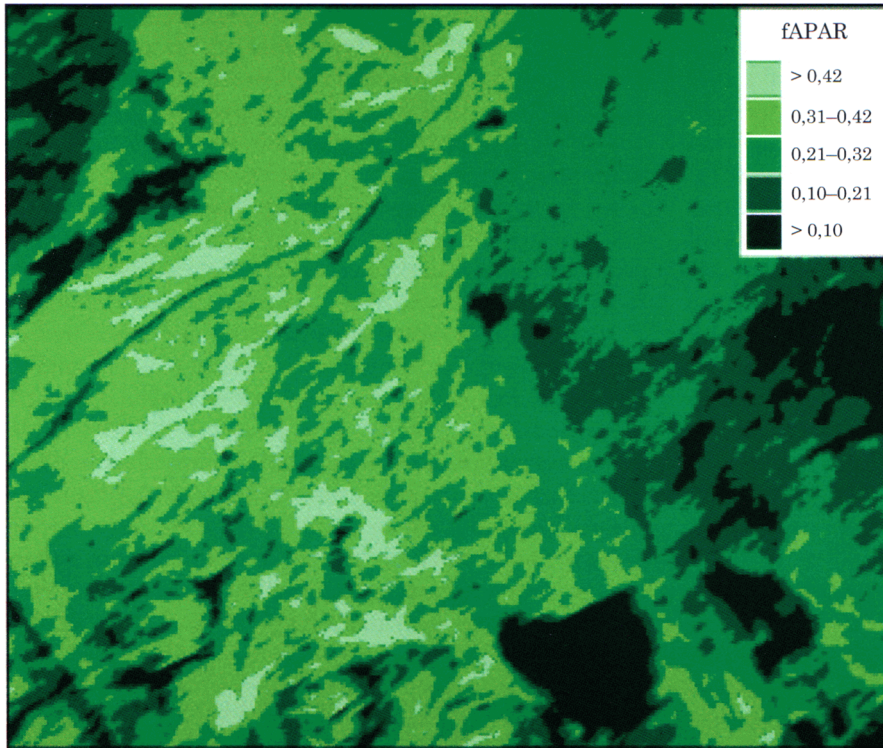
Ryc. 4. Zależność między barwnikami fotosyntetycznymi.

Fig. 4. Relationship between plant pigments.

Na uwagę zasługuje fakt, iż dane te jest stosunkowo łatwo uzyskać bazując na zobrażeniach hiperspektralnych (ryc. 5). Pomiary fAPAR prowadzone równoległe z nalotem lotniczym pozwalają na bezpośrednie porównanie uzyskanych wyników (z pomiaru naziemnego i lotniczego). Istniejące rozbieżności (ryc. 6) wynikają z faktu, iż wynik pomiaru lotniczego uwzględniał także skały, kamienie i inne obiekty występujące w polu widzenia skanera.

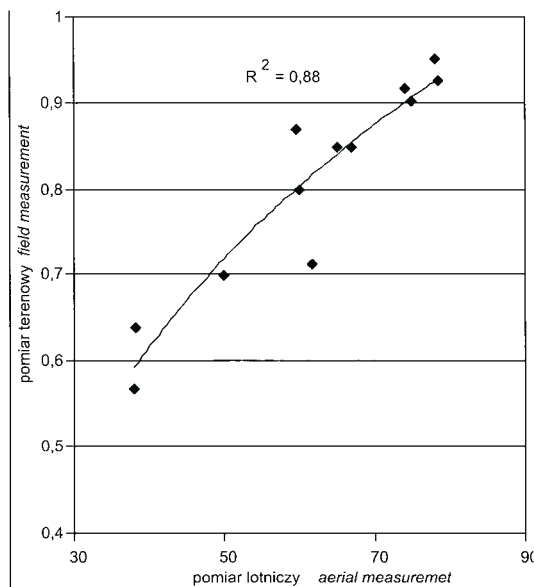
Produkcja biomasy oraz wskaźnik LAI

Ilość wytwarzanej biomasy jest składową warunków środowiskowych, w jakich znajdują się rośliny oraz ich własnych, genetycznych możliwości i strategii rozwoju. Jak pokazują prezentowane w tabeli 2 wyniki badań oraz wyniki uzyskane za pomocą zastosowania wyżej opisanych wskaźników, stan kondycyjny analizowanych roślin jest dobry. Potwierdzają to także pomiary wskaźnika projekcyjnego liści LAI. Wskaźnik ten dla większości gatunków roślinnych osiągnął optymalne wartości z zakresu 3–5. Jedynie sit skucina (*Juncus trifidus*) nie wy-



