

The Volume Entirely Dedicated to Dr Anna M. Jakomulska

Tom w całości poświęcony dr Annie M. Jakomulskiej



Anna Maria Jakomulska 1970 – 2002

Dr Anna Maria Jakomulska, z domu Kurnatowska, odeszła od nas 16 sierpnia 2002 roku. Była początkującym młodym naukowcem, przed którą otwierała się wielce obiecująca kariera naukowa. Swoją drogę zgłębiania problemów naukowych w zakresie geografii rozpoczęła już w latach 1985–1989 w LX Eksperymentalnym Liceum Ogólnokształcącym w Warszawie – o profilu matematyczno-geograficznym. Wybierając naukę w tym liceum kierowała się zapewne intuicją wspartą mądrą radą rodziców, że uprawianie geografii w przyszłości będzie musiało być oparte o solidne podwaliny matematyczne.

Po ukończeniu Liceum podjęła studia na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Jako specjalizację magisterską obrała geografię fizyczną i seminarium w Zakładzie Kompleksowej Geografii Fizycznej. Wykonała tu pracę dyplomową, pod kierunkiem prof. dr hab. Andrzeja Richlinga, na temat: *Analiza struktury środowiska przyrodniczego wybranych terenów górskich (Dolina Pięciu Stawów Polskich w Tatrach i Dolina Loch Coruisk w Szkocji) z wykorzystaniem systemów informacji geograficznej.* Po złożeniu egzaminu magisterskiego w roku 1995 roku uzyskała stopień magistra geografii w zakresie geografii fizycznej. Jej praca magisterska uzyskała II nagrodę w I Konkursie Prac Magisterskich z zakresu ekologii krajobrazu, organizowanym przez Polską Asocjacją Ekologii Krajobrazu (Warszawa, 17 V1996) oraz wyróżnienie w XII Konkursie Prac Magisterskich z zakresu geografii Polskiego Towarzystwa Geograficznego (Warszawa, 24 V 1996). Przy wykonywaniu pracy dyplomowej nabyła pierwsze doświadczenia w prowadzeniu badań. w ramach współpracy międzynarodowej, przebywając w latach 1992–1993 w Wielkiej Brytanii w University of Greenvich School of Environment Sciences w Londynie (stypendium Fundacji TEMPUS). Ten sposób badań rozwinęła w następnych latach, w czasie studiów doktoranckich i po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.

Studia doktoranckie odbywała również na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Jej zainteresowania skupiały się wokół badań roślinności wysokogórskiej w Tatrach, z zastosowaniem metod teledetekcji. Można powiedzieć, że metody teledetekcji i geoinformacji zafascynowały ja. Pogłebiała swoją wiedze w tym zakresie poprzez udział w seminariach i szkoleniach: w firmie ESRI-Polska (1995): szkolenie w zakresie systemów informacji geograficznej (ARC/INFO), a następnie w firmie Geosytems-Polska (ERDAS-Imaging) oraz w ramach stypendium European Science Foundation i National Science Foundation (Second Summer Institute on Geographic Information - GIS-DATA-NCGIA). w zakresie fotogrametrii cyfrowej w firmie Vision International w Warszawie (1996), a w zakresie zastosowań teledetekcji w badaniach środowiskowych i archeologicznych w Londynie w Hunting Technical Services Limited (1996) oraz na kursie organizowanym przez Zakład Teledetekcji Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego i Klub Teledetekcji Środowiska Polskiego Towarzystwa Geograficznego w Szymbarku (1999), prowadzonym przez profesora Henri Aldersa z Delft University of Technology, Faculty of Geodetic Engineering z Holandii. W roku 2000 przeszła przeszkolenie w zakresie metodyki interferometrycznej analizy obrazów mikrofalowych w ESRIN we Frascati, we Włoszech. Studia doktoranckie uzupełnione wyżej wymienionymi szkoleniami zaowocowały wykonaniem, pod opieka prof. dr hab. J.R.Oledzkiego, bardzo dobrej pracy doktorskiej na temat: Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr w świetle badań teledetekcyjnych, którą obroniła w dniu 22 czerwca 1999 roku, uzyskując stopień doktora Nauk o Ziemi w zakresie geografii. Za rozprawę tą uzyskała w roku 2000 nagrodę Rektora Uniwersytetu Warszawskiego.

Bedac jeszcze na studiach doktoranckich aktywnie właczyła się w krajowe i międzynarodowe życie naukowe poprzez aktywny udział w konferencjach teledetekcyjnych, geoinformatycznych i geograficznych. Były to następujące konferencje i spotkania robocze: "Joint European Conference and Exhibition and Geographical Information" (Wiedeń, Austria, 1997), XVI Ogólnopolska Konferencja Fotointerpretacji i Teledetekcji (Szymbark, Polska, 1997); 18. Sympozjum EARSeL'a "Operational Remote Sensing for Sustainable Development" (Enschede, Holandia, 1998), XVII Ogólnopolska Konferencja Fotointerpretacji i Teledetekcji (Szymbark, Polska, 1998); Ogólnopolska Konferencja zorganizowana przez Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego "Geografia na przełomie wieków jedność w różnorodności" (Warszawa, 1998); 19. Sympozjum EARSeL'a "Remote Sensing in the 21st century: Economic and Environmental Applications" (Valladolid, Hiszpania, 1999), a także w dorocznej konferencji National Center of Geographic Information Analysis – NCGIA (Santa Barbara, USA, 1999), uczestniczyła w pracach grupy roboczej STATMOD, w zakresie zastosowań statystyki w badaniach ekologicznych (Santa Barbara, USA, od listopada 1999 do czerwca 2000 roku); GeoENV200 w Avignon (Francja, 2000); 21 Sympozjum EARSeL'a "Observing our Environment from Space: New Solutions for a New Millennium" (2001); Seminarium polsko słowacko-czeskie, na temat "Teoretycznych i metodologicznych aspektów przestrzeni geograficznej – na przełomie wieków" (Cierszew k/ Płocka, Polska, 2001), konferencja "Uncertainty in Remote Sensing and GIS", zorganizowana przez University of Southampton (Wielka Brytania, 2001), oraz I Sympozjum "Geoinformacja Zintegrowanym Narzędziem Badań Przestrzennych" (Wysowa, Polska, 2001).

Dzięki wysokiemu poziomowi prowadzonych przez nią badań uzyskała szereg stypendiów naukowych, z których najbardziej prestiżowym było stypendium Fundacji Fulbrighta. Pozwoliło ono na prowadzenie pogłębionych studiów i branie udziału w badaniach z zastosowaniem wyrafinowanych metod ilościowych w zastosowaniu teledetekcji w badaniach geoekologicznych. W ramach tego stypendium przebywała w latach 1999–2000 na Uhniwersytecie Kalifornijskim w Santa Barbara (USA), na Wydziale Geografii. Drugim wielce prestiżowym stypendium naukowym było stypendium dla młodych naukowców, przyznane jej przez Fundację Rozwoju Nauki Polskiej na lata 2001–2003, z którego do końca już niestety nie skorzystała. Inne Jej stypendia, w porządku chronologicznym to: stypendium w programie TEMPUS, studia w University of Greenwich School of Environmental Sciences w Londynie (1992–1993); Stypendium European Science Foundation i National Science Foundation (Niemcy, 1995), umożliwiające jej miesięczny pobyt w Instytucie Geoinformatyki w Berlinie; Stypendium Uniwersytetu Warszawskiego umożliwiające miesięczny pobyt na Uniwersytecie w Amsterdamie, na Wydziale Nauk o Środowisku (1999).

Pomimo krótkiego okresu pracy zawodowej, rozpoczęła ją 1 października 2000 roku jako adiunkt w Zakładzie Teledetekcji Środowiska Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, była bardzo aktywnym nauczycielem akademickim. Przygotowała samodzielnie lub współuczestniczyła w realizacji 6. przedmiotów, a mianowicie, dla specjalizacji magisterskiej Teledetekcja Środowiska: "Podstawy do cyfrowego przetwarzania, obrazów" (wykłady i ćwiczenia); "Przetwarzanie obrazów cyfrowych" – kurs II stopnia (wykłady i ćwiczenia), "Rozwój technik teledetekcyjnych" (wykład), "Wstęp do Systemów Informacji Geograficznej" (wykłady i ćwiczenia), "Zastosowanie teledetekcji i SIG w ekologii krajobrazu" – wykłady i ćwiczenia dla specjalizacji magisterskiej – geoekologia, "Radiometria, biometria i fizjologia roślin" w ramach kursu terenowego "Zintegrowane techniki pomiarowe" – teledetekcja dla studentów ochrony środowiska Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego. Wykształciła dwoje magistrów geografii. Była również opiekunka trzech następnych prac magisterskich, których ukończenia już nie doświadczyła.

Wysoki poziom wykonywanych przez nią badań, doświadczenie we współpracy międzynarodowej, łatwość w kontaktach interpersonalnych stworzyły przesłanki do powołania jej do szeregu naukowych organizacji profesjonalnych. I tak w ciągu krótkiej i tragicznie zakończonej kariery naukowej była Członkiem Zarządu Klubu Teledetekcji Środowiska Polskiego Towarzystwa Geograficznego, delegatem Zakładu Teledetekcji Środowiska Uniwersytetu Warszawskiego do kontaktów z Europejskim Stowarzyszeniem Laboratoriów Teledetekcyjnych (EARSeL), Członkiem Komisji Teledetekcji Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych przy Prezydium Polskiej Akademii Nauk oraz członkiem Rady Programowej czasopisma Teledetekcja Środowiska d. Fotointerpretacja w geografii.

Do chwili swojej śmierci kierowała polską częścią wielkiego międzynarodowego projektu badawczego HYSENS, którego była główną projektantką i animatorem. Projekt ten dotyczył wykorzystania technologii hiperspektralnej w badaniu zbiorowisk roślinnych w Tatrach i na Pogórzu Gorlickim. Kierowała również projektem badawczym "Analiza spektralnych właściwości roślinności naziemnymi systemami teledetekcyjnymi". Celem tego projektu było szczegółowe rozpoznanie właściwości spektralnych roślin. W wyniku tego rozpoznania możliwe byłoby w przyszłości zautomatyzowanie identyfikacji i kartowania roślinności na podstawie obrazów hiperspektralnych. Bezpośrednim efektem miało być opracowanie "biblioteki spektralnej" powszechnych oraz uprawnych, a także rzadkich (chronionych) w Polsce gatunków roślin oraz tworzonych przez nie zbiorowisk miały się również znaleźć dane o stanie zdrowotnym roślinności. Prace badawcze były tak zaprojektowane, aby mogły być porównywalne z podobnymi badaniami prowadzonymi za granicą. Gwarancją tego był udział, w pierwszej serii badań terenowych prowadzonych w Tatrach w pierwszej połowie sierpnia 2002 roku, którymi Anna kierowała osobiście, licznej ekipy z Niemiec. Badania te są kontynuowane przez zespół Zakładu Teledetekcji Uniwersytetu Warszawskiego.

Wśród innych tematów badawczych, które zaczynała realizować były: "Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w klasyfikacji tekstury obrazów teledetekcyjnych"; "Zastosowania geostatystyki w teledetekcji (problemy: skali, klasyfikacji tekstury obrazów i analizie struktury obiektów)" oraz "Zastosowanie analizy decyzyjnej drzewa binarnego w przewidywaniu występowania określonych zbiorowisk roślinnych i kartowaniu roślinności".

Oprócz niesłychanej, jak z powyższego wynika, aktywności zawodowej, była osobą, która znajdywała czas na życie prywatne, byłą mężatką, aktywnie uprawiała turystyką wysokogórską, rowerową. Właśnie w trakcie wycieczki rowerowej, na drodze leśnej na Roztoczu, zginęła tragicznie razem z mężem w wyniku rażącej nieodpowiedzialności kierowcy prowadzącego niesprawny technicznie samochód ciężarowy. Uprawiała również nurkowanie, windserfing, wykonywała przepiękne fotografie krajobrazowe, interesowała się klasyczną muzyką gitarową.

Jej śmierć dla polskiej teledetekcji i geoinformacji, a śmiem twierdzić dla całej polskiej geografii w XXI wieku jest niepowetowaną stratą. Niech ten tom zawierający tekst Jej pracy doktorskiej przyczyni się do pamięci o Niej, a także niech skłoni młode pokolenie wchodzące w życie naukowe, do wytężonego wysiłku w śmiałym sięganiu po sukcesy w pracy badawczej i dydaktycznej.

Jan R.Olędzki

Curriculum Vitae

Personal data:	
Names:	Anna Maria
Last name:	Jakomulska
Maiden name:	Kurnatowska
Date of birth:	29 VIII 1970
Date of Death:	16 VIII 2002
Professional experience	<i>record:</i> Warsaw University, Faculty of Geography and Regional Studies
IX 2001 to 16 VIII 2002	Remote Sensing of Environment Laboratory adjunct (research and education)
1995–1997	ESRI Poland, GIS specialist, international project co-ordinator (EGIS, COPESTAT)
Education:	
1005 1000	Doctoral Studies
1990–1999	Parata Songing of Environment Laboratory
1002 1003	University of Greenwich School of Environmental Sciences London, Great Britain
1332-1333	Masters Program
1993-1995	Department of Geoecology Faculty of Geography and Regional Studies
1000 1000	Warsaw University
1989–1992	Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw University,
1985–1989	Experimental High School No. LX in Warsaw, mathematical-geographical
	specialisation
Scolarships	
2001	The Foundation for Polish Science. The Stipend for Young Scientists FNP'01
IX 1999–VIII 2000	University of California Santa Barbara, Department of Geography, USA National Center of Geographic Information Analysis, Fulbright Scholarship
IX 1999	University of Amsterdam, Faculty of Environmental Sciences Scholarship granted by University of Warsaw
VII 1995	GIS-DATA/NCGIA Second Summer Institute on Geographic Information Berlin, Germany. Scholarship granted by European Science Foundation and National
IX 1992–VI 1993	University of Greenwich School of Environmental Sciences London, Great Britain, scholarship within TEMPUS program
Prizes:	
XI 2000	Prize for outstanding doctoral thesis (rewarded by Rector of Warsaw University)
V 1996	II prize in the 1 st competition in Master Theses within landscape ecology
	(rewarded by Polish Association of Landscape Ecology, division of PAEK)
V 1996	Prize in XII Competition of Master Theses within Geography (rewarded by General Assembly of Polish Geographical Association)
Professional courses:	
XI 2000	Interferrometry, ESRIN, Frascati, Italy
II 1999	GIS Technology, Szymbark, prof. Henri Aalders (Delft University of Technology,
	Faculty of Geodetic Engineering)
	VI 1996 – Remote sensing in environmental and archaeological research London,
II 1000	Great Britain, Hunting Technical Services Limited
11 1996 NI 1005	Digital photogrammetry (Softplotter) Warsaw, Vision International
AI 1990 I II 1005	Remote sensing and GIS (ERDAS Imagine) Warsaw, Geosystems Polska
1-11 1995	GIO (ARU/INFU) Warsaw, EORI POISKa
Conferences and working	g groups:
VII 2001	Uncertainty in Remote Sensing and GIS University of Southempton

VII 2001Uncertainty in Remote Sensing and GIS, University of SouthamptonV 200121st EARSeL Symposium: "Observing our Environment from Space: New Solutions
for a New Millennium"

XI 2000	GeoENV200, Avignon, France
XI 1999–VI 2000	National Center for Ecological Analysis and Synthesis - working group
	Statmod: research within application of statistics and scale issues in ecology
	Santa Barbara, CA, USA
XII 1999	National Center of Geographic Information Analysis - NCGIA yearly
	conference, Santa Barbara, CA, USA
V 1999	EARSeL/ISPRS Symposium: "Remote Sensing in the 21st century: Economic
	and Environmental Applications", Valladolid, Spain
VI 1998	"Geography in the New Millennium", Warsaw
VI 1998	XVII Polish Conference on Remote Sensing and Photointerpretation,
	Szymbark, Polen
V 1998	EARSeL/NSEOG Symposium: "Operational Remote Sensing for Sustainable
	Development", Enschede, Netherlands
IV 1997	Joint European Conference and Exhibition and Geographical Information,
	Vienna, Austria
VI 1998	XVI Polish Conference on Remote Sensing and Photointerpretation,
	Szymbark, Polen

Membership in professional organisations:

- Polish Geographical Association, Club of Remote Sensing of Environment
- European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL)
- Polish Academy of Sciences Commission on Remote Sensing within Committee of Satellite and Cosmic Research
- Scientific Board of the Teledetekcja Środowiska [Remote Sensing of Environment] journal

Teaching Experience

- Digital Image Processing (Lecture and Lab)
- Advanced Digital image processing (Lecture and Lab)
- Advances in Remote Sensing Techniques (Lecture)
- Introduction to GIS (Lecture and Lab)
- Application of Remote Sensing and GIS in Landscape Ecology (Lecture and Lab)
- Integrated field measurement techniques (radiometry, plant physiology, biometrics)
- Supervision of 5 Master Theses

Current research interests and projects

- Application of artificial neural network in textural image classification
- Decision Binary Trees in vegetation prediction and mapping
- Geostatistical applications in Remote Sensing (problems of scale, textural classification, object structure analysis)

$Personal\ interests$

- high mountain hiking, trekking
- sailing, scuba diving, windsurfing
- photography
- classic guitar music

List of Recent Publications Wykaz publikacji

- Kurnatowska A., 1998, Analysis of environmental structure and changes in mountain environments with the help of GIS and statistical methods, [in:] Craglia M., Onsrud H., Geographic Information Research: transatlantic perspectives, Proceedings of ESF GISDATA/NCF NCGIA Second Summer Institute, Taylor & Francis, London.
- Jakomulska A., 1998, Comparison of structure of mountainous environments of Loch Coruisk Valley, Skye, Scotland and The Five Lakes Valley, The Tatra Mountains, carried out with the help of GIS methods, "Miscellanea Geographica", 1998, vol. 8, Warsaw.
- Jakomulska A., 1998, *Kartowanie wysokogórskiej roślinności Tatr metodami teledetekcji i fizjologii roślin* [Mapping mountainous vegetation in the Tatra Mountains using remote sensing and plant physiology techniques],"Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji", vol. 27, PTG KTŚ, Warszawa.
- Jakomulska A., 1999, *Teledetekcja a problemy kartowania wysokogórskiej roślinności Tatr* [Alpine Vegetation Mapping in the Tatra Mountains using Remote Sensing], "Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji", vol. 29, PTG KTŚ, Warszawa.
- Jakomulska A., 1999, Zastosowania logiki rozmytej w klasyfikacji nadzorowanej [Applications of fuzzy logic in supervised image classification], "Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji", vol. 27, PTG KTŚ, Warszawa.
- Jakomulska A., 1999, Przystosowania a spektralna charakterystyka gatunków wysokogórskich: Juncus trifidus, Luzula spadicea i Calamagrostis villosa. Oszacowanie możliwości zdalnej identyfikacji roślinności wysokogórskiej [Physiology and Spectral Signatures of the Alpine Species: Juncus trifidus, Luzula spadicea and Calamagrostis villosa. Assessment of Potential for Remote Identification of Vegetation in High-Mountain Environments], [in:] A. Kotarba, A. Kozłowska (eds), Badania Geoekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu [Geoecological research in the Kasprowy Wierch Area], "Prace Geograficzne", vol. 174, Wrocław.
- Kozłowska A., Rączkowska A., Jakomulska A., 1999, Roślinność jako wskaźnik morfodynamiki stoku wysokogórskiego [Vegetation as an Indicator of Morphodynamics on a High-Mountain Slope], [in:] A. Kotarba, A. Kozłowska (eds), Badania Geoekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu [Geoecological research in the Kasprowy Wierch Area], "Prace Geograficzne", vol. 174, Wrocław.
- Kozłowska A., Jakomulska A., 1999, Struktura przestrzenna roślinności Kotłów Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego [The Spatial Structure of the Vegetation of Kocioł Gąsienicowy and Kocioł Goryczkowy Świński], [in:]
 A. Kotarba, A. Kozłowska (eds), Badania Geoekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu [Geoecological research in the Kasprowy Wierch Area], "Prace Geograficzne", vol. 174, Wrocław
- Jakomulska A., 1999, Wielkoskalowe badania roślinności alpejskiej Tatr z wykorzystaniem metod z zakresu teledetekcji i fizjologii roślin [Large scale alpine vegetation mapping in the Tatra Mts using remote sensing and plant physiology methods], [in:] Geografia na przełomie wieków – Jedność w różnorodności, Materiały konferencyjne (Proceedings of the conference 'Geography at the Millennium. Unity in Diversity'), Warszawa.
- Kurnatowska A., 1999, Large scale vegetation mapping in mountain environments using remote sensing and plant plysiology methods, Proceedings of EARSeL/NSEOG Symposium: "Operational Remote Sensing for Sustainable Development", 11–14 maj, 1998, Enschede.
- Jakomulska A., Clarke K.C., 2000, Variogram-derived measures of textural image classification. Application to large-scale vegetation mapping. In: *Geostatistics and Quantitative Geology*, Kluwer Academic Publishers
- Rosenberg M.S., Citron-Pousty S., Dungan J., Jakomulska A., Liebhold A. M., Miriti M., Perry J., 2001 [in press], Illustration and Guidelines for Selecting Statistical Methods for Quantifying Spatial Patterns in Ecological Data, [in:] Ecography: "Integrating the Statistical Analysis of Spatial Data in Ecology".
- Dungan J., Citron-Pousty S., Dale M., Fortin M.-J., Jakomulska A., Miriti M., Perry J., Rosenberg M.S., 2001, Effect of Change of Scale (Support), [in:] Ecography: "Integrating the Statistical Analysis of Spatial Data in Ecology".
- Jakomulska A., Sobczak M., 2002, Korekcja radiometryczna obrazów satelitarnych metodyka i przykłady [Radiometric correction of satellite imagery – methods and exemplification], "Teledetekcja Srodowiska d. Fotointerpretacja wgeografii, vol. 32, PTG KTŚ, Warszawa.
- Jakomulska A., Radomski J., 2002, Assessment of neural network, textural image classification algorithm performance for classification of medium resolution data, [in:] P. Atkinson, Foody G., Uncertainty in Remote Sensing and GIS, John Wiley & Sons, Chichester.
- Jakomulska A., Stawiecka M., 2002, *Integrating spectral and textural information derived from passive and active systems. Application for land cover mapping*, Proceedings of EARSeL/NSEOG Symposium: "Observing our Environment from Space. New Solutions for a new Millennium".
- Zagajewski B., Jakomulska A., Traut A., 2002, Field remote sensing investigation of protected areas (Siwica Reserve). Analysis of vegetation condition based on NDVI, LAI, APAR and plant surface temperature indices, "Miscellanea Geographica", vol. 10. Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw University, Warsaw.
- scellanea Geographica", vol. 10, Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw University. Warsaw. Ciołkosz A., Jakomulska A., 2003, *Przetwarzanie cyfrowych zdjęć satelitarnych* (Processing of digital satellite Images), Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Jakomulska A., 2003, Warsaw from space application of geostatistics for analysis of urban areas, [in:] A. Kowalczyk, Theoretical and Methodological Aspects of Geographical Space at the Turn of Century, Warsaw University, Faculty of Geography and Regional Studies, Warsaw.

^ · · ·	a •	
Contents	– Spis	tresci

In Memory of Anna M. Jakomulska Wspomnienie	3
Curriculum Vitae	6
List of Recent Publictations Wykaz publikacji	8

Differentiation of the Alpine Vegetation of the Tatra Mountains in the light of Remote Sensing Research

Introduction Wstęp	11
Purpose and Scope of Research <i>Cel i zakres badań</i>	11
Methodology of Research Metodyka badań	12
Working Hypothesis Hipoteza robocza	13
Trends and Problems of Remote Sensing and of Alpine Vegetation Cartography Kierunki i problemy teledetekcji i kartografii roślinności wysokogórskiej	13
Remote Sensing of Vegetation Teledetekcja roślinności	14
Remote Sensing of Alpine Environments Teledetekcja środowisk wysokogórskich	
Remote Sensing Research in the Tatra Mountains Badania teledetekcyjne w Tatrach	15
Structure of Vegetation and Problems of Phytosociological Cartography Struktura roślinności a problemy kartografii fitosocjologicznej	15
Applications of Fuzzy Logic in Remote Sensing of Vegetation Zastosowania logiki rozmytej w teledetekcji roślinności	
Conclusions Wnioski	
Characteristics of the Area and of the Objects of Research Charakterystyka obszaru i obiektów badań	
Character of the Vegetation Cover of the Tatra Mountains Charakter szaty roślinnej Tatr	17
Alpine Vegetation and Flora Roślinność i flora wysokogórska	
Characteristics of Plant Communities under Research Charakterystyka badanych zbiorowisk roślinnych	
Characteristics of Species under Research Charakterystyka badanych gatunków	
Intensity and Spectral Constitution of Solar Radiation Nateżenie i skład spektralny promieniowania słonecznego	
Location of Testing Fields Położenie poligonów badawczych	21
Characteristics of Materials Used Charakterystyka wykorzystanych materiałów	23
Remote Sensing Materials Materiały teledetekcyjne	23
An Air Image Zdjęcia lotnicze	23

A Satellite Image	23
Cartographic Source Materials	23
Methods of Research25	
Large Scale Ground Research	25
Wielkoskalowe badania naziemne	. 20
Integrated Measurements from the Field of Physiology of Plants, Biometry and Remote Sensing Zintegrowane pomiary z zakresu fizjologii roślin, biometrii i teledetekcji	. 25
Analysis of Ground Photographs Analiza zdieć naziemnych	27
Digital Processing of Air and Satellite Images	30
Cyfrowe przetwarzanie zdjęć lotniczych i satelitarnych	
Interpretation of the Results of Ground Research Interpretacja wyników badań naziemnych	. 36
Results of Fiels Research	. 36
Wyniki badań terenowych	
Results of Cameral Elaborations Wyniki opracowań kameralnych	. 43
An Attempt to Extrapolate the Results of Ground Investigations of Air and Satellite Images Próba ekstrapolacji wyników badań naziemnych na zdjęciach: lotnicze i satelitarne	. 44
Supervised Classification of an Air Images	. 44
Klasyfikacja nadzorowana zdjęcia lotniczego	47
Supervised Classification of a Satellite Image Klasyfikacia nadzorowana zdiecia satelitarnego	. 41
Problem of Community Complexes and Zonal Borders	. 59
Problem kompleksów zbiorowisk i granic zonalnych	
Problem of Mixed Pixels Problem pikseli mieszanych	. 59
Problem of Generalization	. 59
Problem generalizacji	
Assessment of Usefulness of Currently Accessible Remote Sensing Materials in the Research	59
Ocena przydatności obecnie dostępnych materiałów teledetekcyjnych do badań roślinności wysokogórskiej	. 00
Assessment of the Application of Fuzzy Logic in the Classification	. 61
Ocena zastosowania logiki rozmytej w klasyfikacji	
Summary of the Results of the Research and Discussion Podsumowanie wyników badań i dyskusja	. 64
Differentiation of the Investigated Species in the Light of Research within the Range of Physiology of Plants	. 64
Zróżnicowanie badanych gatunków w świetle badań z zakresu fizjologii roślin	
Differentiation of the Investigated Communities in the Light of Remote Sensing Research Zróżnicowanie badanych zbiorowisk w świetle badań teledetekcyjnych	64
Assessment of Usefulness of Remote Sensing in Alpine Vegetation Mapping Oszacowanie przydatności teledetekcji w kartowaniu roślinności wysokogórskiej	. 64
Literature Bibliografia	. 68
Zróżnicowanie wysobogórskiej roślinności Tatr w świetle badań teledetelewinych	79
Στο στικο φαιτικά τη χροκό ματική το διατικά στα τη τη τη διατική τη από τη από τη από τη από τη από τη από τη α	. 12

Differentation of the Alpine Vegetation of the Tatra Mountains in the Light of Remote Sensing Research

Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr w świetle badań teledetekcyjnych

Anna JAKOMULSKA

Introduction

Remote sensing is one of the fastest growing practical disciplines of modern geography. Numerous applications of photo-interpretation and of digital processing methods include such fields as geology, geomorphology, geography of soils, geochemistry, oceanography and hydrology, meteorology and climatology, geo-ecology, environment protection, town-planning, geography of transport, industry, agriculture and population, cartography, and also a range of geography-related fields, e.g.: archeology, phyto-sociology, botany, physiology of vegetation - examples could be multiplied here. Remote sensing finds special application in the survey of vegetation which is the component of a landscape, clearly visible on remote sensing materials. Possibilities of studying vegetation using remote sensing methods are wide, this is why phytosociologists postulate for wider use of remote sensing in vegetation research (Faliński, 1990; Küchler, Zonneveld, 1988). This does not, however mean that photo-interpretation of vegetation is a simple and not demanding research issue (Ciołkosz, Miszalski, Olędzki, 1986). Since remote sensing materials reflect all components of the environment, they constitute a "true model of the terrain" (Nikołajew, 1981). Phototone, structure and texture of an image are the resultant of all geo-components, however, impact of respective components and of their features upon the image recorded on remote sensing materials is not equal and depends on the character of the objects under examination (Olędzki, 1986, 1991). Interpretation features are also of different consequence depending on the scale of the research. In the choric scale vegetation is the indicator element.

