

Teledetekcja a problemy kartowania wysokogórskiej roślinności Tatr

*Remote sensing and problems of high-mountain
vegetation mapping in the Tatra Mountains*

Anna JAKOMULSKA

The research presented in this paper aimed at assessment of currently available remote sensing data and methods for large-scale vegetation mapping in mountain environments. It stems from the previous research within plant physiology, field radiometry and biometry and digital analysis of ground multispectral photos of common and prevalent alpine and subalpine communities: alpine swards, snow-bed communities and avalanche meadows and their dominant species: *Juncus trifidus*, *Luzula spadicea* and *Calamagrostis villosa*, respectively. It has been shown that high functional differentiation of the researched species results in distinct spectral signatures of the communities and allows for both identification and delimitation of the communities at association and even lower rank. In this article a hypothesis that remote sensing techniques can be applied for large-scale vegetation mapping has been tested through examination of vegetation cover on color aerial photos and Landsat TM scene.

Due to the lack of infrared information and acquisition of the image at the very beginning of the vegetation season, analysis of an aerial photo produced very poor results, both within identification and delimitation of communities. Spectral characteristics of the researched communities derived from the satellite scene match the results of laboratory and field spec-

troscopy allowing the proper identification of the communities. However, due to low spatial resolution of a Landsat scene, standard image classification resulted in a thematic map of an unsatisfactory accuracy (58.3%, Kappa index = 0.44). Three factors decreasing classification accuracy were discussed: 1) high spatial diversity of vegetation cover, common occurrence of vegetation community complexes and zonal character of many vegetation communities borders, 2) mixed pixel problem and 3) simplification of ground truth (vector map) due to generalization. Further research focused on an assessment of fuzzy logic classification for automated identification of complex communities. The analysis was performed on a multispectral ground photo of Beskid slope and based on a Dempster-Shafer theory of evidence, using thresholding of two fuzzy measures: plausibility and uncertainty. The results of this approach were similar to the results achieved in a standard classification approach, the advantages of application of fuzzy decision rule being: automatization of a process (there is no need to identify signatures for mixed classes) and a possibility of identification of a number of transitional mixed classes, depending on a scale and purpose of the research. Final discussion focuses on current limiting factors and future potentials of large-scale mountainous vegetation mapping using remotely sensed data.

Cel i zakres badań

Tatry są obszarem dość dobrze zbadanym pod względem florystycznym (Piękoś-Mirkowa, Mirek, 1996). Pomimo tego, jak również mimo faktu, że to właśnie od map roślinności Tatr rozpoczęła się w Polsce w latach dwu-

dziestych kartografia roślinności, nadal nie ma szczegółowego opracowania obejmującego obszar całego Tatrzańskiego Parku Narodowego¹. Wynika to nie tylko z ograniczeń technicznych (krótki sezon wegetacyjny, zmienna pogoda, niedostępność wielu stoków): mapy roślinności wysokogórskiej uważane są za najtrudniej-

¹ Obszar całego TPN pokrywa mapa roślinności opracowana przez zespół: S. Myczkowski, H. Piękoś-Mirek, J. Baryła, opublikowana w skali 1:50 000 w Atlasie TPN (Trafas (red.), 1985). W skalach szczegółowych skartowano jedynie roślinność górnych partii wybranych dolin (Szafer, Pawłowski, Kulczyński, 1923, 1927; Pawłowski, Sokółowski, Wallisch, 1928; Balcerkiewicz, Wojterska, 1978; Kurnatowska, 1995; Kozłowska, 1999).

szy rodzaj map roślinności (Faliński, 1990). Metodyczne problemy kartowania roślinności wysokogórskiej wynikają z natury samej szaty roślinnej gór, charakteryzującej się ogromnym zróżnicowaniem przestrzennym (mozaiką drobnopowierzchniowych zbiorowisk) oraz gradientowymi (w odróżnieniu od dyskretnych) zmianami roślinności, co wyraża się poprzez powszechne występowanie kompleksów zbiorowisk oraz granic o charakterze przejściowym. Względy te determinują specyfikę map roślinności wysokogórskiej: konieczne jest uwzględnienie w legendzie jednostek typologicznych różnej rangi, zbiorowisk o pośrednim charakterze fitosocjologicznym (Curtis, 1959), jak również jednostek nie w pełni wykształconych (Kozłowska, 1999).

Zarówno metody interpretacji wizualnej, jak i cyfrowe przetwarzanie zdjęć lotniczych i satelitarnych pozwalają na kartowanie roślinności różnych formacji (leśnej, krzewiastej i trawiastej) w górach (Bielecka, 1980, 1986; Bielecka, Fedorowicz-Jackowski, Witkowska, 1994). W niniejszej pracy podjęto próbę oszacowania przydatności metod i obecnie dostępnych materiałów teledetekcyjnych do kartowania roślinności wysokogórskiej w skali szczegółowej. Do badań tych skłoniły wyniki wielkoskalowych badań z zakresu fizjologii, radiometrii i teledetekcji wybranych gatunków i zbiorowisk alpejskich Tatr (Jakomulska 1999a; 1999c; 1998b). Stwierdzono bowiem istotne zróżnicowanie tych cech i przystosowań fizjologicznych roślin, które mają bezpośredni wpływ na wielkość odbicia promieniowania elektromagnetycznego (zawartości barwników asymilacyjnych, natężenia transpiracji oraz zawartości wody w tkankach). Na podstawie terenowych pomiarów radiometrycznych wykazano możliwość identyfikacji zbiorowisk roślinnych w randze zespołów. Klasyfikacja nadzorowana zdjęć naziemnych pozwoliła natomiast na zdalną, zautomatyzowaną delimitację zbiorowisk w randze zespołu, a nawet podzespołu. W niniejszej pracy rozszerzono wyniki badań naziemnych na materiały lotnicze i satelitarne. Podjęto również metodyczne zagadnienie z zakresu kartografii geobotanicznej, dotyczące kartowania trwałych kompleksów zbiorowisk. Jako jedno z możliwych rozwiązań tego problemu zaproponowano zastosowanie teorii logiki rozmytej w klasyfikacji nadzorowanej.

Badania prowadzono w wysokogórskiej części Doliny Gąsienicowej. Analizie poddano trzy typowe, powszechne i dominujące w krajobrazie piętra alpejskiego i subalpejskiego zespoły wysokogórskie o zbliżonej fizjonomii: *Oreochloa distachae-Juncetum trifidi* (murawy alpejskie), *Luzuletum spadicaceae* (zielne zbiorowiska wyleżyskowe) i *Calamagrostetum villosae taticum* (traworośla).

Struktura roślinności a problemy kartografii fitosocjologicznej

Metody opisu i kartograficznej prezentacji roślinności wynikają bezpośrednio z koncepcji jej postrzegania. Klasyfikacji roślinności przeciwstawia się ordynację, która zakłada ciągłość roślinności i polega na gradientowym

uporządkowaniu zbiorowisk roślinnych. Klasyfikacja prowadzi do podziału roślinności na klasy, które wykazują większe lub mniejsze wzajemne podobieństwo. Szczególnym przypadkiem klasyfikacji jest typologia. W powszechnie przyjętej w Polsce szkole środkowoeuropejskiej opracowanej przez J. Braun-Blanqueta (1964), istnieją wyraźnie zróżnicowane zbiorowiska, rozróżniane na podstawie kombinacji gatunków charakterystycznych, a ich typologię można prowadzić nawet według kryterium występowania lub braku jednego gatunku. Przeciwnie stanowisko reprezentuje szkoła wywodząca się z Wisconsin, według której roślinność wyraża się poprzez swoiste kontinuum, które można opisać jedynie poprzez uszeregowanie zbiorowisk w wielowymiarowej przestrzeni według szeregu cech (Curtis, 1959). Podobnie, szkoła skandynawska opiera się na dominacji i frekwencji gatunków, co pozwala na uporządkowanie lokalnie zróżnicowanych zbiorowisk w skali ciągłej. Ograniczenia natury technicznej (możliwości kartograficznej prezentacji stref przejściowych) przechyliły szalę sporów na korzyść zwolenników klasyfikacji: tradycyjne kartowanie fitosocjologiczne przyjmuje założenie o względnej nieciągłości przestrzennej roślinności (Greig-Smith, 1964; Faliński, 1990). Nie oznacza to jednak odrzucenia idei o „przestrzennym kontinuum”. Istotnym, ale trudnym problemem badawczym kartografii fitosocjologicznej jest wyjaśnianie i prezentacja zjawiska strefy przejścia, czyli ekotonu, między odrębnymi fitocenozami. Takie podejście do zagadnienia kontinuum roślinności przyjęto w szkole Braun-Blanqueta, która za podstawę przyjmuje klasyfikację hierarchiczną. Formalny podział roślinności według szkoły Braun-Blanqueta jest jednak dość elastyczny i na najniższych szczeblach pozwala na wydzielanie zbiorowisk zróżnicowanych gradientowo i nie w pełni wykształconych, np. zbiorowisk występujących na siedliskach o różnej wilgotności lub zbiorowisk o zróżnicowanej zawartości pokrywy roślinnej. Uporządkowanie to jest zazwyczaj prowadzone tylko według jednego kryterium. Ponadto, w trakcie badań terenowych wielokrotnie zwracano uwagę na fakt, że podejście to prowadzi do wydzielenia zbyt wielu jednostek legendy, co obniża czytelność mapy. Powszechnie stosowana metoda prezentacji kartograficznej polegająca na nakładaniu kilku informacji w obrębie jednego wydzielenia na mapie (tzw. „pizamka”, przedstawiana na mapie kolorowym szrafem), daje wyniki niezadowolające. Dowiodły tego szczególnie badania prowadzone w środowiskach wysokogórskich, których roślinność wykazuje w rzeczywistości charakter ciągły (McVean, Ratcliffe, 1962). Wielokrotnie podkreślany przez geobotaników problem poszukiwania nowego sposobu prezentacji map roślinności wysokogórskiej wydaje się nadal aktualny (Faliński, 1990).

Charakter szaty roślinnej Tatr

Środowiska izolowane (wyspy) i trudno dostępne (góry wysokie) charakteryzuje wysoka bioróżnorodność (Falińska, 1996). W środowiskach wysokogórskich, roz-

drobniona i mozaikowa struktura roślinności, jak również jej wyraźna zmienność w czasie, jest wyrazem ogromnego zróżnicowania i dynamiki czynników abiotycznych (Jakomulska, 1998a; Kozłowska, 1999). Charakterystyczną cechą roślinności wysokogórskiej jest współistnienie jednostek o różnej randze taksonomicznej, co jest z kolei wynikiem różnej wrażliwości zbiorowisk roślinnych na działanie czynników o różnej skali i dynamice.

Na zróżnicowanie roślinności Tatr najsilniejszy wpływ wywiera mezoklimat, związany z orografią, wyrażający się poprzez formacje roślinne charakterystyczne dla danego piętra klimatycznego. Kolejnym istotnym czynnikiem jest trofizm: dostępność składników odżywczych dla roślin determinuje powstanie w tym samym piętrze klimatyczno-roślinnym zbiorowisk bazy- i acidofilnych, które zwykle w typologii fitosocjologicznej należą do różnych klas, a więc jednostek najwyższych rangą. Wpływ lokalnych czynników, takich jak: długość zalegania pokrywy śnieżnej, wilgotność podłoża, topoklimat (ekspozycja stoku) i procesy rzeźbotwórcze panujące na stoku wyraża się różnicami w randze zespołu. Jednostki niższej rangi: podzespoły, warianty i facje są natomiast wyrazem lokalnego zróżnicowania siedlisk. Podzespoły wyróżnia się dla zbiorowisk zonalnych. Przykładowo, w obrębie zespołu muraw alpejskich *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi*, wydzielono szereg podzespółów: *typicum*, *cetrarietosum*, *caricetosum sempervirentis*, *sphagnetosum*, *salicetosum herbaceae* (Balcerkiewicz, 1984), natomiast dla zespołu traworośli *Calamagrostietum villosae tatricum*, który charakteryzuje się stosunkową jednorodnością, nie wyróżniono zbiorowisk o niższej randze.

Szczególnie specyficzną cechą roślinności wysokogórskiej jest występowanie mikromozajki zbiorowisk, będącej wynikiem istnienia mikrorzeźby terenu oraz lokalnych różnic wilgotności podłoża i długości zalegania pokrywy śnieżnej. Powszechne, małopowierzchniowe biochory poszczególnych zbiorowisk roślinnych, trudno uznać za ekosystemy. Dopiero powtarzalne, trwałe kompleksy zbiorowisk związane z danym typem stoku stanowią jednostki strukturalno-funkcjonalne (Kozłowska, 1999).

Charakterystyczne dla gór jest również powszechne występowanie granic o charakterze zonalnym. Granice między zbiorowiskami mają rzadko charakter wyraźnej linii, najczęściej przejście to ma charakter dość szerokiego pasa, w którym następuje stopniowe wymieszanie się („dyfuzja”) sąsiadujących ze sobą zbiorowisk roślinnych. Jest to związane z gradientowym charakterem wielu cech geokomponentów (np. wysokości n.p.m., żyzności i wilgotności podłoża, miąższości gleby, temperatury, ciśnienia, nasłonecznienia). Na przykład, kompleksy zbiorowisk i granice zonalne na mapie Kotła Gąsienicowego w skali 1:1000² przedstawiono poprzez

wyróżnienie następujących zbiorowisk: *Luzuletum spadiceae*, *Luzuletum spadiceae* w kompleksie z *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi*, *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi* postać z *Juncus trifidus* w kompleksie z *Luzuletum spadiceae* oraz *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi typicum*.

