

## Kartowanie wysokogórskiej roślinności Tatr metodami teledetekcji i fizjologii roślin

*High mountain vegetation mapping using remote sensing and plant physiology methods*

**O**bjectives. The paper presents application of a combination of remote sensing and plant physiology methods for vegetation communities recognition. The research is based on large scale, multispectral photos made from ground level (in red and infrared portion of electromagnetic spectrum), field radiometric measurements (in channels: 500–600 nm, 600–700 nm, 700–800 nm and 800–1100 nm) and laboratory chlorophyll analysis (using photospectrometer).

**Characteristics of test sites.** The research was conducted on a slope of Beskid, located in the High Tatra Mountains and was based on an in-depth analysis of three alpine species: *Juncus trifidus*, *Luzula spadicca* and *Calamagrostis villosa*, which compose common and prevalent alpine communities: *Oreochloa distichae*–*Juncetum trifidi*, *Luzuletum spadiccae* and *Calamagrostietum villosae*, respectively. *Juncus trifidus* is a high mountain rush, a prevalent and most widespread component of alpine meadows. It occurs on hard-rock slopes, ledges, screes and moraines, forming dozen or so variants of *Oreochloa distichae*–*Juncetum trifidi* community. *Luzula spadicca* is a grass growing at concave-shaped slopes and gullies characterised by a long-lasting snow cover. *Calamagrostis villosa* composes one of the most typical tall-herb communities and occupies well-established screes. All the researched communities occur on granite and acidic slope deposits and moraines in alpine zone (above 1850 m a.s.l.).

**Results. Leaf pigments.** The qualitative and quantitative analysis of pigments has shown significant differences between the analysed species. *Calamagrostis villosae* has the highest total content of chlorophyll per 1 g of fresh vegetation matter (2.1–3.4 mg), *Luzula spadicca* contains 1.6–2.5 mg of chlorophyll, while *Juncus trifidus* — only 0.5–0.9 mg. The researched species have also different ratio of chlorophyll *a* to chlorophyll *b*. Low values of this ratio have been observed for *Luzula spadicca* (1.9–4.2) and *Calamagrostis villosae* (2.1–3.4), while comparatively high for *Juncus trifidus* (5.5–8.6). Additionally *Juncus trifidus* contains high amount of carotenoids in comparison to the total chlorophyll content: (ratio of carotenoids to chlorophyll ranges between 1.9–3.1), while the ratio for *Calamagrostis villosae* and *Luzula spadicca* ranges between 3.6–5.6 and 3.5–5.3, respectively. Chlorophyll *b* plays a second-

ary function in photosynthesis, as it supports chlorophyll *a* in light absorption. Hence its amount in high alpine species, which rather suffer from the excess of solar radiation, is low. This can be observed on the example of the tree researched species. In leaves of *Luzuletum spadiccae* and *Calamagrostietum villosae* chlorophyll *b* reaches 25% of the total amount of leaf pigments, while in leaves of *Juncus trifidus* it amounts only to 10%. Carotenoids play the opposite role in the photosynthesis process: they protect chlorophyll from photooxidation and thylakoid membranes from destruction resulting from excess sun radiation. Hence, high quantity of carotenoids can be found in *Juncus trifidus*, which is one of the main components of high alpine meadows and occupies the highest positions on slopes, where sun radiation intensity is very high. Mean percentage of carotenoids in the analysed *Juncus trifidus* samples reached 28%, while in *Luzula spadicca* and *Calamagrostis villosae* samples — only 17%. Analysis of carotenoid absorption spectrum shows a maximum in the blue portion of the electromagnetic spectrum, with a maximum shifted towards longer waves in comparison with chlorophyll absorption in this part of electromagnetic spectrum. Carotenoid absorption spectrum lacks also a peak in a red portion of electromagnetic spectrum which is characteristic for chlorophyll absorption spectrum. As differentiation of leaf pigments present in the researched plant species is significant, it should influence light absorption in blue and red portions of electromagnetic spectrum.

**Field spectrometer measurements.** Radiometric measurements confirmed the results of laboratory analysis: *Juncus trifidus* has lower absorption in the red band, than the other researched species.

**Analysis of multispectral photographs.** Supervised classification was carried out on composite images: infrared and red channels of the ground photos. It produced good results and allowed for recognition of the following communities: *Oreochloa distichae*–*Juncetum trifidi*, *Luzuletum spadiccae*, *Calamagrostis villosae*, *Rhizocarpetalia* (screc communities), pioneer mossy communities in humid gullies, *Pogonato-Unigeretum* (anthropogenic communities developed along tourist paths) and *Vaccinietum myrtilli*, *Empetro-Vaccinietum* and *Pinetum mughi* (dwarf-

shrub shrubs and heaths). It also allowed for recognition of different variants of *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi* community including the following variants: *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi herbaceae* (occurring at sites with long lasting snow cover), *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi sphagnetosum* (mossy variant), *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* (sheep-grazed subalpine meadows).

**Conclusions.** Large scale methods of analysis applied in this research (both laboratory and remote sensing methods of photographs analysis) show a potential of remote sensing techniques for research of vegetation in mountainous environments in scales 1:10 000 or larger. Hence, it is expected, that new satellite data of broad spectral resolution (IR, R, G) but high geometric resolution (2-5 m) will allow for the recognition of communities discerned in this research. This hypothesis should be verified by the future analysis of satellite data.