Ryc. 5. Mapa wskaźnika fAPAR uzyskana ze skanera DAIS 7915.

Fig. 5. The map of fAPAR index derived from DAIS 7915 scanner.



Ryc. 6. Porównanie wskaźników fAPAR mierzonych w terenie i ze skanera DAIS 7915

Fig. 6. Comparison of the fAPAR index derived from the ground and airborne DAIS 7915 scanner

korzystuje całego potencjału produkcyjnego. Na uwagę zasługuje stosunkowo duża zmienność mierzonego wskaźnika LAI oraz biomasy w poszczególnych punktach pomiarowych. Zależność pomiędzy LAI i wytworzoną biomasą jest bardzo wysoka (R^2 wynosi około 0,92).

Uwodnienie roślin

Kolejnym wskaźnikiem potwierdzającym dobry stan roślin jest różnica temperatury powierzchni liścia (t_s) oraz aktualnej temperatury powietrza (t_a). Dla wszystkich ba-

danych zbiorowisk osiąga ona wartości ujemne. Dla kosmatki brunatnej (*Luzula spadicca*) jest to $-6,3^\circ\text{C}$, natomiast stosunkowo najwyższą temperaturę (-4°C) posiada trzcinnik owłosiony (*Calamagrostis villosae*), co może wskazywać na istnienie stresu wodnego u tego gatunku.

Zawartość wody w roślinach jest stosunkowo silnie zróżnicowana (ryc. 7), ale należy przy tym zauważyć, że dla wielu gatunków dany poziom jest charakterystyczny. Fakt ten w dużej mierze przyczynia się do rozróżnienia poszczególnych gatunków.

Wnioski

Zastosowanie teledetekcyjnych technik pomiarowych pozwoliło na szeroką analizę charakterystyk spektralnych badanych gatunków, skorelowanie ich z tradycyjnymi pomiarami biometrycznymi oraz laboratoryjnymi pomiarami z zakresu fizjologii roślin. Możliwe jest także skorelowanie otrzymanych wyników z pomiarami spektralnymi wykonanymi dla dużych obszarów z pułapu lotniczego, a poprzez zastosowanie odpowiednich przetworzeń możliwe jest określenie na podstawie zdjęć lotniczych wszystkich wskaźników, które zostały pomierzone technikami naziemnymi. Hiperspektralne techniki lotnicze stwarzają możliwości prowadzenia badań na stosunkowo dużych powierzchniach z dokładnością porównywalną pomiarom terenowym (np. rozdzielczość terenowa, liczba rejestrowanych kanałów).

Utworzona baza danych o roślinności objęła informacje pochodzące z pomiarów terenowych. Należą do nich: emitancja energetyczna obiektów; całkowite promieniowanie z zakresu fotosyntezy dochodzące do roślin (PAR_r), odbite od nich (PAR_d) oraz transmitowane przez nie (PAR_t).

Skidmore, A.K., Schmidt K.S., 1998, *Mapping rangeland vegetation using hyperspectral vegetation spectra*, 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Remote Sensing Laboratories, University of Zurich, Switzerland, 6–8 October 1998.

Turner B., Dibley G., Dury S., 1998, *Hyperspectral Characteristics of Australian Native Eucalypt Forests*, 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Remote Sensing Laboratories, University of Zurich, Switzerland, 6–8 October 1998.

Welles J.M., Norman J.M., 1991, *Measurement of canopy architecture*, *Agronomy Journal*, 83, 5.