Ostatecznie, dynamika wielu procesów (np. torcjonalnych) oraz działalność człowieka, zaburzają naturalną sukcesję roślinności, co wyraża się poprzez występowanie nie w pełni wykształconych zbiorowisk roślinnych.

Przedmiot badań

Badania prowadzono na obszarze wysokogórskiej części Doliny Gąsienicowej, dla której istnieją szczegółowe, kartograficzne opracowania roślinności. Umożliwiło to wykorzystanie tych map do wstępnej identyfikacji badanych zbiorowisk na materiałach teledetekcyjnych oraz oszacowania dokładności wykonanych analiz. Analizie poddano trzy typowe i powszechne zbiorowiska wysokogórskie polskiej części Tatr, związane z podłożem niewapiennym: *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi*, *Luzuletum spadiceae* i *Calamagrostietum villosae tatricum*.

W tabeli 1 przedstawiono udział badanych zbiorowisk w całkowitej powierzchni piętra alpejskiego i subalpejskiego (bez powierzchni porośniętych kosodrzewiną) Kotłów: Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego oraz Doliny Pięciu Stawów Polskich (Kozłowska, Jakomulska 1999; Kurnatowska, 1995).

Tabela 1.

Udział powierzchni badanych zbiorowisk w całkowitej powierzchni piętra alpejskiego i subalpejskiego (w %)
Percentage of researched communities in the total area of the alpine and subalpine zone

	Kocioł Gąsienicowy Gąsienicowy Cirque	Kocioł Goryczkowy Świński Swirski Cirque	Dolina Pięciu Stawów Polskich The Five Polish Lakes Valley
<i>Oreochloa distichae-Juncetum trifidi</i>	61,2	48,1	40,4
<i>Luzuletum spadiceae</i>	24,1	3,1	15,5
<i>Calamagrostietum villosae tatricum</i>	0,8	5,3	6,3

Udział muraw w Kotle Gąsienicowym, który jest położony prawie w całości w piętrze alpejskim wynosi ponad 60%, w Kotle Goryczkowym, który zajmuje położenia niższe — ok. 50%, natomiast w Dolinie Pięciu Stawów Polskich, która obejmuje znacznie większy obszar i zasięg pionowy, a co za tym idzie większą amplitudę siedlisk — około 40%. W sumie na każdym z obszarów badane zbiorowiska zajmują większą ich część.

Oreochloa distichae-Juncetum trifidi

Klasa: *Caricetea Curvulae*, Rząd: *Caricetalia curvulae*, Związek: *Caricion curvulae*.

² Koncepcja merytoryczna, kartowanie terenowe i redakcja: A. Kozłowska, opracowanie cyfrowe i graficzne: A. Jakomulska (Kozłowska, 1999).

Zespół situ skuciny (*Juncus trifidus*) i boimki dwurzędowej (*Oreochloa disticha*) jest głównym zespołem murawowym na podłożu ubogim w węglan wapnia w alpejskim piętrze Tatr. Występuje na stokach i półkach skalnych, piargach i morenach o krótko zalegającej pokrywie śnieżnej, na niezbyt wilgotnym podłożu, zarówno na płytkiej, jak i dobrze wykształconej glebie. Tworzy zwarte murawy. Współtworzą go trzy gatunki: sit skucina, boimka dwurzędowa i kostrzewa niska, przy czym w piętrze alpejskim zdecydowanie przeważają kępy situ. W obrębie tego zespołu wyróżniono kilkanaście podzespołów i postaci (Balcerkiewicz 1984), (ryc. 1a, b).

Luzuletum spadiceae

Klasa: *Salicetea herbaceae*, Rząd: *Salicetalia herbaceae*, Związek: *Salicion herbaceae*.

Luzula spadicea (kosmatka brunatna) tworzy powszechne, zielne zbiorowisko wyleżyskowe *Luzuletum spadiceae* (Ryc. 2), porastające wklęsłe partie stoków, kotły, dna dolin i rozleglejszych żlebów w piętrze subalpejskim i alpejskim, z długo zalegającą pokrywą śnieżną. Fitocenozy *Luzuletum spadiceae* występują głównie w obszarach piargowych, na utrwalonych już piargach i żwirkach granitowych. W dolnej i środkowej części sta-



Ryc. 1b. *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi* powypasowa postać subalpejska w kompleksie z borówczyskami "*Vaccinietum myrtylli*"
Fig. 1b. *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi* subalpine community after grazing in complex with dwarf scrub communities "*Vaccinietum myrtylli*"

rych, utrwalonych stożków usypiskowych dominują płaty z dość licznym udziałem *Doronicum stiriacum* i *Ranunculus montanus*, w górnej części występuje natomiast „czysta” postać *Luzuletum*. Płaty te charakteryzują się bardzo silnym zwarcim pokrywy roślinnej i opóźnionym rozwojem fenologicznym — pędy kosmatki zaczynają niekiedy wyrastać dopiero na początku sierpnia. Zespół ten, mimo wyraźnej odrębności, wykazuje szereg podobieństw fizjonomicznych, siedliskowych i florystycznych do *Calamagrostietum villosae tatricum* (Balcerkiewicz, 1984).



Ryc. 2/ Fig. 2. *Luzuletum spadiceae*

Calamagrostietum villosae tatricum

Klasa: *Betulo-Adenostyletea*. Rząd: *Adenostyletalia*.
Związek: *Calamagrostion*.

Zespół ten sięga od 1400 po 2200 m n.p.m. i, obok zarośli kosodrzewiny, jest najszerzej rozprzestrzenionym zbiorowiskiem naturalnym piętra subalpejskiego (ryc. 3). Traworośla te porastają silnie nachylone, stabilne i wilgotne stoki oraz stare, utrwalone już piargi, na skałach granitowych oraz kwaśnych utworach stokowych i morenowych. W zespole tym panuje trzcinnik owłosiony, niekiedy wraz z *Festuca picta* lub *C. arundinacea*.

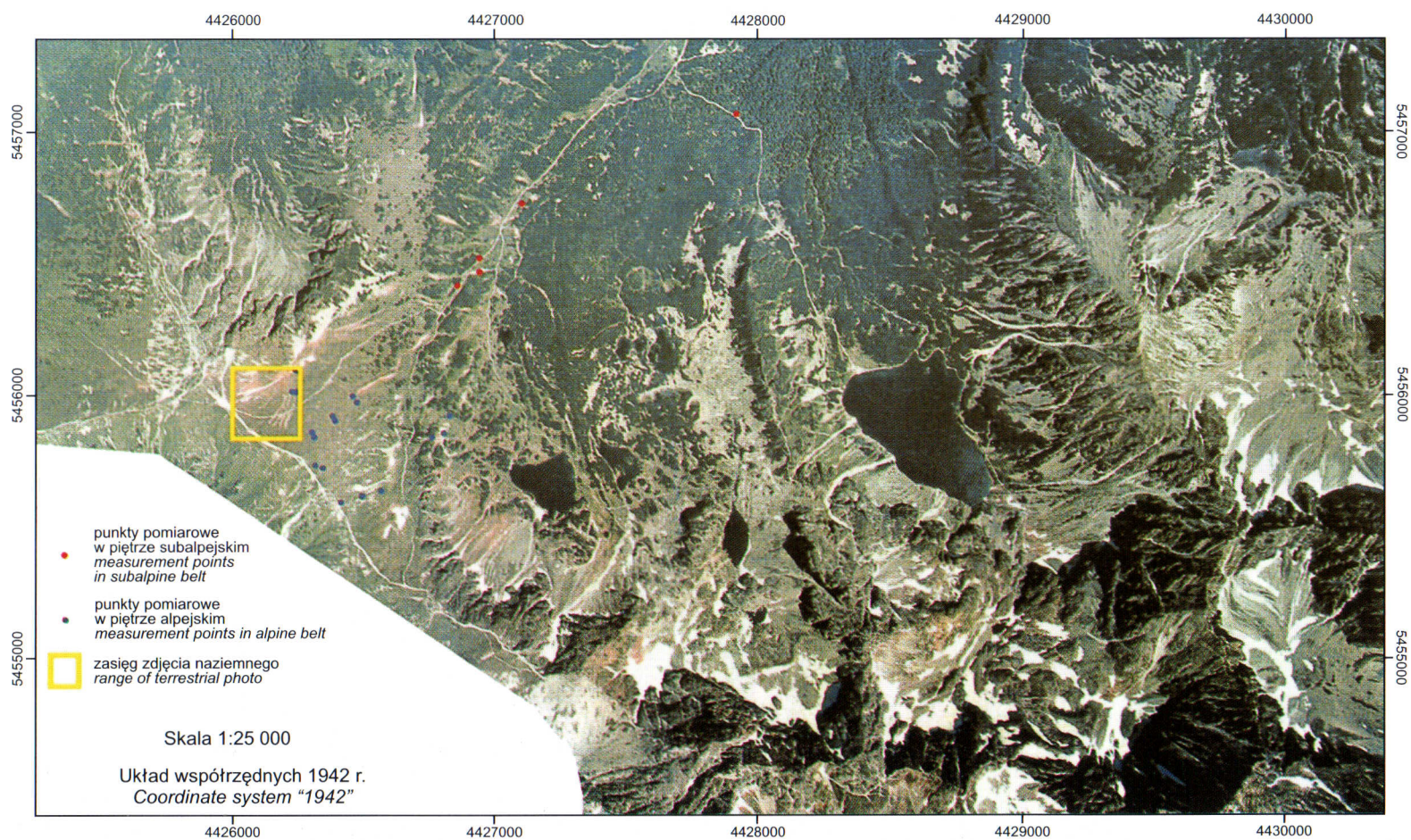


Ryc. 3/ Fig. 3. *Calamagrostietum villosae tatricum*

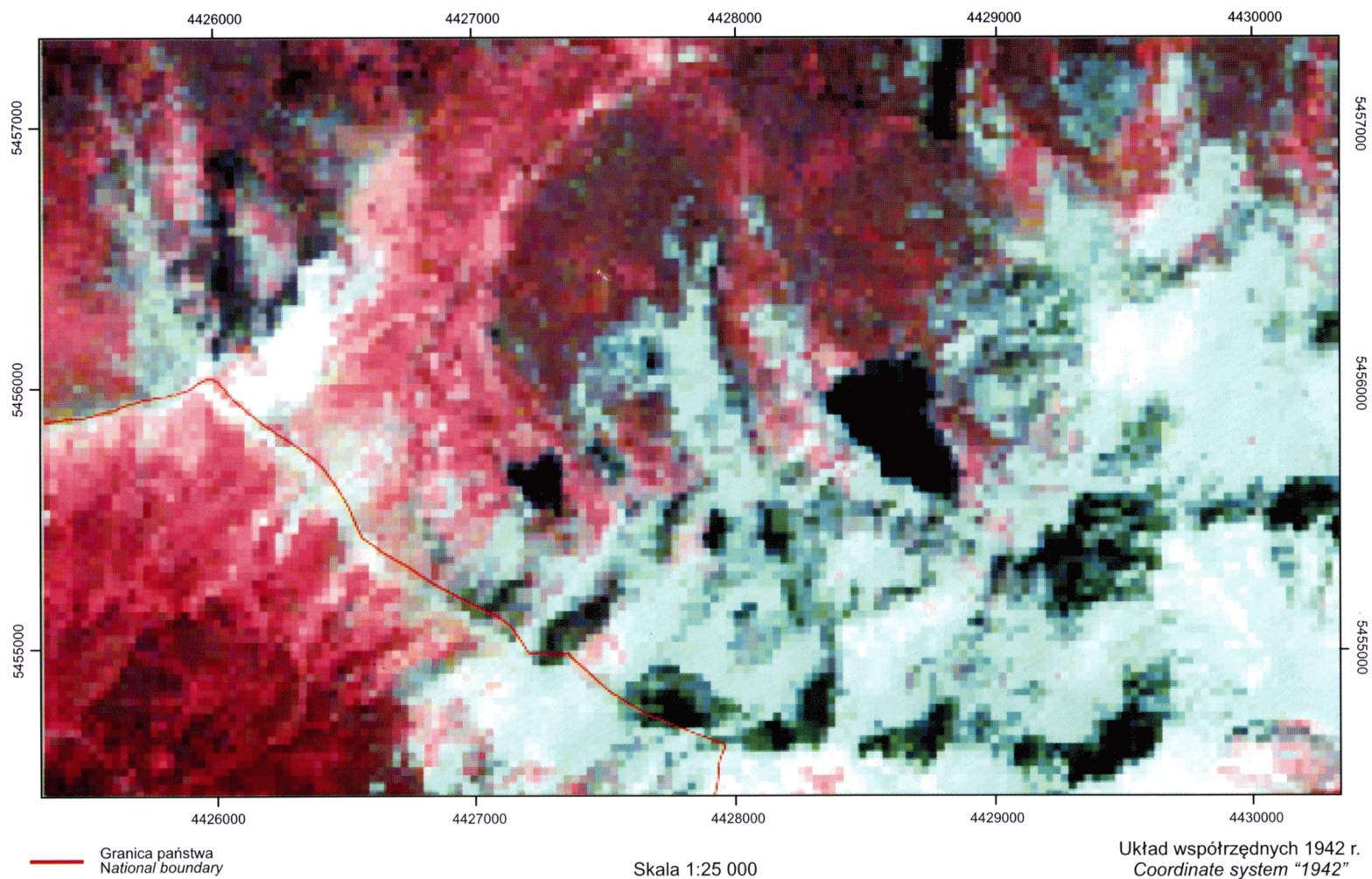
W celu uniknięcia powtarzania długich nazw zespołów, w dalszej części pracy nazwy zespołów: *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi*, *Luzuletum spadiceae* i *Calamagrostietum villosae tatricum* używane są zamiennie z terminami (odpowiednio): murawa, wyleżysko i traworośle.