## Cel i zakres badań

Roślinność jest doskonałym wskaźnikiem pozostałych komponentów środowiska, toteż w środowiskach mało zaburzonych przez człowieka, takich jak wysokie góry, dobre rozpoznanie roślinności może być szczególnie pomocne w badaniach budowy geologicznej, rzeźby, gleb, wilgotności podłoża i mikroklimatu. Jednocześnie, zarówno komponenty biotyczne jak i abiotyczne w środowiskach wysokogórskich wykazują ogromną wrażliwość i dynamikę. Fizjologiczny stres roślin, wkraczanie nowych roślin i zbiorowisk roślinnych na nowe siedliska, obniżanie się i podwyższanie granic zasięgów roślin i zbiorowisk niejednokrotnie są wynikiem działalności człowieka. Rozpoznanie i monitoring roślinności jest więc niezbędnym elementem ochrony i zarządzania wrażliwych środowisk wysokogórskich.

Kartowanie roślinności polskiej części Tatr rozpoczęto już w latach 60. Mimo iż rozpoznanie roślin, zbiorowisk roślinnych i stanowisk gatunków jest bardzo dobre, tylko niektóre z dolin mają pokrycie mapami roślinności w skalach co najmniej 1: 20 000. Głównym powodem wolnego postępu kartowania roślinności w Tatrach jest krótki okres wegetacyjny, zmienna pogoda, niedostępność wielu stoków oraz ogromną zmienność i zróżnicowanie roślinności.

Dynamiczny rozwój teledetekcji w ostatnich latach doprowadził do wypracowania szybkich i skutecznych metod fotointerpretacji roślinności, toteż fitosocjologzy postulują o ich szerokie zastosowanie do analizy roślinności (Faliński, 1990; Küchler, Zonneveld, 1988). Wymienione wyżej problemy związane z terenowym kartowaniem roślinności skłoniły autorkę do podjęcia pracy badawczej mającej na celu oszacowanie przydatności metod teledetekcji w wielkoskalowym kartowaniu roślinności Tatr. Zdjęcia satelitarne o wysokiej rozdzielczości geometrycznej dostępne obecnie na rynku nie pozwalają na kartowanie roślinności w skalach większych niż 1:50 000. Nie istnieją również wielospektralne zdjęcia lotnicze dla badanego terenu. Ocena przydatności metod teledetekcyjnych do wielkoskalowego kartowania roślinności wysokogórskiej oparta więc została na cyfrowej analizie wielkoskalowych, naziemnych zdjęć wykonanych w czerwonym i podczerwonym zakresie spektrum elektromagnetycznego. Badania z zakresu teledetekcji zostały wsparte terenowymi pomiarami radiome-

trycznymi wybranymi zbiorowisk roślinnych oraz laboratoryjnymi badaniami z zakresu fizjologii roślin (analiza zawartości barwników asymilacyjnych).