Zagajewski B., Sobczak M., 2003, *Field remote sensing techniques for mountains vegetation investigation*, [w:] Proceedings of 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, Oberpfaffenhofen, May 13–16 2003.

Zagajewski B., 2001, *Assessment of a possibility of the lead detection in grasses using spectrometer SPZ-5*, [w:] M.F Buchroithner (ed.), *A Decade of Trans-European Remote Sensing Cooperation*, Proceedings of the 20 th EARSeL Symposium Dresden/Germany/14–16 VI 2000, A.A. Balkema Publishers, 367– 372, Lisse.



Bogdan Zagajewski od 11 lat zajmuje się wykorzystaniem teledetekcji i SIG w badaniach środowiska. Bierze aktywny udział w krajowym i międzynarodowym życiu naukowym. Autor wielu publikacji naukowych. Ostatnio zajmuje się wykorzystaniem technik hiperspektralnych w identyfikacji i monitoringu roślinności górskiej, rolniczo użytkowanej i zanieczyszczonej metalami ciężkimi. Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW; ul. Krakowskie Przedmieście 30; 00-927 Warszawa; e-mail: bogdan@uw.edu.pl



Mgr Alicja Folbrier, Zakład Teledetekcji Środowiska, od 2005 roku w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji. Od września 1997 r. pracuje na stanowisku starszego specjalisty naukowo-technicznego. Bierze aktywny udział w opracowaniach naukowo-badawczych realizowanych przez zespół Katedry. Interesuje się analizą zmian w środowisku na podstawie interpretacji archiwalnych i aktualnych zdjęć lotniczych i satelitarnych oraz naziemnymi metodami i technikami teledetekcyjnymi. Uczestniczy również w pracach Klubu Teledetekcji Środowiska Polskiego Towarzystwa Geograficznego, jako sekretarz redakcji i redaktor techniczny biuletynu informacyjnego poświęconego zagadnieniom teledetekcji „OKÓLNIK TD”. Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW; ul. Krakowskie Przedmieście 30; 00-927 Warszawa; e-mail: AlicjaFolbrier@uw.edu.pl



Anna Kozłowska. Z wykształcenia biolog, absolwentka Uniwersytetu Warszawskiego, od wielu lat zatrudniona w Instytucie Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN. Specjalizuje się w kartografii roślinności, brała udział w opracowaniu *Mapy Potencjalnej Roślinności Naturalnej Polski 1:300 000*. Zajmuje się roślinnością górska, jej zróżnicowaniem i ekologią. Bierze udział w opracowaniach dotyczących parków narodowych i planowania przestrzennego.



Marcin Sobczak, doktorant Studium Doktoranckiego na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji. Studia magisterskie ukończył w Zakładzie Teledetekcji Środowiska WGiSR, w ramach Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych UW. W roku 2002 stypendysta programu Sokrates-Erasmus na Universidad Complutense de Madrid. W latach 2004 i 2005 uzyskał stypendium dla młodych naukowców Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej. Interesuje się nowoczesnymi technikami przetwarzania obrazów satelitarnych i lotniczych, a także wykorzystaniem Systemów Informacji Geograficznej, teledetekcji oraz geostatystyki w analizach środowiska. Specjalizuje się w wykorzystaniu danych hiperspektralnych i metod spektroskopii obrazowej w interdyscyplinarnych badaniach roślinności.



Magdalena Wrzesień jest ukończyła z wyróżnieniem studia na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych. Pracę magisterską napisała w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. W roku 2005 stypendystka Fundacji im. Nowickiego i Deutsche Bundesstiftung Umwelt oraz Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej. W roku 2005 odbyła 9-miesięczny staż pod kierunkiem prof. dr Patricka Hosterta w Humboldt University Remote Sensing Laboratory (HURS). Obecnie kontynuuje studia doktoranckie w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW, gdzie rozwija zainteresowania związane z teledetekcyjnymi badaniami roślinności. Szczególnie interesuje się analizą zdjęć hiperspektralnych i możliwościami wykorzystania ich w gromadzeniu informacji na temat roślinności obszarów górskich.