Materiały i metody

Badania z pułapu lotniczego prowadzono na barwnym zdjęciu lotniczym Doliny Gąsienicowej wykonanym w skali ok. 1:30 000, w dniu 4 lipca 1994 r. (ryc. 4, na zdjęciu zaznaczono zasięg badań naziemnych: lokalizację punktów pomiarowych i zasięg zdjęcia naziemnego). Zdjęcie to zostało wykonane na początku okresu wegetacyjnego, gdy w zaciennionych i wilgotnych żlebach i kotłach zalegały jeszcze płaty śniegu. W zasadzie tylko na stokach południowych widać zieloną roślinność piętra alpejskiego. Dla obszaru Tatr są to jednak jedyne barwne zdjęcia lotnicze; archiwalne zdjęcia czarno-białe nie są przydatne w szczegółowych badaniach roślinności. Nie wykonano również nigdy wielospektralnych ani spektrostrefowych zdjęć lotniczych Tatr.



Ryc. 4. Barwne zdjęcie lotnicze Doliny Gąsienicowej
Fig. 4. Color aerial photo of Gąsienicowa Valley



Ryc. 5. Obraz satelitarny — kompozycja w barwach nierzeczywistych (RGB: 4, 3, 2)
Fig. 5. Satellite image false — image composition (RGB: 4, 3, 2)

Badania z pulapu satelitarnego objęły analizę sceny satelitarnej nr 187/26 zobrazonej dnia 6 VIII 1992 r. przez skaner Thematic Mapper umieszczony na satelicie Landsat 5 (ryc. 5). Zdjęcie wykonano w bardzo dobrych warunkach pogodowych: charakteryzuje się wysokim kontrastem i nie ma na nim chmur.

Wstępne przetwarzanie zdjęć lotniczego i satelitarnego objęło ortorektyfikację oraz korekcję atmosferyczną. Ze względu na niską rozdzielczość numerycznego modelu terenu nie przeprowadzono jednak korekcji efektu cienia. Według Seidela i in. (1983), korekcja efektu topograficznego możliwa jest jedynie w przypadku, gdy NMT ma rozdzielczość większą lub równą rozdzielczości materiałów teledetekcyjnych. Standardową klasyfikację nadzorowaną zdjęć przeprowadzono metodą największego prawdopodobieństwa. Na obydwu zdjęciach pola treningowe do klasyfikacji wyznaczono na podstawie numerycznej mapy roślinności w skali 1:20 000³. Dokładność klasyfikacji oszacowano na podstawie reprezentatywnej próby pikseli, wybranych metodą proporcjonalnego losowania warstwowego.

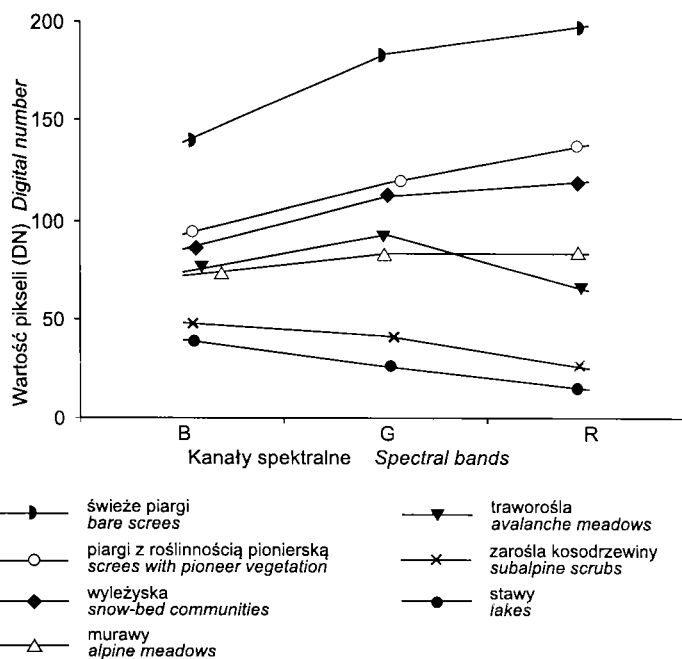
Eksperymentalną analizę zbiorowisk mieszanych przeprowadzono metodą klasyfikacji nadzorowanej z zastosowaniem logiki rozmytej. Wykorzystano tu teorię Dempstera-Shafera, która jest modyfikacją teorii prawdopodobieństwa całkowitego (Bayesa), będącej podstawą standardowej klasyfikacji nadzorowanej (Peddle, 1993; Eastman, 1992; Jakomulska, 1999b). Badania prowadzono na wielospektralnym zdjęciu naziemnym Beskidu, wykonanym z Uhrocia Kasprowego (szczegółowy opis materiałów fotograficznych, wstępnego przetwarzania i standardowej klasyfikacji obrazu zamieszczono w: Jakomulska, 1998b, 1999c).

Wyniki

Klasyfikacja nadzorowana zdjęcia lotniczego

W klasyfikacji nadzorowanej podjęto próbę identyfikacji badanych zbiorowisk: muraw, wyleżysk i traworośli oraz: zarośli kosodrzewiny, świeżych piargów bez roślinności, piargów ze śladami roślinności pionierskiej i stawów. Kanale spektralne w zakresie widzialnym są ze sobą silnie skorelowane, przez co niosą stosunkowo niewiele informacji o zróżnicowaniu obiektów. Potwierdziła to analiza sygnatur wydzielonych klas. Charakteryzują się one równoległym i płaskim rozkładem (ryc. 6), a uporządkowanie sygnatur według wielkości odbicia wykazuje taki sam układ we wszystkich kanałach. Jedynym wyjątkiem jest tu klasa muraw i traworośli, któ-

rych sygnatury „zamieniają się miejscami” w kanale czerwonym i zielonym. Sygnatury badanych zbiorowisk nie potwierdzają jednak wyników badań laboratoryjnych, pomiarów radiometrycznych, ani analizy zdjęć naziemnych, co jest rezultatem wczesnego terminu wykonania zdjęć.



Ryc. 6. Charakterystyki spektralne klas wyróżnionych w klasyfikacji zdjęcia lotniczego

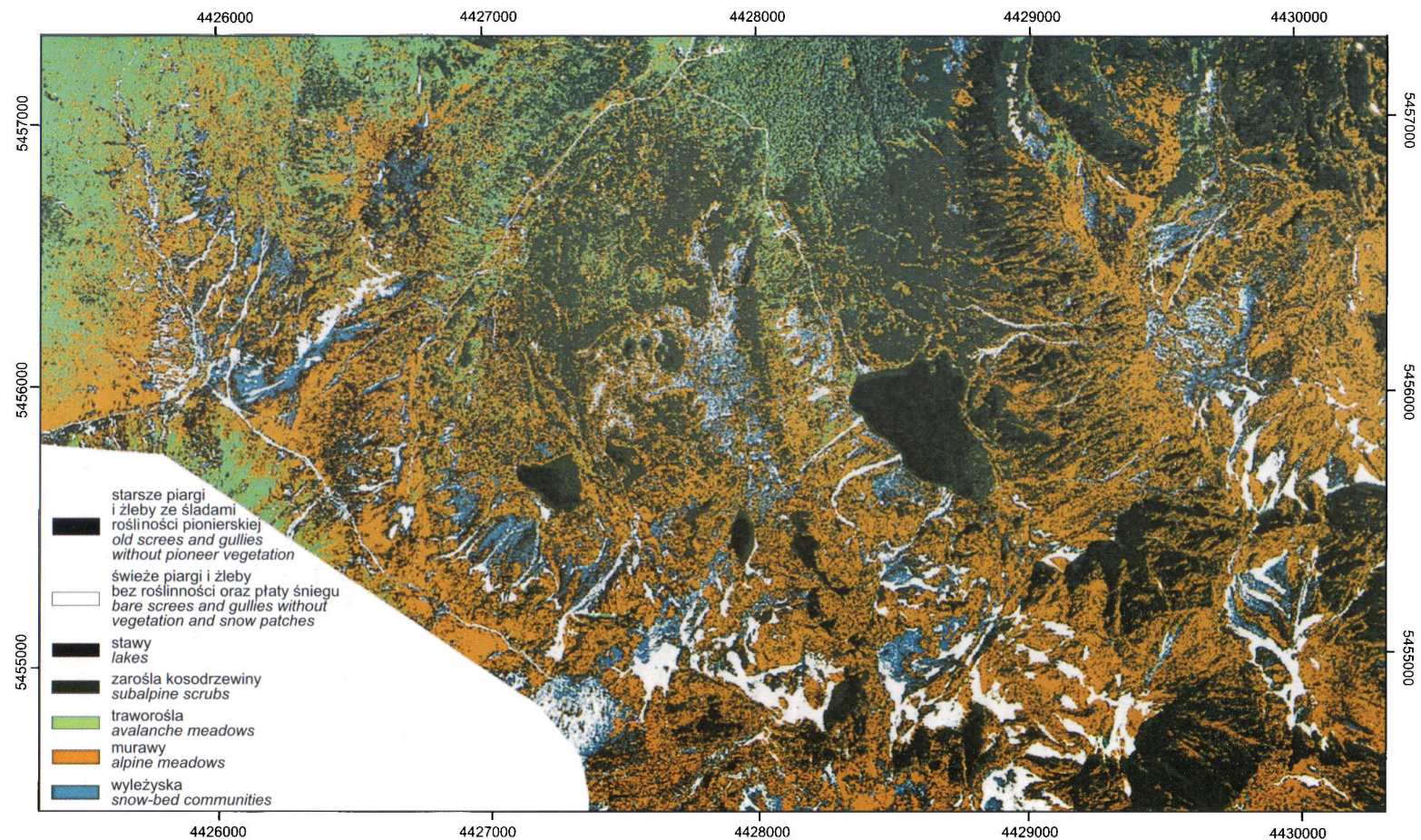
Fig. 6. Spectral characteristics of classes derived from aerial image (RGB: 4, 3, 2)

Rezultat klasyfikacji przedstawiono na ryc. 7. Niska przydatność zdjęcia lotniczego potwierdziła analiza oszacowania dokładności. Dokładność klasyfikacji wyniosła jedynie 40,2%, natomiast współczynnik Kappa, wyrażający proporcjonalną redukcję błędów powstających w czasie procesu klasyfikacji w odniesieniu do błędu klasyfikacji przypadkowej — 0,213. Oznacza to, że tylko 21,3% pikseli zostało zaklasyfikowanych lepiej niż w przypadku klasyfikacji przypadkowej! W tabeli 2 przedstawiono macierz błędów klasyfikacji zdjęcia lotniczego.

Klasyfikacja nadzorowana zdjęcia satelitarnego

Charakterystyki spektralne badanych zbiorowisk, opracowane na podstawie próbek treningowych klasyfikacji zdjęcia satelitarnego (ryc. 8), potwierdzają wyniki badań z zakresu fizjologii roślin i mają przebieg zgodny z przebiegiem uzyskanym w wyniku pomiarów radiometrycznych w czterech pierwszych, pomierzonych zakresach (ryc. 9). Zbiorowisko muraw charakteryzuje się najwyższym odbiciem w zakresie widzialnym, a w szczególności w zakresie czerwonym. Jest to wynikiem najniższej spośród badanych zbiorowisk bezwzględnej zawartości barwników fotosyntetycznych i wysokiego udziału karotenoidów, (które nie absorbują promieniowania w zakresie czerwonym), w ogólnej puli barwników

³ Mapa roślinności wysokogórskiej dolin: Pańszczycy, Gąsienicowej, Goryczkowej i Kondratowej w skali 1:20 000, A. Kozłowska (red.). Kartowanie terenowe prowadzono w skali 1:10 000: koncepcja merytoryczna, kartowanie terenowe i redakcja: A. Kozłowska; kartowanie terenowe i generalizacja kartograficzna: J. Plit; opracowanie cyfrowe i graficzne: A. Jakomulska.



Ryc. 7. Wynik klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia lotniczego
Fig. 7. Result of a supervised classification of the aerial photo

Skala 1:25 000

Układ współrzędnych 1942 r.
Coordinate system "1942"

Tablica 2.