Holistic look at the natural environment requires a complex and comprehensive analysis of respective geo-components and also their reciprocal relationships (Richling, 1993). For technical reasons, scrutiny of all components is not always possible. System methods and complexity may be however accomplished through the examination of one or several possible aspects of functioning of the natural environment. In the environment of high level of naturalness, such as high mountains, an indirect conclusion on abiotic components is enabled by the indicative character of vegetation. Therefore, vegetation analysis on remote sensing materials is in a special manner justified in geographic research.

Purpose and Scope of Research

Recognition and monitoring vegetation is an indispensable element of sensitive environments protection. Significant role of phyto-sociology in research of ecology of landscape was emphasized and widely justified by Matuszkiewicz (1974, 1981). In the environments which are little disturbed by man, such as high mountains, indicative character of vegetation is specially clear (Gottfried, Pauli, Grabherr, 1998; Jakomulska, 1998; Rączkowska, Kozłowska, 1994; Pietrzak, 1989).

Strong anthropopression in the Tatra Mountains expressed, among others, year by year by an increasing number of tourists visiting TPN (The Tatra's National Park) (currently about 2.4 M people per annum, diurnal attendance in peak periods: 20,000 people!, Czochański, 1995), and the project of having winter olympic games at Zakopane in 2006, emphasize the need of immediate preparation of a plan protecting TPN. This requirement is regulated by the law on environment protection of 1991, which obligates national parks to work out plans of protection. In the Tatra's National Park such works were undertaken in autumn 1994. One of the basic scientific elaborations of this plan is the "operat", a program for the protection of TPN's non forest ecosystems, within the framework of which foreseen was the elaboration of a map of the alpine and sub-alpine belt vegetation in the 1:10 000 scale. Completion of works was anticipated to take place within the period of three years however up till now they have not been completed because of the specific problems of traditional mapping of alpine vegetation.

The Tatra Mountains are the area well scrutinized, considering its flora (Piękoś-Mirkowa, Mirek, 1996). Nevertheless and despite of the fact that in Poland in the twenties the Tatras' vegetation cartography started just with the vegetation maps, there is still no detailed elaboration covering the area of all the Tatra's National Park. Maps of alpine vegetation are considered by the author of the vegetation cartography manual, J.B. Faliński (1990), as the most difficult type of vegetation maps. Methodical problems of alpine vegetation mapping arise from the nature of the mountain vegetation cover itself, which characterizes with high spatial versatility (a mosaic of small surface communities) and gradient (as differentiated from discreet) changes of vegetation, which are expressed by common occurrence of community complexes and borders of interim character. These reasons determine characteristic specifics of alpine vegetation maps: it is necessary to consider typological items of different ranks and communities of indirect phyto-sociological character in the legend (Curtis, 1959), and also items not fully formed and perennial community complexes (Kozłowska, 1999). Thus alpine vegetation mapping is impeded by two substantial problems. First refers to the difficulty of graphic presentation of community complexes, and second with recognition of communities of interim character. Method of cartographic presentation consists in laying several pieces of information within the limits of one separation on a map (the so called "pyjamas", presented on a map with a colour hachure), gives unsatisfying results and leads to distinguishing of a large number of units in the map legend, which lowers its readability. This problem is inseparably bound with the methodological problem of the typology of vegetation communities. Repeatedly emphasized by geo-botanists problem of seeking for a new way of presentation of alpine vegetation maps still seems to be a live issue (Faliński, 1990).

Field works connected with alpine vegetation map-

ping are additionally impeded and delayed by: short vegetative life, changeable weather and inaccessibility of many mountain-sides.

The area of all the Tatras' National Park is covered only by a vegetation map elaborated by the team: S. Myczkowski, H. Piękoś-Mirek, J. Baryła, published in the 1:50 000 scale in the TPN Atlas (Trafas, 1985). Maps in detailed scales were elaborated only for higher parts of chosen Tatra valleys: Chochołowska, Koście-liska and Morskie Oko in the 1:37 500 scale (Szafer, Pawłowski, Kulczyński, 1923, 1927; Pawłowski, Sokołowski, Wallisch, 1929), of Dolina Pięciu Stawów Polskich, in the scale of about 1:10 000 (Balcerkiewicz, Wojterska, 1984; Kurnatowska, 1995), of Pańszczycy, Gasienicowa, Goryczkowa and Kondratowa valleys in the scale 1:10 000 (Kozłowska¹) and of Kocioł Gasieniscowy and Goryczkowy Wierch in the scales: 1:1000 and 1:500 (Kozłowska, 1999). These maps originated from field mapping of various degree of minuteness of detail.

Thus it seemed beneficial to investigate the usefulness of remote sensing methods and materials for the research of alpine vegetation in a detailed scale. Both, methods of visual interpretation and digital processing of images allow for mapping flora of various formations (forest, shrubby, and grassy) in the mountains (Bielecka, 1980, 1986; Bielecka, Fedorowicz-Jackowski, Witkowska, 1994). The subject matter of this paper is evaluation of possibilities of delimitation of the common communities of the alpine and sub-alpine belts, at least in the rank of a set, on various remote sensing materials: ground largescale photographs, air and satellite images with the use of digital image processing methods.

Basic research was made on the terrain of the alpine part of Dolina Gąsienicowa (Gąsienicowa Valley) for which detailed, cartographic elaborations of vegetation do exist. This enabled using these maps for initial identification of communities under examination on remote sensing materials and for evaluation of the exactness of the performed analyses.

Methodology of Research

As the basis for evaluation adopted were methods and remote sensing materials for large-scale research of vegetation, as follows:

1) analysis of the possibility of remote identification of three typical and common alpine sets: *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* (alpine greenswards), *Luzuletum spadiceae* (herbaceous depositary communities) and *Calamagrostietum villosae tatricum* (grasso-phytes), dominant in the landscape of alpine and sub-alpine belt, and

2) evaluation of possibilities of automated mapping of sub-sets and complexes of these communities.

¹Not published materials, paper for the operate for the protection of non-forest ecosystems.

Differentation of the Alpine Vegetation of the Tatra Mts. ...

The first research problem is of a cognitive character. Research was conducted on several levels of minuteness of detail connected with the scale of research and type of methods and remote sensing materials used. Considering the fact that the analysis was made of communities of the same vegetation formation, of approximate physiognomy, a detailed analysis of species dominant in the communities under the research was adopted as a starting point. This included a laboratory analysis of these features and physiological adaptations of plants which have direct impact on the amount of reflection of electromagnetic radiation. It seemed advisable to proceed with the following measurements: assimilation pigments, fluorescence, transpiration and water contents in tissues. Observed essential functional versatility of species induced undertaking an analysis of spectral characteristics on the level of vegetation communities (dominated by the examined species). For this purpose point radiometric measurements of communities under study were performed.

Also, an attempt to determine the usefulness of quantitative differentiation of communities for their identification was undertaken. Performed were measurements of biomass and of a standardized NDVI – verdure indicator, calculated on the basis of field spectrometric measurements.

Verification of the results of point measurements on ground photographs taken in red and infrared range was a subsequent stage. Basing on the analysis of these photographs, assessment of the possibility of remote identification of the communities under study and their automated delimitation with the use of the method of a supervised classification was made.

Finally, extrapolation of the obtained results on air (colour images) and satellite materials (Landsat Thematic Mapper) was attempted.

The other problem set in this paper is of methodical character. The goal of this part of the paper was to apply an experimental method of vegetation mapping, enabling presentation and analysis of community complexes and of zonal borders. A possible solution to this problem of geo-botanic cartography is presented based on the results of the supervised classification of vegetation communities using fuzzy logic.

In the discussion there is also an opinion on the usefulness of methods and remote sensing materials used and articulation of open problems, including the possibility and advisability of carrying out a detailed survey of alpine vegetation and its extension with the consideration of advanced figurative scanners and techniques of digital processing of images.

Working Hypothesis

Differentiation of alpine vegetation is connected with the activity of a range of a-biotic factors. At the same time, formation of many forms of flora results from specific adaptations of plants, enabling survival in hard environment conditions. These adaptations may be of a different character: starting with the outer structure (e.g. covering leaves with hairs or wax protecting from excess transpiration) up to anatomic and physiologic adaptations (e.g. structure of mezophyll, quantity and arrangement of stomatal apparatuses, contents of assimilation pigments). In this paper it is assumed that differentiation of flora observed in the terrain and in a micro-scale may be also recorded remotely, with the use of specialist remote sensing measurement equipment. It is expected that knowledge of the features of anatomic and functional construction of species representing the communities under examination, will allow identification of communities on large-scale remote sensing materials at least in the rank of a set.

The second research problem of this paper is an attempt at analysis and cartographic representation of the communities under examination with the use of a method derived from the theory of fuzzy logic. Problems connected with mapping of fuzzy and smallmosaic vegetation structure with the use of traditional methods point to such an analysis. It is assumed that the description of alpine vegetation based on the idea of partial attachment of a pixel to a given class is closer to the real status than the conventional description based on the theory of Kantor's communities and will allow better understanding of the vegetation structure and its relationship with the remaining components of the environment.

Trends and Problems of Remote Sensing and of Alpine Vegetation Cartography

Considering the rich literature on remote sensing of vegetation, the chapter below presents only papers representing main trends of these researches. Discussed are also forerunning publications from the scope of remote sensing researches carried out on the alpine areas and the history of photogrammetric and remote sensing researches carried out in the Tatra Mountains.

The second part of the survey is devoted to the issues of the environment structure and to the discussion from the scope of geo-botanic cartography referring to vegetation continuum. This part also presents examples of applications of the theory of fuzzy logic in remote sensing research of vegetation. Fuzzy logic can help solve two problems connected with remote mapping of vegetation: technical and systematic. Firstly it allows analysis of mixed pixels, being the result of both low geometric resolution of currently accessible satellite materials, and also occurrence of a functional mosaic and vegetation community complexes. Secondly, fuzzy logic finds special application in natural disciplines which undertake research of objects and phenomena of a continuous character.

Remote Sensing of Vegetation

Remote sensing of vegetation allows analysis of both, qualitative and quantitative differentiation of vegetation. Classic applications of remote sensing include mapping of the terrain cover and monitoring vegetation, e.g. succession of forest (Hall et al., 1991; Lucas et al., 1993), process of desertification (Tucker et al., 1986), analyses of humidity of habitats (Nemani, Running, 1989), or bio-geo-chemical cycles (Potter et al., 1993) at global and regional scales. At the same time, even in early papers, performed were detailed, laboratory physiological examinations and spectrophotometric analyses of chosen species of plants, the aim of which was facilitating identification of the given species and identification of their physiological condition "from air" (Gates et al., 1965; Knipling, 1970). Optical properties of plants are a direct result of their anatomical and functional (physiology) structure, and also are the basis for interpretation of vegetation on air and satellite images. Identification of objects on remote sensing materials is based mainly on the analysis of the size of reflection of solar radiation in various ranges of electromagnetic spectrum. Volume of absorption of solar radiation by vegetation depends on the radiation energy (length of wave). Ultra-violet and visible radiation are used by plants in the process of photosynthesis and in the photomorphogenetic reactions. Low energetic infrared radiation is connected with the processes of warming, evapo-transpiration and transpiration. Works within the field of physiology of plants and a spectrometric analysis proved (Gausman, 1985), that within the scope of visible radiation, reflection of solar radiation depends on the contents of pigments in a leaf, while within the scope of near-infrared radiation - on the internal structure of a leaf: in the range of $0.75-1.35 \,\mu\text{m}$ – on the size and quantity of interspaces, and in the scope of 1.35- $2.5 \,\mu\text{m}$ – on the contents of water in tissues (with the maximum radiation absorption in the range of 1.45 and 1.95 µm).

Quantitative examinations of vegetation were at first connected with working out of a range of indicators of verdure (Vegetation Indices) (Ashburn, 1978; Tucker, 1979). Calibration of these parameters on the basis of field biometric and meteorological measurements allowed inter alia modeling hydrological, meteorological and biotic processes (Baret, Guyot, 1991; Dabrowska-Zielińska, 1995) and for evaluation productivity of crop (van Dijk et al., 1992; Dąbrowska-Zielińska, Kogan, Ciołkosz, Gruszczyńska, 1998). The subsequent step in the development of the trend of quantitative research of vegetation was applying lidar for the analysis of chlorophyll fluorescence. Special usefulness of a lidar technique was proved in the research of water environments (Kim, 1973). In land environments examination of fluorescence awoken by the laser light was used for assessment of net photosynthesis and of vigour and stress of plants (Hoge et al., 1983; Berkhout, 1996; Lang et al., 1995; Lichtenthaler et al., 1995).

Remote Sensing of Alpine Environments

Satellite and air materials are especially precious in the research of inaccessible alpine regions (Bax, 1996). Literature referring to this subject is however poor, and most papers are up till now of a methodological character. This results from a special character of alpine environments which dictated the specifics of remote sensing research on the areas of diversified sculpture. Three research trends dominate here: modeling of hydrological and geo-morphological processes, analysis of the environment structure and problem connected with orography.

Papers in the field of geomorphology concentrate on issues of automated identification of the forms of sculpture and evaluation of the scale and dynamics of geo-morphological processes on the basis of materials "from air" (Walsh et al., 1998; Brown et al., 1998). Application of remote sensing to large-scale mapping of geo-morphological processes for spatial planning in the Alps was presented by J. Rupke, E.C. Cam-meraat, A.C. Seijmonsbergen and C.J. van Westen (1988). An interesting example of applying remote sensing in the mountains are studies of thickness and length of a deposit of snow cover with the purpose of modeling a river outflow (Vuille, 1996).

Conceived on a large scale research project in the field of modeling physico-geographical processes and of the analysis of the environment structure in the zone of an upper line of the forest on the basis of remote sensing materials was presented by a group of scientific centers in the USA (Malanson, Brown, 1998).

A special difficulty of remote mapping of alpine environments is geometric and radiometric deformations of images of objects on photographs and visualization in three-dimensional space. Geometric deformations resulting from the geometry of central projection are of marginal significance at the analysis of even terrains. In the analysis of images of diversified sculpture areas, they are easily reduced by ortho-rectification of digital images, consisting in correction of radial displacement of images of points, resulting from substantial drop of the terrain. This correction requires a numerical model of the terrain at rectification. At present, professional remote sensing and photogrametric software enables not only half automated generation of numerical models of the terrain on the basis of stereopar photographs, but also visualization of thematic maps and digital satellite and air images in the three-dimensional space. Laboriousness of elaboration of a detailed numerical model of the terrain, and also possibility in principle of unlimited enlargement of the scale of the image on the computer screen, led to working out advanced methods using fractal geometry, allowing for simulation of realistic formation of a terrain in any scale (Clarke,

1993). These methods consist in automated generation of the "texture" of numerical models of the terrain on the basis of fractal measure, characteristic for the given area of research.

A more difficult and infrequently undertaken problem is radiometric correction. Standard atmospheric correction using the Modtran model based on Tasseled Cap (Richter, 1996) transformation, is successfully used on even areas. It does not include correction of deformation of the size of the reflection of radiation, arising because of: deep shadow, different inclination of the slopes in relation to the antenna fixed on the satellite and various thickness of the atmosphere layer from the scanner to for example bottoms of valleys and peaks of the mountains. Attempts to correct satellite scenes from the alpine areas are at present of experimental character and cover calibration only of a respective scanner. E. Parlow (1996), K.I. Itten and co-authors (1992, 1993) worked out correction indices for respective channels of Landsat TM, based on a model simulating changes of solar radiation intensity depending on the inclination, solar exposure, and the elevation of slopes above the sea level.

Remote Sensing Research in the Tatra Mountains

The Tatra Mountains constitute one of the areas of the largest natural and landscape qualities. Therefore since the end of the XVIII century they have become a natural research laboratory for the range of sciences on the Earth. Scientific research is one of the basic purposes of the Tatras National Park and are carried out on a large scale: within recent years, on the terrain of the Tatras National Park, about 120 research subjects were carried out annually (Byrcyn-Gasienica, 1995). Although the Tatra Mountains are one of better researched areas in Poland, the need to carry out scientific research does not reduce. At the same time, among so many papers, only a few remote sensing works can be mentioned. The first works which were carried out in 1917 by K. Weigl were of photogrametric character. In 1934, Wojskowy Instytut Geograficzny (Military Geographic Institute) published a map of the Tatra Mountains in the scale of 1:20.000, which was elaborated on the basis of ground stereograms and complementary table measurements. In the 60s K. Guzik carried out photogrametric works, which were used for elaboration of a detailed geological map of the Tatra Mountains. In the 60s and 70s ground photogrametric photographs were taken of 11 slopes in the valleys: Gasienicowa, Goryczkowa, Kościeliska, Rybiego Potoku and Starorobociańska (Cracow Division of the Polish Society of the Friends of the Sciences on Earth - Oddział Krakowski Polskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk o Ziemi, Borowiec, 1977) and of the valley - Dolina za Mnichem, Kocioł Mięguszowiecki, slopes of Skrajna Turnia and Zółta Turnia (team of the Workshop for Interpretation of Air Photographs WGiSR UW), for which

spectrozonal photographs were also taken. The first application of photointerpretation in the research of vegetation of the Tatra Mountains was presented by E. Bielecka (1986) in the study dedicated to the analysis of changes within the highest forested mountain belt, while E. Bielecka, W. Fedorowicz-Jackowski and E. Witkowska (1994) applied methods of digital processing of images to monitoring of the upper line of the forest. Possibilities for visualization of the Tatra Mountains "from air" are presented on the satellite map of the Tatra Mountains elaborated on the basis of the Landsat TM image (Bielecka, Fedorowicz-Jackowski, 1993), an attempt of a three-dimensional, virtual presentation of satellite images and thematic maps of Dolina Pięciu Stawów Polskich was also undertaken on the basis of a numerical model of the terrain (Fedorowicz-Jackowski, Halicki, Jezierska, Kurnatowska, 1995).

Structure of Vegetation and Problems of Phytosociological Cartography

In the 60s a discussion was inflamed on the methods of vegetation description and presentation, the basis of which were divergences of opinions on the nature of the vegetation itself. Classification of vegetation was opposed to regulations which assume continuity of vegetation and which consist in gradient arrangement of vegetation communities. Classification leads to the division of vegetation into classes, which reveal larger or smaller mutual similarities. A special example of classification is typology. According to generally adopted in Poland Central European school worked out by J. Braun-Blanguet (1964), there exist clearly differentiated communities distinguished on the basis of the combination of characteristic species and their typology which can be carried out even according to the criterion of occurrence or lack of occurrence of one species. Another school originating from Wisconsin represents a reverse point of view, according to which vegetation expresses itself by specific continuum, which can only be described by lining up communities in multidimensional space according to a range of features (Curtis, 1959). A range of clear and sharp borders exist in nature. Many of them are however of an interim, zonal character. Limitations of technical nature (possibilities of cartographic presentation of interim zones) turned the scale of disputes to the advantage of the advocates of classification: traditional phytosociological mapping adopts the assumption of a relative spatial non-continuity of vegetation (Greig-Smith, 1964; Faliński, 1990). This does not however mean rejection of the idea of "spatial continuum": essential but a very difficult research problem of phytosociological cartography is explanation and presentation of the phenomenon of the transit zone, that is the ecotone between separate phytocenozes. Such an approach to the issue of vegetation continuum was adopted in the school of Braun-

Blanquet, which adopts a hierarchical classification as the basis. At lower levels however, it is possible to consider ordination by distinguishing a spectrum of communities diversified in a gradient way, e.g. of communities occurring on habitats of various humidity or communities of differentiated density of vegetation cover. This arrangement is usually carried out according to only one criterion. Formal division of vegetation according to Braun-Blanquet's school is quite flexible and allows for separation of interim communities and not fully formed ones. In the course of field research however, attention was repeatedly called to the fact that in detailed scales this leads to separation of too many units of the legend which lowers readability of the map and may not allow cartographic presentation. This was proved by the research carried out in alpine environments, vegetation of which in reality demonstrated a continuous character (McVean, Ratcliffe, 1962).

Applications of Fuzzy Logic in Remote Sensing of Vegetation

Working out many models allowing for drawing conclusions on a-biotic components of the environment and on a range of physical and geographical processes on the basis of vegetation, and also a dynamic development of methods of digital processing of images induced many authors to undertake detailed research of vegetation using remote sensing methods. In numerous papers it was perceived however that the supervised classification based on traditional, strictly defined and discreet classes leads to working out thematic maps of low accuracy (Wang, 1992). This is the result of both, the technology of obtaining satellite data (low geometric resolution of images), and the specifics of many physical and geographical objects and processes, characteristic for their special continuum (Foody, 1994).

Thus intensive research was undertaken in the field of sub-pixel analysis, with the goal of identifying the diversification of the cover of the terrain within the frame of one pixel. One of the possible solutions of the problem of mixed pixels appeared to be the application of methods from the scope of fuzzy logic. Positive results were obtained by using the so called *spectral un-mixing* and methods from the scope of fuzzy sets.

The first group of methods requires caliber spectrometric measurements and consists of solving a system of equations of many unknowns, on the basis of the size of the reflection of radiation of "clear" types of cover, measured in the terrain (Roberts et al., 1990). This method gives good results, considering the time, cost and laboriousness undertaken are attempts to model spectral answers of homogenous types of terrain cover. They give less accuracy and works within this scope require further research.

The second group of methods uses the theory of

fuzzy sets, which are the extension of the notion of sets in classical formulation (Cieślak, Smoluk, 1998). This theory assumes that there exist sets in which affiliation of an element to a set is controversial. According to the founder of this theory L.A. Zadeha (1965), a fuzzy set specified in the X space, containing all interesting us objects is a function specified in the X space having values included in the [0,1] interval, contradictory to a regular set, the values of which belong to a double element set $\{0,1\}$. This means that the given element may belong completely to a given set (affiliation = 1), may not belong to the set (affiliation = 0), and there is also the third possibility, namely the given element partly belongs to the given set (affiliation between 0 and 1). The theory of fuzzy sets finds special application in the natural disciplines. In geography, fuzzy sets enable mapping of interim zones and presentation of continuous phenomena (Burrough, 1986; Wang, Hall, 1996). A classical example of a fuzzy set is a map of acclivities. Let us take it for granted that we assume as steep slopes in the Tatra Mountains the slopes of higher acclivity than 20°. Does this mean that slopes of 19.99° acclivity are not steep slopes? An interesting application of fuzzy sets to elaboration of a map of pH of soils was presented by P. Burrough (1989) and A. Ołdak (1994).

Application of fuzzy logic in the supervised classification of air or satellite images consists in analysis of the distribution of a probability of a pixel's affiliation to a given class and requires specifying the thresholds of probabilities below which a given pixel belongs to a mixed class (Manyara, Lein, 1994, Jakomulska, 1999). This allows for distinguishing "clear" classes, for which probability of affiliation equals or is close to a unit, and for mixed classes. This enables distinguishing not only one "mixed" class but also several interim classes.

Both methods are still experimental – the first is laborious, while the second may be subjective. Nevertheless fuzzy logic is very popular in research in remote sensing of vegetation. The idea of partial affiliation of a pixel to a given class appeared to be an attractive alternative to a double value logic used in the standard techniques of classification, and application of the theory of fuzzy sets is more and more used to solve the problem of mixed pixels, because it gives the answer both to a methodical problem of phyto-sociological cartography connected with the assumption of relative non-continuity of vegetation, and also to a technical problem of remote sensing connected with a low geometric resolution of currently accessible satellite images.