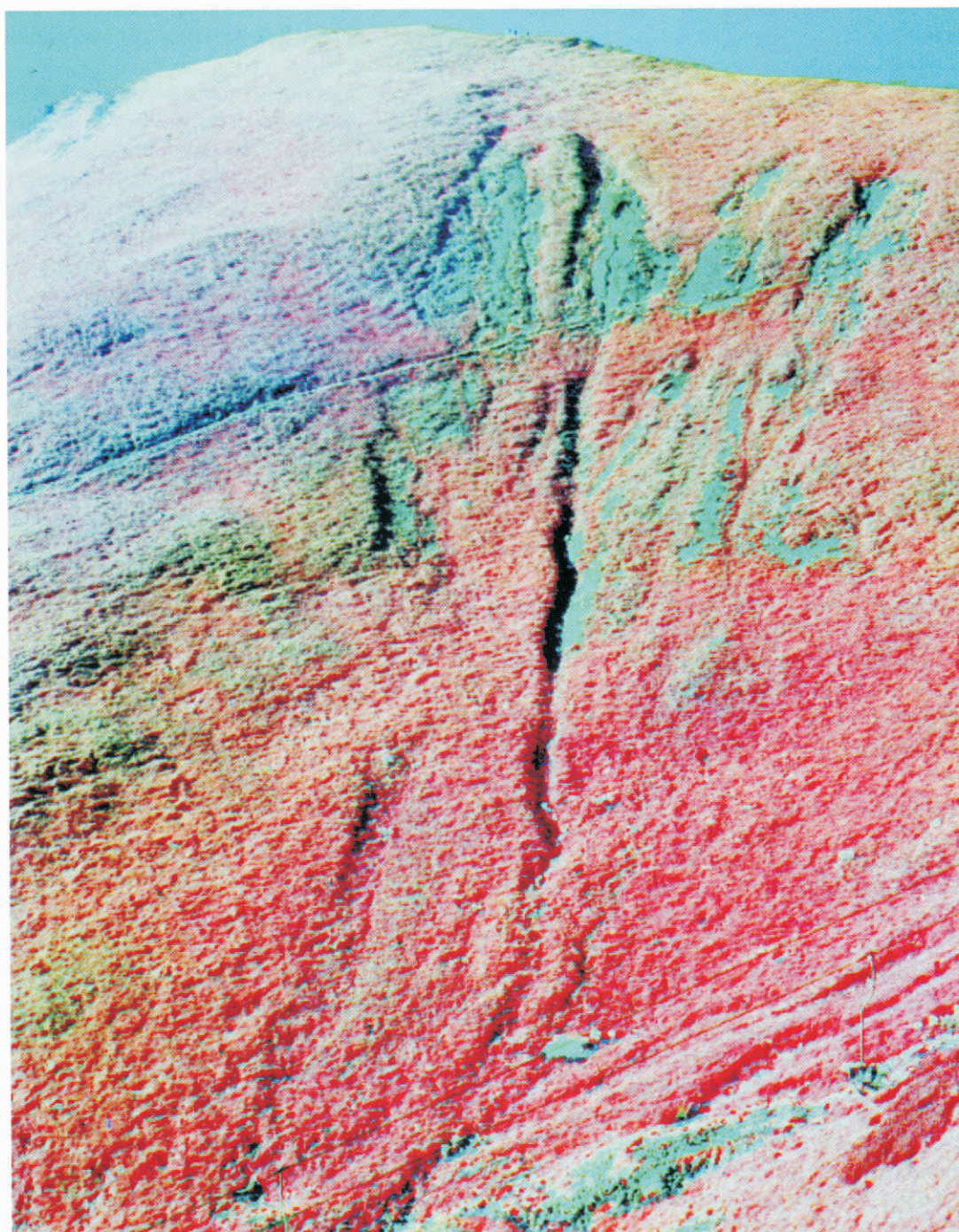
## Metody

### Charakterystyka badanych zbiorowisk roślinnych

Zbiorowiska roślinne różnych formacji roślinnych (np. łąki, zarośla, lasy), są stosunkowo łatwe do interpretacji na zdjęciach lotniczych i satelitarnych. W prezentowanej pracy analizą objęte zostały więc trzy typowe i powszechne w Tatrach Wysokich zbiorowiska trawiaste piętra alpejskiego: *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi*, *Luzuletum spadiceae* i *Calamagrostietum villosae*, reprezentowane przez następujące gatunki alpejskie: *Juncus trifidus*, *Luzula spadicea* i *Calamagrostis villosa*, które są głównymi składnikami badanych zbiorowisk. *Juncus trifidus* (sit skucina) jest powszechnym i dominującym gatunkiem muraw alpejskich. Występuje na stokach i półkach skalnych, piargach i morenach, tworząc kilkanaście podzespołów zbiorowiska *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi*. Występuje na stanowiskach na najwyższych szczytach Tatr. *Luzula spadicea* (kosmatka brunatna) jest gatunkiem tworzącym powszechne, trawiaste zbiorowisko wyleżyskowe *Luzuletum spadiceae*, porastającym wklęsłe partie stoków, kotły, dna dolin i rozleglejszych żlebów, z długo zalegającą pokrywą śnieżną. *Calamagrostis villosa* (trzcinnik owłosiony) tworzy jedno z najbardziej typowych zbiorowisk ziołoroślowych porastające utrwalone piargi.

Wszystkie badane zbiorowiska występują na skałach granitowych oraz kwaśnych i obojętnych utworach stokowych i morenach w piętrze alpejskim (powyżej 1850 m n.p.m.).

Zbiorowiska roślinne badane były na kilkunastu stokach; w tym artykule przedstawione zostały jedynie wyniki szczegółowej analizy gatunków i zbiorowisk roślinnych na stokach Beskidu. Analiza ta objęła: terenowe pomiary radiometryczne, laboratoryjną analizę zawartości barwników asymilacyjnych oraz cyfrowe przetwarzanie zdjęć wykonanych w czerwonym i podczerwonym zakresie spektrum elektromagnetycznego. Badania terenowe wykonano w drugiej połowie sierpnia 1998 roku, w okresie największego wigoru i zróżnicowania roślinności.



Ryc. 1. Standardowa kompozycja w barwach nierzeczywistych (zdjęcia prezentowane w publikacji mają czterokrotnie zmniejszoną rozdzielczość w stosunku do materiałów oryginalnych)

Fig. 1. Image of Beskidy (channels: IR, R, G)

#### **Laboratoryjne pomiary zawartości barwników fotosyntetycznych**

Z 51 pól testowych pobrano kilkugramowe próbki badanych gatunków. Każdy z gatunków reprezentowany jest przez 17 prób w trzech powtórzeniach (próby z powtórzeń zebrano w obrębie płatu tego samego zbiorowiska roślinnego, w odległości kilku metrów). Próby te przewieziono następnie do laboratorium, gdzie wykonano spektrofotometryczne oznaczenie zawartości barwników fotosyntetycznych: chlorofilu *a* i *b* oraz karoteno-

idów (po abstrakcji barwników w acetonie). Dla każdej z prób wykonano po dwa pomiary spektrofotometryczne.

#### **Terenowe pomiary radiometryczne**

Pomiary radiometryczne wykonano radiometrem polowym SP-1, operującym w tych samych zakresach spektralnych co radiometr Landsat MSS (500–600 nm, 600–700 nm, 700–800 nm i 800–1100 nm). W każdym z pól testowych wykonano 20 pomiarów. Dodatkowo, oprócz badanych zbiorowisk roślinnych, dla porówna-

nia zmierzono odbicie spektralne dla piargów, nagich skał i kosodrzewiny.

### Wykonanie zdjęć naziemnych

Zdjęcie stoku Beskidu wykonano z Uhrocia Kasprowego, dwoma aparatami umocowanymi na ramie statywu, co umożliwiło jednoczesne wykonanie zdjęć i ujęcie tego samego kadru. Wykonano zdjęcia w podczerwieni i w czerwonym zakresie spektrum elektromagnetycznego oraz zdjęcia czarno-białe i kolorowe.

Zdjęcia w podczerwieni wykonano na filmie KODAK Ektachrome Infrared High Speed, uczulonym na bliski ultrafiolet, widzialny zakres spektrum elektromagnetycznego oraz bliską podczerwień (do 0,9 m, z maksimum uczulenia filmu przypadającym na fale o długości 0,75–0,84  $\mu\text{m}$ ). W celu wyeliminowania ultrafioletu i zakresu widzialnego zastosowano gęsty czerwony filtr, który przepuszcza fale o długości większej od 690 nm, z maksimum transmitancji (około 73%) fal o długości 750 nm.

Zdjęcia w czerwonym zakresie spektrum wykonano na panchromatycznych filmach Kodak TMAX 400, uczulonych na światło w całym zakresie. Aby wyeliminować światło niebieskie i zielone zastosowano filtr czerwony, transmitujący światło o długości powyżej 595 nm, z maksimum transmitancji dla fal dłuższych od 645 nm.