Macierz błędów klasyfikacji zdjęcia lotniczego
Aerial image classification error matrix

		Klasy wg mapy roślinności Classes discerned on the vegetation map					Suma wg mapy roślinności Sum by vegetation map classes	Suma wg klasyfikacji Sum by classes identified in classification	Liczba pikseli zaklasyfiko- wanych poprawnie Number of properly classified pixels	Błąd pominięcia Omission error (%)	Błąd przeszacowania Commission error (%)
		1 — Piargi i żleby Screes and gullies	2 — Zarośla koso- drzewiny Subalpine scrubs	3 — Traworośla Avalanche meadows	4 — Murawy Alpine swards	5 — wyleżyska Snow-bed communities					
Klasy wyróżnione w klasyfikacji Classes identified in classifica- tion	1	87	12	0	54	21	129	174	87	67	50
	2	18	165	3	18	0	192	204	165	14	19
	3	21	12	15	21	15	21	84	15	29	82
	4	3	3	0	27	9	120	42	27	77	36
	5	0	0	3	0	3	48	6	3	94	50

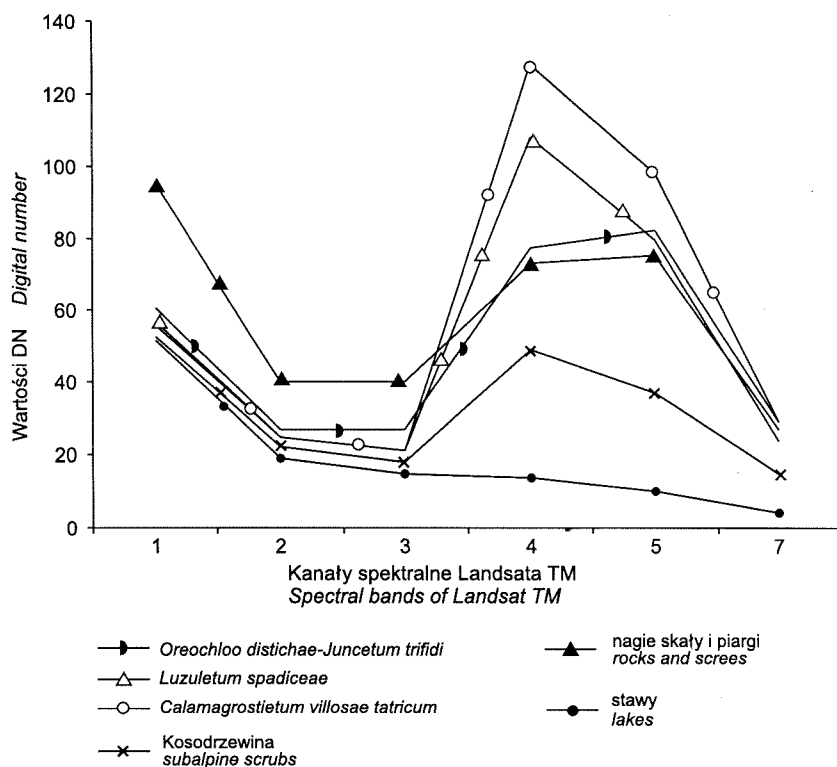
fotosyntetycznych. Trzcinnik, który zawiera około 1,5 razy więcej barwników w 1 g świeżej masy niż kosmatka, wykazuje większe pochłanianie w fotosyntetycznie czynnym (czerwonym) zakresie światła i mniejsze w nieczynnym fotosyntetycznie (dla barwników chlorofilowych) zakresie zielonym. Na zdjęciu satelitarnym zróżnicowanie w zakresie widzialnym jest niewielkie, ale zauważalne. Niższe zróżnicowanie zarejestrowane przez radiometr polowy i skaner Thematic Mapper, w stosunku do wysokiego zróżnicowania względnej i bezwzględnej zawartości barwników asymilacyjnych, wynika z wpływu dodatkowych czynników na wielkość odbicia spektralnego (ułożenie liści, odbicie od podłoża, rozpraszanie promieniowania w atmosferze itd.), ze stosunkowo szerokich zakresów spektralnych wykorzystanych w badaniach oraz ze względu na fakt, że badania teledetekcyjne prowadzone były dla zbiorowisk, a nie gatunków.

Istotne zróżnicowanie zaobserwowano natomiast w zakresie podczerwonym: w 4 kanale TM (760–900 nm) oraz w zakresach 700–800 nm i 800–1100 nm najwyższe odbicie mają traworośla, następnie zbiorowiska wyleżyskowe, najniższe zaś — murawy. Odbicie promieniowania słonecznego jest tu zdeterminowane wielkością i ilością przestworów międzykomórkowych, które to z kolei determinuje natężenie transpiracji: rośliny o luźnej strukturze mięszku gąbczastego charakteryzują się szybką wymianą gazową i wysokim odbiciem. Uporządkowanie gatunków pod względem wielkości odbicia w tym kanale potwierdza wyniki uzyskane w badaniach transpiracji (najszybciej transpiruje trzcinnik).

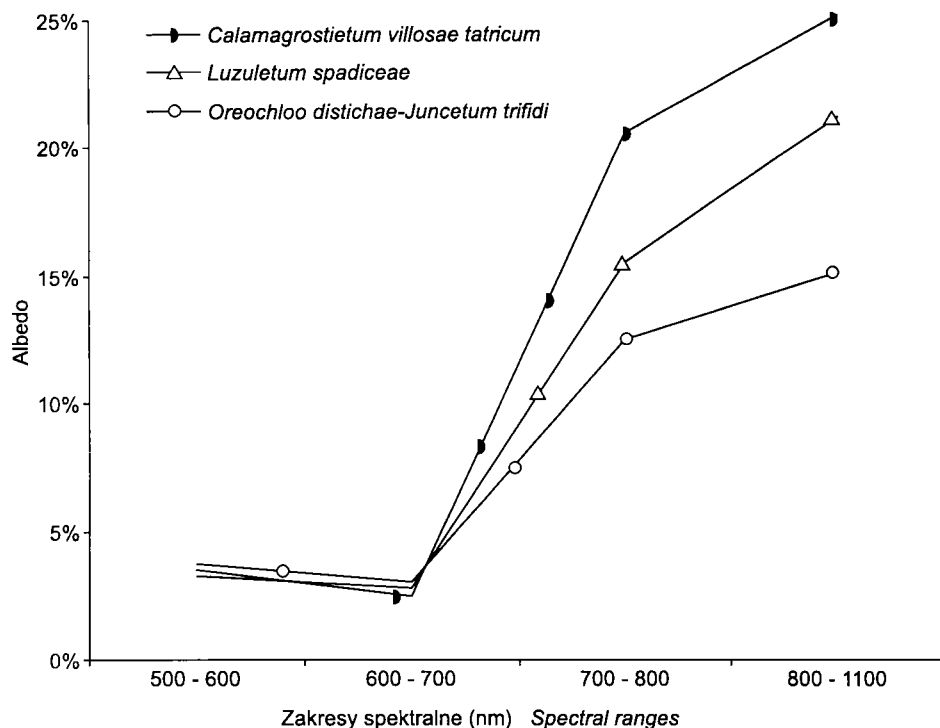
Sygnatury prób treningowych uzyskanych ze zdjęcia satelitarnego

dostarczyły dodatkowe informacje w zakresach 1,55–1,75 i 2,08–2,35 (kanały 5 i 7). Wpływ na odbicie ma tu zawartość wody w tkankach roślin. W obydwu tych zakresach najniższe odbicie ma kosmatka. W kanale 7 zanotowano jednakowe odbicie dla situ i trzcinnika i znacznie obniżone odbicie kosmatki. Potwierdza to rezultat otrzymany w badaniach zawartości wody w tkankach: sit i trzcinnik zawierają zbliżoną zawartość wody (ok. 70%), natomiast uwodnienie tkanek kosmatki jest wyższe i sięga 79%.

W klasyfikacji opracowano sygnatury dla: muraw, wyleżysk i traworośli, dodatkowo wyróżniono klasy: zarośli kosodrzewiny, nagich skał i piargów oraz stawów. Próbkę treningową wyznaczono w obrębie powierzchni,



Ryc. 8. Charakterystyki spektralne opracowane na podstawie zdjęcia satelitarnego
Fig. 8. Spectral characteristics of researched communities derived from Landsat TM image



Ryc. 9. Albedo w zakresach rejestrowanych przez spektrometr SP-1

Fig. 9. Albedo registered by spectrometer SP-1

które charakteryzowały się jednorodnością (wybrano próby ze stosunkowo dużych płątów roślinności) oraz reprezentatywnością dla danej klasy (wybrano próby jedynie z klas „czystych”, tzn. klas typowych, nie będących podzespołami, wariantami, ani przestrzennymi kompleksami badanych zbiorowisk. Zespół *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* reprezentowany był przez podzespół *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum*.

Po lewej stronie ryciny 10 zilustrowano rozmieszczenie pikseli próbek treningowych badanych klas w spektralnej przestrzeni cech (ang. *feature space*). Odległości spektralne wyrażone są w skali 0–255. Największą liczbę pikseli oznaczono kolorem czerwonym, a najmniejszą — purpurą. Po prawej stronie ryciny 10 przedstawiono natomiast wzajemne położenie klas. Poszczególne barwy wyrażają klasy wydzielone w wyniku klasyfikacji (kolory jak na ryc. 11). Informacja z kanałów 2 i 3 oraz 5 i 7 jest silnie skorelowana, a bliskie ułożenie badanych klas w przestrzeni cech w zasadzie nie pozwala na ich rozpoznanie. Zróżnicowanie pozwalające na identyfikację badanych zbiorowisk widać natomiast w kanałach, które nie są skorelowane w tak silnym stopniu: 3, 4 oraz 7. Na ich podstawie możliwe jest rozpoznanie badanych zbiorowisk, natomiast kanały: niebieski (1), zielony (2) i bliska podczerwień (5) nie są niezbędne do ich prawidłowej identyfikacji.

Rezultat klasyfikacji przedstawiono na ryc. 11, a macierz błędów w tabeli 3. Dokładność klasyfikacji (58,3%) można określić jako niezadowalającą: współczynnik Kappa wyniósł jedynie 0,44.

W przeciwieństwie do przeprowadzonej klasyfikacji zdjęcia lotniczego, niska dokładność klasyfikacji zdjęcia satelitarnego nie wynika z rozdzielczości spektralnej. Analizy krzywych spektralnych i położenia klas w prze-

strzeni spektralnej świadczą o tym, że zbiorowiska typowe („czyste”) mogą być rozróżnione na podstawie zdjęć satelitarnych, nawet o stosunkowo niskiej rozdzielczości spektrometrycznej, jaką ma Landsat TM. Przyczyną uzyskanej, niskiej dokładności klasyfikacji jest geometria zarówno samego obiektu badań (drobnomozaikowy charakter szaty roślinnej) jak i wykorzystanych materiałów: zdjęcia satelitarnego i mapy roślinności wykorzystanej do oszacowania dokładności klasyfikacji. Zagadnienia te omówiono szczegółowo poniżej.

Problem kompleksów zbiorowisk i granic zonalnych

Tak jak zaznaczono powyżej, próbki treningowe do wyznaczenia klas wybrano z obszarów jednorodnych i reprezentujących klasy typowe. Na obszarze poddanym analizie zbiorowiska typowe zajmują jednak niewielki procent powierzchni — udział powierzchni badanych zbiorowisk w sumarycznej powierzchni zbiorowisk z podzespołem, wariantem lub kompleksem zbiorowisk z udziałem tego zespołu przedstawiono w tab. 4. Większość pikseli poddanych analizie w klasyfikacji nadzorowanej jest więc silnie heterogeniczna.

Problem ten zarysował się już w trakcie analizy zdjęcia naziemnego Beskidu. W klasyfikacji nadzorowanej uzyskano bardzo dobre wyniki: rozpoznano bowiem zbiorowiska roślinne rangi zespołów, a nawet podzespołów. Oszacowanie wiarygodności przeprowadzono statystyczną metodą identyfikacji błędnie sklasyfikowanych pikseli, opartą na określeniu progu odległości spektralnej (Mahalanobisa) pikseli próbek treningowych od średniej wartości próby (ERDAS, 1993). Progi te, wyznaczone na podstawie rozkładu chi-kwadrat (χ^2), przyjęto na poziomie istotności 0,01. Dla trzech stopni

Tablica 3.

Macierz błędów klasyfikacji zdjęcia satelitarnego
Satellite image classification error matrix

		Klasy na podstawie mapy roślinności <i>Classes discerned on the vegetation map</i>						Suma wg mapy roślinności <i>Sum by vegetation map classes</i>	Suma wg klasyfikacji <i>Sum by classes identified in classification</i>	Liczba pikseli zaklasyfikowanych poprawnie <i>Number of properly classified pixels</i>	Błąd pominięcia <i>Omission error (%)</i>	Błąd przeszacowania <i>Commission error (%)</i>
		1 — Piargi z rośl. pionierską <i>Screes with pioneer vegetation</i>	2 — Świeże piargi <i>Bare screes</i>	3 — Zarośla koso-drzewiny <i>Subalpine scrubs</i>	4 — Traworośla <i>Avalanche meadows</i>	5 — Murawy <i>Alpine meadows</i>	6 — Wyleżyska <i>Snow-bed communities</i>					
Klasy wyróżnione w klasyfikacji <i>Classes identified in classification</i>	1	18	0	15	0	48	12	69	93	18	74	81
	2	12	0	0	0	18	3	9	33	0	100	100
	3	12	0	114	3	48	3	240	180	114	53	37
	4	0	0	75	6	6	0	15	87	6	60	93
	5	18	6	33	0	87	9	231	153	87	62	43
	6	9	3	3	6	24	21	48	66	21	56	68

Tablica 4.

Procentowy udział zbiorowisk „czystych” na mapie roślinności Doliny Gąsienicowej
Percentage of "pure" communities on map of vegetation of Gąsienicowa Valley

Zbiorowisko roślinne <i>Vegetation community</i>	Powierzchnia Area (m ²)	Udział w całkowitej powierzchni zbiorowisk z udziałem danego zbiorowiska <i>Percentage in the total area of units with this community (%)</i>
<i>Oreochloa distichae-Juncetum trifidi typicum</i>	534 805	13,32
<i>Luzuletum spadiceae</i>	402 819	62,08
<i>Calamagrostietum villosae tatricum</i>	612 021	51,83

swobody (liczba kanałów) wartość χ^2 wynosi 11,345. Powyżej tej wartości (oznaczonej na ryc. 12 czerwoną, pionową linią) piksele zostały zaliczone do klasy „niezaklasyfikowane”. Większość badanych zbiorowisk roślinnych została zaklasyfikowana dobrze (przeciętna dokładność klasyfikacji dla poszczególnych klas: 80–95%). Najniższą wiarygodność mają się piksele klasy mieszanej: *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* w kompleksie z *Luzuletum spadiceae* (dokładność 36%). Na histogramie odległości dla tej klasy, można zauważyć, że znaczna część pikseli odznacza się dużymi odległościami od wartości średniej. Wynika to ze specyfiki klasy, która charakteryzuje się wysoką heterogenicznością.