Conclusions

Repeatedly emphasized advantages of remote sensing (speed, impartiality and repeatability of research and possibility of simultaneous research of large and inaccessible areas) led to propagation of methods and wide use of remote sensing materials. Rich literature, numerous research projects and efficiency of many systems of obtaining, processing and analyzing air and satellite remote sensing data constitute the proof of high achievements in this field and testify that remote sensing is a verified research tool supporting traditional methods of research. Considering the specifics of alpine environments application of remote sensing methods in research is still of methodological and experimental character.

It should be clearly emphasized that remote sensing research is of highly interdisciplinary character, so it requires complex formulation of the object of research. Interdisciplinarity of remote sensing is emphasized by the fact that it uses both fundamental and detailed results of research of such fields of science as: physics (including especially optics), electronics, telecommunication, mathematics and statistics, computer science, graphics, psychology of perception, and others. Finding application in many fields of research and practice, remote sensing uses the latest achievements of these techniques. At the same time, however, it seems that the dynamic technological progress which we observe in the recent years, more often outpaces the possibility of its inculcation in the research of environment. Not rare are cases where technology enables observation and registration of phenomena, which we, however, cannot interpret yet. From an optimistic point of view, the fact that the technique outpaces the thought it constitutes the promise of a new "age of discoveries" for geography, from pessimistic point of view - our knowledge is still open and not complete and there is a need of much research to get to its bottom.

Characteristics of the Area and of the Objects of Research

Considering the range of works which undertake the problems of natural research carried out in the area of the Tatra Mountains, it was acknowledged in this paper that a detailed description of the environment is redundant here. Shortly were characterized only these geo-components and their features which are in direct coherence with this paper, namely: character of vegetation cover of the Tatra Mountains, alpine vegetation, communities and species under investigation and the distribution of the intensity of solar radiation.

Character of the Vegetation Cover of the Tatra Mountains

The vegetation cover of the Tatra Mountains is specific: Tatra and Carpathian endemic plants occur here, and it is the center of the occurrence of many communities in Poland. Up till now it preserved its natural character, and even primeval at places, although for several centuries it was under pressure from various activities of man (Piękoś-Mirkowa, 1981). Isolated environments (islands) and difficult to access high mountains characterize with high bio-versatility (Falińska, 1996). In alpine environments, frittered down and mosaic structure of vegetation and also its clear variability in time, is the expression of high versatility and dynamics of a-biotic factors (Jakomulska, 1998; Kozłowska, 1999). A character-istic feature of alpine vegetation is coexistence of units of various taxonomic ranks, which is in turn the result of various sensitivities of vegetation communities to the activity of factors of different scale and dynamics.

Mezo-climate connected with the orography has the strongest impact upon the versatility of the Tatra Mountains vegetation, which expresses itself via vegetation formations, characteristic for the given climatic belt. Tropism is a subsequent vital factor: accessibility of nutrition components for plants determines the origination on this same climatic-vegetation belt of communities - bases and acidophyllic, which usually in the phyto-sociological typology belong to various classes, that is to units of highest rank. Impact of local factors, such as: length of deposition of snowy cover, bedding humidity, topo-climate (exposition of the slope) and sculpture formation processes which occur on the slope, are expressed in differences in the rank of a set. While units of a lower rank: subsets, variants and facies are the expression of local differentiation of habitats. Sub-sets are being differentiated for zonal communities. For example, within the alpine grasses Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, a range of sub-sets were separated: typicum, cetrarietosum, caricetosum sempervirentis, sphagnetosum, salicetosum herbaceae, (Balcerkiewicz, 1984) while for the set of grass family Calamagrostietum villosae tatricum, which characterizes with a relative uniformity, no lower rank communities were distinguished.

An especially characteristic feature of alpine vegetation is the occurrence of a mosaic of communities, originating as a result of the existence of a microsculpture of terrain, local differences in bedding humidity, and the length of deposition of a snowy cover. This causes the origination of such small-area biochoras of respective vegetation communities that it is difficult to acknowledge them as the ones which suit the structural and functional units – ecosystems. Only such a repeatable, durable complex of communities related to a given type of a slope constitutes a functional unit (Kozłowska, 1999).

Common occurrence of borders of zonal character is characteristic for the mountains. Borders between communities rarely constitute a clear line. Most often this transfer constitutes quite a wide belt in which gradual diffusion of neighbouring vegetation communities occurs. This is connected with a gradient character of many features of geo-components (elevation above sea level, fertility and humidity of bedding, thickness of soil, temperature, pressure, insolation). Finally, dynamics of many processes (e.g. torrential) and man's activity, disturb the natural succession of vegetation, which is expressed by occurrence of not fully formed vegetation communities.

Alpine Vegetation and Flora

The term "alpine vegetation" covers vegetation sets which appear above the upper line of the mountain forest. They do not, however, constitute one group. Just the opposite, differences among them are so distinctive that these communities are accounted to several separate classes (Pawłowski, [in:] Szafer, Zarzycki, 1977). A characteristic feature of alpine vegetation is the predominance or even exclusivity of alpine species in their floristic composition. Lowland species occur here occasionally. Alpine communities may however be spotted below the upper line of the forest in specific habitats, e.g. on screes. In the group of alpine communities one may include: vegetation of rocky apertures, scree vegetation, rocky grasses, grasslands, herblands, depositary plants, well-head communities and sets of dwarf mountain pine.

In this paper analyzed are three typical and common alpine communities of the Polish part of the Tatra Mountains, connected with non-lime soil: Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, Luzuletum spadiceae and Calamagrostietum villosae tatricum and three species which are the dominating species of communities under research (respectively): Juncus trifidus, Luzula spadicea and Calamagrostis villosa.

Table 1 presents the share of the areas of communities under research in the total area of the alpine and sub-alpine belt (without the areas overgrown by dwarf mountain pine) of Kocioł Gąsienicowy and Kocioł Goryczkowy Świński and Dolina Pięciu Stawów Polskich (Kozłowska, Jakomulska 1999; Kurnatowska, 1998).

The share of grasslands in Kocioł Gąsienicowy, which is situated almost wholly in the alpine belt is more than 60%, in Kocioł Goryczkowy about 50%, while in the valley Dolina Pięciu Stawów Polskich, which covers substantially a much larger area and perpendicular reach, and what follows larger amplitude of communities – about 40%. In total on each of the areas, plant communities under research occupy a larger part of them.

Characteristics of Plant Communities under Research

Oreochloo distichae-Juncetum trifidi

Class: Caricetea Curvulae, Order: Caricetalia curvulae, Alliance: Caricion curvulae

Set of rush (Juncus trifidus) and a double-order boimka (Oreochloa disticha) is the main grassland set on the bedding poor in calcium carbonate in the alpine belt of the Tatra Mountains. It appears on the slopes and ledges, screes and moraines of shortly deposited snow cover on not very wet bedding, both on shallow, and on well formed soil. It forms dense grasslands. It is jointly created by three species: rush (Juncus trifidus), a double-order boimka (Oreochloa disticha) and short fescue (Festuca), while in the alpine belt tafts of rush (Juncus trifidus) prevail. Within this set, distinguished were more than ten sub-sets and forms (Balcerkiewicz 1984), (Fig. 1).

Luzuletum spadiceae

Class: Salicetea herbaceae, Order: Salicetalia herbaceae, Alliance: Salicion herbaceae

Luzula spadicea creates common, depositary herbaceous community Luzuletum spadiceae (Fig. 2), growing in concave parts of slopes, in potholes at the bottom of valleys and wider gullies in the sub-alpine and alpine belts with a depositary snow cover. Phytocenozes of Luzuletum spadiceae occur mainly on scree areas, on already fixed screes and on granite grits.

Patches with quite numerous participation of *Doronicum stiriacum* and *Ranunculus montanus* prevail in lower and middle part of old and fixed dump fans, while in the upper part, a "clear" form of *Luzuletum* occurs. These patches characterize with very high density of the vegetation cover and delayed phenological growth – weeds of Luzuletum sometimes appear only at the beginning of August. This set, apart from distinct character, shows a range of physiognomical, habitat and floristic similarities to *Calamagrostietum villosae tatricum* (Balcerkiewicz, 1984).

Table 1. The share of the area of analyzed plant communities in the total area of alpine and sub-alpine belt Tabela 1. Udział powierzchni badanych zbiorowisk w całkowitej powierzchni piętra alpejskiego i subalpejskiego

	Kocioł Gąsienicowy	Kocioł Goryczkowy Świński	Dolina Pięciu Stawów Polskich
		in %	
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi	61,2	48,1	40,4
Luzuletum spadiceae	24,1	3,1	15,5
Calamagrostietum villosae tatricum	0,8	5,3	6,3



Fig. 1. Oreochloo distichae-Juncetum trifidi: 1 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi post-pasturage subalpine form in complex with the vacciniaceous plants – Vaccinietum myrtylli Ryc. 1. Oreochloo distichae-Juncetum trifidi: 1 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus z – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus z – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus z – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus z – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z Juncus trifidus z – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi postać z – Oreochloo

Calamagrostietum villosae tatricum Class: Betulo-Adenostyletea, Order: Adenostyletalia, Alliance: Calamagrostion

This set reaches the elevation of 1400 up till 2200 m above the sea level, and next to the thicket of dwarf mountain pine, it is the most expanded natural community of the sub-alpine belt (Fig. 3). These grassophytes grow on much inclined, stable and wet slopes, and old, already fixed screes, on granite rocks, and on acid hill-side and moraine formations. Hairy reed grass and sometimes together with *Festuca picta* or *C. arundinacea* predominates in this set.

Characteristics of Species under Research

Rush (Juncus trifidus)

Juncus trifidus, Class: Monocotyledones, Order: day lilies (Hemerocallis), Family: the rush family (Juncaceae)

Rush is an alpine herbaceous plant of the upper parts of the Karpaty and the Sudety Mountains (Fig. 4a). It grows on slopes, terraces and rock fissures on non-lime bedding. It occurs in the Tatra Mountains from the elevation of about 1200 m up till 2600 m above the sea level. The height of stems in bloom



Fig./Ryc. 2. Luzuletum spadiceae

ranges from 10 to 25 cm. Leaves are about 15 cm long, they are narrow, awl-shaped, mat, grey-and-green. It grows in tufts and creates bushy and compact turf. Leafless stem sometimes has 2 or 4 awl-shaped leaves, the so-called stipule, at its top within the inflorescence. It bursts into bloom in July, fruit gets grape at the end of August and in September, at this time leaf stipule gets red. Rush is a very wind, draught and frost resistant plant (Pawłowski, 1956).

Wood-rush

Luzula spadicea, Class: Monocotyledones, Order: day lilies (*Hemerocallis*), Family: the rush family (*Juncaceae*)

Wood-rush is an alpine Carpathian species (Fig. 4b). It is a herbaceous plant of wide leaves (2-3 mm). It reaches the height of up to 30 cm. It blooms in July-August (black or dark-brown flowers).

Hairy reed grass

Calamagrostis villosa, Class: Monocotyledones, Order: Glumiflorae, Family: Grasses

Hairy reed grass reaches the height of 1 m, in Poland it exists in the whole range of the Carpathian



Fig./Ryc. 3. Calamagrostietum villosae tatricum

Mountains, however, lowland and northern forms can also be spotted (Fig. 4c). In the upper locations it creates a community of *Calamagrostietum villosae tatricum*, in the sub-alpine belt it grows on patches of dwarf mountain pines, while in the upper mountain forest it is a common species and characteristic for the undergrowth of piedmont reed grass wood (*Pino-Calamagrostidetum villosae*).

To avoid repetitions of long names of species and sets in the further part of the paper the names of species: Juncus trifidus, Luzula spadicea and Calamagrostis villosa are used interchangeably with the terms (respectively): rush, wood-rush and reed grass, while the names of communities: Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, Luzuletum spadiceae and Calamagrostietum villosae tatricum are exchanged with the respective terms: green-sward, depositary and grassophyte.

Intensity and Spectral Constitution of Solar Radiation

Intensity and volume of solar radiation which is received by plants is conditioned by a range of physiological, physical and chemical processes which take place in a plant, e.g. photo-synthesis, respiration, growth, development, etc. The process of total radiation is conditioned first of all by the volume of cloudiness. Annual course of total radiation at the meteorological station in Zakopane shows that in mountain locations in summer months there are higher values of solar radiation than average in Poland. In summer months, often occurring cloudiness of orographic type in Zakopane, lowers the average diurnal radiation values (Podogrodzki, 1970; Miara, Paszyński, Grzybowski, 1987). On sunny days, the elevation of sun and the transparency of atmosphere (pollution and contents of water vapour) are decisive for insolation. Only two thirds of energy emitted by Sun reaches the Earth – the remaining part is subject to reflection, dispersion and atmospheric absorption. In higher locations the share of direct radiation increases and the dispersed radiation decreases. Actinometric research in the Alps proved that in fine conditions in June, the intensity of total radiation at the height of 3000 m above sea level is about 25% higher than at the height of 200 m (Barry, 1981). Gradient of growth of radiation with the height oscillates from 47 to 94 MJ/m^2 for 100 m of elevation. At Kasprowy Wierch (1996 m above the sea level) in summer months average diurnal volumes of total solar radiation increase by 13%, in relation to the values measured at the station in Zakopane (857 m above sea level). From the point of view of plants and their accommodation to strong intensity of solar radiation, important is maximum direct radiation. In the decade 1971-1980 maximum values were: in Zakopane - 71%, and on Kasprowy Wierch - 78% of the average constant solar value, intensity growth was about 8 W/m² for each 100 m of elevation (Rojan, 1988).

Also spectral constitution of solar radiation is very important for plants. On average, infrared radiation constitutes 45–50% of the total solar radiation, while visible - about 45%. Ultra-violet radiation constitutes only about 5–9% of the total radiation, but this is the ultra-violet part of solar radiation, and especially UV-A and UV-B (0.28–0.4 µm) which is most biologically active (Szczęsna-Kozłowska, Błażejczyk, 1998). Dispersion depends on the size of particles in the atmosphere and on the wave length. Short wave radiation undergoes the highest dispersion: electromagnetic radiation of wave length shorter than 280 nm does not reach the Earth In high mountains, where the layer of atmosphere is thinner than on the lowlands, participation of short-wave radiation increases: of ultraviolet and blue radiation. Unfortunately, there is only one actinometric station in Poland which performs measurements of ultraviolet radiation, but it is on the lowlands, in Legionowo - so there is no data enabling presentation of perpendicular distribution of the volume of ultraviolet radiation.



Fig. 4. Analysed species: a – rush (*Juncus trifidus*), b – wood-rush (*Luzula spadicea*), c – reed grass (*Calamagrostis villosa*), d – from the left: rush, wood-rush, reed grass

Ryc. 4. Badane gatunki: a – sit skucina (Juncus trifidus), b – kosmatka brunatna (Luzula spadicea), c – trzcinnik owłosiony (Calamagrostis villosa), d – od lewej: sit, kosmatka, trzcinnik

Location of Testing Fields

Choice of testing fields was dictated by the accessibility of the mountain sides for the performance of field investigations and especially for taking ground photographs, and by proper identification and cartographic tabulation of vegetation on the area under research. Slopes of Beskid met these conditions. Their vegetation was well identified and mapped.

Research was made on 18 testing fields of various elevation above sea level, inclination of the slope and humidity of bedding, situated along three transects on the slope of Beskid, of various exposure to sun and wind:

transect 1: along the gully on the north-west slope of Kocioł Gąsienicowy with active torrential processes,

transect 2: along the gully on the north slope of Beskid up to the fork of routes to Kasprowy Wierch, Świnica and Karb,

transect 3: along the gully on the north-east slope of Beskid, from the peak to the route leading to Kasprowy Wierch, Świnica and Karb.

Choice of measurement points within the precinct of differentiated habitats aimed at securing repeatability and representativeness of the results of the research. In addition a dozen or so measurements of chosen parameters were taken on lower parts of the sub-alpine belt of Gasienicowa Valley and in the alpine belt of the West Tatra Mountains, on the slopes of Starorobociański Wierch.

Ground photographs of Beskid were taken from Uhrocie Kasprowego. Location of transects, field meas-



Fig. 5. Localisation of ground measurement points and range of ground photos in Dolina Gasienicowa: 1 - measurement points in the subalpine belt, 2 - measurement points in the alpine belt, 3 - reach of the ground photographs, 4 - transects

Ryc. 5. Położenie terenowych punktów pomiarowych i zasięg zdjęć naziemnych w Dolinie Gąsienicowej: 1 - punkty pomiarowe w pętrze subalpejskim, 2 - punkty pomiarowe w piętrze alpejskim, 3 - zasięg zdjęć naziemnych, 4 - transekty

22

urement points and the reach of ground photographs are presented on Fig. 5.

Research from air and satellite ceilings were extended to the area of the whole Gasienicowa Valley.

Characteristics of Materials Used

Remote Sensing Materials

Photographical Materials Used for Taking Ground Photographs

Ground photographs were taken on professional Kodak film (36 × 24 mm). Infrared photographs were taken on KODAK Infrared High Speed film, sensitive to close ultra-violet, visible range of electromagnetic spectrum and near-infrared radiation (up to 0.9 μ m, with maximum sensitiveness of the film to waves of 0.75–0.84 μ m length). To eliminate ultra-violet and a visible range a dense red filter ("black") was applied, which lets waves of length longer than 690 nm to pass, with maximum transmittance (about 73%) of waves of the length of 750 nm (Fig. 6).



Fig. 6. Transmittance of used filters²
 Ryc. 6. Transmitancja zastosowanych filtrów²

Photographs in the red portion of spectrum were taken on panchromatic Kodak TMAX 400 films, sensitive to light in its whole range. To eliminate blue and green light a red filter was used transmitting light of length longer than 595 nm, with maximum transmittance for waves longer than 645 nm (Fig. 6).

Films used characterize themselves with high resolution: KODAK Infrared High Speed: 80 lines/mm, a KODAK TMAX: 125 lines/mm.

An Air Image

Research from air ceiling was made on a colour air photograph of Gąsienicowa Valley taken in the scale of about 1:30 000, on 4 July 1994. This photograph was taken at the beginning of the vegetation period, when in shaded and wet couloirs and cauldrons, wet patches of snow were still deposited. In principle, green vegetation of the alpine belt can be seen only on southern slopes. These are, however the only colour photographs for the area of the Tatra Mountains, black and white archival photographs are of no use in detailed survey of vegetation. Multi-spectral or spectro-zonal air photographs have never been taken of the Tatra Mountains.

A Satellite Image

In the analysis a satellite scene no. 187/26 was used, photographed on 6 August 1992 by the Thematic Mapper placed on the satellite Landsat 5. This photograph was taken in good weather conditions: it characterizes itself with high contrast and there are no clouds.

At present, Landsat 5 delivers satellite materials which are mostly used in the research on exploitation of earth and vegetation. Universality of usage of Thematic Mapper data arises from relatively good parameters of photographs, mainly field and spectrometric resolution, accessibility and a reasonable price. To compare: SPOT photographs, of better field resolution (20 m for a multi-spectral scanner and 10 m for a panchromatic one), have much worse spectrometric resolution (3 ranges: green, red and near – infrared radiation) and much higher price.

Satellite materials of higher field resolution from new satellites entering orbits at present, were not accessible within the course of carrying out of this research.

Cartographic Source Materials

The following cartographic materials were used in this paper:

- topographic maps in the 1942 arrangement of coordinates in the scale of 1:50 000 (no.: M-34-100-b and M-34-101-a),

- photogrametric backing in the scale of 1:500, worked out by the team of AGH (Academy for Mining and Metallurgy) under the direction of dr. W. Borowiec,

² Analysis of transmittance of a red (R) and "black" (IR) filter was made in the Department of Remote Sensing of the Centre of Cosmic Research of Polish Academy of Sciences transmittance of catalogue filters [was elaborated on the bases of:] Rajkowski, 1997. ² Analizę transmitancji filtrów czerwonego (R) i "czarnego" (IR) wykonano w Zakładzie Teledetekcji Centrum Badań Kosmicznych PAN, opracowanie transmitancji filtrów katalogowych [na podstawie:] Rajkowski, 1997.



Fig. 7. Colour infrared photograph of Żółta Turnia (phot. Jan R. Olędzki)
Ryc. 7. Spektrostrefowe zdjęcie Żółej Turni (fot. Jan R. Olędzki)

- numerical model of the terrain,

– map of alpine vegetation of the Valleys: Pańszczyca, Gąsienicowa, Goryczkowa and Kondratowa in the scale of 1:20 000, edited by A. Kozłowska³.

- vegetation map of (Cauldron) Kocioł Gąsienicowy in the scale of 1:1000, ed. A. Kozłowska⁴ (Kozłowska, 1999).

Topographic maps, photogrametric backing and a numerical model of the terrain were used for rectification of remote sensing materials. Vegetation maps were used for choosing training samples in the supervised classification and for assessment of the exactness of the classification.

Methods of Research

Large Scale Ground Research

Before starting field research, a pilot analysis of archive, ground spectro-zonal photographs was made in cameral conditions. Its aim was testing to what extent ground photographs can be helpful in identification and mapping of vegetation of alpine communities. A spectro-zonal photograph of Zółta Turnia (Fig. 7). was submitted to examination. This photograph was scanned at a high resolution (2000 dpi) and submitted to automated supervised and non-supervised classification. Supervised classification gave better results than the non-supervised one. Identified was a community of dwarf mountain pine, grassy communities, bare rocks, screes and a pond. In both cases, however, it was possible to distinguish grassy and herbaceous vegetation only on the basis of density of vegetation and not on the basis of communities of plants as defined in the typology of Braun-Blanquet. Distinguished were compact communities, fairly dense and dispersed on rocky ledges. Usefulness of spectro-zonal photographs in large scale research of vegetation, was determined as low. This is connected with the fact that at scanning a colour photograph, information from 3 channels is recorded in RGB system, which at the same time undergoes some deformation.

Considering the above, a detailed ground remote sensing research. The research was integrated and it covered:

- laboratory analysis of assimilation components,
- laboratory analysis of fluorescence,
- field measurements of transpiration,
- measurements of water contents in tissues,
- field measurements of biomass,

- field radiometric measurements, and

 performance and digital analysis of ground photographs in red and infrared scope of electromagnetic spectrum.

The basic task here was defining the differentiation of vegetation species and vegetation communities under research, in terms of their optical features with the purpose of assessing the possibilities of identifying the communities under research "from air" and specifying the rank of communities, delimitation of which is possible via an automated supervised classification.

Integrated Measurements from the Field of Physiology of Plants, Biometry and Remote Sensing

Field measurements were carried out in the second part of August within the period of higher vigour and differentiation of vegetation: analyses of photosynthetic pigments were made in 1997 and 1998, measurements of biomass, contents of water in tissues and spectrometric – in 1997, while measurements of transpiration – in 1998.

In spite of close term of performed investigations, year1997 characterizes itself with shorter vegetation term and precipitated growth of vegetation compared with 1998. Distribution of average diurnal temperatures and of insolation in the months under investigation, having immediate impact upon the ageing of vegetation is presented in Fig. 8. August 1998 characterizes itself with higher volume of insolation (monthly average: 5.83 h) and higher average diurnal temperatures (monthly average: 11.25° C), in August 1997, however, lower insolation and lower and more even temperatures were recorded (respectively: 4.80 h and 10.73° C).

Spectrometric measurements and ground photographs were taken in very good weather conditions, in optimal conditions of slope illumination. For example meteorological parameters recorded at the meteorological observatory on Kasprowy Wierch on 6 August 1997 at 8:00 a.m., at the time of taking a photograph of Beskid, were given as an example: temperature: +6,7°C, humidity: 78%, pressure: 801.0 hPa, visibility: 50 km, cloudiness: 1/8, speed of the wind: 0 m/s. Considering the cloudiness of orographic type often occurring in summer, most of the research was performed in morning hours. This is why radiation intensity was lower than maximum. Exemplary daily distribution of radiation measured on 8 August 1998 on Hala Gasienicowa⁵ is presented in Fig. 9.

³ Field mapping was made in the scale of 1:10 000, merit concept, field mapping and editorship: A. Kozłowska, field mapping and cartographic generalization: J. Plit, digital and graphic elaboration: A. Jakomulska.

⁴ Merit concept, field mapping and editorship: A. Kozłowska, digital and graphic elaboration: A. Jakomulska.

⁵ J. Baranowski, not published data.



Fig. 8. Mean diurnal temperatures and total diurnal insolation in August 1997 and 1998: 1 – temperature, 2 – insolation Ryc. 8. Średnie dobowe temperatury i całkowite usłonecznienie dzienne w sierpniu 1997 i 1998 r.: 1 – temperatura, 2 – usłonecznienie



Fig. 9. Diurnal distribution of long-wave solar radiation: 1- long-wave radiation, 2- reflected long-wave radiation

Ryc. 9. Dzienny rozkład natężenia długofalowego promieniowania słonecznego: 1 – promieniowanie długofalowe, 2 – promieniowanie długofalowe odbite

Designation of photosynthetic pigments and of fluorescence was made for green leaves, without visible traces of damage or signs of ageing of a plant (among others, measurements were taken for bottom, green part of rush).

Measurements of biomass and transpiration were taken in scientific stations of PAN (Polish Academy of Sciences) on Hala Gasienicowa and on Antałówka, while laboratory analyses were made in the Department for Physiology of Plants of the II Faculty of Biology at the University of Warsaw.

Analysis of photographs was made with the use of methods of digital processing of images in programmes: ERDAS IMAGINE 8.2, 8.3 and IDRISI for Windows 4.0. Most of works from this scope was made on the working station Silicon Graphics INDIGO 2, in the Department of Remote Sensing of Environment of Geography and Regional Studies Faculty of Warsaw University.

Quantitative and Qualitative Designation of Photosynthetic Pigments

Samples of leaves of plant species under research: Juncus trifidus, Luzula spadicea and Calamagrostis *villosa* were taken from testing fields (plant material was collected in three repetitions from one patch of the same plant community, plants grew within several meters from one another). The samples were brought to the laboratory where designation of the contents of photosynthetic pigments in vitro was carried out according to the method of Lichtenthaler and Wellburn (1983), with the use of absorption spectrophotometry. Light absorption was measured at the following wave lengths: chlorophyll *a* and *b*: 663.2 nm, and 646.8 nm, carotenoids (total contents): 470 nm and carotenes: a- and b- of carotene: 446, 453 nm, xanthophylls: luthein: 445 nm, violaxanthine: 443 nm and neoxanthine: 439 nm. Spectrophotometric measurements for each sample were taken twice. Quantitative designation of the contents of respective carotenoids was carried out according to Davies's method (1996) with the use of the method of a thinlayer chromatography on siliceous gel.