### Cyfrowe przetwarzanie zdjęć

Wywołane zdjęcia zeskanowano z wysoką rozdzielczością 10 mikronów (2540 dpi). Zdjęcia te nie mają charakteru kartometrycznego: na przednim planie piksel reprezentuje ok. 1 cm w terenie, na tylnym zaś — ok. 10 cm. Mimo niejednorodnej skali na całym zdjęciu, jego rozdzielczość gwarantuje, że jeden piksel obejmuje nie więcej niż jedną kępkę badanych zbiorowisk trawiastych. Zakłada się więc, że wielkość piksela nie ma wpływu na odbicie spektralne badanych obiektów.

Wysoka rozdzielczość pozwoliła na zarejestrowanie zdjęć wykonanych w różnych zakresach spektrum do wspólnego układu współrzędnych, co pozwoliło na uzyskanie standardowej kompozycji w barwach nierzeczywistych (ryc. 1). Rozpoznanie i analizę badanych zbiorowisk przeprowadzono na podstawie szczegółowej klasyfikacji nadzorowanej, w oparciu o mapę zbiorowisk roślinnych w skali 1:1000 (zawierającą ok. 20 zespołów i podzespołów roślinnych i kilkanaście kompleksów tych zbiorowisk).

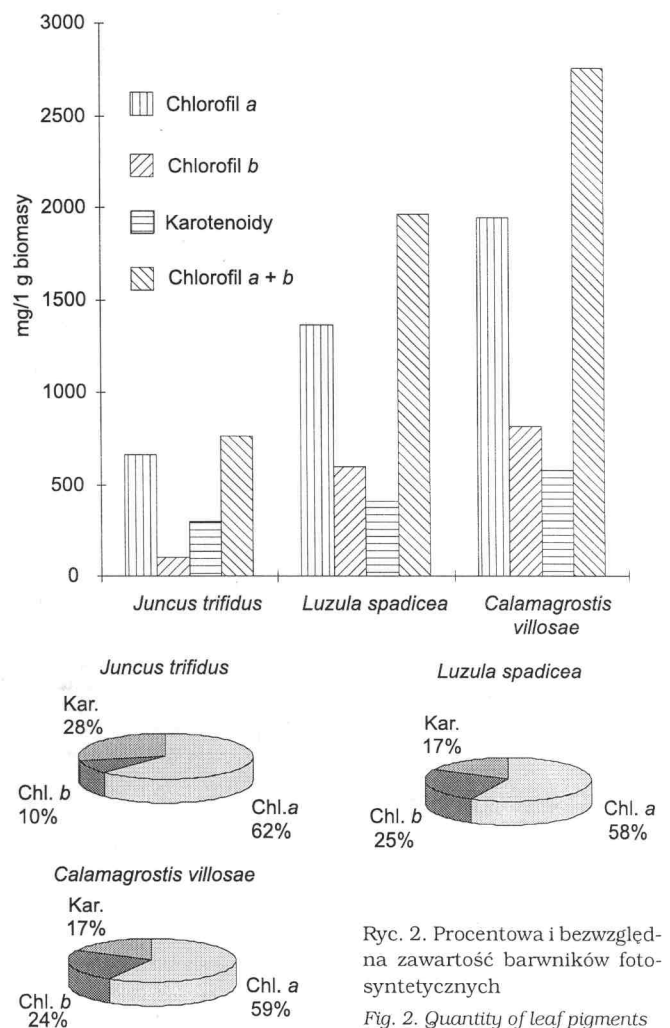
## Wyniki

### Barwniki fotosyntetyczne

Jakościowa i ilościowa analiza barwników zawartych w liściach badanych gatunków wykazała znaczne różnice pomiędzy badanymi gatunkami. Największą sumaryczną zawartość chlorofilu na 1 g świeżej masy wykazał trzcinnik owłosiony (*Calamagrostis villosae*): 2,1–

3,4 mg, a następnie kosmatka brunatna (*Luzula spadiacea*): 1,6–2,5 mg i sit skucina (*Juncus trifidus*) — tylko 0,5–0,9 mg.

Ważny z punktu widzenia funkcji życiowych roślin stosunek chlorofilu *a* do chlorofilu *b* oraz stosunek sumarycznej zawartości chlorofilu do karotenoidów, jest również zróżnicowany dla badanych gatunków. Niskie wartości stosunku chlorofilu *a* do chlorofilu *b* zaobserwowano dla kosmatki brunatnej (1,9–4,2) i dla trzcinnika owłosionego (2,1–3,4), wysokie zaś dla situ skucina (5,5–8,6). Sit skucina zawiera ponadto stosunkowo dużo karotenoidów. Stosunek chlorofilu do karotenoidów dla situ skucina zawiera się w przedziale 1,9–3,1, podczas gdy dla trzcinnika owłosionego i kosmatki brunatnej, odpowiednio 3,6–5,6 i 3,5–5,3 (ryc. 2, tab. 1).