Problem pikseli mieszanych

Dostępne zdjęcie satelitarne cechuje się bardzo niską rozdzielczością terenową (30 m), w stosunku do powierzchni zajmowanych przez badane zbiorowiska. Do powszechnych zastosowań (kartowanie pokrycia terenu) obraz uzyskany przez Landsata TM ma w zasadzie zadowalającą rozdzielczość. W przypadku szczegółowego kartowania roślinności charakteryzującej się tak

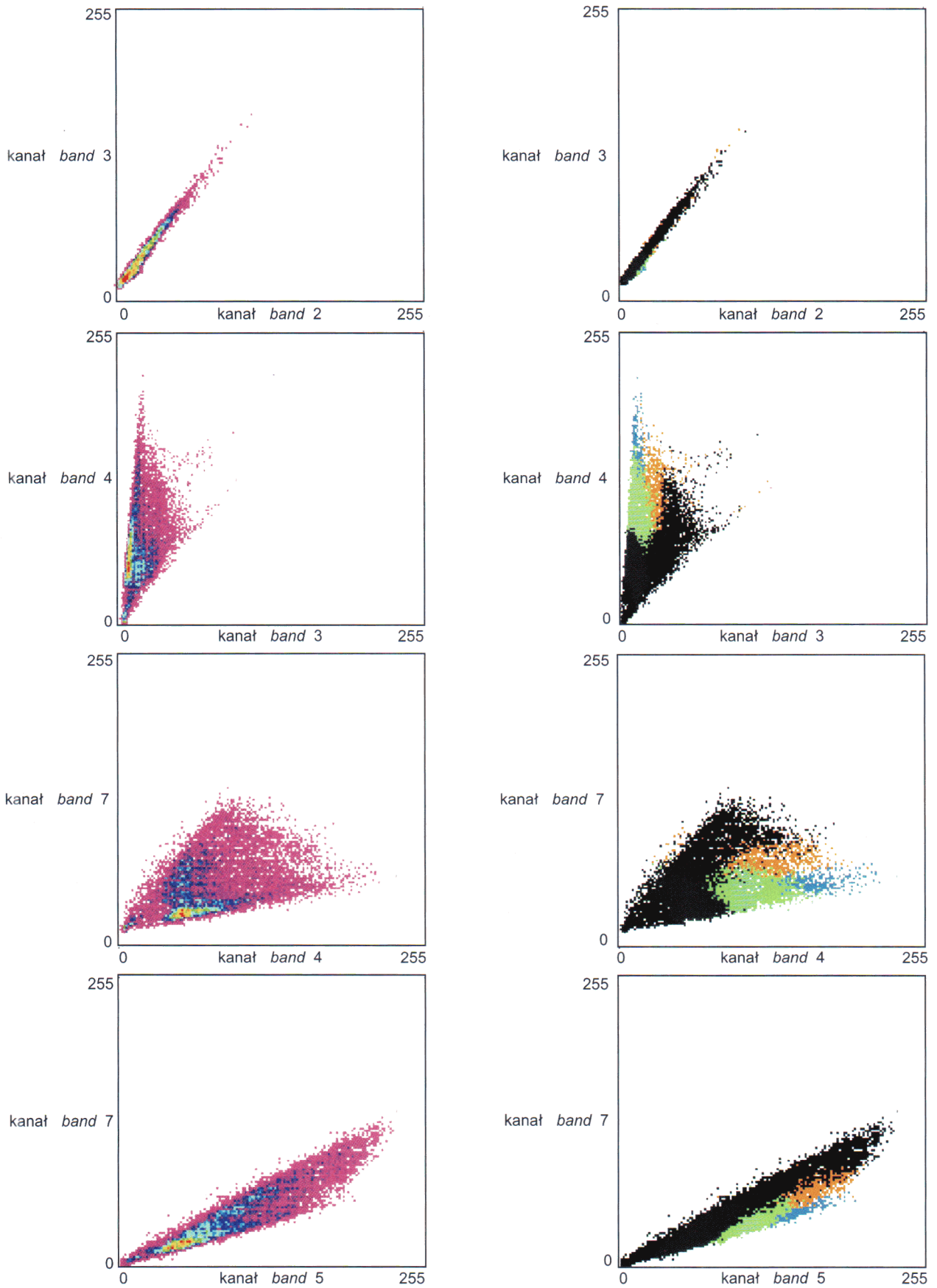
ogromną zmiennością przestrzenną, piksel zobrazowany przez Landsata jest pikselem heterogenicznym i obejmuje kilka typów roślinności. Na ryc. 13 przedstawiono ten sam obszar zarejestrowany na zdjęciu lotniczym (ryc. 13a) i na zdjęciu satelitarnym (ryc. 13b). Wybrane fragmenty zajmują powierzchnię 300 × 240 m i na zdjęciu Landsata reprezentowane są przez 80 pikseli. Zdjęcie lotnicze obrazuje zróżnicowanie roślinności w obrębie poszczególnych pikseli zdjęcia satelitarnego.

Problem generalizacji

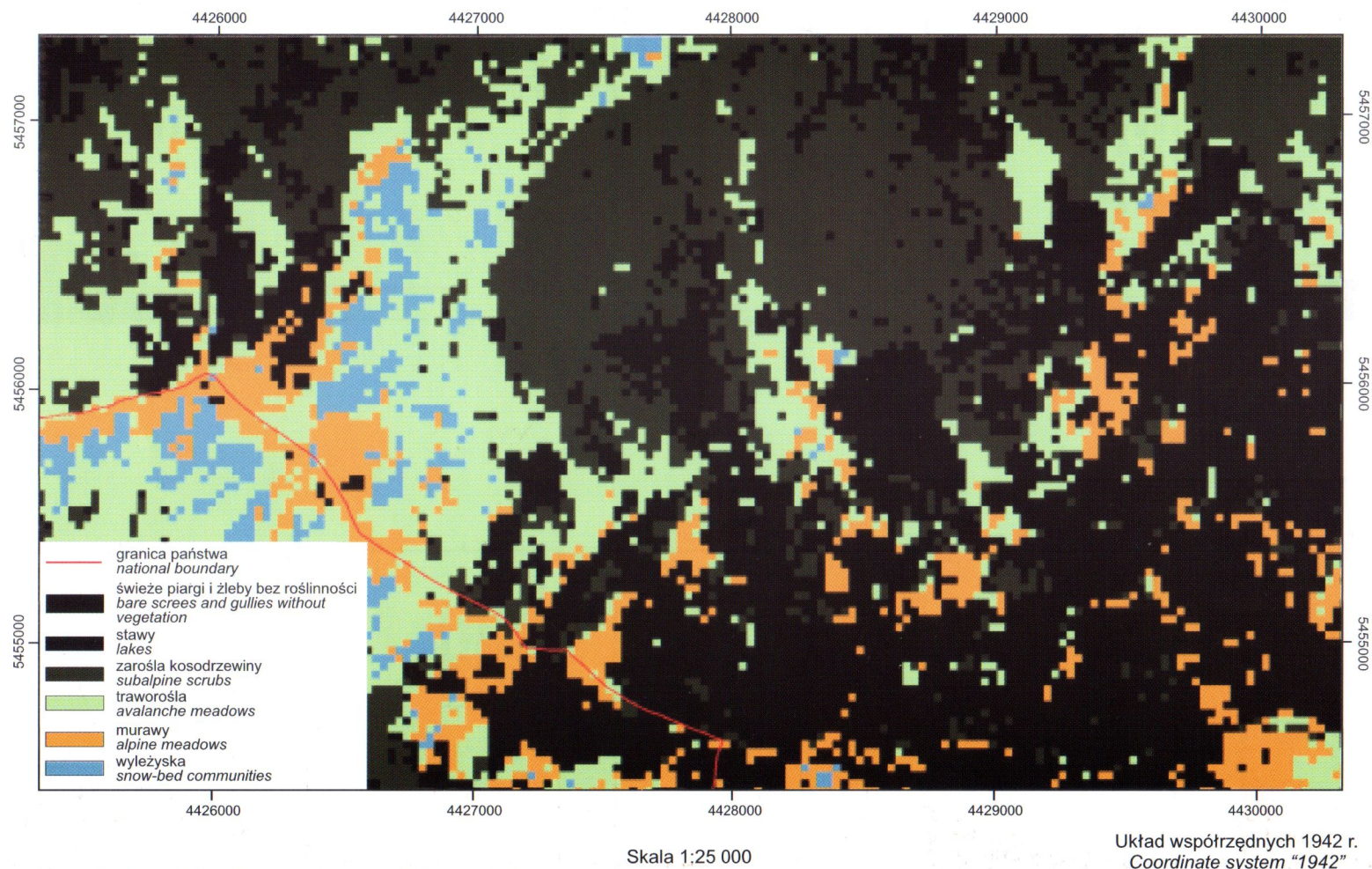
Trzecim zagadnieniem, z którym wiąże się uzyskana, niska dokładność klasyfikacji jest problem generalizacji mapy roślinności. Mimo że kartowanie roślinności przeprowadzone zostało w terenie w bardzo dokładnej skali (1:10 000), niejednokrotnie czytelność mapy nie pozwoliła na narysowanie takiej mozaiki roślinności, jaka istnieje realnie. W przypadku, gdy dane kompleksy roślinne tworzą trwałe kompleksy przestrzenne, w legendzie wydzielone zostały oddzielne klasy. W przypadkach gdy drobna mozaika zbiorowisk roślinnych nie ma charakteru funkcjonalnego, generalizacja objęła:

- usunięcie drobnych konturów,
- przewiększenie drobnych, ale charakterystycznych wydzieleni,
- łączenie drobnych, jednorodnych konturów w większe.

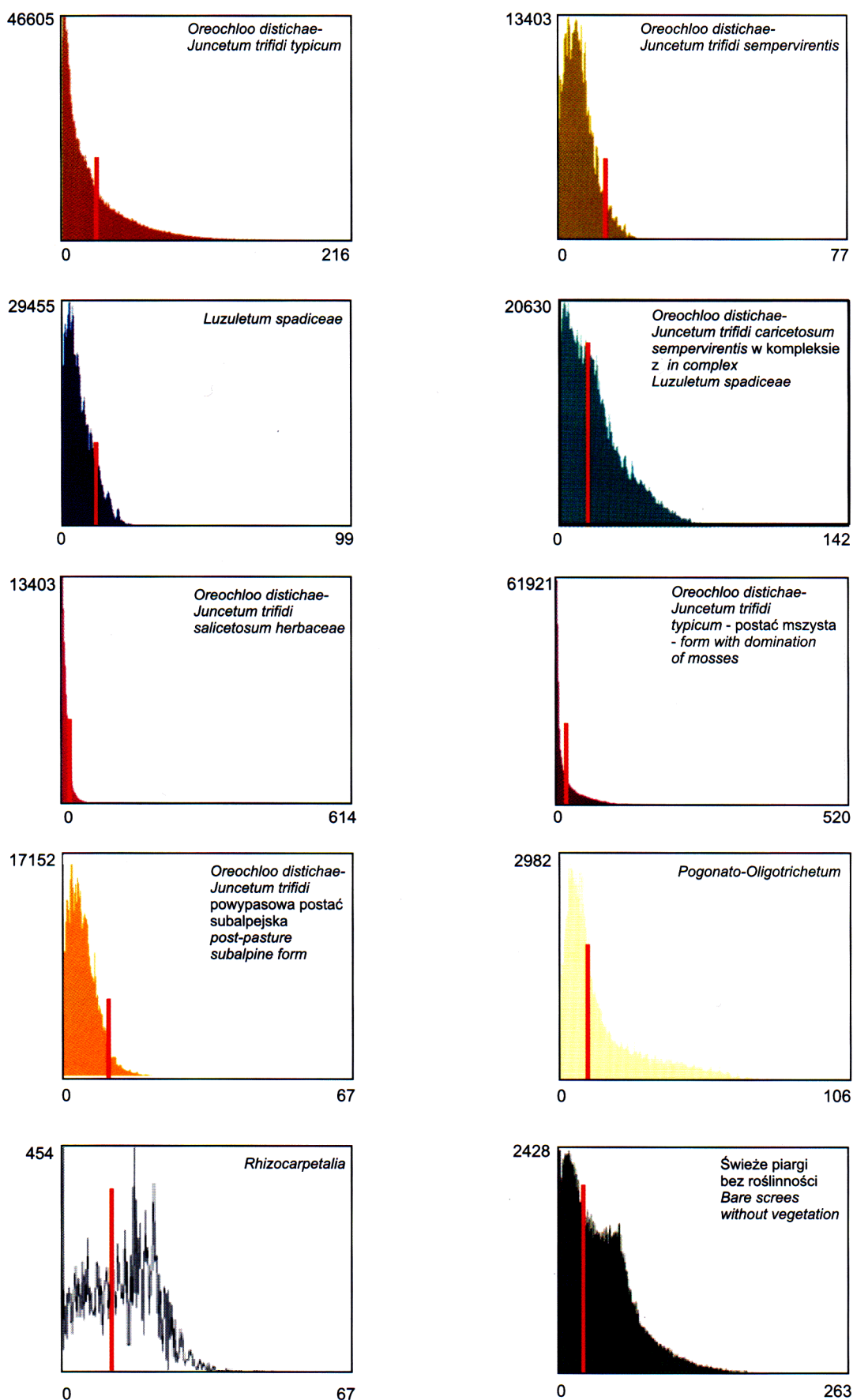
Przykłady generalizacji mapy roślinności przedstawiono na ryc. 13a. Generalizacja jest jedną z ważniejszych właściwości klasycznych map; bez abstrahowania, uogólnienia i uproszczenia, które składają się na generalizację, przedstawienie kartograficzne wielu obiektów geograficznych w zadanej skali nie jest możliwe. Generalizacja prowadzi jednak do zmniejszenia wierności oraz dokładności geometrycznej, a uzyskanie kompromisu między dokładnością i wiernością przed-