Measurements of Fluorescence

Measurements of fast fluorescence of chlorophyll a were taken with the use of biomonitor – Plant Stress Meter, on cut off leaves of species under research, incubated for 30 minutes in darkness before the measurement. 30 measurements were taken for each sample. The following parameters of fast fluorescence of chlorophyll a (below 1s) were measured: maximum fluorescence (F_m), fixed (F_o), variable (F_y), half-time

of inducing fluorescence from F_o to F_m $(t_{1/2})$ and F_{ν}/F_m . Parameter $t_{1/2}$ expresses the volume of the pool of acceptors of electron at the reduction side of the photoscheme II (PS II), whereas volume F_{ν}/F_m is proportional to the potential output of primary photochemical reactions PS II.

Analysis of Transpiration

Measurements of transpiration of plant species under research were taken with the use of a potometer. From each testing field 3 samples were taken. For each sample 2 measurements were taken. Measured was the time of absorption of 10 μ l of water by cut off plant leaves put in the absorption cuvette filled with water. Measurements were taken in constant temperature conditions (about 20°C), relative air humidity (76%) and light intensity (about 30 W/m²).

Assessment of Water Contents in Tissues

From each testing ground three samples of plant material were collected for measurements. Contents of water was determined using the weight method. From each sample two 10-gram samples of leaves were chosen. They were dried in a drier in the temperature of 105°C for 48 hours, and then weighted. The examination was carried out at the scientific station of PAN (Polish Academy of Sciences) on Antałówka and in the Department of Plants Physiology II, at the Faculty of Biology of Warsaw University.

Examination of Biomass

Biomass of the above-ground part of plants was assessed on the basis of samples collected from the surface of 0.25 m^2 , the same surfaces, from which measurements of water contents in tissues were taken. As a whole, about 70 samples were collected of about 70–410 g each. Biomass, (and exactly the so called status of biomass nearing maximum) was calculated on the basis of a sample of dry mass.

Spectrometric Measurements

Spectrometric measurements were taken using a field spectrometer SP-1, operating in the same spectral ranges as radiometer Landsat MSS (500–600 nm, 600–700 nm, 700–800 nm and 800–1100 nm). Angle of view of a spectrometer is 14° , for measurements taken from the elevation of 1 m, the size of a transitory field of vision corresponds to about 0.625 m². Thus, the results obtained are representative not so much for species as for biochoras.

In the aggregate, 500 measurements were taken, 20 measurements in each of testing fields. Additionally, apart from examined vegetation communities, for comparison, spectral reflection for screes and bare rocks was measured. Performed was calibration of data connected with changing the intensity of solar radiation within the course of measurements. Finally a Uniform Indicator of Verdure NDVI=(IR-R)/(IR+R) was calculated.

Completion of measurements was, among others, to check the exactness and accuracy of performance of the SP-1 equipment. Considering the fact that the scope of the red channel is very wide, and that it covers maximum and minimum of plants' absorption, measurements taken in this scope gave overstated results. Indispensable was making correction of values measured by the spectrometer within the red scope: these parameters were worked out in co-operation with dr. M. Rataj from the Department of Remote Sensing of the Centre for Cosmic Research of Polish Acadaemy of Sciences. In future, parameters of correction will be introduced to the spectrometer.

In the introductory statistical analysis carried out for all measurements performed, rejected were results, the standard deviation of which from the average was higher than 2.

Analysis of Ground Photographs

Taking Photographs

Photographs were taken from the opposite slope using two PRAKTICA cameras fixed on a tripod, which enabled taking photographs simultaneously and capturing the same film frame. Photographs were taken in the infrared and in red range of electromagnetic spectrum, also black and white photographs, and colour ones. Photographs were taken with the use of the objectives of focal length equal 50 mm, average parameters of exposure are given in Table 2.

Table 2. Films exposure parameters Tabela 2. Parametry naświetlania filmów

	Time of exposure Czas naświetlania	Diaphragm Przysłona
KODAK Infrared High Speed	$1/250 \mathrm{~s}$	11
Kodak TMAX 400	$1/250~{\rm s}$	4-5.6

Each of the photographs were taken three times, using the so called *bracketing*, namely, exposure of the same film frame on three subsequent film frames with the same time and changing the size of a diaphragm (leap by 1 up and down from the value measured by the photometer). This method increases the probability of performing photographs of high contrast which was essential for taking photographs with the use of red and "black" filters. Photographs were developed in the black and white process with the HC-110 developer, in the Kodak laboratory. From each series of photographs an image with the best contrast of plant communities was chosen.

Processing Images into a Digital Format

Negatives were processed from the analogue to a numerical form with a professional photogrametric scanner (OrthoVision 950 XL) in the company



Fig. 10. Ground photograph of Beskid in the red part of spectrum Ryc. 10. Zdjęcie Beskidu w zakresie czerwonym



Fig. 11. Ground photograph of Beskid in the infrared part of spectrum Ryc. 11. Zdjęcie Beskidu w zakresie podczerwonym

Geosystems Polska, at geometric resolution of 10 microns (2540 dpi) and radiometric - 8-bits. Application of such high resolution of scanning was dictated by the detailed scale of elaboration, and at the same time it was enabled by high technical parameters of films used. These photographs are of perspective character (Fig. 10, 11 and 12) and are characterized with a not uniform scale (identical scale is preserved only along terrain lines located in the same distance from the objective). The first plan (vegetation just in front of the cameras) and the last plan (sky) of the images are characterized with much deformation and were not taken into consideration in the analysis. Pixels on the foreground correspond to about 10×10 cm in the terrain, while at the background - to about 20×20 cm. The smallest element recorded on the image is the area of the size of about 0.2 m^2 in the terrain, which allows for a detailed analysis of biochoras. Thus the applied parameters of scanning meet the rule of Nyquist (Prat, 1978, Green, 1989; Kaczyński, 1993), according to which the period of sampling of an image must equal or be smaller than half of the size of the smallest detail on the scanned picture. The size of the pixel also approximately corresponds to the area for which measurements of reflection were taken with the use of a field spectrometer. Difference in the size of a pixel on the foreground and at the background of the image should not have a substantial impact on the analysis.

Registration of Images

Black and white images in the scope of red and infrared radiation were taken on the tripod, which enabled fixing two cameras securing synchronism of taking photographs and enabled seizure of the same frame on both images. This method allowed for registration of photos taken in various spectral ranges in a common, local arrangement of coordinates. An attempt of rectification to the scheme of rectangular flat coordinates, on the basis of photogrametric foundation in the scale of 1:1000 was a failure because of unequal distribution of terrain testing points indispensable for calculating geometric transformation. It was possible to locate these points mainly along linear elements (scree and a path leading to Kasprowy Wierch) located in the center of the images, which caused high deformations of outer parts of the images. Instead, registration of images in the common scheme of coordinates appeared to be relatively simple, and a deformation error of a registered image was slight and did not exceed the standard admissible error (RMS < 0,5 of a pixel). To facilitate visual analysis of images, a standard colour composition in unreal colours was made (Fig. 13): component colours: R, G, B represent channels, respectively: IR, R, G (in place of the photograph in a green range, a panchromatic image was placed).

Supervised Classification

Identification of vegetation communities was performed on the basis of a detailed supervised classification made on the basis of the map of vegetation communities in the scale 1:1000 elaborated by A. Kozłowska (1999). This map contains 36 issues of legend, including 23 representing sets, sub-sets or spatial complexes of communities *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, Luzuletum spadiceae* and *Calamagrostietum villosae tatricum*. Table 3 contains a list of all units of the legend which were used to create signatures.

Considering the fact that images under the analysis were not reduced to a rectangular arrangement of co-ordinates, assessment of the exactness of classification by comparing the results of the classification with a real arrangement of vegetation communities (on the map) was not possible. For the assessment of reliability of classification, used was a statistical method of identification of erroneously classified pixels, based on specifying the threshold of a spectral distance (Mahalanobis) of pixels of training samples from the mean value of a sample (ERDAS, 1993). These thresholds were appointed on the basis of the chi-squared test disposition (χ^2).

Digital Processing of Air and Satellite Images

Introductory Processing

Diapositive of an air image was processed into a numerical form with the use of a professional PhotoScan PS-1 Zeiss/Intergraph scanner, with the resolution of 850 dpi. Ortorectification of air and satellite images was performed on the basis of topographic maps in the 1942 arrangement of coordinates and of a numerical model of the terrain. At rectification, the method of the closest neighbourhood and a function of the second stage of geometric transformation was used. Ortorectification error for the air image equaled 6 m, while for the satellite – 16 m and it was contained within the borders of the standard admissible rectification error.

Radiometric Correction

To eliminate the influence of the so-called "atmospheric mist", radiometric correction of images was performed with the use of the method of Tasseled Cap transformation. Differences of pixel values of a satellite image after the atmospheric correction from the original values were not high and did not exceed 5% of the range of a radiometric satellite image (radiometric resolution of Landsat: 8-bits). In Table 4 presented are differences of pixel values after and before the correction: most differences were annotated for the first channel - short-wave radiation (within the scope of blue) as it characterizes with highest dispersion. Satellite images of alpine areas characterize with considerable (compared with images of lowlands) influence of thickness of the atmosphere on the differentiation of reflections of solar radiation of these same



Fig. 12. Photo of Beskid in natural colors Ryc. 12. Zdjęcie Beskidu w barwach rzeczywistych



Fig. 13. Beskid – imaginery color composition (RGB: IR, R, G) Ryc. 13. Beskid – kompozycja w barwach nierzeczywistych

33

Table 3. Units of vegetation map legend, used for creation of signatures for supervised classification of analysed photographs

Tabela 3. Wydzielenia jednostek legendy mapy roślinności, na podstawie których opracowano sygnatury do klasyfikacji nadzorowanej zdjęć naziemnych

Units of map legend Wydzielenia legendy mapy	Units used during classification Wydzielenia uwzględnione przy klasyfikacji
Communities of lichen on rocks Naskalne zbiorowiska porostów	
Rhizocarpetalia	yes tak
Zbiorowiska piargów i szczelin skalnych Communities of screes and fissures in roch	ะร
Initial studies on encroachment of cryptogamic vegetation on not stabilized belding – phase I Inicjalne stadia wkraczania roślin zarodnikowych na nieustabilizowanym podłożu – faza I	yes <i>tak</i>
Initial studies on encroachment of cryptogamic vegetation on not stabilized belding – phase II Inicjalne stadia wkraczania roślin zarodnikowych na nieustabilizowanym podłożu – faza II	yes <i>tak</i>
Oxyrio-Saxifragetum carpaticae – anthropogenic (antropogeniczne)	-
Pogonato-Oligotrichetum	yes tak
Depositary communities Zbiorowiska wyleżyskowe	
Pionier communities of the phylum of the Salicion herbaceae alliance Pionierskie zbiorowiska mszaków ze związku Salicion herbaceae	yes <i>tak</i>
Luzuletum spadiceae – not densed (słabo zwarte)	-
Luzuletum spadiceae	yes tak
$Luzuletum\ spadiceae\ with\ the\ participation\ of\ (z\ udzialem)\ Polytrichetum\ sexangularis$	-
$Luzule tum\ spadice ae\ in\ complex\ with\ (w\ kompleksie\ z)\ Oreochloo\ distichae-Junce tum\ trifidi$	yes tak
$\label{eq:loss} Luzule tum spadiceae \ {\rm in \ complex \ with \ the \ community} \ (w \ kompleksie \ ze \ zbiorowiskiem) \ Festuca \ picta$	-
Alpine green-swards Murawy alpejskie	
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi sphagnetosum	yes tak
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum a mossy form (postać mszysta)	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum a mossy form in complex with (postać mszysta w kompleksie z) Luzuletum spadiceae	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum an interim mossy form with (postać mszysta przejściowa do) salicetosum herbaceae	yes tak
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum	yes tak
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi cetrarietosum	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi a form with (postać z) Juncus trifidus	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi an anthropogenic form with (postać antropogeniczna z) Juncus trifidus	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi a form with (postać z) Juncus trifidus in the complex with (w kompleksie z) Luzuletum spadiceae	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis in complex (w kompleksie z) Luzuletum spadiceae	yes tak
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis in complex with (w kompleksie z) Calamagrostietum villosae tatricum	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis in complex with (w kompleksie z) Calamagrostietum villosae tatricum – an anthropogenic form (postać antropogeniczna)	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis a dry form with (postać sucha z) Nardus stricta	-
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis	yes <i>tak</i>
Sub-alpine post-pasturage green-swards Subalpejskie murawy powypasowe	
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi post-pasturage alpine form (powypasowa postać subalpejska)	yes <i>tak</i>
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi post-pasturage alpine form in complex with (powypasowa postać subalpejska w kompleksie z) Vaccinietum myrtilli	-

Units of map legend Wydzielenia legendy mapy	Units used during classification Wydzielenia uwzględnione przy klasyfikacji
Grasso-phytes Traworośla	
Calamagrostietum villosae tatricum	-
Bilberries Borówczyska	
Vaccinietum myrtilli	_
$\label{eq:Vaccinietum myrtilli} Vaccinietum myrtilli \ in \ complex \ with \ sub-alpine \ post-pasturage \ green-swards \ (w \ kompleksie \ z \ subalpejski \ mi \ murawami \ powypasowymi)$	_
Empetro-Vaccinietum	-
Dwarf mountain pine thicket Zarośla kosodrzewiny	
Pinetum mughi carpaticum	_
Anthropological communities on an artificial carbonate bedding Antropogeniczne zbiorowiska na sztucznym podłożu węglanowym	
Gree-swards congenial to Seslerion tatrae Murawa zbliżona do Seslerion tatrae	_
Herbaceus plants from the Adenostylion alliariae Ziołorośla ze związku Adenostylion alliariae	_
Herbaceus plants from Alchemilla sp. Ziołorośla z Alchemilla sp.	_

Table 4. Difference between pixel values after radiometric correction of a satellite image compared to original values

Tabela 4.	Różnica	wartości	pikseli j	oo korekcji	i radiometrycznej	zdjęcia	satelitarnego	w stosunku	do	wartości
oryginalny	vch									

DN value difference	Spectral bands TM Kanały spektralne TM						
Różnica wartości DN	1	2	3	4	5	7	
Maximum / Maksymalna	13	6	7	5	9	4	
Mean / Średnia	0.81	0.25	0.56	0.25	0.63	0.23	
Standard deviation Odchylenie standardowe	1.64	0.67	1.00	0.67	1.23	0.58	

objects. Spatial distribution of changes is presented on Fig. 14 on the background of a numeric model of the terrain and on the background of a colour composition in real colours illustrating the cover of the terrain. For alpine areas where the layer of the atmosphere is thinner than on the areas of slight elevation, changes of pixel values after radiometric correction were minimal $(1-2 \text{ DN}^6)$ or equaled zero.

Supervised Classification

Supervised classification of a satellite and air image was performed for parts covering the area of Gasienicowa Valley. Considering lack of air images in the infrared range and the term of taking the photo, the analysis of the air image was of initial recognition. Classification of the satellite image was performed on the basis of 6 channels with the exclusion of a thermal channel. On both images classification training fields were appointed on the basis of a numerical vegetation map in the scale of 1:20 000. Exactness of classification was assessed by comparing the image obtained as a result of classification with the map of vegetation. Verification was made on the basis of a representative sample of pixels, chosen with the method of a proportional layer toss.

Application of Fuzzy Logic in a Supervised Classification

Analysis of mixed communities was performed with the use of the experimental method of supervised classification and with the application of fuzzy logic. Used here was the theory of Dempster-Shafer, which is a modification of the theory of complete probabil-

⁶ DN – data number, value of a pixel on the raster image.

Fig. 14. Radiometric correction of the blue band of a satellite image: a – DN difference after correction compared to original values, b – Digital Terrain Model, c – natural color composition, scale 1:250 000, 1942 coordinate system

Ryc. 14. Korekcja radiometryczna niebieskiego kanału zdjęcia satelitarnego: a – różnica wartości DN po korekcji w stosunku do oryginalnych wartości obrazu, b – numeryczny model terenu, c – kompozycja w barwach rzeczywistych; skala: 1:250 000, układ współrzędnych 1942 r.



ity (Bayes), being the foundation of a standard supervised classification (Peddle, 1993; Eastman, 1992). This theory allows for a certain degree of ignorance, because it assumes that there is no pattern given, that is the training sample for some type of terrain cover, thus, the given pixel may belong to another class than the indicated model classes. Opposite to the theory of Bayes, lack of proof for confirmation of the hypothesis does not give the reason for its rejection. The theory of Dempster-Shafer operates with three basic parameters: belief, plausibility and a difference between these parameters (belief interval). Belief expresses the degree in which there exist proofs to support a given hypothesis. It is tantamount to the probability a *posteriori* in the theory of Bayes and expresses itself with the formula,

$$p(h \mid e) = \frac{p(e \mid h) p(h)}{\sum_{i} p(e \mid h) p(h)}$$

where:

p(h|e) – probability *a posteriori* of an event, p(e|h) – probability that an event took place, p(h) – probability *a priori* of an event,

i – number of classes.

Plausibility presents the degree in which proofs do not allow rejection of a given hypothesis. Plausibility is the complement of the sum of all probabilities of affiliation to other classes, e.g. in case of the analysis of three classes A, B and C, plausibility of affiliation of a pixel to class A is expressed with the formula:

$$W_A = 1 - [p(h|e)_B + p(h|e)_C]$$

Finally the difference between the plausibility and belief is the measure of uncertainty of classification. Uncertainty expresses the degree of ignorance or unawareness. The higher value of ignorance, the more probable it is that the given pixel does not belong to any class, for which testing samples and signatures were designated.

Interpretation of the Results of Ground Research

Results of Field Research

Composition of Photosynthetic Pigments and Their Impact upon Absorption Spectrum

Qualitative and quantitative analysis of photosynthetic pigments contained in leaves of plant species under research proved considerable differences between the species. The highest contents of chlorophyll (a+b) in 1 g of fresh mass was contained in reed grass: 2.1–3.4 mg, then wood rush: 1.6–2.5 mg, and rush possessed only 0.5–0.9 mg (Fig. 15).

From the point of view of life functions of plants, important is the proportion of the contents of respective pigments: chlorophyll a to chlorophyll b and of



Fig. 15. Absolute content of assimilation pigments in leaves: Juncus trifidus; Luzula sapdicea and Calamagrostis villosa: 1 - chlorophill a, 2 - chlorophill b, 3 - carotenoids, 4 - chlorophyll a + b

Ryc. 15. Bezwzględna zawartość barwników asymilacyjnych w liściach: Juncus trifidus, Luzula spadicea i Calamagrostis villosa: 1 – chlorofil a, 2 – chlorofil b, 3 – karotenoidy, 4 – chlorofil a + b

total contents of chlorophylles to carotenoids. For wood rush the proportion of chlorophyll a to chlorophyll b ranges from: 1.9–4.2, for reed grass: 2.1–3.4, while for rush 5.5–8.6. Proportion 3:1 is characteristic for pigments of grana thylacoids, while in stroma thylacoids observed is considerably lower participation of chlorophyll *b* expressed in proportion of chlorophyll *a* to *b* of the 5:1 range. High proportion of chlorophyll *a*:*b* observed for rush proves most probably that this species has worse formed granal system and that most tylakoid membranes occur as stroma lamelles. 4 proteinaceous complexes, differentiated considering their composition and functions, which take part in light reactions of photosynthesis, occur in tylakoid membranes. PSIIa complex chracterized with high antenna system occurs in the grana centre, while in stroma lamelles PSIIb appears which has antennas collecting light smaller by about 60–70%. At species submitted to a long-lasting activity of high intensity light, synthesis of chlorophyll *b* is lowered, which causes lowering of global size of antennas collecting light (Romanowska, 1999). This may be observed just on the example of rush, which appears on the highest ledges of the Tatra Mountains and is exposed to excessive solar radiation: in leaves of wood rush and reed grass, chlorophyll b constitutes 25% of total contents of photosynthetic pigments, while of rush – only 10% (Fig. 16).

Rush contains considerably many carotenoids. Proportion of chlorophyll to carotenoids for rush is contained in the interval of 1.9–3.1, while for reed grass and wood rush, respectively 3.6–5.6 and 3.5–5.3 (Tab. 5). Average share of carotenoids in the total pool of assimilation pigments is illustrated on Fig. 16: rush contains up to 28% of carotenoids, while wood rush and reed grass – only 18% each.



Fig. 16. Percentage of photosynthetic pigments share in leaves of investigated plant species *Ryc. 16. Procentowy udział barwników fotosyntetycznych w liściach badanych gatunków roślin*

Carotenoids are defined as accompanying pigments. However the role of carotenoids in plant organisms is quite differentiated (Włoch, Więckowski, 1982; Tuckendorf, 1979):

– co-participation in photosynthesis: they can absorb light within the range of the wave which is not absorbed by chlorophyll, and then transform the energy of an induced status upon the chlorophyll molecule, acting as an antenna (participation of carotens in the process of photosynthesis is much higher than of xanthophylles, because of the fact that the transfer of energy of electron induction from carotenoids to chlorophyll *a* takes place with almost 100% efficiency, while generally the efficiency is much lower of xanthophylles),

- counteraction to photooxidation of lypids of tylakoid membranes which takes place in oxygenic conditions (mainly: antheraxantine, zeaxantine and *b*-caroten).

Participation of respective carotenoids in leaves of species under investigation is similar, apart from violaxantine, the contents of which was lowered in rush. Instead, substantial differences were annotated for a dry wisp of rush, which is characterized with a lower contents of violaxantine, and especially neoxantine. Proportion of carotenoids to xanthophylles is almost twice as high as for the green part of rush and for leaves of reed grass and wood rush. It comes out from numerous investigations that stroma lamelles are enriched in carotens, while grana lamelles contain considerably more xanthophyll pigments (Włoch, Więckowski, 1982), thus increased contents of bcaroten and lowered contents of xanthophylles is observed in plants growing in the conditions of high intensity of solar radiation. Increased participation of *b*-caroten in rush stipules is surely connected with additional protection of a plant from excessive radiation. Dry wisp of rush ages faster than the lower green part of the plant, it contains most certainly less assimilation pigments, including up to about 50% less chlorophyll a and b and only15% less carotenoids, which results in the increase of the relative contents of carotenoids.

Measurements of the contents of pigments were taken in 1997 and 1998 at the same period (the last decade of August). Nevertheless it appeared that in 1998 plants were in the earlier stage of growth. Results of investigations from 1997 may thus be reckoned as representative for a later period of the vegetation season (ageing of species). As the wood rush

Table 5. Mean photosynthetic pigment content in leaves of investigated species Tabela 5. Średnia zawartość barwników fotosyntetycznych w liściach badanych gatunków

	Juncus trifidus		Luzula spadicea		Calamagrostis villosa	
Vegetation season Okres wegetacyjny	middle środkowy	late późny	middle środkowy	late późny	middle środkowy	late późny
mg of chlorophyll <i>a</i> in 1 g <i>mg chlorofilu a w 1 g masy</i>	0.909	0.661	1.383	1.391	1.782	1.768
% of chlorophyll a % chlorofilu a	61	62	61	58	60	58
mg of chlorophyll b in 1 g mg chlorofilu b w 1 g masy	0.269	0.104	0.493	0.593	0.655	0.743
% of chlorophyll b % chlorofilu b	18	10	22	24	22	24
mg of carotenoids in 1 g mg karotenoidów w 1 g masy	0.302	0.297	0.394	0.439	0.520	0.537
% of carotenoids % karotenoidów	20	28	17	18	18	18
Chlorophyll a / chlorophyll b Chlorofil a / chlorofil b	3.4	6.3	2.8	2.3	2.7	2.4
Chlorophyll / carotenoids Chlorofil / karotenoidy	3.9	2.6	4.8	4.5	4.7	4.7
ages complete contents of chlorophyll *b* increases by about 20% and carotenoids (11%) – contents of chlorophyll *a* does not undergo a change. Contents of chlorophyll *b* increases at reed grass by (13%). Thus the relative contents of protective pigments increases. In the late stage of growth of rush, complete contents of chlorophyll *a* and *b* considerably decreases (by 27%) increases. Within the range of the alpine belt these changes do not, however exceed 2% and should not have influence on spectral reflection of communities located on various elevations.

Absorption spectrum of chlorophyll b compared with the spectrum of chlorophyll a characterizes with the move of the absorption curve towards longer waves

Table 6. Percentage of specific carotenoid content in total carotenoids content Tabela 6. Procentowy udział poszczególnych karotenoidów w sumarycznej puli karotenoidów

	b-karoten	a-karoten	Lutheine <i>Luteina</i>	Violaxantine Wiolaksantyna	Neoxantine Neoksantyna	Carotens/Xantophyles Karoteny/Ksantofile
Juncus trifidus Sit skucina	21.3	1.1	58.4	6.4	12.8	0.29
Luzula spadicea Kosmatka brunatna	21.7	2.6	50.0	12.3	13.4	0.32
Calamagrostis villosa Trzcinnik owłosiony	18.4	1.2	56.5	11.3	12.6	0.25
Dry part of Juncus Sucha wiecha situ	26.0	6.2	56.1	7.9	3.8	0.52

and 61% respectively), while contents of carotenoids practically does not change. On the basis of the analysis of percentage contents of pigments, a distinct change in their contents may be observed of rush: in a late stage of growth contents of chlorophyll b decreases on behalf of carotenoids by about 8%.

Quantitative and qualitative composition of assimilation pigments of a given species may undergo oscillations of adaptations. In this paper, a small number of samples collected from testing fields of identical habitat conditions does not authorize drawing conclusions in this scope. However it seems that with the elevation, relative participation of chlorophyll a and of carotenoids increases, and of chlorophyll bdecreases at wood rush and reed grass, while at rush contents of chlorophylls decreases and carotenoids



Fig. 17. Absorption curves of main photosynthetic pigments: 1 – chlorphill a, 2 – chlorophill b, 3 – carotenoids

Ryc. 17. Widmo absorpcyjne głównych barwników fotosyntetycznych: 1 – chlorofil a, 2 – chlorofil b, 3 – karotenoidy (Fig. 17) within the blue and green range and towards shorter waves within the red range.