Ryc. 2. Procentowa i bezwzględna zawartość barwników fotosyntetycznych

Fig. 2. Quantity of leaf pigments

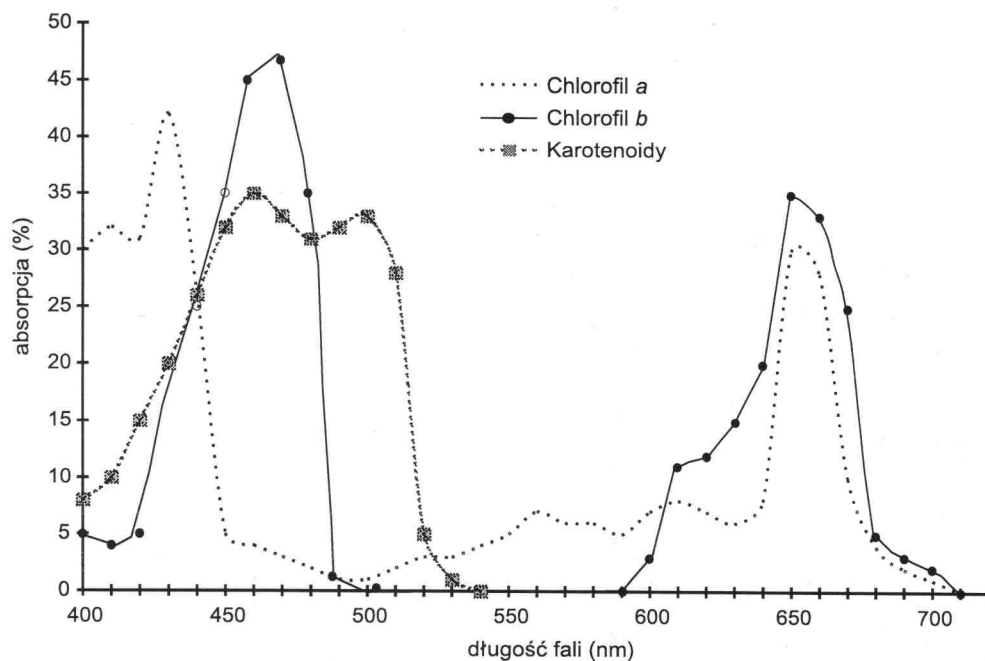
Chlorofil *b* pełni drugorzędną rolę w procesie fotosyntezy i ma za zadanie wspieranie chlorofilu *a* w absorpcji światła. Dlatego jego zawartość w gatunkach alpejskich, które raczej cierpią na nadmiar promieniowania słonecznego niż na jego niedobór, jest niska. Można to zaobserwować na przykładzie badanych gatunków: liście *Luzula spadiacea* i *Calamagrostis villosae* zawierają aż 25% chlorofilu *b*, w sumarycznej zawartości barwników fotosyntetycznych, natomiast sit skucina, rosnąca na

Tabela 1.

Średnia zawartość barwników fotosyntetycznych  
*Quantity and quality of leaf pigments*

Gatunek	<i>Juncus trifidus</i>	<i>Luzula spadicea</i>	<i>Calamagrostis villosae</i>
mg chlorofilu a w 1 g masy	661	1365	1946
% chlorofilu a	62	58	59
mg chlorofilu b w 1 g masy	104	599	812
% chlorofilu b	10	25	24
mg karotenoidów w 1 g masy	297	407	579
% karotenoidów	28	17	17
chl. a/chl. b	6,64	2,53	2,51
chlorofil/karotenoidy	2,63	4,34	4,75

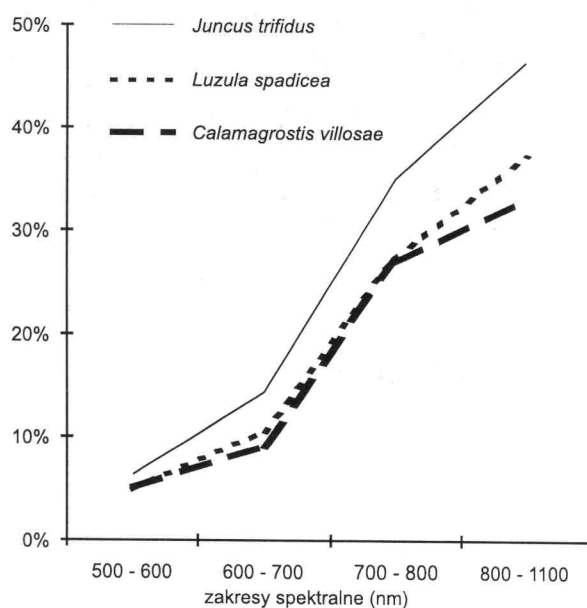
w teledetekcji. Wyraźnie inną krzywą absorpcji charakteryzują się natomiast karotenoidy, które absorbują światło niebieskie, z maksimum przesuniętym w kierunku fal dłuższych, w porównaniu do absorpcji chlorofilu, natomiast, w przeciwieństwie do chlorofilu, nie absorbują światła czerwonego. Wysokie zróżnicowanie zawartości karotenoidów w badanych gatunkach roślin powinno więc mieć istotny wpływ na absorpcję światła. Sit skucina, zawierający stosunkowo dużo karotenoidów powinien wykazywać podwyższone odbicie światła w zakresie czerwonym w stosunku do pozostałych dwóch badanych gatunków.

Ryc. 3. Widmo absorpcyjne fotosyntetycznie czynnych barwników  
*Fig. 3. Absorption of photosynthesising pigments*

najwyższych szczytach i półkach skalnych, i przystosowany do wysokiego natężenia promieniowania słonecznego, zawiera jedynie 10% wspomagającego fotosyntezę chlorofilu b.