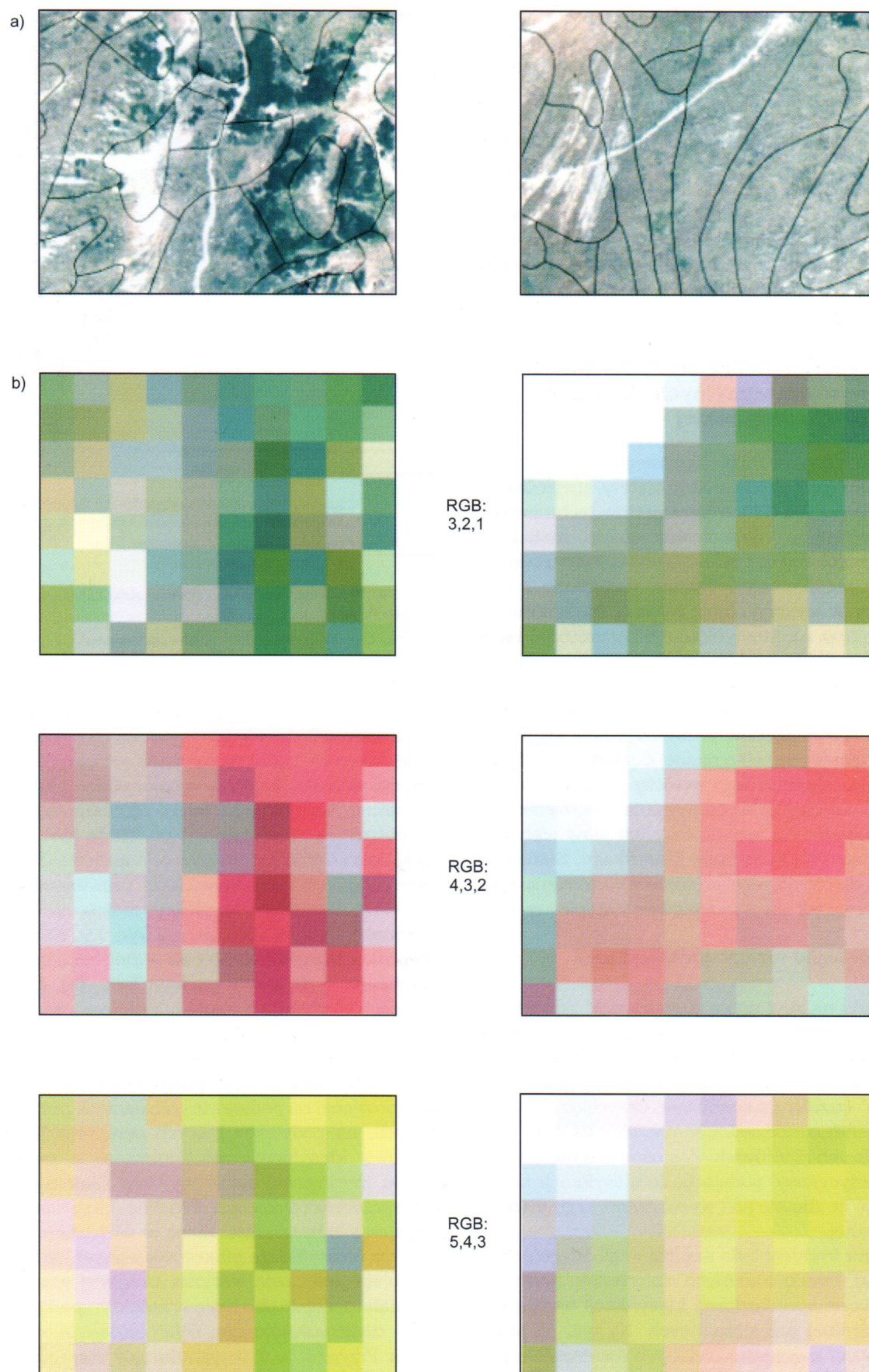
Ryc. 10. Rozmieszczenie klas wydzielonych w klasyfikacji zdjęcia satelitarnego w spektralnej przestrzeni cech
 Fig. 10. Distribution of classes derived from satellite image in a spectral space



Ryc. 11. Wynik klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia satelitarnego
Fig. 11. Result of a supervised classification of the satellite image



Ryc. 12. Rozkłady odległości pikseli prób treningowych od wartości średnich tych prób
 Fig. 12. Distribution of mean distance of training sample pixels from the mean values of the samples



Ryc. 13. Czynniki wpływające na dokładność klasyfikacji: a) generalizacja mapy roślinności, b) wielkość piksela zdjęcia satelitarnego
 Fig. 13. Factors reducing classification accuracy: a) vegetation map generalisation, b) satellite image pixel size

stawienia a czytelnym przedstawieniem graficznym jest jednym z ważniejszych problemów kartografii. Jednym z możliwych rozwiązań problemu generalizacji map tematycznych jest rastrowy system prezentacji i analizy. Umożliwia on nie tylko przedstawienie drobnych, dyskretnych wydzieleni (Širajev, 1977), ale również ich analizę. Cyfrowe przetwarzanie materiałów teledetekcyjnych ma więc dodatkowo tę zaletę, że nie ma potrzeby dokonywania generalizacji po przeprowadzeniu analiz zmierzających do opracowania map tematycznych (np. klasyfikacji). W związku z tym wejściowe materiały teledetekcyjne nie ulegają deformacji i mają rzeczywście charakter „wiernego modelu terenu”.

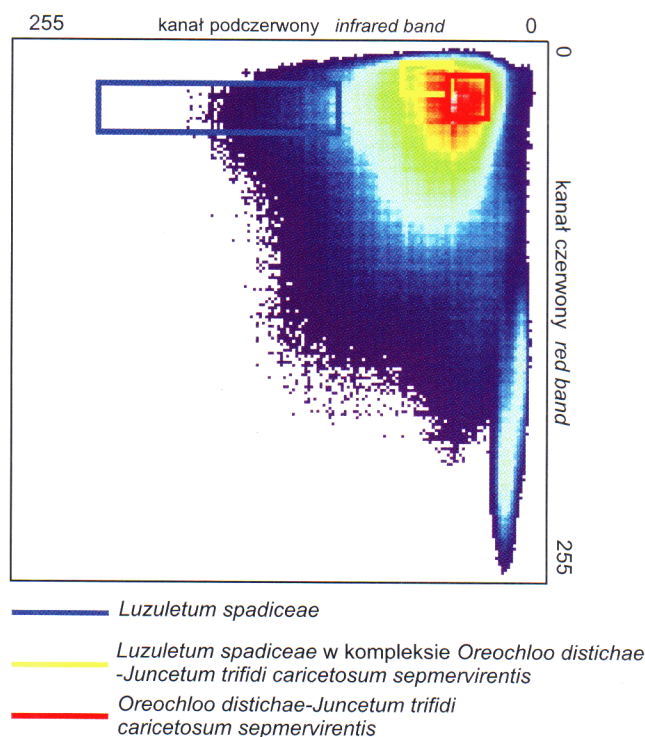
Ocena przydatności obecnie dostępnych materiałów teledetekcyjnych do badań roślinności wysokogórskiej

Podsumowując wyniki cyfrowego przetwarzania zdjęcia lotniczego i satelitarnego należy stwierdzić, że żadne z nich nie ma takich parametrów technicznych, które umożliwiłyby opracowanie mapy roślinności w skali szczegółowej na podstawie zautomatyzowanej klasyfikacji nadzorowanej. Termin wykonania zdjęcia lotniczego oraz wykorzystane zakresy spektralne nie pozwalają nawet na identyfikację (interpretację) badanych zbiorowisk. Na zdjęciu satelitarnym Landsat TM, badane zbiorowiska wysokogórskie wykazują zróżnicowanie wystarczające do ich zdalnej identyfikacji. Niska rozdzielczość geometryczna prowadzi jednak do opracowania map tematycznych o niskiej dokładności. Wyniki analizy zdjęcia satelitarnego zwróciły jednak uwagę na problem powszechnego występowania zbiorowisk mieszanych na badanym terenie oraz ich silny wpływ na dokładność zautomatyzowanej klasyfikacji. Skłoniło to do podjęcia metodycznego problemu kartowania kompleksów zbiorowisk zarysowanego we wstępie artykułu.

Zastosowanie logiki rozmytej w klasyfikacji

Ze względu na zbyt niską rozdzielczość geometryczną zdjęcia satelitarnego i niezadowalającą rozdzielczość spektralną zdjęcia lotniczego, badania przeprowadzono na zdjęciu naziemnym Beskidu. Analizie poddano trzy zbiorowiska: *Luzuletum spadiceae*, *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* oraz kompleks tych dwóch zbiorowisk. Zastosowana metoda różni się od tradycyjnego podejścia do klasyfikacji nadzorowanej tym, że zbędne jest wyznaczenie sygnatury dla klasy mieszanej.

Pierwszym krokiem była analiza względnego położenia sygnatur trzech badanych zbiorowisk, wyróżnionych w procesie standardowej klasyfikacji nadzorowanej, w spektralnej przestrzeni cech. Na ryc. 14 przedstawiono położenie sygnatur badanych zbiorowisk w dwukanałowej przestrzeni cech (kanał czerwony i podczerwony). Sygnatura dla kompleksu badanych zbiorowisk leży pomiędzy sygnaturami analizowanych zbiorowisk „czystych”.