While using radiometers or graphic scanners registering narrow ranges of radiation: about 440 and 470 nm, 646 and 663 nm, it would be possible to identify species which differ in the contents of chlorophyll b. Considering the fact of high dispersion of blue light this range is rarely used in remote sensing. Carotenoids, which absorb blue and green light with a maximum moved towards longer waves compared to absorption of chlorophyll characterize themselves with a different curve of absorption, while contrary to chlorophyll, they do not absorb red light. High differentiation of the contents of carotenoids in the investigated plant species has essential influence on absorption of light (Fig. 18). Rush, containing less chlorophyll pigments and relatively many carotenoids compared to remaining two species under research, shows increased reflection of light in blue and red range. Absorption spectrum of a dry wisp of rush in the red range is approximate to the spectrum of the green part of a plant, while within the blue range absorption clearly increases, which is the result of high relative contents of carotenoids. Reed grass and wood rush characterize themselves with high absorption of photosynthetically active light, while reed grass has the highest absorption.

Spectrophotometric analysis of the absorption spectrum of respective carotenoids is impeded considering the fact that they demonstrate several maxima of absorption (usually 3) in approximate bands, concentrated in the interval of 410–490 nm (Fig. 19). Remote identification of species, differing with qualitative and quantitative variability of carotenoids would require using hyperspectral data, of narrow ranges of channels. Also it was ascertained (Goedheer, 1969), that *in vivo* carotenoids demonstrate slightly



Fig. 18. Absorption curve of photosynthetic pigments' mixture contained in leaves of the analysed species: 1 - rush, 2 - rush (dry wisp), 3 - wood-rush, 4 - reed grass

Ryc. 18. Widmo absorpcyjne mieszaniny barwników fotosyntetycznych zawartych w liściach badanych gatunków: 1 – sit skucina, 2 – sit skucina (sucha wiecha), 3 – kosmatka brunatna, 4 – trzcinnik owłosiony

different physico-chemical features than *in vitro*, e.g. *in vivo* main bands of absorption within the range of visible radiation are moved by a dozen or so nm towards longer waves compared with the analogous bands of pigment absorption in organic dissolvents.

Fluorescence Parameters of Chlorophyll a

Fluorescence of chlorophyll *a* reflects photochemical efficiency of PS II, which is specially sensitive to stress factors, such as: high and law temperature and draught. On the average the photochemical efficiency of PSII of herbaceous species expressed with the parameter F_v/F_m oscillates within the interval of 0.780–0.865 (Öquist, Wass, 1988). Excessive lighting of a leaf leads to photoinhibition expressed with a decrease of changeable fluorescence. For the species under investigation, the following average values were obtained: reed grass: 0.726, wood rush 0.692, rush 0.630 – thus all the investigated species have quite

low photochemical PS II efficiency, with rush demonstrating the lowest fluorescence. A short half-time fluorescence induction $(t_{1/2})$ is characteristic for shade loving species which contain bigger pool of LHCPII (proteinaceo-pigmental complexes, functioning as main peripheral antenna collecting light). In the analysis performed, the following results were obtained: $t_{1/2}$: reed grass: 55 ms, wood rush 67 ms, rush 119 ms (Fig. 20).

Intensity of Transpiration

Transpiration measurement results are presented on Fig. 21. Transpiration and other processes of gas exchange are subject to the laws of diffusion: intensity of transpiration depends on the external conditions and on a range of processes taking place inside the organism of a plant which are vital for water economy, and first of all connected with osmotic pressure and with the status of stomatal apparatuses.



Fig. 19. Absorption maximum of different carotenoids: 1 - a-caroten, 2 - b-caroten, 3 - lutein, 4 - violaxanthine, 5 - neoxanthine Ryc. 19. Maksima absorpcji poszczególnych karotenoidów: a-karoten, 2 - b-karoten, 3 - luteina, 4 - wiolaksantyna, 5 - neoksantyna



Fig. 20. Half-time of fluorescence invocation from $F_{_{0}}$ to $F_{_{m}}$ $(t_{_{1/2}})$ and $F_{/}F_{_{m}}$

Ryc. 20. Połówkowy czas wzbudzenia fluorescencji od F_o do F_m $(t_{1|2})$ oraz F_v/F_m

Large area of a leaf compared to its mass requires loss of water as a result of a large surface of plant contact with the surrounding air. This explains faster transpiration at reed grass and wood rush against the thin scrolled leaf blade of rush.

In this experiment measurements were taken in stable conditions, so the measured transpiration may be acknowledged as potential, depending only on anatomical factors. Intensity of transpiration is connected *inter alia* with the total volume of intercellular spaces. Based on the observed results it is possible to draw a conclusion that the sponge parenchyma of reed grass contains relatively large intercellular spaces. Influence of the structure of a leaf upon the reflection of electromagnetic radiation is discussed in the chapter containing the results of field spectrometric measurements.



Fig. 21. Transpiration time of 0.01 cm³ of water from 1 g of matter *Ryc. 21. Czas transpiracji 0,01 cm³ wody przez 1 g masy*

On Fig. 21 presented is the average time of transpiration of 0.01 cm^3 of water by 1 g of mass of a plant species under investigation for measurement points located in the alpine and sub-alpine belt, in the alpine belt a shorter time of transpiration was recorded. In this paper measurements of the indicator of a leaf surface (LAI) were not performed. However a hypothesis can be drawn that higher intensity of transpiration of plants collected from the alpine belt is connected with the growth of the surface of leaf blades.

Water Contents in Tissues

Reed grass and rush demonstrate approximate content of water in tissues: 70.5% and 71.3%, respectively, while wood rush which is a species of wet depositary habitats, contains up to 78.9% of water. Reed grass demonstrates slight decrease of the contents of dry mass with the elevation, while wood rush and rush – a slight increase.

Spectral Characteristics of the Investigated Communities

Spectrometric measurements of the investigated communities confirmed the result of field and laboratory research performed on the level of species. As was expected, rush characterizes itself with larger reflection of radiation in all investigated ranges of light. (Fig. 22).

Larger reflection of rush within the range of red light is the result of high participation of carotenoids in the total pool of photosynthetic pigments, which do not absorb radiation in this range. Reed grass, which contains about 1.5 times more pigments in 1g of mass than wood rush, demonstrates higher absorption in photo-synthetically active (red) range of light and lower in photo-synthetically inactive (for chlorophyll pigments) green range. Differentiation of the reflection of the radiation in the visible range is however inconsiderable. This is first of all due to the fact

that measurements were taken in channels of very wide ranges. Besides, the arrangement of leaves and the bedding also influence the reflection.

Plant species under investigation differ substantially with the reflection in the infrared range of electromagnetic radiation. Within the range of 800–1100 μm reflection depends on the number and size of intercellular spaces of leaves: species with dense sponge parenchyma reflect considerably less infrared radiation within the range of $0.75-1.35 \mu m$, than species of a substantial participation of intercellular spaces in mesophyll (Gausman, 1974). A conclusion could be drawn that rush, which demonstrates the smallest reflection in this range, characterizes itself with a dense structure of parenchyma, while reed grass, of the largest re-

flection characterizes with a loose structure. There is a correlation between the quantity of reflected light within the range of 800–1100 nm and intensity of transpiration: reed grass, which characterizes itself with high transpiration has larger reflection within this



Fig. 22. Albedo in spectral bands registered by SP-1 spectrometer: 1 – Calamagrostietum villosae tatricum, 2 – Luzuletum spadiceae, 3 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi

Ryc. 22. Albedo w zakresach rejestrowanych przez spektrometr SP-1: 1 – Calamagrostietum villosae tatricum, 2 – Luzuletum spadiceae, 3 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi

range, while rush, which transpires small quantities of water – the smallest. This results from the dependence between the transpiration and anatomical structure of a leaf. Intensity of transpiration depends first of all on the degree of the rictus of stomatal apparatuses and on the inside surface of transpiration. Large intercellular spaces considerably add to enlargement of the total surface of transpiration. Therefore species of loose structure of mesophyll characterize themselves with increased transpiration (Górski, 1962).

Quantitative Differentiation of the Investigated Communities

Analysis of biomass production proved the following arrangement of species: wood rush (average: 2421 kg/ha, range: 1600–3260 kg/ha), reed grass (2126.89 kg/ha, 1700–2680 kg/ha), rush (1554 kg/ha, 960–2360 kg/ha). A considerable decrease of productivity with altitude was observed. At the same time investigated communities demonstrated high variability of productivity depending on habitat conditions (Fig. 23). Reed grass has the lowest variability. Statistically valid interpretation of the variability of productivity is not possible because of the small number of samples collected from testing fields of identical habitat conditions.

Analysis of verdure indicator calculated on the basis of field spectrometric measurements also indicates high differentiation of the value of NDVI indicator for the investigated communities (NDVI = 0.58 –0.78). Average values and the range of recorded NDVI indicator are compared in Table 7. Depositary communities distinguish themselves with the highest differentiation. Considering strong differentiation in productivity and NDVI indicator depending on local habitat conditions, discernment of the investigated communities on NDVI indicator does not seem possible.

Evaluation of the Possibilities of Identification of the Investigated Plant Communities

Investigated species demonstrated distinct adaptability to the alpine environment, which is reflected in differentiation of all investigated parameters within the field of plant physiology: quantity and quality of assimilation pigments, fluorescence, transpiration and water contents in tissues. These parameters have substantial influence upon the reflection of electromagnetic radiation in respective ranges, which was confirmed by the results of field spectrometric measurements. Considering the fact that spectrometric measurements were carried out for communities and not for species, and in quite wide ranges, recorded differentiation was smaller. Differentiation of communities is however distinct in the infrared radiation, which allows for identification of the investigated communities.



Fig. 23. Productivity of analysed communities and change tendency with altitude: 1 – grasso-phytes, 2 – grasso-phytes – trend, 3 – greenswards, 4 – greenswards – trend, 5 – depositary vegetation, 6 – depositary vegetation – trend Ryc. 23. Produktywność badanych zbiorowisk i trend zmian z wysokością: 1 – traworośla, 2 – traworośla – trend zmian, 3 – murawy, 4 – murawy – trend zmian, 5 – wyleżyska, 6 – wyleżyska – trend zmian



Table 7. NDVI of analysed plant communities Tabela 7. NDVI badanych zbiorowisk roślinnych

Plant community Zbiorowisko	Measured NDVI range Zakres pomierzonych wartości NDVI	Mean values of NDVI Wartości średnie NDVI	
Luzuletum spadiceae	0.60 - 0.78	0.70	
Calamagrostietum villosae tatricum	0.74 - 0.78	0.78	
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi	0.58 - 0.74	0.61	

Recorded differentiation of species in respect of the contents and quality of carotenoids is substantial, but unfortunately difficult to catch in remote sensing investigations, due to strong dispersion of short-wave radiation. Possible attempts at investigations in this range would require advanced radiometric correction.

Although high variability of biomass and of NDVI indicator do not allow for identification of the investigated communities, quantitative measurements may allow for the analysis of the expansion and vigour of communities depending on habitat conditions.

Results of Cameral Elaborations

Supervised Classification of Ground Images

Supervised classification of images taken within the range of red and infrared radiation gave good results and allowed identification of the following plant communities: Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, Luzuletum spadiceae, Rhizocarpetalia (community of rock lichen), community of ponier moss-grown communities growing on wet gullies and Pogonato-Oligotrichetum (anthropogenic communities formed along tourist paths). As a result of classification, also mapped were the following sub-sets and forms of a community of Oreochloo distichae-Juncetum trifidi: herbaceae (with herbaceous willow, which occur on slopes with a depositary snow cover), typicum, typicum moss-grown, caricetosum sempervirentis, sub-alpine post-pasturage form and a complex of Luzuletum spadiceae and Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis communities (Fig. 24).

Histograms of signatures for testing fields of three investigated plant communities: Luzuletum spadiceae, Oreochloo distichae–Juncetum trifidi typicum and Oreochloo distichae–Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis confirm the results of radiometric measurements and laboratory analysis of photosynthetic pigments: communities dominated by the alpine species *Juncus trifidus* have increased reflection of electromagnetic radiation within red radiation, while in the infrared this reflection is decreased compared with a depositary community (Fig. 25). Within the range of red radiation it is not possible to distinguish the above mentioned sub-sets with the participation of rush. In the infrared radiation the histograms of these communities are separable, which enables easy distinguishing of sub-sets of the *Oreochloo distichae–Juncetum trifidi set*.

Assessment of the Exactness of Classification

Mahalanobis's distances of pixels from average values of training samples are presented on Fig. 26: the longer the distances, the less probability that the given pixel belongs to the class to which it was assigned. Long distances are marked with light colour, and short ones with black. Statistical characteristics of the distribution of Mahalanobis's distances is presented in Table 8.

Table 8. Parameters of statistical distribution of Mahalanobis` distance from mean values of training samples Tabela 8. Parametry statystycznego rozkładu odległości Mahalanobisa od wartości średnich próbek treningowych

Parameters of statistical distribution Parametry rozkładu statystycznego	Value <i>Wartość</i>
Minimum / Minimum	0
Maximum / Maksimum	700.82
Mean / Średnia	22.76
Median / Mediana	8.24
Dominant / Dominanta	2.76
$Standard\ deviation\ /\ Odchylenie\ standard owe$	33.05

←

Ryc. 24. Wynik klasyfikacji nadzorowanej zdjęć naziemnych: 1 – Rhizocarpetalia, 2 – świeże piargi bez roślinności, 3 – starsze piargi z roślinnością pionierską, 4 – Pogonato-Oligotrichetum, 5 – pionierskie zbiorowiska wilgotnych mchów, 6 – Luzuletum spadiceae, 7 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae, 8 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum (postać mszysta), 9 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum, 10 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, 11 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis w kompleksie z Luzuletum spadiceae, 12 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi (powypasowa postć subalpejska), 13 – cień

Fig. 24. Result of supervised classification: 1 - Rhizocarpetalia, 2 - young screess without pioneer vegetation, 3 - older screess with pioneer vegetation, 4 - Pogonato-Oligotrichetum, 5 - pioneer communities of wet moss, 6 - Luzuletum spadiceae, 7 - Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae, 8 - Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum (mossy form), 9 - Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum, 10 - Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, <math>11 - Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis in complex with Luzuletum spadiceae, <math>12 - Oreochloo distichae-Juncetum trifidi (post pasturage subalpine form), 13 - shade



 $\label{eq:Fig.25} Fig. 25. \ Histograms for \ signatures of three \ plant \ communities: 1-Luzuletum \ spadiceae, 2-Oreochloo \ distichae-Juncetum \ trifidi \ typicum, 3-Oreochloo \ distichae-Juncetum \ trifidi \ caricetosum \ sempervirentis$

Ryc. 25. Histogramy sygnatur dla pól treningowych trzech zbiorowisk roślinnych: 1 – Luzuletum spadiceae, 2 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum, 3 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis

Pixels assigned to such classes as: screes, shade and moss-growing communities, the signatures of which are not separable, classified themselves worst. A detailed analysis of the exactness of classification was carried out on the basis of the distribution of the distances of pixels of training tests from the mean values of these tests (Fig. 27). Mahalanobis's distances (taking into consideration variance and co-variance of channels) were plotted on the obscissa and the number of pixels on the ordinate. Distributions of distances are approximated with the chi-squared distribution. Threshold distances, above which rejected were pixels classified to the given class, were adopted on the level of vitality equal 0.01. For three degrees of liberty (number of channels) and the level of vitality 0.01, value of χ^2 equals 11.345. Above this value (marked on Fig. 27 with a red, perpendicular stroke) pixels were attributed to the class of "not classed". Percent of appropriately classified pixels is presented in Table 9.

Most of the investigated plant communities were well classified. Pixels of a mixed class: *Oreochloo distichae–Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* in complex with *Luzuletum spadiceae* were classified worst. On the histogram of distances of this class, one may notice that many pixels are a long way from the mean value. This results from the specifics of the class which characterizes itself with high heterogeneity as this is a mixed class. Attempts to solve the problem of classification of mixed pixels and of automated mapping of complexes will be undertaken in the further part of the thesis. Final results of classification, after rejection of pixels classified erroneously on the level of vitality 0.01 are presented on Fig. 28.

Assessment of the Possibility of Automated Delimitation of the Investigated Communities on Large Scale Remote Sensing Materials

It can be ascertained from the supervised classification of ground images, that remote delimitation of alpine plant communities is possible even in the rank of a subset. An attempt to verify the results obtained in the large scale investigations on air and satellite materials will be undertaken in the further part of the thesis.

An Attempt to Extrapolate the Results of Ground Investigations of Air and Satellite Images

Supervised Classification of an Air Image

Considering the lack of information within the infrared range of the air image, in the supervised classification an attempt of identification of only the investigated communities was undertaken: greenswards, depositary plants and grasso-phytes and: dwarf mountain pine thicket, new screes without vegetation, screes with traces of pioneer vegetation, ponds and shade. Spectral channels within the visible range are strongly correlated with one another. This is why they carry comparatively little information on the differentiation of objects. This was confirmed by the analysis of signatures of separated classes. They characterize themselves with parallel and even distribution (Fig. 29), and distribution of signatures according to sizes of reflection demonstrates the same arrangement in all channels (Fig. 30). The only exception is here the class of green-swards and grassophytes, the signatures of which "change places" in the red and green channels.



Fig. 26. Spectral distance of pixels from mean sample values (explanation in text) Ryc. 26. Odległości spektralne pikseli od wartości średnich próbek treningowych



Fig. 27. Distribution of pixel distances of training sites from mean values Ryc. 27. Rozkłady odległości pikseli prób treningowych od wartości średnich tych prób

Table	9.	Accuracy	assessm	ient of	ground	photogra	phs	classification	
Tabela	9.	Oszacowo	anie dok	ladno	ści klasy	fikacji za	ljęć n	naziemnych	

Class Klasa	% of correctly classified pixels % pikseli zaklasyfikowanych poprawnie
Rhizocarpetalia	36
New screes without vegetation Świeże piargi bez roślinności	19
Older screes with traces of pioneer vegetation Starsze piargi ze śladami roślinności pionierskiej	10
Pogonato-Oligotrichetum	51
Pioneer communities of moist mosses Pionierskie zbiorowiska wilgotnych mchów	1
Luzuletum spadiceae	83
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae	67
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum (mossy form) (postać mszysta)	56
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum	60
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis	88
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis in complex with (w kompleksie z) Luzuletum spadiceae	36
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi (subalpine post-pasture form) (powypasowa postać subalpejska)	94
Shade (Cień)	6

However, signatures of investigated communities do not confirm the results of laboratory examinations, radiometric measurements, nor the analysis of ground images, which is the result of an early time of taking photographs.

The result of the classification is presented on Fig. 31, low usefulness of aerial image was confirmed by the analysis of the assessment of exactness. Exactness of the classification was only 40.2%, while Kapp's coefficient, expressing proportional reduction of errors originating within the process of classification referring to the error of random classification is 0.213. This means that only 21.3% of pixels were classified

Table 10. Error marix of aerial photo classification Tabela 10. Macierz błędów klasyfikacji zdjęcia lotniczego better than in case of a random classification! Matrix of errors of the classification of aerial image is presented in Table 10.

Supervised Classification of a Satellite Image

The scope of a supervised classification on a satellite image is presented on colour compositions: in real colours (Fig. 32) and on three compositions in unreal colours (respectively: R,G,B): channels 4, 3, 2 (Fig. 33), channels: 5, 4, 3 (Fig. 34) and channels 7,5,3 (Fig. 35).

At first an attempt was undertaken of elaborating signatures for all classes separated on the accessible map (38 classes). However, considering the inseparability of signatures, this classification did not give

		Classe Kla	es on the isy na p	e bases o odstawie	of the ve e mapy r	getatior o <i>ślinno</i>	n map ści		tcji	-03		it , %
		1 – scree and with pioneer piargiz rosl. pionierską	2 – new screes świeże piargi	3 – dwarf mountain pine zarośla kosodrzewiny	4 – grasso-phytes traworośla	5 – greenswards murawy	6 – depositary wegetation <i>wyleżyska</i>	Sum according to vegetation map Suma według mapy roślinności	Sum according to classification Suma według klasyfika	Number of pixels correctly classified Liczba pikselizaklasyfi wanych poprawnie	Error of omitting in $\%$ Bt ąd pominięcia w $\%$	Error of overassessmen in % Bląd przeszacowania w
	1	18	0	15	0	48	12	69	93	18	74	81
shed on ve	2	12	0	0	0	18	3	9	33	0	100	100
sses distinguis he classificati <i>sy wyróżnion</i> lasyfikacji	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
Cla in t Kla w k	6	9	3	3	6	24	21	48	66	21	56	68



◀

Fig. 28. Classification result after rejection of incorrectly classified pixles: 1 – *Rhizocarpetalia*, 2 – young screess without vegetation, 3 – older screes with pioneer vegetation, 4 – *Pogonato-Oligotrichetum*, 5 – pioneer communities of wet moss, 6 – *Luzuletum spadiceae*, 7 – *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae*, 8 – *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum* (mossy form), 9 – *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum*, 10 – *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis*, 11 – *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* in complex with *Luzuletum spadiceae*, 12 – *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* (post pasturage subalpine form), 13 – shade

Ryc. 24. Wynik klasyfikacji nadzorowanej zdjęć naziemnych: 1 – Rhizocarpetalia, 2 – świeże piargi bez roślinności, 3 – starsze piargi z roślinnością pionierską, 4 – Pogonato-Oligotrichetum, 5 – pionierskie zbiorowiska wilgotnych mchów, 6 – Luzuletum spadiceae, 7 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae, 8 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum (postać mszysta), 9 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum, 10 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, 11 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis w kompleksie z Luzuletum spadiceae, 12 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi (powypasowa postć subalpejska), 13 – cień

favourable results. Thus, classification of the vegetation sets investigated in this paper (viz green-swards, depositary vegetation and grasso-phytes) was performed. Additionally the following classes were distinguished: dwarf mountain pine thickets, bare rocks, screes and ponds. Training samples were delimited within the homogeneous surfaces (chosen were samples from relatively large patches of vegetation) and representative for the given class (samples were chosen only from "clean" classes, namely typical classes which are not sub-sets, variants nor spatial complexes of the investigated communities. Set of *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* was represented by a sub-set *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum*.

Fig. 36 illustrates distribution of mean values of DN of the investigated classes. Spectral curves of the investigated communities (*viz* green-swards, grassophytes and depositary vegetation) have a course concordant with the course obtained as a result of radiometric measurements in the first four ranges measured. Community of green-swards characterizes itself with the highest reflection within the visible range. Distinct differentiation can be seen within the range of near-infrared radiation. In the 4 channel grasso-phytes have the highest reflection, then depositary communities, while green-swards have the lowest reflection. As it was already mentioned, within this range, reflection is determined by the size and quantity of intercellular spaces, and the arrangement of species according to the size of reflection in this channel confirms the results obtained in the investigation of transpiration.

Differentiation of reflection is also distinct in channels 5 and 7. Within these ranges, contents of water in plant tissues influences the reflection. In both of these ranges wood rush has the lowest reflection. In channel 7 identical reflection was recorded for rush and reed grass and considerably lowered reflection of wood rush. This confirms the result obtained in the examination of the contents of water in tissues: rush and reed grass contain approximate contents of water (about 70%), while hydration of tissues of wood rush is higher and reaches 79%.

Blue channel characterizes itself with very low usefulness in classification: approximate DN values were recorded for all investigated classes, except for rocks and screes not covered with vegetation.

On the left side of Fig. 37 illustrated is the arrangement of pixels which belong to training samples



 $\label{eq:Fig. 29. Spectral characteristics of classes distinguished from aerial photo: 1-fresh screes, 2-screes with vegetation, 3-depositary vegetation, 4-greenswards, 5-grasso-phytes, 6-dwarf mountain pine thicket, 7-ponds$

Ryc. 29. Charakterystyki spektralne klas wyróżnionych w klasyfikacji zdjęcia lotniczego: 1 – świeże piargi, 2 – piargi z roślinnością pionierską, 3 – wyleżyska, 4 – murawy, 5 – traworośla, 6 – zarośla kosodrzewiny, 7 – stawy



Fig. 30. Histograms for signatures used in supervised classification of aerial photo: 1 – shade, 2 – ponds, 3 – dwarf mountain pine thicket, 4 – grasso-phytes, 5 – greenswards, 6 – young screes, 7 – depositary vegetation, 8 – screes with pioneer vehetation Ryc. 30. Histogramy sygnatur opracowanych do klasyfikacji zdjęcia lotniczego: 1 – cień, 2 – stawy, 3 – zarośla kosodrzewiny, 4 – traworośla, 5 – murawy, 6 – świeże piargi, 7 – wyleżyska, 8 – piargi z roślinnością pionierską



Fig. 31. Result of supervised classification of aerial photo: 1 - older screes with traces of pioneer vegetation, 2 - young screes and gullies without vegetation and patches of snow, 3 - ponds, 4 - dwarf mountain pine this ckets, 5 - grasso-phytes, 6 - greenswards, 7 - despositary vegetation

Ryc. 31. Wynik klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia lotniczego: 1 – starsze piargi ze śladami roślinności pionierskiej, 2 – świeże piargi i żleby bez roślinności oraz płaty śniegu, 3 – stawy, 4 – zarośla kosodrzewiny, 5 – traworośla, 6 – murawy, 7 – wyleżyska





Ryc. 32. Obraz satelitarny – kompozycja w barwach rzeczywistych (RGB: 3, 2, 1)





Fig. 33. Satellite image – color composition (RGB: 4, 3, 2)

Ryc. 33. Obraz satelitarny – kompozycja w barwach nierzeczywistych (RGB: 4,3,2)



Fig. 34. Satellite image – color composition (RGB: 5, 4, 3)

Ryc. 34. Obraz satelitarny – kompozycja w barwach nierzeczywistych (RGB: 5,4,3)





Fig. 35. Satellite image – color composition (RGB: 7, 5, 3)

Ryc. 35. Obraz satelitarny – kompozycja w barwach nierzeczywistych (RGB: 7,5,3)



Fig. 36. Spectral characteristics of classes distinguished in classification of satellite image: 1 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi,
2 – Luzuletum spadiceae, 3 – Calamagrostietum villosae tatricum, 4 – dwarf mountain pine, 5 – bare rocks and screes, 6 – ponds
Ryc. 36. Charakterystyki spektralne klas wyróżnionych w klasyfikacji zdjęcia satelitarnego: 1 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, 2 – Luzuletum spadiceae, 3 – Calamagrostietum villosae tatricum, 4 – kosodrzewina, 5 – nagie skały i piargi, 6 – stawy

of the investigated classes in the spectral feature space. Spectral distances are expressed in an 8-bit scale. The largest number of pixels is marked with the red colour, and the smallest with purple. On the right side of Fig. 37 the mutual location of classes is presented. Respective colours present classes separated as a result of classification (colours as on Fig. 38). It is clear on Fig. 37 a and d that information from channels 2, 3 and 5, 7 is strongly correlated, and close location of the investigated classes in the feature space generally does not allow for distinguishing them. Differentiation which allows for identification of investigated communities can be seen in channels which are not correlated in such a degree: 3, 4 and 7. It is possible to distinguish the investigated communities on their bases, while channels: blue (1), green (2) and near-red (5) are not indispensable for their proper identification.