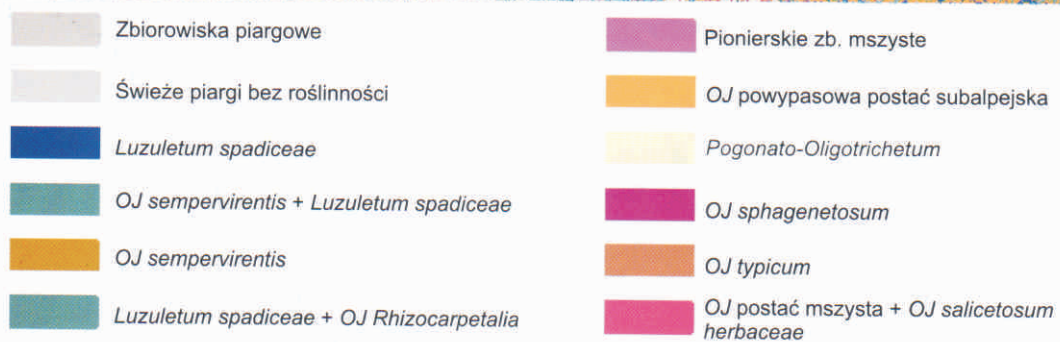
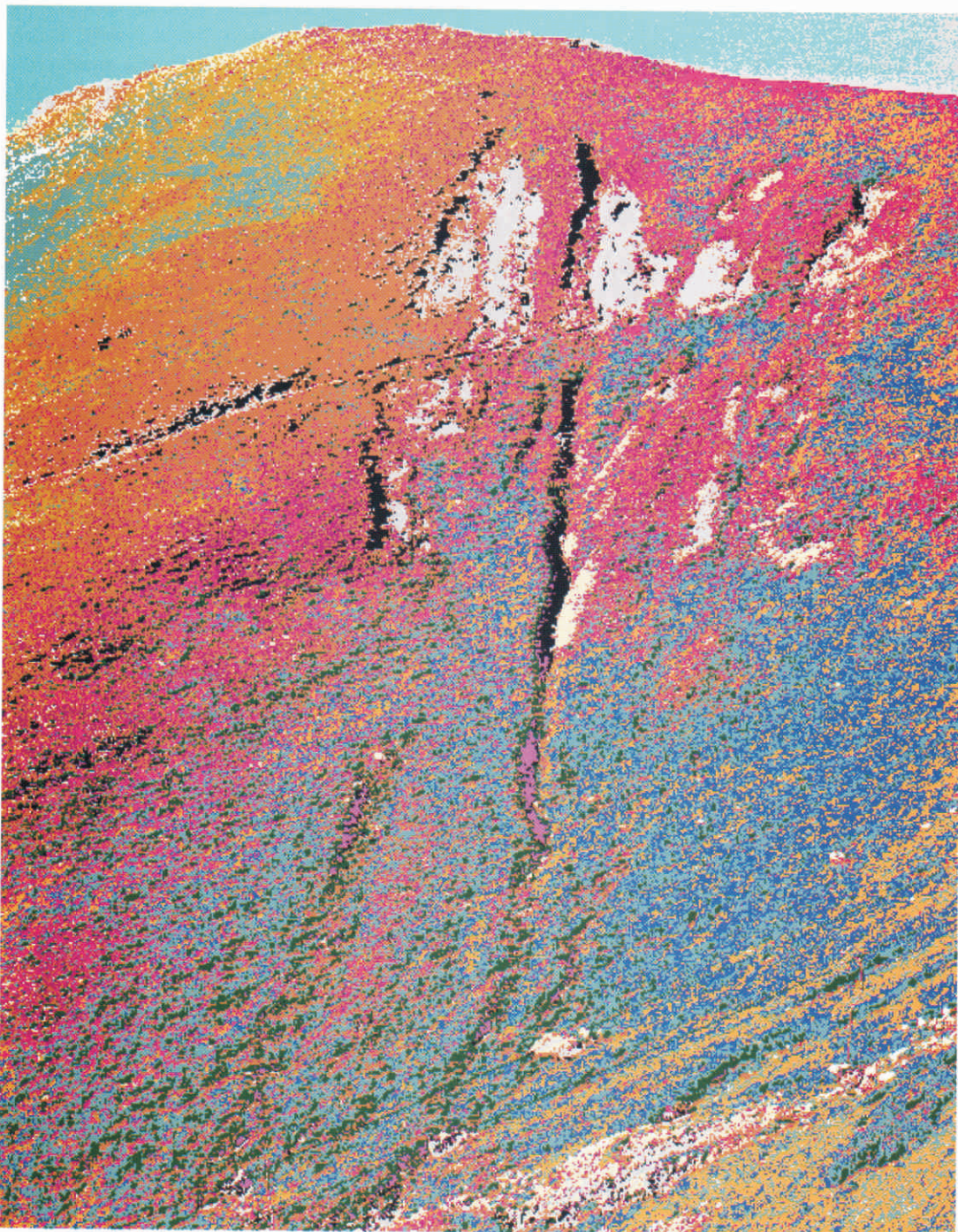
Karotenoidy natomiast chronią chlorofil przed fotooksydacją, a membrany tylakoidowe przed destrukcją w wyniku nadmiernego promieniowania słonecznego. Stąd też duża zawartość karotenoidów w sicie skucina (średnio 28%), który jest głównym składnikiem łąk alpejskich i zajmuje najwyższe położenia na stokach, gdzie natężenie słońca jest największe. Próbkę kosmatki brunatnej (*Luzula spadicea*) i trzcinnika owłosionego (*Calamagrostis villosae*) zawierają jedynie po ok. 17% karotenoidów.

Analiza spektrum absorpcyjnego chlorofilu b w stosunku do spektrum chlorofilu a wykazuje niewielkie przesunięcie krzywej absorpcji w kierunku fal dłuższych (ryc. 3). Przy zastosowaniu filmów uczulonych na wąski zakres promieniowania o długości ok. 470 nm, można by więc rozpoznać gatunki różniące się zawartością chlorofilu b. Ze względu jednak na silne rozpraszanie światła niebieskiego, zakres ten rzadko jest używany



Ryc. 4. Odbicie promieniowania w zakresach rejestrowanych przez spektrometr SP-1

*Fig. 4. Light reflection registered by spectrometer SP-1*



*OJ* - *Oreochloa distichae* - *Juncetum trifidi*

Ryc. 5. Wyniki klasyfikacji nadzorowanej  
Fig. 5. Results of supervised classification