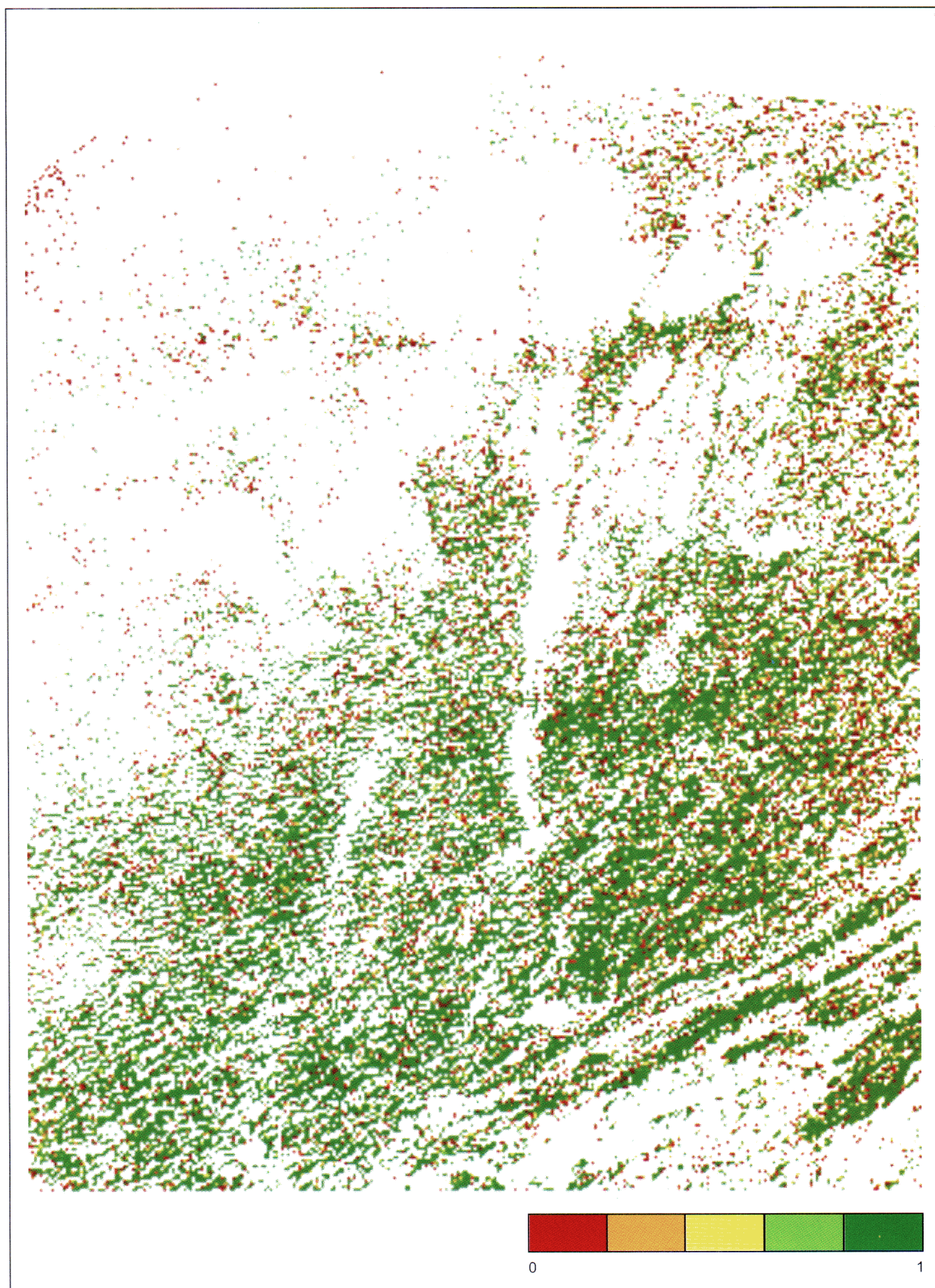


Ryc. 14. Położenie sygnatur trzech zbiorowisk w spektralnej przestrzeni cech

Fig. 14. Location of three communities in a spectral space

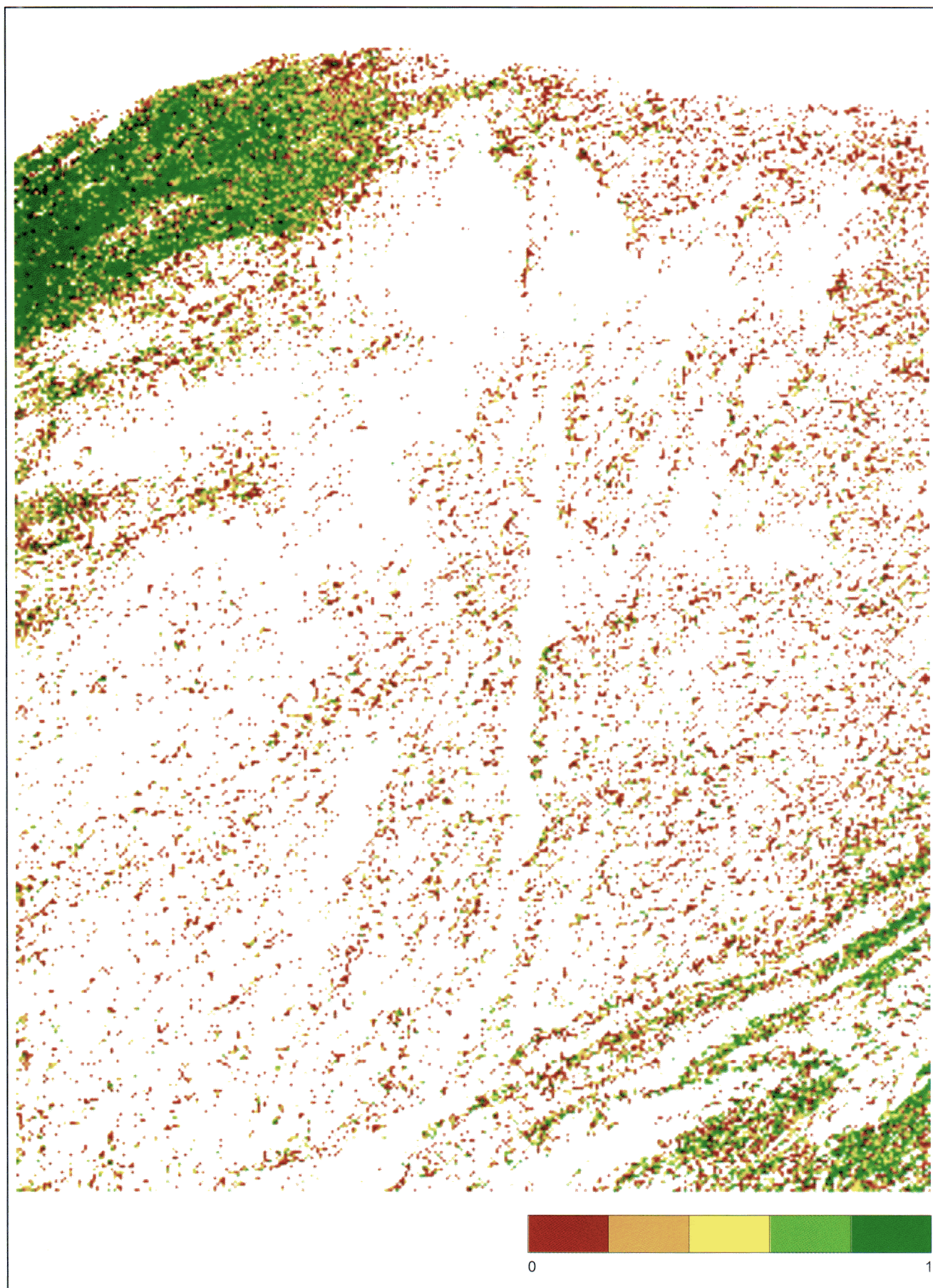
W analizie opartej na logice rozmytej wystarczy określić jedynie sygnatury „czyste”: w tym przypadku dla zbiorowisk *Luzuletum spadiceae* i *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*, a następnie określić kryteria wyznaczające granicę klasy mieszanej. Na rycinach 15 i 16 przedstawiono prawdopodobieństwa przynależności pikseli do klas: *Luzuletum spadiceae* i *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*. Największe prawdopodobieństwa dla klasy *Luzuletum spadiceae* można zaobserwować w prawym dolnym rogu obrazu (ryc. 15), natomiast dla *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* — w lewym górnym (ryc. 16). Na obydwu obrazach występują również piksele o prawdopodobieństwie przynależności niższym od 1 — występują one głównie w środkowej części obrazu.

Drugim etapem było przeprowadzenie klasyfikacji nadzorowanej na podstawie tych samych próbek treningowych, na podstawie których przeprowadzono standardową klasyfikację nadzorowaną, z pominięciem próbki treningowej dla kompleksu zbiorowisk *Luzuletum spadiceae* i *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*. Klasę tę wydzielono następnie poprzez identyfikację pikseli mieszanych, które wyznaczono na podstawie wartości progowej wiarygodności przynależności do obu klas: *Luzuletum spadiceae* i *Oreochloa distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*. Przyjęto, że w przypadku gdy wiarygodność była zawarta w przedziale (0,1; 0,9), piksele będą należały do klasy mieszanej. Z klasyfikacji odrzucono jednak te piksele, których niepewność była większa od 0,5, a więc te piksele, które nie są podobne do żadnej z wydzielonych



Ryc. 15. Prawdopodobieństwo przynależności do klasy *Luzuletum spadiceae*

Fig. 15. Probability of *Luzuletum spadiceae* class



Ryc. 16. Prawdopodobieństwo przynależności do klasy *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*

Fig. 16. Probability of *Oreochloa distichae*-*Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* class

klas i prawdopodobnie należą do innej klasy. Przykładowe rozkłady prawdopodobieństw przynależności pikseli do trzech klas oraz rozwiązanie problemu klasyfikacji w wyniku zastosowania tradycyjnej metody klasyfikacji oraz zasady decyzyjnej opartej na teorii Dempstera-Shafera zestawiono w oddzielnej publikacji (Jakomulska, 1999b).

Klasyfikacja przeprowadzona tą metodą dała pozytywne wyniki (ryc. 17), a uzyskany obraz roślinności jest zbliżony do obrazu uzyskanego w wyniku zastosowania tradycyjnej metody klasyfikacji nadzorowanej. Przewagą tej metody jest jednak to, że wydzielenie klasy mieszanej jest zautomatyzowane i nie wymaga przygotowania sygnatury dla klasy mieszanej. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy klas mieszanych jest dużo. Poza tym metoda ta umożliwia tworzenie dowolnej liczby klas przejściowych pomiędzy klasami „czystymi” — w zależności od celów i skali opracowania.

Dyskusja

Zautomatyzowane, szczegółowe kartowanie roślinności wysokogórskiej metodami teledetekcji na obecnie dostępnych dla Tatr materiałach teledetekcyjnych wydaje się być zadaniem trudnym. Podstawowym problemem jest tu niska rozdzielczość geometryczna. Na uwagę natomiast zasługuje rastrowy system organizacji i prezentacji danych teledetekcyjnych, którego cechy są cenne z punktu widzenia kartografii roślinności:

1) Mapy rastrowe pozwalają na wierne odwzorowanie realnie istniejącej, drobnopowierzchniowej mozaiki zbiorowisk roślinnych. Uniknięcie błędu generalizacji wydaje się istotną zaletą przy opisie środowisk o tak wielkim zróżnicowaniu przestrzennym.

2) Jednym z rozwiązań technicznego problemu klasycznego, szczegółowego kartowania roślinności wysokogórskiej, związanego z trudnością graficznej prezentacji zbiorowisk uszeregowanych według cech gradientowych oraz kompleksów zbiorowisk roślinnych i granic przejściowych, wydaje się być zastosowanie metod opartych na teorii logiki rozmytej. Metody te umożliwiają nie tylko graficzną prezentację przyrodniczych zjawisk o charakterze „rozmytym”, ale również ich analizę⁴. W przypadku analizy roślinności możliwe jest zautomatyzowane rozpoznawanie kompleksów zbiorowisk. Kartowanie oparte na częściowej przynależności piksela do danej klasy znacznie poprawia dokładność opracowywanych map tematycznych i pozwala na wyróżnienie do kilku poziomów przejściowych zbiorowisk mieszanych, w zależności od skali i celu opracowania.

Zwiększenie poprawności zautomatyzowanej identyfikacji i kartowania zbiorowisk roślinnych na materiałach lotniczych i satelitarnych, możliwe będzie dzięki

uwzględnieniu poniższych uwag, wynikających z doświadczeń badań tatrzańskich autorki.

1. Zdjęcie do szczegółowych badań roślinności powinno mieć rozdzielczość geometryczną rzędu kilku metrów.

2. Na podstawie analizy charakterystyk spektralnych i rozkładu sygnatur w spektralnej przestrzeni cech określono, że największą przydatność do identyfikacji roślinności, z wykorzystanych w niniejszym doświadczeniu zakresów, mają zakresy: czerwony oraz podczerwień w przedziałach 0,76–0,90 i 2,08–2,35 μm . Lepsze wyniki można by jednak osiągnąć dzięki zwiększeniu rozdzielczości spektralnej materiałów teledetekcyjnych przez:

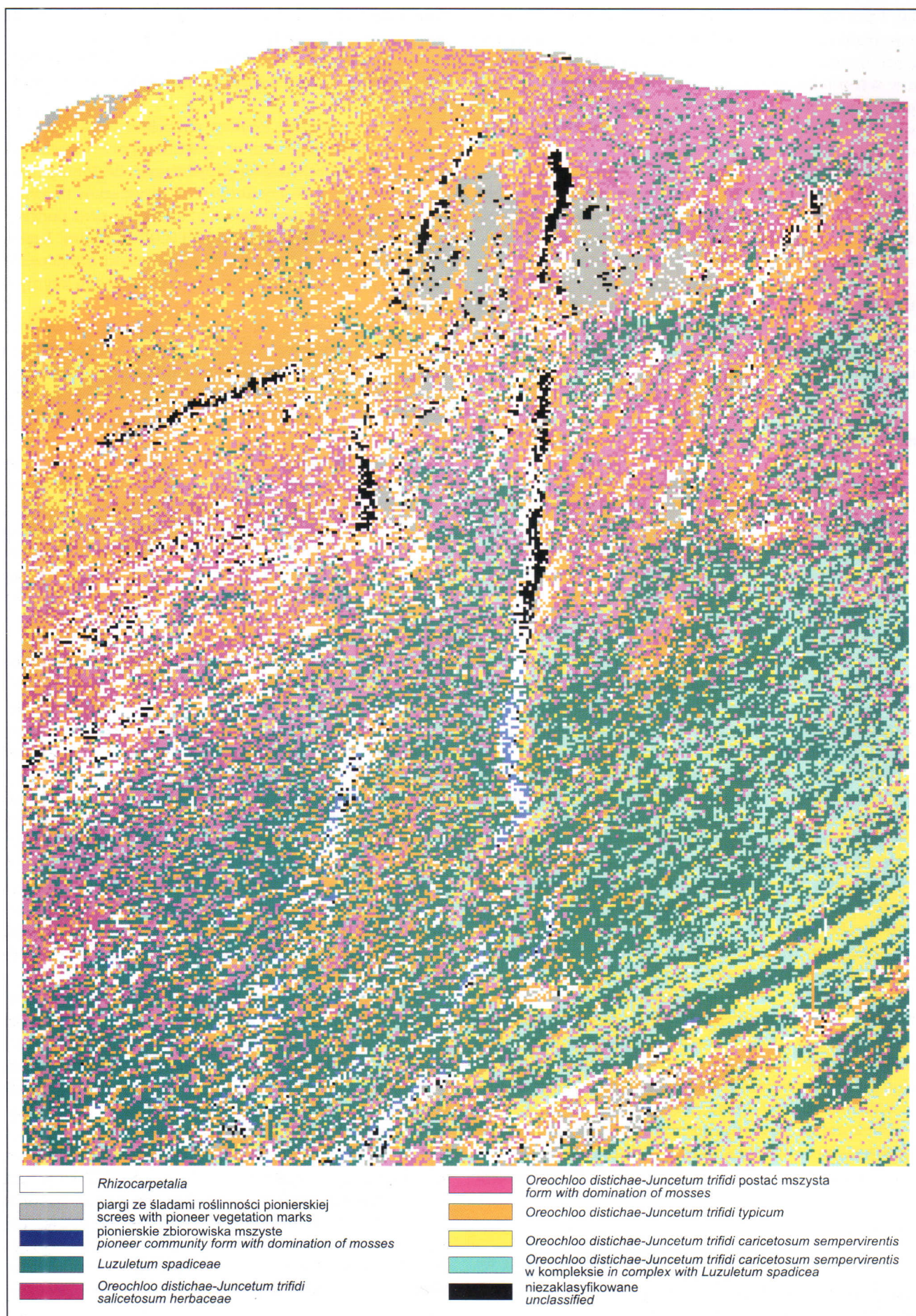
— zastosowaniu od kilku do kilkunastu wąskich kanałów w zakresie widzialnym, a w szczególności: 663 nm, 646 nm oraz ok. 470 nm, odpowiadających maksimum absorpcji głównych i towarzyszących barwników fotosyntetycznych (odpowiednio: chlorofilu a, chlorofilu b, karotenoidów).

— uwzględnieniu zakresów bliskiej podczerwieni ok. 1,45 i 1,95 μm , odpowiadającym maksimum pochłaniania promieniowania przez rośliny o wysokiej zawartości wody w tkankach. W zakresie tym możliwe byłoby rozróżnienie zbiorowisk roślinnych z udziałem *Luzula spadiacea*, która charakteryzuje się szczególnie wysoką zawartością wody w tkankach. Zakresy te ułatwiłyby również identyfikację innych zbiorowisk wyleżyskowych, które występują na siedliskach wilgotnych.