Classification result is presented on Fig. 38, and matrix of errors in Table 11. Exactness of the classification (58,3%) may be described as unsatisfactory, Kapp's coefficient was only 0.44.

Contrary to the classification of the aerial image, low accuracy of the satellite image classification does not result from the spectral resolution of the image. As it was proved above, for identification of the investigated communities sufficient are three channels of Landsat TM photograph. The reason for low exact-

Table 11. Error matrix of satellite image classification Tabela 11. Macierz błędów klasyfikacji zdjęcia satelitarnego

		Classe F	s accordir Klasy wg 1	ng to a ve napy roś	egetation <i>linności</i>	map	2			%	nent a	
		1 – scree and with pioneer piargi i żleby	2 – new screes zarośla kosodrzewiny	 3 - dwarf mountain 3 - dwarf mountain 4 - grasso-phytes 4 - grasso-phytes 5 - depository vegetation wyleżyska 		5 – depository vegetation <i>wyleżyska</i>	Sum according to a vegetation map <i>Suma wedlug map</i> ; roślinności	Sum according to classification <i>Suma według</i> kłasyfikacji	Number of pixels correctly classified Liczba pikseli zaklasyfikowanych poprawnie	Error of omitting Bląd pominięcia w '	Error of overassessi Bląd przeszacowani w %	
	1	87	12	0	54	21	129	174	87	67	50	
n one	2	18	165	3	18	0	192	204	165	14	19	
es iguished assificatio ' wyróżni	3	21	12	15	21	15	21	84	15	29	82	
	4	3	3	0	27	9	120	42	27	77	36	
Class distir in cli Klasy w kla	5	0	0	3	0	3	48	6	3	94	50	



Fig. 37. Distribution of classes created during classification of satellite image, in spectral feature space (explanation in text) Ryc. 37. Rozmieszczenie klas wydzielonych w klasyfikacji zdjęcia satelitarnego w spektralnej przestrzeni cech



Fig. 38. Result of supervised classification of satellite image: 1 - country frontier, 2 - young screes and gullies without vegetation, 3 - ponds, 4 - dwarf mountain pine thicket, 5 - grasso-phytes, 6 - greenswards, 7 - depositary vegetation

Ryc. 38. Wynik klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia satelitarnego: 1 – granica państwa, 2 – świeże piargi i żleby bez roślinności, 3 – stawy, 4 – zarośla kosodrzewiny, 5 – traworośla, 6 – murawy, 7 – wyleżyska

ness of the classification is the geometry of the object of research itself (small-mosaic character of vegetation cover) and also the materials used: satellite image and a vegetation map used for assessment of the classification accuracy. These issues are discussed in detail below.

Problem of Community Complexes and Zonal Borders

Analyses of spectral curves and of location of classes in spectral space evidence that typical "clean" communities can be distinguished on the basis of satellite images, even of such low spectrometric resolution as the resolution of Landsat TM. As was indicated above training samples for attributing classes were chosen from homogenous areas, representing typical classes. However, on the area submitted to the analysis, typical communities cover only a small percentage of the area – share of the area occupied by the investigated communities in a summary area of communities with a sub-set, variant or complex of communities with the participation of this set is presented in Table 12.

Most pixels submitted to the analysis in the supervised classification is thus very heterogenuous.

Problem of Generalization

The third problem connected with low exactness of classification, is the problem of generalization of a vegetation map. Although vegetation mapping was made in terrain in a very accurate scale of (1:10 000), recurrently readability of the map did not allow drawing such a mosaic of vegetation as does exist in reality. When the given vegetation complexes create durable spatial complexes, separate classes are listed in the legend. In cases when small mosaic of vegetation communities does not have a functional character, generalization is:

- deleting small contours,

- increasing small but characteristic separations,

- combining small, homogenous contours into larger ones.

Examples of generalization of a vegetation map are presented on Fig. 39. Generalization is one of more important attributes of classical maps, without abstracting and simplification which compose generalization, cartographic presentation of many geographical objects in a required scale is not possible. However, generalization leads to reducing geometrical exactness, and obtaining a compromise between the exactness and plausibility of presentation and the issue

Table 12. Percentage of "clear" communities on the vegetation map of Dolina Gasienicowa Tabela 12. Procentowy udział zbiorowisk "czystych" na mapie roślinności Doliny Gąsienicowej

Plant community Zbiorowisko roślinne	Area (m²) Powierzchnia (m²)	% of particular community in total area of all communities Udział w całkowitej powierzchni zbiorowisk z udziałem danego zbiorowiska			
Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum	$534\ 805$	13.32			
Luzuletum spadiceae	402819	6208			
Calamagrostietum villosae tatricum	612 021	51.83			

One of possible solutions to the problem of interim borders is using fuzzy communities (Wang, 1992, Haußecker, Tizhoosh, 1999). This issue will be addressed in the last part of the thesis.

Problem of Mixed Pixels

Accessible satellite images are characterized by very low field resolution (30 m), compared with areas occupied by investigated communities. Images obtained by Landsat TM have satisfactory resolution for regular applications (mapping of the terrain cover). In the case of detailed mapping of vegetation characterizing itself with high spatial variability, a pixel depicted by Landsat is a heterogenic one, comprises several types of vegetation. Fig. 39 presents the same area recorded on an aerial and satellite image. Chosen fragments cover the area of 300×240 m and on the Landsat image are represented by 80 pixels. The aerial image, taken in the scale of about 1:30 000, illustrates differentiation of the terrain cover within one pixel of Landsat.

of legible graphic presentation are one of more important problems of cartography (Saliszczew, 1984; Eckert, 1921). One of possible solutions to the problem of thematic maps generalization is a raster system of presentation and analysis. It enables not only presentation of small discreet separations (Sziriajew, 1977), but also their analysis. Digital processing of remote sensing materials thus has this additional advantage that there is no need to carry out generalization after making analyses leading to elaboration of thematic maps (e.g. classification). As a consequence of this, the character of these materials constituting a "plausible model of the terrain" does not undergo deformation.

Assessment of Usefulness of Currently Accessible Remote Sensing Materials in the Research of Alpine Vegetation

Summing up the results of digital processing of aerial and satellite images, it should be stated that none of them possesses such technical parameters which would allow for separation of the investigated

A. Range of vegetation map units overlaid on color aerial photo Zasięgi wydzieleń mapy roślinności nałożone na kolorowe zdjęcie lotnicze





B. Color compositions of a part of the Landsat TM satellite image Kompozycje barwne fragmentu obrazu satelitarnego Landsat TM



Fig. 39. Factors influencing classification accuracy: A – vegetation map generalization, B – pixel size of satellite image, scale 1:5000 Ryc. 39. Czynniki wpływające na dokładność klasyfikacji: A – generalizacja mapy roślinności, B – wielkość piksela zdjęcia satelitarnego

Differentation of the Alpine Vegetation of the Tatra Mts. ...

vegetation communities on the basis of automated supervised classification. The term of performing an aerial image and the spectral ranges used do not even allow for identification (interpretation) of the investigated communities. On the Landsat TM satellite image, investigated alpine communities demonstrate sufficient differentiation which allows for their remote identification. However, low geometric resolution does not allow for their mapping. Results of the satellite image, however, drew attention to a problem of common occurrence of mixed communities on the terrain under research and on their strong influence upon the exactness of automated classification. Methodological problem of mapping of the complexes of communities was outlined in the introduction of this paper, an attempt of solving the problem was undertaken in the last part of the thesis.

Assessment of the Application of Fuzzy Logic in the Classification

Specifics of alpine vegetation is expressed *inter alia* by zonal character of many borders and common occurrence of complexes of communities. Communities numbered in the table 3 as 8, 10, 21^7 and 17, where classes 10 and 21 constitute interim forms from *Luzuletum spadiceae* (class 8) to *Oreochloo distichae*-*Juncetum trifidi* (class 21), may be an example. Another example may be communities of different degree of formation demonstrated by density – e.g. communities 2, 3 and 7, 8.

As was shown in the example of a supervised classification of a satellite image, occurrence of various forms of communities and their complexes enables correct classification of the image. Automated identification of these communities with the methods of traditional supervised classification is impeded and in most cases leads to elaborating thematic maps of low exactness.

In this paper, an attempt was made of automated delimitation of mixed communities. Considering too low geometric resolution of a satellite image and unsatisfactory spectral resolution of an aerial image, examination was made on a ground image of Beskid. Three communities: *Luzuletum spadiceae*, *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* and a complex of these two communities were submitted to the analysis. The method used differs from the traditional approach to a supervised classification, because it is useless to appoint a signature for the mixed class.



Fig. 40. Signature distribution of three communities in spectral feature space: 1 – Luzuletum spadiceae, 2 – Luzuletum spadiceae in complex with Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, 3 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetoricetosum sempervirentis

Ryc. 40. Položenie sygnatur trzech zbiorowisk w spektralnej przestrzeni cech: 1 – Luzuletum spadiceae, 2 – Luzuletum spadiceae w kompleksie z Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, 3 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis

The first step was the analysis of a relative location of signatures of the three investigated communities, distinguished in the process of standard supervised classification, in spectral feature space. Fig. 40 presents the location of signatures of investigated communities in two-channel feature space (red and infrared channel). Signature for the complex of investigated communities lies between signatures of investigated "clean" communities.

In the analysis based on fuzzy logic, it is enough to specify "clean" signatures: in this case for the communities Luzuletum spadiceae and Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, and then to specify the criteria delimiting the border of a mixed class. Figure 43 present probabilities of affiliation of pixels to classes: Luzuletum spadiceae and Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis. The highest probabilities for the class of Luzuletum spadiceae can be observed in the right bottom corner of the image, while for the class of Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis - in the upper left corner (compare Fig. 24). On both images, however, appear pixels of lower probability of affiliation than 1 – they occur mainly in the central part of the image.

The second stage consisted in performing a supervised classification on the basis of the same training samples, based on which a standard supervised clas-

⁷ Xerophilous form of *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* with *Juncus trifidus* occurs on large-stone screes and blocks of rocks of southern exposure. It characterizes with loose tufty structure. Because this form is poorly distinguished floristically, it was not given a rank of a sub-set, although formally it should have been included to a typical sub-set ([after:] Balcerkiewicz, 1984).



Fig. 41. Likelihood of *Luzuletum spadiceae* class membership Ryc. 41. Prawdopodobieństwo przynależności do klasy Luzuletum spadiceae



Fig. 42. Likelihood of Oreochloo distichea-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis class membership Ryc. 42. Prawdopodobieństwo przynależności do klasy Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis

sification was made, with the omission of a training sample for the complex of communities of Luzuletum spadiceae and Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis. This class was separated by identification of mixed pixels, which were appointed on the basis of the value of a threshold plausibility of affiliation to both classes: Luzuletum spadiceae and Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis. It was assumed that in the event the plausibility was contained in the interval (0.1: 0.9), pixels would belong to a mixed class. Pixels with uncertainty higher than 0.5 are rejected. Thus, these pixels are not similar to any of the separated classes and most probably belong to another class. Table 13 presents example distributions of probabilities of affiliation to three classes and solution of the problem of classification in the result of applying a traditional method of classification and a decision rule based on the theory of Dempster-Shafer.

Classification performed with this method gave favourable results (Fig. 43), and the obtained image of vegetation is close to the image obtained by applying a traditional method of supervised classification. The advantage of this method is the fact that separation of a mixed class is automated and does not require preparing a signature for a mixed class. This has special significance when there are many mixed classes. Besides, this method enables creating any number of interim classes between "clean classes"– depending on the goals and scale of elaboration.

Summary of the Results of the Research and Discussion

Differentiation of the Investigated Species in the Light of Research Within the Range of Physiology of Plants

Investigated alpine species demonstrate substantial differences in anatomic and also in functional structure, which are expressed by differentiation of all investigated parameters from the scope of physiology of plants: contents and quality of photosynthetic pigments, fluorescence, transpiration, and contents of water in tissues. Quantitative and qualitative contents of assimilation pigments enables distinguishing rush from two remaining species: wood rush and reed grass. Contents of water in tissues distinguishes wood rush from reed grass and rush. While fluorescence parameters and volume of transpiration are differentiated for all investigated species.

Differentiation of the Investigated Communities in the Light of Remote Sensing Research

Results of functional differentiation observed at the level of species were confirmed by spectral characteristics of the investigated communities. On the basis of performed spectrometric measurements, the analysis of ground images, and a satellite photo it was proved that differentiation of the investigated communities within the visible range is inconsiderable but noticeable. Lower differentiation observed on remote sensing materials compared with the differentiation recorded after the examination of the contents of assimilation pigments, results from the influence of additional factors (arrangement of leaves, reflection from bedding) upon the size of spectral reflection and from relatively wide spectral ranges used in research. Instead, substantial differentiation was observed in the infrared range, it facilitates distinguishing investigated communities. It is also possible to identify communities in the rank of a sub-set (sub-sets and forms of the community of Oreochloo distichae-Juncetum trifidi) and complexes of communities on remote sensing materials. On the basis of the analysis of spectral characteristics and distribution of signatures in the spectral feature space, it was stated that spectral ranges: red and infrared within the range of 0.76-0.90 and 2.08–2.35 μ m have the highest usefulness for automated mapping of vegetation from the ranges used in this experiment.

Assessment of Usefulness of Remote Sensing in Alpine Vegetation Mapping

Automated detailed mapping of alpine vegetation with the use of remote sensing methods on remote sensing materials currently accessible for the Tatra Mountains seems to be a difficult task. Low geometric resolution is the basic problem here. However, two features of remote sensing images, which are of great worth from the point of view of vegetation cartography deserve attention:

Fig. 43. Result of fuzzy classification (image resolution was decreased for printing): 1 – *Rhizocarpetalia*, 2 – screes with traces of pioneer vegetation, 3 – pioneer mossy communities, 4 – *Luzuletum spadiceae*, 5 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae, 6 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum (mossy form), 7 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum, 8 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, 9 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis in complex with Luzuletum spadiceae, 10 – shade

Ryc. 43. Wyniki klasyfikacji przeprowadzonej w oparciu o metody logiki rozmytej: – Rhizocarpetalia, 2 – piargi ze śladami roślinności pionierskiej, 3 – pionierskie zbiorowiska mszyste, 4 – Luzuletum spadiceae, 5 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi salicetosum herbaceae, 6 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum (posatć mszysta), 7 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum, 8 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, 9 – Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis iw kompleksie z Luzuletum spadiceae, 10 – cień



	Bayes Theory Teoria Bayesa						Dempster-Shafer Theory Teoria Dempster-Shafera				
er r	Probal	bility of a Prawdop rzynależn	ffiliation odobieśtu ości do kl	to a class yo lasy	tion ass ależność sy	W	Reliabilit ïarygodno	y Dść	Uncertainly Niepewność	Affiliation to a class according o the application of a mixed community	
Numb Nume	А	В	С	Total Suma	Affilia to a cl <i>Przynu</i> do kla	А	В	С	А	wg kryterium zasotosowania do wydzielania zbiorowiska mieszanego	
1.	1.00	0.00	0.00	1.00	Α	1.00	0.00	0.00	0.00	А	
2.	9.90	0.10	0.00	1.00	А	0.90	0.10	0.00	0.00	Α	
3.	0.80	0.00	0.00	0.80	Α	1.00	0.20	0.20	0.20	Α	
4.	0.80	0.20	0.00	1.00	А	0.80	0.20	0.00	0.00	AB mixed class / klasa mieszana AB	
5.	0.80	0.10	0.00	0.90	А	0.90	0.20	0.10	0.10	A	
6.	0.80	0.10	0.10	1.00	А	0.80	0.10	0.10	0.00	A	
7.	0.60	0.40	0.00	1.00	А	0.60	0.40	0.00	0.00	AB mixed class / klasa mieszana AB	
8.	0.60	0.30	0.00	0.90	А	0.70	0.40	0.10	0.00	AB mixed class / klasa mieszana AB	
9.	0.60	0.30	0.10	1.00	А	0.60	0.30	0.10	0.00	AB mixed class / klasa mieszana AB	
10.	0.60	0.00	0.40	1.00	А	0.60	0.00	0.40	0.00	AC mixed class / $klasa\ mieszana\ AC$	
11.	0.51	0.49	0.00	1.00	Α	0.51	0.49	0.00	0.00	AB mixed class / klasa mieszana AB	
12.	0.50	0.50	0.00	1.00	?	0.50	0.50	0.00	0.00	AB mixed class / klasa mieszana AB	
13.	0.50	0.00	0.00	0.50	А	1.00	0.50	0.50	0.50	Α	
14.	0.50	0.00	0.40	0.90	А	0.60	0.10	0.50	0.10	AB mixed class / klasa mieszana AB	
15.	0.50	0.00	0.50	1.00	?	0.50	0.00	0.50	0.00	AC mixed class / klasa mieszana AC	
16.	0.33	0.33	0.00	0.66	?	0.67	0.67	0.34	0.34	AB mixed class / klasa mieszana AB	
17.	0.33	0.33	0.33	0.99	?	0.34	0.34	0.01	0.01	ABC mixed class / klasa mieszana ABC	
18.	0.30	0.2	0.50	1.00	А	0.30	0.20	0.00	0.00	ABC mixed class / klasa mieszana ABC	
19.	0.30	0.00	0.00	0.30	А	1.00	0.70	0.70	0.70	not classified / niezaklasyfikowane	
20.	0.20	0.10	0.00	0.30	А	0.90	0.80	0.70	0.70	not classified / niezaklasyfikowane	
21.	0.10	0.10	0.00	0.20	?	0.90	0.90	0.80	0.80	not classified / niezaklasyfikowane	
22.	0.10	0.00	0.00	0.10	А	1.00	0.90	0.90	0.90	not classified / niezaklasyfikowane	
23.	0.10	0.10	0.10	0.30	?	0.80	0.80	0.70	0.70	not classified / niezaklasyfikowane	
24.	0.01	0.00	0.00	0.01	Α	1.00	0.99	0.99	0.99	not classified / niezaklasyfikowane	
25.	0.00	0.00	0.00	0.00	?	1.00	1.00	1.00	1.00	not classified / niezaklasyfikowane	

Table 13. Exemplary distributions of the probability of pixels affiliation to three classe Tabela 13. Przykładowe rozkłady prawdopodobieństwa przynależności pikseli do trzech klas

* Question marks refer to cases in which this method does not allow for deciding of the affiliation of a pixel. In such a case other methods apply, e.g. of a shater distance. Znakiem zapytania oznaczono przypadki, w których metoda nie pozwala na rozstrzygnięcie przynależności piksela. W tym ptrzypadku stosuje się inne metody decyzyjne, np. mniejszej odległości. a) Raster system of organization and presentation of data, allowing for exact projection of actually existing small-surface mosaic of vegetation communities. Avoiding an error of generalization seems to be a vital advantage in describing environments of such high spatial differentiation.

b) Classical methods of detailed alpine vegetation mapping face the problem of graphic presentation and analysis of a small-surface mosaic of communities, complexes of vegetation communities and interim borders. Although the assumptions of Central European phytosociological school allow for location of these specimens in the taxonomy, mapping vegetation in detailed scales, and especially technical possibilities of presentation of maps of a large number of items in the legend, are limited. One of the solutions of a technical problem connected with the difficulty in graphic presentation of communities arranged according to gradient features, seems to be applying methods based on the theory of fuzzy logic. These methods enable not only graphic presentation of natural phenomena of a "fuzzy" character, but also their analysis. In case of vegetation analysis, automated distinguishing of complexes of communities is possible. Mapping based on partial affiliation of a pixel to a given class considerably improves accuracy of the thematic maps being elaborated and allows for distinguishing up to several interim levels of mixed communities, depending on the scale and goal of the elaboration.

Increasing accuracy of automated identification and mapping of vegetation communities on aerial and satellite materials would be possible thanks to taking into consideration the following remarks resulting from this experiment:

1. Increasing spectral resolution of remote sensing materials, including:

– Application of several (up to a dozen or so) narrow channels in the visible range, corresponding to maxima of absorption of main and accompanying photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids). Specially useful would be using ranges of about 646 and 663 nm, corresponding to maxima of absorption of chlorophyll b and a (respectively) and a range of about 470 nm, corresponding to the maximum of absorption of carotenoids (total).

– Taking into account ranges of near-red radiation of about 1.45 and 1.95 μ m, corresponding to maxima of radiation absorption by plants of high contents of water in tissues. This makes possible distinguishing vegetation communities with presence of *Luzula spadicea*, which has especially high contents of water in tissues. These ranges would also facilitate identification of other depositary communities which appear on wet habitats.

2. Increase of geometric resolution of satellite images. Satellite image used in this experiment characterizes itself with spectral and radiometric resolution sufficient for identification of investigated communities. Instead, too low geometric resolution prevents carrying out correct, plausible and automated classification of the image. For detailed research of vegetation, the image should have geometric resolution in the category of several meters.

3. Performing measurements of fluorescence from the aerial ceiling. In this experiment there was no possibility to take measurements of fluorescence "from air". However, usefulness of active remote sensing techniques for identification of species was proved in a range of researches and elaborations. As the possibilities arise it would be useful to take measurements of fluorescence in several maxima of emission (440, 525, 685 and 740 nm), (Chapelle et al., 1985). Applying fluorescence techniques would also allow for investigation of the same communities, submitted to stress factors (e.g. freezing of dwarf mountain pine, treading herbaceous and grass communities located close to tourist paths).

It seems, however that usefulness of NDVI indicator for identification of vegetation communities of the Tatra Mountains is insignificant, taking into account high differentiation of productivity of communities depending on the elevation of the occurrence of the community and on the microclimate and other local and habitat conditions (Breymeyer, Uba, 1988). Also the latest research on correlation of NDVI indicator with the net photosynthesis and productivity as the exponent of physiological status of plants question the usefulness of this indicator (Buschmann, Lichtenthaler, 1988) because it requires carrying out a range of advanced calibrations based on biometric and meteorological measurements. Instead, LAI is a better indicator of the surface of a leaf enabling assessment of productivity. Also in this case it is indispensable to carry out its calibration, but the results obtained are reliable and allow for specifying quantitative volume of the produced bio-mass. In future, measurements of LAI indicator would surely be interesting and would allow for investigating habitat conditions of occurrence and vigour of vegetation communities.

Results of investigations also draw attention to the choice of the time of taking photographs. Existing colour aerial photographs for the area of the Tatra Mountains taken at the start of the vegetation period are not applicable in the identification and mapping of alpine vegetation communities in the detailed scale. Usually vegetation period in alpine environments is very short and is limited to July and August. The best colouring of the investigated communities occurs at the end of the season, unfortunately it is not possible to exactly determine the term because of instability of dates appointing the beginning and end of the vegetation period. Carrying out possible research should be thus planned with the consideration of short-term weather forecasts.

Research of alpine vegetation carried out up till now on the basis of remote sensing materials allowed only for a rough identification of vegetation (namely, deciduous forests, coniferous forests, fasciculated communities, herbaceous and gramineous communities, bare rocks). On the basis of materials and research methods used in this study it could be assumed that large-scale (in the rank of a set and lower) research of alpine vegetation from "air" with the use of automated method of digital processing of images is a demanding task, but practicable.

The author sees the possibility and need for expanding the research into detailed mapping of alpine vegetation with the use of remote sensing materials. Introductory processing of remote sensing materials should first of all carry out an atmospheric correction with a detailed numerical model of the terrain which would enable the correction of the influence of various thickness of atmosphere, and of the gradient and exposures of slopes upon the image recorded on the photographs. Numerical model of the terrain in the category of several meters could also deliver additional informational layers, consideration of which in the supervised classification would improve its plausibility. On the basis of NMT digital processing a range of indirect microclimatic information may be obtained (elevation above sea level, exposure) and habitat (gradient, shape and position on the slope which determine humidity and trophism of bedding), which are not always accessible from other sources in a detailed range and scale. Elaboration of NMT of high geometrical resolution would be possible on the basis of the stereopar of aerial images.

Given the above comments, three premises prompt research of alpine vegetation by remote sensing:

1. Dynamic technological development demonstrated, *inter alia*, by new generation scanners of high geometrical resolution (several and even one meter) on satellite orbits, and especially propagation of hyperspectral image scanners located on aerial platforms (AVIRIS, DAIS).

2. Technical problems of field mapping of vegetation and the need of immediate and accurate cartographic materials documenting spatial differentiation, dynamics and impediments to the vegetation of the Tatra National Park. Advantages of using remote sensing techniques is objectiveness, speed and repeatability of investigations. At present, relatively low costs of remote sensing research could be added. Development of technique and also propagation of aerial and satellite images lead to considerable lowering of the costs of remote sensing research, not infrequently to sums lower than research using traditional methods, and especially time-consuming and costly field work. For technical reasons, research and field measurements are mostly limited to point research (points and testing fields) and linear (transects and itinerary routes), which then requires extrapolation of the results of the research. Instead, remote sensing enables analysis of the whole area of interest.

3. The possibility of solving the problem of geobo-

tanical cartography connected with delimitation of communities of an interim character and of zonal borders.

To end the author would like to once again draw attention to an interdisciplinary character of this research project. Possible extension of research of vegetation would require cooperation of specialists from the scope of remote sensing, geobotany and cartography. It should also be stressed that remote sensing research largely replaces laborious field research, but does not eliminate it: just the opposite, it is necessary to calibrate and verify remote sensing analyses on the basis of thorough point field research.