#### Errata

Wiersz szósty od góry, po lewej stronie, powinno być: *Luzuletum spadiceae* + *OJ*  
Wiersz czwarty od góry, po prawej stronie, powinno być: *OJ sphagnetosum*  
Dodatkowo powinna być wyróżniona klasa:

 *Rhizocarpetalia*

### Pomiary radiometryczne

Hipoteza postawiona w wyniku analizy zawartości barwników fotosyntetycznych została zweryfikowana przez pomiary radiometryczne. Tak jak oczekiwano, sit skucina, który zawiera stosunkowo mało barwników fotosyntetycznych, charakteryzuje się wyższym odbiciem promieniowania we wszystkich zakresach światła (ryc. 4). Ponadto, wyraźnie wzrasta jego odbicie w zakresie czerwonym, co jest wynikiem wysokiej zawartości karotenoidów, które nie absorbują promieniowania w tym zakresie. Trzcinnik owłosiony, który zawiera ok. 1,5 razy więcej barwników w 1 g masy niż kosmatka brunatna wykazuje większe pochłanianie w fotosyntetycznie czynnym czerwonym zakresie światła i (minimalnie) mniejsze w nieczynnym fotosyntetycznie zakresie zielonym.

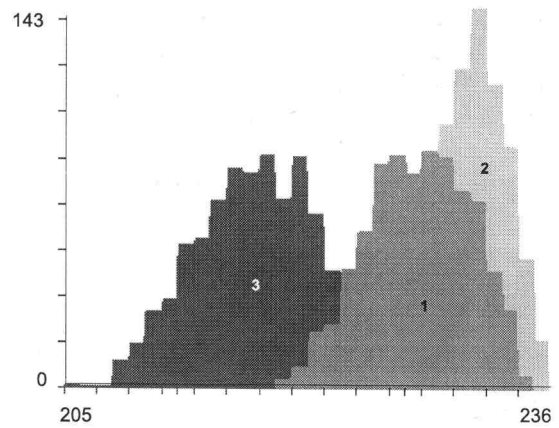
Badane gatunki różnią się ponadto odbiciem w podczerwonym zakresie promieniowania elektromagnetycznego. W zakresie promieniowania widzialnego odbicie zależy od zawartości barwników fotosyntetycznie czynnych. W podczerwieni natomiast jest ono zależne od budowy liści: liczby i wielkości przestrzeni międzykomórkowych, zajętych przez gazy nasycone parą wodną. Badania z zakresu fizjologii roślin, pozwalające na uzasadnienie zróżnicowanie odbicia promieniowania w zakresie podczerwonym (np. pomiar transpiracji badanych gatunków) zostaną przeprowadzone w dalszej części pracy.

### Cyfrowe przetwarzanie zdjęć naziemnych

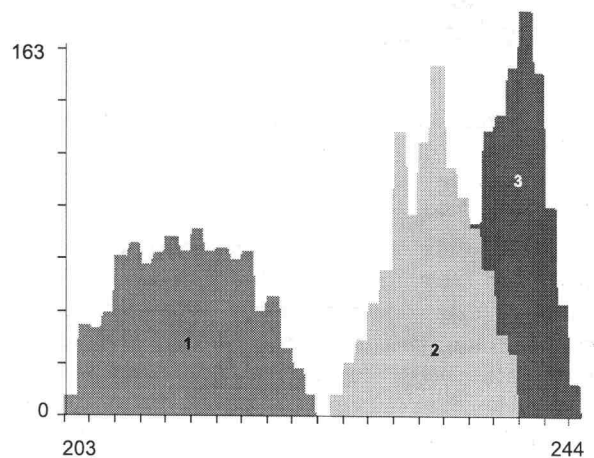
#### Klasyfikacja nadzorowana

Klasyfikacja nadzorowana zdjęć wykonanych w zakresie czerwonym i w podczerwieni dała dobre rezultaty i pozwoliła na rozpoznanie następujących zbiorowisk roślinnych: *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi*, *Luzuletum spadiceae*, *Calamagrostis villosae*, *Rhizocarpatalia* (zbiorowisko porostów naskalnych), pionierskich zbiorowisk mszystych porastających wilgotne żleby, *Pogonato-Oligotrichetum* (antropogenicznych zbiorowisk wykształconych wzdłuż ścieżek turystycznych), *Vaccinietum myrtilli*, *Empetro-Vaccinietum* (zbiorowisk krzewinkowych) oraz *Pinetum mughi* (zbiorowiska kosodrzewiny), (ryc. 5). W wyniku klasyfikacji skartowano również podzespoły zbiorowiska z sitem skucina: *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi herbaceae* (z wierzbą zielną, występujące na stokach z długo zalegającą pokrywą śnieżną), *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi sphagnetosum* (mszyste, na wilgotnym podłożu), *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* (powypasowe murawy subalpejskie).

Ryciny 6 i 7 przedstawiają histogramy sygnatur dla pól treningowych trzech badanych zbiorowisk roślinnych: *Luzuletum spadiceae*, *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi typicum* i *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi cetrarietosum*. Histogramy te potwierdzają wyniki pomiarów radiometrycznych i laboratoryjnej analizy bar-



Ryc. 6. Histogramy pól treningowych w zakresie światła czerwonego  
Fig. 6. Histograms of signatures in infrared  
1 — *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi typicum*, 2 — *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*, 3 — *Luzuletum spadiceae*



Ryc. 7. Histogramy pól treningowych w zakresie podczerwieni  
Fig. 7. Histogram for signatures in red band  
1 — *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi typicum*, 2 — *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*, 3 — *Luzuletum spadiceae*