3. W niniejszym eksperymencie nie było możliwości przeprowadzenia badań fluorescencji „z lotu ptaka”, przydatność aktywnych technik teledetekcji do identyfikacji gatunków wykazano jednak w szeregu badań i opracowań (Gausman, 1974), a zróżnicowanie wszystkich parametrów fluorescencji badanych zbiorowisk wykazano w badaniach naziemnych (Jakomulska, 1999a). W miarę możliwości warto by było wykonać pomiary fluorescencji w kilku maksimach emisji: 440, 525, 685 i 740 nm (Chapelle i in., 1985). Zastosowanie technik fluorescencyjnych pozwoliłoby również na badania tych samych zbiorowisk, poddanych czynnikom stresowym (np. wymarzenie kosodrzewiny, deptanie zbiorowisk zielnych i trawiastych położonych w pobliżu ścieżek turystycznych).

4. Wyniki przeprowadzonych badań zwracają również uwagę na dobór terminu wykonania zdjęć. Istniejące barwne zdjęcia lotnicze dla obszaru Tatr, wykonane na początku okresu wegetacyjnego, nie znajdują zastosowania w identyfikacji i kartowaniu wysokogórskich zbiorowisk roślinnych w skali szczegółowej. Zasadniczo okres wegetacyjny w środowiskach wysokogórskich jest bardzo krótki i ogranicza się do lipca i sierpnia. Najlepsze wybarwienie badanych zbiorowisk występuje pod koniec sezonu, niestety dokładne określenie terminu jest niemożliwe ze względu na niestabilność dat wyznaczających początek i koniec okresu wegetacyjnego. Przeprowadzenie ewentualnych badań należy więc zaplanować uwzględniając krótkoterminowe prognozy pogody.

⁴ Rzeczywista powierzchnia zajęta przez dane zbiorowiska ma istotne znaczenie w badaniach struktury środowiska (większość wskaźników charakteryzujących strukturę wykorzystuje parametr wielkości platów).



5. Wstępne przetwarzanie materiałów teledetekcyjnych powinno obejmować kalibrację radiometryczną i korekcję atmosferyczną z uwzględnieniem szczegółowego numerycznego modelu terenu, co umożliwiłoby korekcję wpływu różnej grubości atmosfery oraz nachylenia i wystawy stoków na obraz zarejestrowany na zdjęciach. Opracowanie NMT o wysokiej rozdzielczości geometrycznej możliwe byłoby na podstawie stereopar zdjęć lotniczych.

6. Na podstawie numerycznego modelu terenu o dokładności rzędu kilku metrów, można dodatkowo uzyskać wiele informacji pośrednich o warunkach: mikroklimatycznych (wysokość nad poziomem morza, ekspozycja) oraz siedliskowych (nachylenie, kształt i pozycja na stoku determinujące wilgotność i trofizm podłoża), które nie zawsze są dostępne z innych źródeł w szczegółowym zakresie i skali. Wyniki badań nad indykacyjnym charakterem roślinności wskazują na wysoką korelację niektórych zbiorowisk roślinnych i powierzchni morfodynamicznych (Kozłowska, Rączkowska, Jakomulska 1999). Uwzględnienie w procesie klasyfikacji (modelowanie) dodatkowych warstw charakteryzujących powierzchnię stoku może więc znacznie podnieść jej wiarygodność.

7. Dodatkową poprawę dokładności klasyfikacji można uzyskać uwzględniając w klasyfikacji teksturę badanych obiektów. Wprowadzanie na orbity satelitarne skanerów nowej generacji o wysokiej rozdzielczości geometrycznej (kilkunasto- i kilkumetrowej, np. Landsat 7, IKONOS), a szczególnie rozpowszechnienie hiperspektralnych skanerów obrazujących umieszczanych na platformach lotniczych (AVIRIS, DAIS) daje podstawy do sądzenia, że w niedalekiej przyszłości, wielkoskalowe (w randze zespołu i niższej) badania roślinności wysokogórskiej „z lotu ptaka”, z zastosowaniem zautomatyzowanych metod cyfrowego przetwarzania obrazów będzie zadaniem wymagającym, ale realnym. Dynamiczny rozwój technologiczny, jak również szerokie i komercyjne rozpowszechnienie zdjęć lotniczych i satelitarnych doprowadziły do znacznego obniżenia kosztów badań teledetekcyjnych, nierzadko do sum niższych niż w przypadku prowadzenia badań metodami tradycyjnymi, a w szczególności czasochłonnymi i kosztochłonnymi prac terenowych. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że badania teledetekcyjne w dużej mierze zastępują żmudne badania terenowe, ale ich nie eliminują; wręcz przeciwnie, konieczna jest kalibracja i weryfikacja analiz teledetekcyjnych na podstawie gruntownych, ale punktowych badaniach terenowych. Interdyscyplinarny charakter zaprezentowanego projektu badawczego potwierdza, że profesjonalne kartowanie roślinności metodami teledetekcji wymagałoby współpracy specjalistów z zakresu teledetekcji, geobotaniki i kartografii.

Literatura

- Balcerkiewicz S., 1984: Roślinność wysokogórska Doliny Pięciu Stawów Polskich w Tatrach i jej przemiany antropogeniczne. Wyd. Nauk. UAM Poznań, Ser. *Biologia*, 25, 1–191.
- Balcerkiewicz S., Wojterska M., 1978: Sigmassoziationen in der Hohen Tatra [in:] *Assoziationskomplexe (Sigmeten)*, R. Tüxen, Ber D. (red.), Intern. Symp. D. Intern. Vereinigung f. Vegetationskunde, J. Cramer, Vaduz, 161–177.
- Bielecka E., 1980: *Dynamika wybranych komponentów środowiska geograficznego Tatr w świetle analizy zdjęć lotniczych oraz analitycznych opracowań fotogrametrycznych*. Warszawa, [maszynopis].
- Bielecka E., 1986: Photointerpretation survey of changes in the range of the Tatra subalpine forests. *Miscellanea Geographica*. Warszawa.
- Bielecka E., Fedorowicz-Jackowski W., Witkowska E., 1994: *An integrated geographical information system for management of the national and landscape parks, nature reserves and other protected areas. GIS for environment, Pilot Study for the Tatra National Park*, Proceedings of the IALE Conference (Kraków, 25–27 XI 1993), Warsaw, October, 1993.
- Braun-Blanquet J., 1964: *Pflanzensoziologie*, 3rd ed. Springer Verlag, Wien.
- Chapelle E.W., Frank M.W. Jr, Newcomb W.W., McMurtrey J.E. III, 1985: Laser-induced fluorescence of green plants. 3: LIF spectral signatures of five major plant types. *Applied Optics*, vol. 24, no. 1.
- Curtis J.T., 1959: *The vegetation of Wisconsin: an ordination of plant communities*. University of Wisconsin Press, Madison.
- Eastman, J.R., 1992: *IDRISI: A Grid-Based Geographic Analysis System. Version 4.0*. Worcester, Massachusetts: Clark University, Graduate School of Geography.
- ERDAS Field Guide, v. 8.2, 1993, Erdas Inc., Atlanta, Georgia.
- Falińska K., 1996: *Ekologia roślin*, PWN.
- Faliński J. B., 1990: *Kartografia geobotaniczna*, PPWK im. Eugeniusza Romera, Warszawa-Wrocław.
- Gausman H.W., 1974: Leaf Reflectance of Near-Infrared. *Photogrammetric Engineering*, vol. 40, 183–191.
- Greig-Smith P., 1964: *Quantitative Plant Ecology*, Butterworths & Co., London.
- Jakomulska A., 1998a: Comparison of structure of mountainous environments of Loch Coruisk Valley (Skye, Scotland) and The Five Lakes Valley (The Tatra Mountains). *Miscellanea Geographica*, vol. 8, Warszawa.
- Jakomulska A., 1998b: Kartowanie wysokogórskiej roślinności Tatr metodami teledetekcji i fizjologii roślin. *Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji*, t. 26, PTG KTŚ, Warszawa.
- Jakomulska A., 1999a: Przystosowania a spektralna charakterystyka gatunków wysokogórskich: *Juncus trifidus*, *Luzula spadicosa* i *Calamagrostis villosa*. Oszacowanie możliwości zdalnej identyfikacji roślinności wysokogórskiej. [w:] *Badania geoekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu*, A. Kotarba (red.), *Prace Geograficzne IGIPZ PAN*, 174 [w druku].
- Jakomulska A., 1999b: Zastosowania logiki rozmytej w klasyfikacji nadzorowanej. *Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji*, t. 27, PTG KTŚ, Warszawa.
- Jakomulska A., 1999c: *Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr w świetle badań teledetekcyjnych*. Praca doktorska wykonana w Zakładzie Teledetekcji Środowiska WGiSR UW pod kierunkiem dra hab. Jana R. Olędzkiego [maszynopis].

←

Ryc. 17. Wyniki klasyfikacji przeprowadzonej metodą logiki rozmytej

Fig. 17. Results of fuzzy classification

- Kozłowska A., 1999: Problemy kartowania roślinności wysokogórskiej w skali szczegółowej (na przykładzie map roślinności Kotła Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego), [w:] *Badania geoeekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu*, A. Kotarba, A. Kozłowska (red.), *Prace Geograficzne IGiPZ PAN*, 174.
- Kozłowska A., Jakomulska A., 1999: Struktura przestrzenna roślinności Kotłów Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego, [w:] *Badania geoeekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu*, A. Kotarba, A. Kozłowska (red.), *Prace Geograficzne IGiPZ PAN*, 174.
- Kozłowska A., Rączkowska Z., Jakomulska A., 1999: Roślinność jako wskaźnik morfodynamiki stoku wysokogórskiego, [w:] *Badania geoeekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu*, A. Kotarba, A. Kozłowska (red.), *Prace Geograficzne IGiPZ PAN*, 174.
- Kurnatowska A., 1995: *Analiza struktury środowiska przyrodniczego wybranych terenów górskich (Dolina Pięciu Stawów Polskich i Dolina Loch Coruisk), z wykorzystaniem Geograficznych Systemów Informacyjnych*. Praca magisterska wykonana w Zakładzie Kompleksowej Geografii Fizycznej WGiSR UW, pod kierunkiem prof. dra hab. Andrzeja Richlinga [maszynopis].
- McVean D.N., Ratcliffe D.A., 1962: *Plant communities of the Scottish Highlands*. London.
- Pawłowski B., Sokołowski M., Wallisch K., 1928: Zespoły roślin w Tatrach. VII. Zespoły roślinne i flora doliny Morskiego Oka, *Bull. Acad. Polon. Ser. B., Suppl. II*.
- Peddie D.R., 1993: An empirical comparison of evidential reasoning, linear discriminant analysis and maximum likelihood algorithms for alpine land cover classification, *Can. J. Remote Sensing*, 19, 31–44.
- Piękoś-Mirkowa H., Mirek Zb., 1996: Szata roślinna Tatr Polskich — stan poznania, potrzeby i perspektywy badań, *Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji: Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek*, t. 2, Biologia, A. Kownacki (red.), Kraków–Zakopane.
- Seidel K., Ade F., Lichtenegger J., 1983: Augmenting Landsat MSS data with topographic information for enhanced registration and classification, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-21(3), 252–258.
- Szafer W., Pawłowski B., Kulczyński S., 1923: Zespoły roślin w Tatrach. Cz. I. Zespoły roślin w dolinie Chochołowskiej, *Bull. Int. Acad. Pol. des Sc. et des Lettr. C. Math. et Nat. B. Sc. Nat. Suppl.*, 1–66.
- Szafer W., Pawłowski B., Kulczyński S., 1927: Zespoły roślin w Tatrach. Cz. III. Zespoły roślin w dolinie Kościeliskiej, *Bull. Acad. Polon. Ser. B, Suppl. II*.
- Širjaev E.E., 1977: *Novye metody kartograficeskogo obozrazhenija i analiza geoinformacii s primeneniem EVM*. Moskwa, Izd. „Nedra”.
- Trafas K. (red.), 1985: *Atlas Tatrzańskiego Parku Narodowego*, Tatrzański Park Narodowy i Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi, Zakopane–Kraków.



Dr Anna Jakomulska jest absolwentką Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Studia magisterskie ukończyła w Zakładzie Geoeekologii, natomiast Studium Doktoranckie WGiSR — w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Interesuje się zagadnieniami metodyki analizy struktury środowiska i technikami cyfrowego przetwarzania obrazów, a szczególnie zastosowaniem SIG, teledetekcji i geostatystyki

w wielkoskalowym kartowaniu roślinności. Jej pasją są środowiska wysokogórskie. Dr Anna Jakomulska uzyskała stypendium naukowe Fundacji Fulbrighta w National Center of Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara, w ramach którego prowadzi obecnie badania dotyczące spektroskopii roślinności, analizy materiałów teledetekcyjnych o wysokiej rozdzielczości spektralnej, geometrycznej i radiometrycznej oraz zaawansowanych technik klasyfikacji obrazów.

Dr. Anna Jakomulska holds the B.A. and Ph. D. degrees from University of Warsaw, Faculty of Geography and Regional Studies. She received her B.A. from Department of Geoecology and Ph.D. from Remote Sensing of Environment Laboratory, specializing in large-scale environmental analysis using GIS and remote sensing techniques. Her interests focus on techniques and applications of GIS, remote sensing and geostatistics in large-scale vegetation mapping. Her passion are mountain environments. Dr. Jakomulska has been awarded Fulbright Commission grant at the National Center for Geographic Information and Analysis, University of California, Santa Barbara. Her most recent research has been on plant spectroscopy, analysis of data of high spectral, spatial and radiometric resolution and advanced methods of image classification.

Adres: National Center for Geographic Information and Analysis University of California, Santa Barbara Department of Geography 3510 Phelps Hall Santa Barbara, CA 93106-4060, phone: (805) 8938652, fax: (805) 8938617
anna@ncgia.ucsb.edu; szkocja@mercury.ci.uw.edu.pl