Literature

- Ashburn P, 1978, The vegetative Index Number and crop identification. The LACIE Symposium Proceedings of the Technical Session, 843–850.
- Balcerkiewicz S. 1984. Roślinność wysokogórska Doliny Pięciu Stawów Polskich w Tatrach i jej przemiany antropogeniczne [Alpine vegetation of the Dolina Pięciu Stawów Polskich in the Tatra Mountains and its anthropogenic transmutations] Wyd. Nauk. UAM Poznań, Ser Biologia, 25, 1–191.
- Balcerkiewicz S., Wojterska M., 1978, Sigmassoziationen in der Hohen Tatra, [in:] R. Tüxen (ed.), Assoziationskomplexe (Sigmeten) Ber. D. Intern. Symp. D. Intern. Vereinigung f. Vegetationskunde. S., J. Cramer, Vaduz, 161–177.
- Baret F., Guyot G., 1991, Potentials and Limits of vegetation Indices for LAI and APAR Assessment, Remote Sensing of Environment, 35, 161–173.
- Barry R.G., 1981, *Mountain weather and climate*, London, New York, Menthuen.
- Bax G., 1996, High Mountain Remote Sensing Cartography Symposium, [Online], Accessible on: http://www.hks.se/ ~gerhabax/hmrsc4.html, 9 II 1999.
- Bax G. (ed.), 1996, Proceedings of the 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Karlstad–Kiruna–Tromsø, August 19–29, 1996, University of Karlstad, Research Report, 97, 3, Natural Sciences/Technology.
- Berkhout J., Jans W., Jongenans J., Kooijman A., Raaphorst S., Steingröver E., 1996, Monitoring photosynthesis in evergreen mediterranean forest in order to assess the scientific and operational potential of the LEAF instrument, Number 94-03 in NRSP-2. BCRS, Delft, The Netherlands.
- Bielecka E., 1980, Dynamika wybranych komponentów środowiska geograficznego Tatr w świetle analizy zdjęć lotniczych oraz analitycznych opracowań fotogrametrycznych [Dynamics of chosen components of geographic environment of the Tatra Mountains in the light of aerial images and analytic photogrametric elaborations] Warszawa, [typescript].
- Bielecka E., 1986, *Photointerpretation survey of changes in the range of the Tatra subalpine forests*, Miscellanea Geographica, Warszawa.
- Bielecka E., Fedorowicz-Jackowski, 1993, Computer-aided Design of the Satellite Image Map of the Tatra Mountains,
 [in:] GIS for Environment, Conference on GIS in Environmental Studies, Kraków.
- 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, Kraków, 25–27 November 1993 (Pilot Study for the Tatra National Park, Proceedings of the IALE Conference, Warsaw, October, 1993).

- Borowiec W., 1977, Fotogrametryczna rejestracja dynamiki zjawisk powierzchniowych w Tatrach Polskich [Photogrametric registration of the dynamics of surface phenomena in the Polish Tatra Mountains]. Papers of the Oddział PTPNoZ in Kraków for the Tatra and Ojców National Parks. Materials for the Symposium from the occasion of the III General Assembly of OK. PTPNoZ, Kraków, April 1977.
- Braun-Blanquet J., 1964, *Pflanzensoziologie*, 3rd ed. Springer Verlag. Wien.
- Breymeyer A., Uba L., 1988, Badania porównawcze produkcji i rozkładu materii organicznej na pastwiskach górskich w Tatrach [Comparative research of the production and decomposition of organic matter on mountain pastures in the Tatra Mountains], Czasopismo Geograficzne, 59(3), 267– 281.
- Brown D.G., Lusch D.P., Duda K.A., 1998, Supervised Classification of Glaciated Landscape Types using Digital Elevation Data, Geomorphology, Special Issue on Remote Sensing and GIS, 21, 3–4, 233–250.
- Burrough P.A., 1986, Principles of Geographical Information Systems for Land Resource Assessment, Oxford, Clarenden Press.
- Burrough P.A., 1989, Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation, Journal of Soil Science, 40, 477–492.
- Buschmann C., Lichtenthaler H., 1988, Reflectance and chlorophyll fluorescence signatures of leaves, [in:] Lichtenthaler H. (ed.), Applications of chlorophyll fluorescence, Kluwer Academic Publishers, 325–332.
- Byrcyn-Gąsienica W., 1995, 40 lat Tatrzańskiego Parku Narodowego [40 years of the Tatra National Park], Tatry, 5/6.
- 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, 24, 1.
- Ciołkosz A., Miszalski J., Olędzki J.R., 1986, *Interpretacja zdjęć lotniczych* [Interpretation of aerial images], PWN, Warszawa.
- Clarke K.C., 1993, One thousand Mount Everests? Fractals in Geography, Nina Siu-Ngan Lam, Lam De Cola, Prentice Hall.
- Curtis J.T., 1959, The vegetation of Wisconsin: an ordination of plant communities, University of Wisconsin Press., Madison.
- Czochański J., 1995, Ruch Turystyczny w Tatrach Wysokich [Tourism in the High Tatra Mountains], Tatry, 5/6.
- Davies D.H., 1996, Carotenoids, [in:] T. W. Goodwin (ed.), Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments, 2, Academic Press, New York, 38–165.
- Dąbrowska-Zielińska K., 1995, Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA [Assessment of evapotranspiration, humidity of soils and of green mass of maedows on the basis of satellite images of NOAA], Prace Geograficzne, 165, PAN, IGiPZ PAN, Continuo, Wrocław.

Dąbrowska-Zielińska K., Kogan F., Ciołkosz A., Gruszczyńska

M., 1998, The results of crop condition assessment and yield prediction in Poland using NOAA polar orbiting satellites. Information for Sustainability, Proceedings of 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment. June 8–12, 1998, Tromso, Norway, 814–817.

- van Dijk A., Berkhout J., Roozenkrans J., Verhoef W., Nieuwenhuis G., Kutsch Lojenga F., Meuldijk D., Gunnink J., 1992, Vegetation conditions and yield indicators, Final Report Part 1, BCRS, NRSP-1, 91–26.
- 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 [Geobotanic cartography], PPWK im. Eugeniusza Romera, Warszawa– Wrocław.
- Fedorowicz-Jackowski W., Halicki K., Jezierska I., Kurnatowska A., 1995, Wizualizacja wybranych informacji geograficznych na przykładzie Tatrzańskiego Parku Narodowego [Visualization of chosen geographic information on the example of the Tatra National Park], [in:] GIS dla obszarów chronionych [GIS for protected areas], Kraków.
- Foody G.M., 1996, Fuzzy modeling of vegetation from remotely sensed imagery, Ecological Modelling, International Journal on Ecological Modelling and Systems Ecology, 85, Special Issue: Salski A., Fränzle O., Kandzia P., Elsevier (eds), Fuzzy Logic in Ecological Modelling.
- Gates D.M., Keegan H.J., Schleter J.C., Weidner V.R., 1965, Spectral Properties of Plants, Applied Optics, 4, 1, 11–22.
- Gausman H.W., 1974, Leaf Reflectance of Near-Infrared, Photogrammetric Engineering, 40, 183–191.
- Gausman H.W., 1985, Plant leaf optical properties in visible and near-infrared light, Graduate Studies Texas Tech. Univ. Pub. No. 29, Texas Tech Press, Lubbock Texas.
- Gottfried M., Pauli H., Grabherr G., 1998, Prediction of Vegetation Patterns at the Limits of Plant Life: A New View of the alpine-Nival Ecotone, Arctic and alpine Research, 30, 3, 207–221.
- Górski F., 1962, Fizjologia roślin, PWN.
- Green W.B., 1989, *Digital Image Processing: A system Approach*, 2nd ed., Van Nostrand Reinhold, New York.
- Greig-Smith P., 1964, *Quantitative Plant Ecology*, Butterworths & Co., London.
- Hall F.G., Botkin D.B., Strebel D.E., Woods K.D., Goetz S.J., 1991, Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing, Ecology 72, 628–640.
- Haußecker, H., Tizhoosh, H.R., 1999, Fuzzy Image Processing: An Overview, [in:] Jähne, B., Haußecker, H., Geißler, P. (eds), Handbook on computer vision and applications, Academic Press, Boston.
- Hoge F.E., Seift R.N., Yungel J.K., 1983, Feasibility of Airborne Detection of Laser-Induced Fluorescence Emissions from Green Terrestrial Plants, Applied Optics, 22, 2991.
- Itten K.I., Meyer P., 1993, Geometric and Radiometric Correction of TM Data of Mountainous Forested Areas, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 31, 4, 764–770.
- Itten K.I., Meyer P, Kellenberger T., Leu R., Sandmeier St., Bitter P., Seidel K., 1992, Correction of the impact of topography and atmosphere on Landsat-TM forest mapping of alpine regions, Remote Sensing Series, 18, Faculty of Geography, University of Zurich, Zurich.

- Jakomulska A., 1998, Comparison of structure of mountainous environments of Loch Coruisk Valley (Skye, Scotland) and The Five Lakes Valley (The Tatra Mountains), Miscellanea Geographica, 8, Warszawa.
- Jakomulska A., 1999, Zastosowania logiki rozmytej w klasyfikacji nadzorowanej [Application of fuzzy logic in the supervised classification], Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji, 27, PTG KTŚ, Warszawa.
- Kaczyński R., 1993, Application of filtering techniques in spatial and frequency domains for improving accuracy of supervised classification, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, XL, 1(88).
- Kim H.H., 1973, New Algae Mapping Technique by the Use of an Airborne Laser Fluorosensor, Applied Optics, 12, 1454.
- Knipling E.B., 1970, Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near Infrared Radiation from Vegetation, Remote Sensing of Environment, 1, 155–159.
- Kozłowska A., 1999, Problemy kartowania roślinności wysokogórskiej w skali szczegółowej (na przykładzie map roślinności Kotła Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego)
 [Problems of alpine vegetation mapping in the detailed scale (on the example of Kocioł Gąsienicowy and Goryczko-wy Świński], [in:] A. Kotarba (ed.), Badania geoekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu [Geoecological research around Kasprowy Wierch], Prace Geograficzne, [in print].
- Kozłowska A., Jakomulska A, 1999, Struktura przestrzenna roślinności Kotłów Gąsiennicowego i Goryczkowego Świńskiego [Spatial structure of vegetation of Kocioł Gąsienicowy and Goryczkowy Świński], [in:] A. Kotarba (ed.), Badania geoekolo-giczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu, Prace Geograficzne, [in print].
- Kurnatowska A., 1995, Analiza struktury środowiska przyrodniczego wybranych terenów górskich (Dolina Pięciu Stawów Polskich i Dolina Loch Coruisk) [Analysis of structure of natural environment of chosen mountain terrains (Dolina Pięciu Stawów Polskich and Dolina Loch Coruisk) with the use of Geografical Information Systems. Master thesis written in Zakład Kompleksowej Geografii Fizycznej under the guidance of prof. dr. hab. Andrzej Richling [typescript].
- Kurnatowska A., 1998, Analysis of environmental structure and changes in mountain environments with the help of GIS and statistical methods., [in:] Craglia M., Onsrud H. (eds), Geographic Information Research: transatlantic perspectives, Proceedings of ESF GISDATA/NCF NCGIA Second Summer Institute, Taylor & Francis, London.
- Küchler A.W., Zonneveld I.S., 1988, Vegetation Mapping, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- Lang M., Lichtenthaler H.K., Sowinska M., Heisel F., Miehé J. A., 1995, Demonstratin water and temperature stress in the photosynthetic apparatus by fluorescence imaging, Proceedings of the International Colloquium Photosynthesis and Remote Sensing, 28–30 August 1995, Montpellier, 29–36.
- Lichtenthaler H.K., Lang M., Stober F., Sowinska M., Heisel F, Miehé J.A., 1995, Detection of photosynthetic parameters and vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system, Proceedings of the International Colloquium Photosynthesis and Remote Sensing, 28–30 August 1995, Montpellier, 103–112.
- Lichtenthaler H.K., Wellburn A.B., 1983, Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents, Biochemical Society Transactions, 603, 591–592.

- Lucas R.M., Honzak M., Foody G.M., Curran P.J., Corves C., 1993, Characterizing tropical secondary forests using multitemporal Landsat sensor imager, International Journal of Remote Sensing, 14, 3016–3067.
- Malanson G.P., Brown D.G., 1998, Collaborative Research on Process and Pattern at alpine Treeline, [Online]. Accessible at: http://www.msu.edu/user/brownda/research/nsf.html, 01.20.98.
- Manyara C.G, Lein J.K., 1994, Exploring the suitability of fuzzy set theory in image classification: A comparative study applied to the Mau forest area Kenya, Technical papers of the ASPRS, 1, 384–391.
- Matuszkiewicz W., 1974, *Teoretyczno-metodyczne podstawy* badań roślinności jako elementu krajobrazu i obiektu użytkowania rekreacyjnego [Theoretical and methodical bases for vegetation research as the element of the landscape and as the object of recreational use], Wiadomości Ekologiczne, XX, 1, Instytut Botaniki UW, Warszawa.
- Matuszkiewicz W., 1981, *Przewodnik do oznaczania zbiorowisk* roślinnych Polski [A guide-book for designation of vegetation communities], PWN, Warszawa.
- McVean D.N., Ratcliffe D.A., 1962, Plant communities of the Scottish Highlands, London.
- Miara K., Paszyński J., Grzybowski J., 1987, Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski [Spatial differentiation of the rediation balanse on the area of Poland], Przegląd Geograficzny, LIX, 4.
- Nemani R., Running S.W., 1989, Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data, Journal of Applied Meteorology, 28, 276–284.
- Nikołajew W.A., 1981, Kosmiczieskije snimki modieli regionalnoj łandszaftnoj struktury. Isliedowanije iż Kosmosa, 1/ 1981, Akademia Nauk ZSRR, Nauka.
- Olędzki J.R., 1996, *Photomorphic regionalization of Poland*, Miscellanea Geographica, Warszawa.
- Olędzki J.R., 1991, Geograficzne uwarunkowania zróżnicowania obrazu satelitarnego Polski i jego podziału na jednostki fotomorficzne [Geographic conditioning of differentiation of a satellite image], Wydawnictwa UW, Rozprawy UW (48515).
- Ołdak A., 1994, Zastosowanie Systemów Informacji Geograficznej w badaniach potencjału produktywności biotycznej [Application of Systems of Geographic Information in the research of the potential of biotic productivity], Warszawa, [typescript].
- Öquist G., Wass R., 1988, A portable, microprocessor operated instrument for measuring chlorophyll fluorescence kinetics in stress physiology, Physiologia Plantarium, 73, 2111–217, Copenhagen.
- Parlow E., 1996, Correction of terrain controlled illumination effects in satellite data, Progress in Environmental Remote Sensing Research and Applications, MCR Laboratory, University of Basel, Switzerland, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Pawłowski B., 1956, *Flora Tatr. Rośliny naczyniowe* [Tatras' flora. Vascular plants], T. I. PWN, Warszawa.
- Pawłowski B., Sokołowski M., Wallisch K., 1928. Zespoły roślin w Tatrach [Sets of plants in the Tatra Mountains] VII.
 Zespoły roślinne i flora doliny Morskiego Oka. [Sets of plants and flora of the Morskie Oko Valley], Bull. Acad. Polon. Ser.
 B., Suppl. II.

- Peddle 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.
- Pietrzak M., 1989, Problemy i metody badania struktury geokompleksu (na przykładzie powierzchni modelowej Biskupice) [Problems and methods of research of the geocomplex structure (on the example of the Biskupice model surface], UAM, Poznań.
- Piękoś-Mirkowa H., 1981, Antropogeniczne przekształcenia szaty roślinnej w Tatrzańskim Parku Narodowym [Anthropogenic transformations of vegetation cover in the Tatra National Park], [in:] Z. Wójcik (ed.), Ochrona Tatr w Polsce Ludowej, Materials for Symposium "Tatry '81", Warszawa.
- Piękoś-Mirkowa H., Mirek Zb., 1996, Szata roślinna Tatr Polskich – stan poznania, potrzeby i perspektywy badań [Vegetation Cover of the Polish Tatra Mountains – status of recognition, needs and perspectives of research], [in:] A. Kownacki (ed.), Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji: Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek, T. 2. Biologia, Kraków–Zakopane.
- Podogrodzki J., 1970, *Przebieg roczny promieniowania całkowitego w Polsce* [Annual course of total radiation in Poland], Papers of Państwowy Instytut Hydrologiczno-Meteorologiczny, 100, Warszawa.
- Potter C.S., Randerson J.T., Field C.B., Matson P.A., Vitousek M., Mooney H.A., Klooster S.A., 1993, Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data, Global Biogeochemical Cycles, 7, 811– 841.
- Prat W.K., 1978, *Digital Image Processing*, John Wiley&Sons Ltd., New York.
- Raciborski M., Szafer W., 1919, Flora Polska. Rośliny naczyniowe Polski i ziem ościennych [Polish flora. Vascular plants of Poland and of sourrounding areas], T. 1, Paprotniki, iglaste i Monocotyledones, Akademia Umiejętności, Kraków.
- Rajkowski B., 1997, Czarno-biała fotografia w podczerwieni na przykładzie Kodak High Speed Infrared [Black and white image in infra-red on the example of Kodak High Speed Infrared, Foto. Magazyn wszystkich fotografujących, 7, FOTOpress.
- Rączkowska Z., Kozłowska A., 1994, Geobotaniczne wskaźniki denudacji stoków wysokogórskich [Geobotanic indices of denudation of alpine mountain slopes], Conference Papers IGiPZ PAN, 20, 75–85.
- Richter R., 1996, A Spatially-Adaptive Fast Atmospheric Correction Algorithm: ATCOR2 for ERDAS Imagine, Accessible at: http://www.geosystems/de, 14.03.1999.
- Roberts D.A., Gardner M., Church R., Ustin S., Scheer G., Green R.O., 1998, Mapping Chaparral in the Santa Monica Mountains Using Multiple Endmember Spectral Mixture Models, Remote Sensing of Environment, 65, 267–279.
- Rojan P., 1988, Profil pionowy promieniowania słonecznego w Polskich Karpatach Zachodnich (1971–1980) [Perpendicular profile of solar radiation in the Polish Western Karpaty (1971–1980)], WGiSR UW, transcript of the master thesis written in the Department Klimatologii Instytutu Nauk Fizycznogeograficznych
- Romanowska E., 1999, Adaptacja blon tylakoidowych do zmiennych warunków świetlnych środowiska [Adaptation of tylakoid membranes to changing light conditions of the environment], Postępy Biochemii, 1.

- Rupke J., Cammeraat E. C., Seijmonsbergen A.C., Westen Van C.J., 1988, Engineering Geomorphology of the Widentobel Catchment, Appenzel and Sankt Gallen, Switzerland. A geomorphological inventory system applied to geotechnical appraisal of slope stability, Engineering Geology, 26, 33– 68.
- Szafer W., Pawłowski B., Kulczyński S., 1923. Zespoły roślin w Tatrach [Sets of plants in the Tatra Mountains]. Part I.
 Zespoły roślin w dolinie Chochołowskiej [Sets of plants in Dolina Chochołowska]. Bull. Int. Acad. Pol. des Sc. et des Lettr. C. Math. et Nat. B. Sc. Nat. Suppl. S, 1-66.
- Szafer W., Pawłowski B., Kulczyński S., 1927, Zespoły roślin w Tatrach [Sets of plants in the Tatra Mountains]. Part I. Zespoły roślin w dolinie Kościeliskiej [Sets of plants in Dolina Kościeliska]. Bull. Acad. Polon. Ser. B, Suppl. II.
- Szafer W., Zarzycki K., 1977, *Szata roślinna Polski* [Vegetation Cover of Poland], PWN, Warszawa.
- Szczęsna-Kozłowska T., Błażejczyk K., 1998, Promieniowanie słoneczne i jego wpływ na organizm człowieka [Solar radiation and its influence on a human organism], Balneologia Polska, XXXX, 1–2.
- Sziriajew E.E., 1977, Nowyje metody kartograficzieskowo otobrażienija i analiza gieoinformacji z primienieniem EWM, Moskwa, Izdatielstwo Niedra.
- Trafas K. (ed.) 1985, *Atlas Tatrzańskiego Parku Narodowego*, Tatrzański Park Narodowy i Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi, Zakopane–Kraków.
- Tuckendorf A., 1979, Niektóre funkcje karotenoidów w organizmach fotosyntetyzujących [Chosen functions of carotenoids in photosynthesizing organisms], Wiadomości Botaniczne, XXIII, 3, 169–180.
- Tucker C.J., 1979, Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, Remote Sensing of Environment, 8, 127–150.
- Tucker C.J., Justice C.O., Prince S.D., 1986, Monitoring the grasslands of the Sahel 1984–1985, International Journal of Remote Sensing, 7(11), 1571–1581.
- Vuille M, 1996, Zur raumzeitlichen Dynamic von Schneefall und Ausaperung im Bereich des südlichen Altiplano, Südamerika, Geographica Bernensia, G 45, Bern.
- Walsh S.J., Butler, D.R., Malanson G.P., 1998, An overview of scale, pattern, process relationships in geomorphology: a remote sensing and GIS perspective, Geomorphology, Special Issue on Remote Sensing and GIS, 21, 183–205.
- Wang F., 1992. Improving Remote Sensing Image Analysis Through Fuzzy Information Representation, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56, 8, 1163–1169.
- Wang F., Hall B.G., 1996, Fuzzy representation of geographical boundaries in GIS, International Journal of Geographical Information Systems, Fisher P., Clarke K.C., Abel D.J., Taylor&Francis, London, Washington.
- Włoch E., Więckowski St., 1982, Karotenoidy aparatu fotosyntetycznego [Carotenoids of photosynthetic apparatus], Postępy Biochemii, 28, 3, 331–352.
- Zadeh L. A., 1965, Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338– 353.

Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr w świetle badań teledetekcyjnych

Wstęp

Teledetekcja jest jedną z najszybciej rozwijających się dyscyplin praktycznych nowoczesnej geografii. Liczne zastosowania fotointerpretacji i cyfrowych metod przetwarzania obejmują takie dziedziny jak: geologia, geomorfologia, geografia gleb, geochemia, oceanografia i hydrologia, meteorologia i klimatologia, geoekologia, ochrona środowiska, urbanistyka, geografia transportu, przemysłu, rolnictwa i ludności oraz kartografia, jak również szereg dziedzin pokrewnych geografii, np.: archeologia, fitosocjologia, botanika, fizjologia roślin – przykłady można by tu mnożyć. Szczególne zastosowanie znajduje teledetekcja w badaniach roślinności, która jest tym komponentem krajobrazu, który jest bezpośrednio widoczny na materiałach teledetekcyjnych. Możliwości badania roślinności metodami teledetekcyjnymi są szerokie, toteż fitosocjolodzy postulują szersze zastosowanie teledetekcji do badań roślinności (Faliński, 1990; Küchler, Zonneveld, 1988). Nie oznacza to jednak, że fotointerpretacja roślinności jest prostym i niewymagającym problemem badawczym (Ciołkosz, Miszalski, Oledzki, 1986). Materiały teledetekcyjne odzwierciedlają bowiem wszystkie komponenty środowiska; stanowią "wierny model terenu" (Nikołajew, 1981). Fototon, struktura i tekstura obrazu są wypadkową wszystkich geokomponentów, jednak wpływ poszczególnych komponentów oraz ich cech na obraz zarejestrowany na materiałach teledetekcyjnych jest niejednakowy i zależy od charakteru badanych obiektów (Olędzki, 1986, 1991). Cechy interpretacyjne mają również inną wagę w zależności od skali badań. W skali chorycznej elementem przewodnim jest roślinność.

Holistyczne spojrzenie na środowisko przyrodnicze wymaga kompleksowej i wszechstronnej analizy poszczególnych geokomponentów jak i związków między nimi (Richling, 1993). Ze względów technicznych, w skalach szczegółowych, szeroko zakrojone badania wszystkich komponentów nie zawsze są możliwe. Systemowość i kompleksowość może być jednak realizowana poprzez badanie jednego lub kilku możliwych aspektów funkcjonowania środowiska przyrodniczego. W środowiskach o wysokim stopniu naturalności, takich jak wysokie góry, pośrednie wnioskowanie o abiotycznych komponentach środowiska umożliwia wskaźnikowy charakter roślinności. Analiza roślinności na materiałach teledetekcyjnych jest więc w szczególny sposób uzasadniona w badaniach geograficznych.

Cel i zakres badań

Rozpoznanie i monitoring roślinności jest niezbędnym elementem ochrony wrażliwych środowisk. Doniosłą rolę fitosocjologii w badaniach nad ekologią krajobrazu podkreślił i szeroko uzasadnił Matuszkiewicz (1974, 1981). W środowiskach mało zaburzonych przez człowieka, takich jak wysokie góry, wskaźnikowy charakter roślinności jest szczególnie wyraźny (Gottfried, Pauli, Grabherr, 1998; Jakomulska, 1998; Rączkowska, Kozłowska, 1994; Pietrzak, 1989).

Silna antropopresja w Tatrach wyrażająca się m. in. wzrastającą z roku na rok liczbą turystów odwiedzających TPN (obecnie ok. 2,4 mln osób rocznie, dzienna frekwencja w okresach szczytu: 20 000 osób!; Czochański, 1995) oraz projekt zorganizowania olimpiady zimowej w 2006 r. w Zakopanem, podkreślają potrzebę szybkiego przygotowania planu ochrony TPN. Wymóg ten reguluje prawnie ustawa o ochronie przyrody z 1991 r., która zobowiązuje parki narodowe do opracowania planów ochrony. W Tatrzańskim Parku Narodowym prace te podjęto jesienią 1994 r. Jednym z podstawowych opracowań przyrodniczych tego planu jest operat ochrony ekosystemów nieleśnych TPN, w ramach którego przewidziano opracowanie mapy roślinności piętra alpejskiego i subalpejskiego, w skali 1:10 000. Zakończenie prac przewidziano w ciągu trzech lat – jednak jak do tej pory nie zostały one ukończone, ze względu na specyficzne problemy tradycyjnego kartowania roślinności wysokogórskiej.

Tatry są obszarem dość dobrze zbadanym pod względem florystycznym (Piękoś-Mirkowa, Mirek, 1996). Pomimo to, jak również mimo faktu, że to właśnie od map roślinności Tatr rozpoczęła się w Polsce w latach dwudziestych kartografia roślinności, nadal nie ma szczegółowego opracowania obejmującego obszar całego Tatrzańskiego Parku Narodowego. Mapy roślinności wysokogórskiej uważane są przez autora podręcznika kartografii roślinności J.B. Falińskiego (1990) za najtrudniejszy rodzaj map roślinności. Metodyczne problemy kartowania roślinności wysokogórskiej wynikają z natury samej szaty roślinnej gór, charakteryzującej się ogromnym zróżnicowaniem przestrzennym (mozaika 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 swoistą specyfikę map roślinności wysokogórskiej: konieczne jest uwzględnienie w legendzie jednostek typologicznych różnej rangi i zbiorowisk o pośrednim charakterze fitosocjologicznym (Curtis, 1959), jak również jednostek nie w pełni wykształconych oraz trwałych kompleksów zbiorowisk (Kozłowska, 1999). Kartowanie roślinności wysokogórskiej utrudniają więc dwa, istotne problemy. Pierwszy związany jest z trudnością graficznej prezentacji kompleksów zbiorowisk, a drugi z wyróżnianiem zbiorowisk o charakterze przejściowym. Metoda prezentacji kartograficznej polegająca na nakładaniu kilku informacji w obrębie jednego wydzielenia na mapie (tzw. "piżamka", przedstawiana na mapie kolorowym szrafem), daje wyniki niezadowalające i prowadzi do wyróżnienia bardzo dużej liczby jednostek w legendzie mapy, co obniża jej czytelność. Problem ten jest nierozerwalnie związany z metodycznym problemem typologii zbiorowisk roślinnych. Wielokrotnie podkreślany przez geobotaników problem poszukiwania nowego sposobu prezentacji map roślinności wysokogórskiej wydaje sie nadal aktualny (Faliński, 1990).