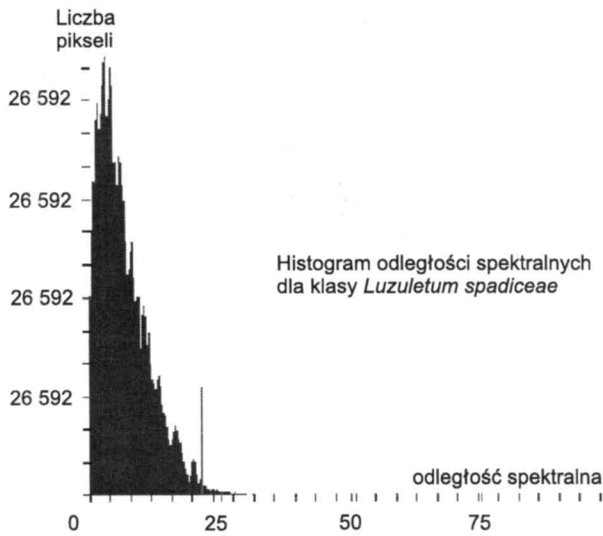
wników fotosyntetycznych: zbiorowiska zdominowane przez alpejski gatunek *Juncus trifidi* mają podwyższone odbicie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie czerwonym (ryc. 6).

W zakresie promieniowania czerwonego niemożliwe jest rozróżnienie podzespołów z udziałem situ skucina (ryc. 6 — histogramy dla tych podzespołów nakładają się). W podczerwieni natomiast, podzespoły te mają inne wartości odbicia, co pozwala na ich łatwe rozróżnienie (ryc. 7 — histogramy są rozłączne).

#### Oszacowanie dokładności klasyfikacji

Ze względu na fakt, że zdjęcie nie zostało zarejestrowane do prostokątnego układu współrzędnych (zbyt duża strata informacji przy rzucie stoku na powierzchnię płaską), oszacowanie dokładności klasyfikacji przez porównanie z istniejącą mapą roślinności nie było możliwe. Przeprowadzono więc statystyczne oszacowanie

dokładności oparte na analizie odległości spektralnych pikseli od wzoru, jakim są próbki treningowe dla wydzielonych klas. Prawdopodobieństwo, że dany piksel należy do danej klasy ma rozkład chi-kwadrat (ryc. 8).



Ryc. 8. Przykład rozkładu prawdopodobieństw przynależności do danej klasy

Fig. 8. An example of a histogram presenting probability of belonging to a given class

(W przypadku, gdy histogram ma kilka pików, lub jego rozkład nie jest zbliżony do rozkładu chi-kwadrat, sygnatura jest niejednorodna i najprawdopodobniej obejmuje kilka obiektów. Należy wtedy poprawić sygnaturę i powtórnie przeprowadzić klasyfikację). Piksele, których odległości spektralne są duże (piksele położone w „ogonie” histogramu, na rycinie: na prawo od wartości progowej zaznaczonej pionową kreską), są zakwalifikowane błędnie. Piksele te zostały odrzucone z danej klasy. W rezultacie uzyskano niewielką liczbę pikseli niesklasyfikowanych: poniżej 0,15% wszystkich pikseli, co wskazuje na wysoką dokładność przeprowadzonej klasyfikacji.

## Podsumowanie

Metody wielkoskalowej analizy roślinności zastosowane w prezentowanej pracy badawczej (zarówno laboratoryjne analizy z zakresu fizjologii roślin, jak i terenowe pomiary i kameralne opracowania z zakresu teledetekcji) pozwoliły na rozpoznanie zbiorowisk na bardzo wysokim szczeblu. Laboratoryjna analiza barwników asymilacyjnych wykazała, że badane gatunki roślin różnią się ich zawartością, co ma wpływ na stosunek promieniowania słonecznego pochłanianego do odbijanego. Zróżnicowanie wielkości odbicia promieniowania potwierdziły punktowe pomiary radiometryczne. Ostatecznie, cyfrowe przetwarzanie wielkoskalowych zdjęć o niewielkiej rozdzielczości spektralnej pozwoliło na rozróżnienie badanych zbiorowisk roślinnych nie tylko w randze zespołów (np. *Oreochloa distichae*–*Juncetum trifidii*), ale również w randze podzespołów (np. *Oreochloa distichae*–*Juncetum trifidii cetrarietosum*).

Ponieważ badane zbiorowiska roślinne są dominujące w krajobrazie Tatr Wysokich, otrzymane wyniki są jednoznaczne z pozytywną oceną metod teledetekcji w badaniach roślinności wysokogórskiej w skalach 1:10 000 i większych. W dalszej części pracy wykonana zostanie ekstrapolacja zaprezentowanych wyników na obszar całych Tatr Wysokich, na podstawie zdjęcia satelitarne Landsat TM. Mimo dużej wielkości pikseli oczekuje się, że dane z badań wielkoskalowych umożliwią rozpoznanie wielkopowierzchniowych płatów badanych zbiorowisk roślinnych. W przyszłości natomiast, satelity nowej generacji, o standardowej rozdzielczości spektralnej (kanały: zielony, czerwony i podczerwony), ale o wysokiej rozdzielczości terenowej (2–5 m), pozwolą na rozpoznanie wysokogórskich zbiorowisk roślinnych z wysoką dokładnością.

## Literatura

- Faliński J.B., 1990: *Kartografia geobotaniczna*, PPWK im. Eugeniusza Romera, Warszawa–Wrocław.  
 Küchler A.W., Zonneveld I.S., 1988: *Vegetation Mapping*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London.



Mgr Anna Jakomulska ukończyła studia magisterskie na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, w Zakładzie Geookologii. Obecnie jest na IV roku Studium Doktoranckiego WGiSR, w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Interesuje się nowoczesnymi technikami przetwarzania obrazów oraz ich zastosowaniem w badaniach roślinności, a w szczególności w wielkoskalowym kartowaniu roślinności wysokogórskiej.