Prace terenowe związane z kartowaniem roślinności wysokogórskiej są utrudnione i opóźnione dodatkowo przez: krótki okres wegetacyjny, zmienną pogodę i niedostępność wielu stoków.

Obszar całego TPN pokrywa jedynie mapa roślinności opracowana przez zespół: S. Myczkowski, H. Piękoś-Mirek, J. Baryła, opublikowana w skali 1:50 000 w *Atlasie TPN* (Trafas, 1985). Mapy w skalach szczegółowych opracowane zostały jedynie dla górnych partii wybranych dolin tatrzańskich: Chochołowskiej, Kościeliskiej i Morskiego Oka w skali 1:37 500 (Szafer, Pawłowski, Kulczyński, 1923, 1927; Pawłowski, Sokołowski, Wallisch, 1929); Doliny Pięciu Stawów Polskich, w skali około 1:10 000 (Balcerkiewicz, Wojterska, 1984; Kurnatowska, 1995); Pańszczycy, Gąsienicowej, Goryczkowej i Kondratowej w skali 1:10 000 (Kozłowska¹) oraz Kotłów Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego w skalach: 1:1000 i 1:500 (Kozłowska, 1999). Mapy te powstały w wyniku kartowania terenowego o różnym stopniu szczegółowości.

Celowe zatem wydawało się przeprowadzenie pracy badawczej, której zadaniem byłoby oszacowanie przydatności metod i materiałów teledetekcyjnych do badań roślinności wysokogórskiej w skali szczegółowej. Zarówno metody interpretacji wizualnej, jak i cyfrowe przetwarzanie zdjęć pozwalają na kartowanie roślinności różnych formacji (leśnej, krzewiastej i trawiastej) w górach (Bielecka, 1980, 1986; Bielecka, Fedorowicz-Jackowski, Witkowska, 1994). Przedmiotem niniejszej pracy jest oszacowanie możliwości delimitacji powszechnych zbiorowisk piętra alpejskiego i subalpejskiego co najmniej w randze zespołu, na różnych materiałach teledetekcyjnych: wielkoskalowych zdjęciach naziemnych oraz zdjęciach lotniczych i satelitarnych, z wykorzystaniem metod cyfrowego przetwarzania obrazów.

Zasadnicze 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.

Metodyka badań

Za podstawę do oceny metod i materiałów teledetekcyjnych do wielkoskalowych badań roślinności przyjęto:

1) analizę możliwości zdalnej identyfikacji trzech typowych i powszechnych zespołów wysokogórskich: *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* (murawy alpejskie), *Luzuletum spadiceae* (zielne zbiorowiska wyleżyskowe) i *Calamagrostietum villosae tatricum* (traworośla), dominujących w krajobrazie piętra alpejskiego i subalpejskiego, oraz

2) oszacowanie możliwości zautomatyzowanego kartowania podzespołów oraz kompleksów tych zbiorowisk.

Rozwiązanie pierwszego problemu badawczego ma charakter poznawczy. Badania prowadzono na kilku poziomach szczegółowości związanych ze skalą badań oraz rodzajem wykorzystanych metod i materiałów teledetekcyjnych. Ze względu na fakt, że analizie poddano zbiorowiska tej samej formacji roślinnej, o zbliżonej fizjonomii, za punkt wyjścia przyjęto szczegółową analizę gatunków dominujących badanych zbiorowisk. Objęła ona laboratoryjną analizę tych cech i przy-

¹ Materiały niepublikowane; opracowanie do operatu ochrony ekosystemów nieleśnych.
stosowań fizjologicznych roślin, które mają bezpośredni wpływ na wielkość odbicia promieniowania elektromagnetycznego. Celowe wydało się tu przeprowadzenie następujących pomiarów: barwników asymilacyjnych, fluorescencji, transpiracji i zawartości wody w tkankach. Zaobserwowane, istotne zróżnicowanie funkcjonalne gatunków skłoniło do podjęcia analizy charakterystyk spektralnych na poziomie zbiorowisk roślinnych (zdominowanych przez zbadane gatunki). W tym celu wykonano punktowe pomiary radiometryczne badanych zbiorowisk.

Podjęto również próbę określenia przydatności zróżnicowania ilościowego zbiorowisk do ich identyfikacji. Wykonano tu pomiary biomasy oraz znormalizowanego wskaźnika zieleni NDVI, obliczonego na podstawie terenowych pomiarów spektrometrycznych.

Kolejnym etapem była weryfikacja wyników pomiarów punktowych, na zdjęciach naziemnych, wykonanych w zakresie czerwonym i podczerwonym. Na podstawie analizy tych zdjęć przeprowadzono oszacowanie możliwości zdalnej identyfikacji badanych zbiorowisk oraz ich zautomatyzowanej delimitacji metodą klasyfikacji nadzorowanej.

Ostatecznie podjęto próbę ekstrapolacji otrzymanych wyników na materiałach lotniczych (zdjęcia barwne) i satelitarnych (*Landsat Thematic Mapper*).

Drugi problem postawiony w niniejszej pracy ma charakter metodyczny. Celem tej części pracy była próba zastosowania eksperymentalnej metody kartowania roślinności, umożliwiającej prezentację i analizę kompleksów zbiorowisk i granic zonalnych. Możliwość rozwiązania tego problemu badawczego, będącego problemem kartografii geobotanicznej, zaprezentowano na podstawie wyników klasyfikacji nadzorowanej zbiorowisk roślinnych, z zastosowaniem metod logiki rozmytej.

W dyskusji znalazła się opinia na temat użyteczności wykorzystanych metod i materiałów teledetekcyjnych oraz artykulacja problemów otwartych, w tym możliwości i celowości prowadzenia szczegółowych badań roślinności wysokogórskiej oraz ich rozszerzenia z uwzględnieniem zaawansowanych skanerów obrazujących i technik cyfrowego przetwarzania obrazów.

Hipoteza robocza

Zróżnicowanie roślinności wysokogórskiej związane jest z działaniem szeregu czynników abiotycznych. Jednocześnie, wykształcenie wielu form roślinności wynika ze specyficznych przystosowań roślin, umożliwiających przetrwanie w trudnych warunkach środowiska. Przystosowania te mogą mieć różnorodny charakter: począwszy od budowy zewnętrznej (np. pokrycie liści włoskami lub woskiem zabezpieczającymi przed nadmierną transpiracją) po przystosowania anatomiczne i fizjologiczne (np. struktura mezofilu, ilość i układ aparatów szparkowych, zawartość barwników asymilacyjnych). W niniejszej pracy zakłada się, że zróżnicowanie roślinności obserwowane w terenie oraz w mikroskali, może być również rejestrowane zdalnie, przy użyciu specjalistycznego sprzętu pomiarowego z zakresu teledetekcji. Oczekuje się, że znajomość cech budowy anatomicznej i funkcjonalnej gatunków reprezentujących badane zbiorowiska, pozwoli na identyfikację zbiorowisk na wielkoskalowych materiałach teledetekcyjnych przynajmniej w randze zespołu.

Drugim problemem badawczym niniejszej pracy jest podjęcie próby analizy i kartograficznej prezentacji badanych zbiorowisk za pomocą metod zaczerpniętych z teorii logiki rozmytej. Do takiej analizy skłaniają problemy związane z kartowaniem rozmytej i drobnomozaikowej struktury roślinności metodami tradycyjnymi. Zakłada się, że opis roślinności wysokogórskiej, oparty o ideę częściowej przynależności piksela do danej klasy jest bardziej zbliżony do stanu rzeczywistego niż konwencjonalny opis oparty o teorię zbiorów kantorowskich i pozwoli na lepsze zrozumienie struktury roślinności, oraz jej związków z pozostałymi komponentami środowiska.

Kierunki i problemy teledetekcji i kartografii roślinności wysokogórskiej

Ze względu na bogatą literaturę dotyczącą teledetekcji roślinności, w poniższym rozdziale przedstawiono jedynie prace reprezentujące główne nurty tych badań. Omówiono również prekursorskie publikacje z zakresu badań teledetekcyjnych prowadzonych na obszarach wysokogórskich oraz historię badań fotogrametrycznych i teledetekcyjnych prowadzonych w Tatrach.

Druga część przeglądu poświęcona jest zagadnieniom struktury środowiska i dyskusji z zakresu kartografii geobotanicznej dotyczacej kontinuum roślinności. W tej części zaprezentowano również przykłady zastosowania teorii logiki rozmytej w teledetekcyjnych badaniach roślinności. Metody z zakresu logiki rozmytej pozwalaja bowiem na rozwiązanie dwóch problemów związanych ze zdalnym kartowaniem roślinności: technicznego i metodycznego. Po pierwsze, pozwalają one na analizę pikseli mieszanych, będacych wynikiem zarówno niskiej rozdzielczości geometrycznej obecnie dostępnych materiałów satelitarnych, jak i występowania funkcjonalnej mozaiki i kompleksów zbiorowisk roślinnych. Po drugie logika rozmyta znajduje szczególne zastosowanie w dyscyplinach przyrodniczych, które podejmują badania obiektów i zjawisk o charakterze ciagłym.

Teledetekcja roślinności

Teledetekcja roślinności pozwala na analizę zarówno jakościowego, jak i ilościowego zróżnicowania roślinności. Klasyczne zastosowania teledetekcji obejmują kartowanie pokrycia terenu i monitoring roślinności, np. sukcesji lasu (Hall i in., 1991; Lucas i in., 1993), procesu pustynnienia (Tucker i in., 1986), analizy wilgotności siedlisk (Nemani, Running, 1989), czy też cykli biogeochemicznych (Potter i in., 1993) w skali globalnej i regionalnej. Jednocześnie, już we wczesnych pracach prowadzono szczegółowe, laboratoryjne badania fizjologiczne oraz analizy spektrofotometryczne wybranych gatunków roślin, które miały na celu ułatwienie identyfikacji danych gatunków oraz rozpoznania ich stanu fizjologicznego "z lotu ptaka" (Gates i in., 1965; Knipling, 1970). Optyczne właściwości roślin są bezpośrednim wynikiem ich budowy anatomicznej i funkcjonalnej (fizjologii), a zarazem podstawa do interpretacji roślinności na zdjęciach lotniczych i satelitarnych. Rozpoznanie obiektów na materiałach teledetekcyjnych oparte jest głównie o analizę wielkości odbicia promieniowania słonecznego w różnych zakresach spektrum elektromagnetycznego. Wielkość absorpcji promieniowania słonecznego roślin zależy od energii promieniowania (długości fali). Ultrafiolet i promieniowanie widzialne wykorzystywane są przez rośliny w procesie fotosyntezy i reakcjach fotomorfogenetycznych. Niskoenergetyczne promieniowanie podczerwone związane jest z procesami ogrzewania, ewapotranspiracji i transpiracji. Prace z zakresu fizjologii roślin i analizy spektrometrycznej wykazały (Gausman, 1985), że w zakresie widzialnym o odbiciu promieniowania słonecznego decyduje zawartość barwników w liściu, natomiast w zakresie bliskiej podczerwieni - wewnętrzna struktura liścia: w zakresie 0,75–1,35 μm – wielkość i ilość przestrzeni międzykomórkowych, a w zakresie 1,35–2,5 µm – zawartość wody w tkankach (z maksimum absorpcji promieniowania w zakresie 1,45 i 1,95 µm).

Ilościowe badania roślinności początkowo związane były z opracowaniem szeregu wskaźników zieleni (Vegetation Indices) (Ashburn, 1978, Tucker, 1979). Kalibracja tych parametrów, na podstawie terenowych pomiarów biometrycznych i meteorologicznych pozwoliła m.in. na modelowanie procesów hydrologicznych, meteorologicznych i biotycznych (Baret, Guyot, 1991; Dąbrowska-Zielińska, 1995) oraz na szacowanie produktywności plonów (van Dijk i in., 1992; Dąbrowska-Zielińska, Kogan, Ciołkosz, Gruszczyńska, 1998). Kolejnym krokiem w rozwoju nurtu ilościowych badań roślinności było zastosowanie lidaru do analizy fluorescencji chlorofilu. Szczególną przydatność techniki lidarowej wykazano w badaniach środowisk wodnych (Kim, 1973). W środowiskach lądowych badania fluorescencji wzbudzonej światłem laserowym posłużyły do szacowania fotosyntezy netto oraz wigoru i stresu roślin (Hoge i in., 1983; Berkhout, 1996; Lang i in., 1995; Lichtenthaler i in., 1995).

Teledetekcja środowisk wysokogórskich

Materiały satelitarne i lotnicze są szczególnie cenne w badaniach niedostępnych rejonów wysokogórskich (Bax, 1996). Literatura na ten temat jest jednak dość uboga, a większość prac ma, jak do tej pory, charakter metodyczny. Wynika to ze szczególnego charakteru środowisk wysokogórskich, który podyktował specyfikę badań teledetekcyjnych na obszarach o urozmaiconej rzeźbie. Dominują tu trzy nurty badawcze: modelowanie procesów hydrologiczno-geomorfologicznych, analiza struktury środowiska oraz problematyka związana z orografią.

Prace z zakresu geomorfologii koncentrują się wokół tematyki zautomatyzowanego rozpoznawania form rzeźby oraz szacowania skali i dynamiki procesów geomorfologicznych na podstawie materiałów "z lotu ptaka" (Walsh i in., 1998, Brown i in., 1998). Zastosowanie teledetekcji do wielkoskalowego kartowania procesów geomorfologicznych do planowania przestrzennego w Alpach przedstawili J. Rupke, E.C. Cammeraat, A.C. Seijmonsbergen i C.J. Van Westen (1988). Ciekawym przykładem zastosowania teledetekcji w górach są badania grubości i długości zalegania pokrywy śnieżnej w celu modelowania odpływu rzecznego (Vuille, 1996).

Szeroko zakrojony projekt badań z zakresu modelowania procesów fizycznogeograficznych i analizy struktury środowiska w strefie górnej granicy lasu na podstawie materiałów teledetekcyjnych przedstawiła grupa ośrodków naukowych w USA (Malanson, Brown, 1998).

Szczególną trudnością zdalnego kartowania środowisk wysokogórskich są zniekształcenia geometryczne i radiometryczne obrazów obiektów na zdjęciach oraz wizualizacja w przestrzeni trójwymiarowej. Zniekształcenia geometryczne, wynikające z geometrii rzutu środkowego mają marginalne znaczenie przy analizie terenów płaskich. W analizie obrazów obszarów o urozmaiconej rzeźbie są one z powodzeniem redukowane poprzez ortorektyfikację obrazów cyfrowych, polegającą na korekcji radialnego przesunięcia obrazów punktów, wynikajacego ze znacznych deniwelacji terenu. Korekta ta wymaga uwzględnienia przy rektyfikacji numerycznego modelu terenu. Obecnie, profesjonalne oprogramowanie teledetekcyjno-fotogrametryczne umożliwia nie tylko na wpół zautomatyzowane generowanie numerycznych modeli terenu na podstawie stereopar zdjęć, ale również wizualizację map tematycznych oraz cyfrowych obrazów satelitarnych i lotniczych w przestrzeni trójwymiarowej. Pracochłonność opracowania szczegółowego numerycznego modelu terenu, jak również możliwość w zasadzie nieograniczonego zwiększania skali obrazu na ekranie komputera, doprowadziła do wypracowania zaawansowanych metod z zakresu geometrii fraktalnej, pozwalających na symulację realistycznego ukształtowania terenu, w dowolnej skali (Clarke, 1993). Metody te polegają na zautomatyzowanym generowaniu "tekstury" numerycznych modeli terenu na podstawie wymiaru fraktalnego charakterystycznego dla danego obszaru badań.

Trudniejszym i rzadziej podejmowanym problemem, jest natomiast korekcja radiometryczna. Standardowa korekcja atmosferyczna wykorzystująca model Modtran oparty o transformację Tasseled Cap (Richter, 1996), z powodzeniem stosowana na obszarach równinnych, nie obejmuje korekcji zniekształcenia wielkości odbicia promieniowania, wynikającego z: głębokiego cienia, różnego nachylenia stoków względem anteny zamontowanej na satelicie oraz różnej grubości warstwy atmosfery od skanera do np. den dolin i szczytów gór. Próby korekcji scen satelitarnych z terenów wysokogórskich mają na razie charakter eksperymentalny i obejmują kalibrację tylko konkretnego skanera. E. Parlow (1996) oraz K. I. Itten i współautorzy (1992, 1993) opracowali współczynniki korekcyjne dla poszczególnych kanałów Landsata TM, na podstawie modelu symulującego zmiany natężenia promieniowania słonecznego w zależności od nachylenia, wystawy słonecznej i wysokości stoków nad poziom morza.

Badania teledetekcyjne w Tatrach

Tatry to jeden z obszarów o największych walorach przyrodniczo-krajobrazowych Polski, toteż od końca XVIII wieku stały się one naturalnym laboratorium badawczym z zakresu nauk o Ziemi. Badania naukowe są jednym z podstawowych celów Tatrzańskiego Parku Narodowego i prowadzone są na szeroką skalę; w ostatnich latach, na terenie TPN realizuje się około 120 tematów badawczych rocznie (Byrcyn-Gasienica, 1995). Mimo że Tatry są jednym z lepiej przebadanych miejsc w Polsce, potrzeba prowadzenia badań naukowych nie maleje, jednocześnie wśród tak wielu prac, można wymienić zaledwie kilka prac teledetekcyjnych. Pierwsze prace, prowadzone w 1917 r. przez K. Weigla miały charakter fotogrametryczny. W 1934 r. Wojskowy Instytut Geograficzny wydał mapę Tatr w skali 1:20 000, którą opracowano na podstawie stereogramów naziemnych i uzupełniających pomiarów stolikowych. W latach 60. K. Guzik prowadził prace fotogrametryczne, które posłużyły do opracowania szczegółowej mapy geologicznej Tatr. W latach 60. i 70. wykonano naziemne zdjęcia fotogrametryczne 11 stoków w dolinach: Gasienicowej, Goryczkowej, Kościeliskiej, Rybiego Potoku i Starorobociańskiej (Oddział Krakowski Polskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk o Ziemi; Borowiec, 1977) oraz Doliny za Mnichem, Kotła Mieguszowieckiego, stoków Skrajnej Turni oraz Zółtej Turni (zespół Pracowni Interpretacji Zdjęć Lotniczych WGiSR UW), dla której wykonano również zdjęcia spektrostrefowe. Pierwsze zastosowanie fotointerpretacii do badań roślinności Tatr przedstawiła E. Bielecka (1986) w studium poświęconym analizie zmian w obrębie piętra reglowego, natomiast E. Bielecka, W. Fedorowicz-Jackowski i E. Witkowska (1994) zastosowali metody cyfrowego przetwarzania obrazów do monitoringu górnej granicy lasu. Możliwości wizualizacji Tatr "z lotu ptaka" zaprezentowano na mapie satelitarnej Tatr, opracowanej na podstawie zdjęcia Landsat TM (Bielecka, Fedorowicz-Jackowski, 1993); podjęto również próbę trójwymiarowej, wirtualnej prezentacji zdjęć satelitarnych i map tematycznych Doliny Pięciu Stawów Polskich, na podstawie numerycznego modelu terenu (Fedorowicz-Jackowski, Halicki, Jezierska, Kurnatowska, 1995).

Struktura roślinności a problemy kartografii fitosocjologicznej

W latach 60. rozgorzała dyskusja na temat metod opisu i prezentacji roślinności, majaca podłoże w rozbieżności poglądów na samą naturę roślinności. Klasyfikacji roślinności przeciwstawiano 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. Przeciwne 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). W przyrodzie istnieje szereg wyraźnych i ostrych granic, wiele granic ma jednak charakter przejściowy, zonalny. 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 przyjeto w szkole Braun-Blangueta, która za podstawe przyjmuje klasyfikację hierarchiczną. Na najniższych szczeblach możliwe jest jednak uwzględnienie ordynacji, poprzez rozróżnienie spektrum zbiorowisk zróżnicowanych gradientowo, np. zbiorowisk występujących na siedliskach o różnej wilgotności lub zbiorowisk o zróżnicowanej zwartości pokrywy roślinnej. Uporzadkowanie to jest zazwyczaj prowadzone tylko według jednego kryterium. Formalny podział roślinności według szkoły Braun-Blanqueta jest dość elastyczny i pozwala na wydzielanie zbiorowisk przejściowych i nie w pełni wykształconych. W trakcie badań terenowych wielokrotnie zwracano jednak uwagę na fakt, że w skalach szczegółowych prowadzi to do wydzielenia zbyt wielu jednostek legendy, co obniża czytelność mapy i nie zawsze umożliwia ich kartograficzną prezentację. Dowiodły tego badania prowadzone w środowiskach wysokogórskich, których roślinność wykazuje w rzeczywistości charakter ciągły (McVean, Ratcliffe, 1962).

Zastosowania logiki rozmytej w teledetekcji roślinności

Wypracowanie wielu modeli pozwalających na wnioskowanie o abiotycznych komponentach środowiska i szeregu procesów fizycznogeograficznych na podstawie roślinności, jak również dynamiczny rozwój metod cyfrowego przetwarzania obrazów skłoniły wielu autorów do podjęcia szczegółowych badań roślinności metodami teledetekcji. W licznych pracach zauważono jednak, że klasyfikacja nadzorowana, oparta o tradycyjne, sztywno zdefiniowane i dyskretne klasy, prowadzi do opracowań map tematycznych o niskiej dokładności (Wang, 1992). Jest to wynikiem zarówno technologii pozyskiwania danych satelitarnych (niska rozdzielczość geometryczna obrazów) jak i specyfiki wielu obiektów i procesów fizycznogeograficznych, charakteryzujących się swoistym kontinuum (Foody, 1994).

Podjęto więc intensywne badania z zakresu analizy subpikslowej, mające na celu rozpoznanie zróżnicowania pokrycia terenu w obrębie jednego piksela. Jednym z możliwych rozwiązań problemu pikseli mieszanych okazało się zastosowanie metod z zakresu logiki rozmytej (*fuzzy logic*). Pozytywne wyniki uzyskano stosując tzw. *spectral unmixing* oraz metody z zakresu zbiorów rozmytych (*fuzzy sets*).

Pierwsza grupa metod wymaga kalibracyjnych pomiarów spektrometrycznych i polega na rozwiązaniu układu równań o wielu niewiadomych, na podstawie wielkości odbicia promieniowania "czystych" typów pokrycia, pomierzonych w terenie (Roberts i in., 1990). Metoda ta daje dobre rezultaty, jednak ze względu na czaso-, koszto- i pracochłonność podejmowane są próby modelowania odpowiedzi spektralnych jednorodnych typów pokrycia terenu. Dają one mniejszą dokładność, a prace w tym zakresie wymagają dalszych badań.

Druga grupa metod wykorzystuje teorię zbiorów rozmytych, które są rozszerzeniem pojęcia zbiorów w ujęciu klasycznym (Cieślak, Smoluk, 1998). Teoria ta zakłada, że istnieją zbiory, w których przynależność elementu do zbioru jest dyskusyjna. Według twórcy tej teorii L.A. Zadeha (1965), zbiór rozmyty określony w przestrzeni X, zawierającej wszystkie interesujące nas obiekty, jest funkcją określoną na przestrzeni X o wartościach zawartych w przedziale [0, 1], w przeciwieństwie do zbioru zwykłego, którego wartości należą do dwuelementowego zbioru $\{0, 1\}$. Oznacza to, że dany element może należeć całkowicie do danego zbioru (przynależność = 1), może nie należeć do zbioru (przynależność = 0), ale istnieje również możliwość trzecia, tzn., że dany element należy do danego zbioru częściowo (przynależność pomiędzy 0 a 1). Szczególne zastosowanie znajduje teoria zbiorów rozmytych w dyscyplinach przyrodniczych. W geografii zbiory rozmyte umożliwiają kartowanie stref przejściowych oraz prezentację zjawisk ciagłych (Burrough, 1986; Wang, Hall, 1996). Klasycznym przykładem zbioru rozmytego jest mapa spadków. Załóżmy, że za stoki strome w Tatrach przyjmiemy stoki o nachyleniu większym od 20°. Czy oznacza to, że stoki o nachyleniu 19,99° nie są stokami stromymi? Ciekawe zastosowanie zbiorów rozmytych do opracowania mapy pH gleb przedstawili P. Burrough (1989) i A. Ołdak (1994).

Zastosowanie teorii z zakresu logiki rozmytej w klasyfikacji nadzorowanej zdjęć lotniczych lub satelitarnych polega na analizie rozkładu prawdopodobieństwa przynależności piksela do danej klasy i wymaga określenia progów prawdopodobieństw, poniżej których dany piksel należy do klasy mieszanej (Manyara, Lein, 1994; Jakomulska, 1999). Pozwala to na wyróżnienie klas "czystych", dla których prawdopodobieństwo przynależności jest równe lub zbliżone do jedności oraz klas mieszanych. Umożliwia wyróżnienie nie tylko jednej klasy "mieszanej", ale również kilku klas przejściowych.

Obydwie metody mają wciąż jeszcze charakter eksperymentalny - pierwsza jest bardzo pracochłonna, druga zaś może być subiektywna. Logika rozmyta cieszy się jednak dużą popularnością w badaniach z zakresu teledetekcji roślinności. Idea częściowej przynależności piksela do danej klasy okazała się atrakcyjną alternatywą dla dwuwartościowej logiki stosowanej w standardowych technikach klasyfikacji, a zastosowanie teorii zbiorów rozmytych jest obecnie coraz częściej wykorzystywaną metodą, która rozwiązuje problem pikseli mieszanych. Daje ona bowiem odpowiedź zarówno na metodyczny problem kartografii fitosocjologicznej związany z założeniem o względnej nieciągłości roślinności, jak i na techniczny problem teledetekcji, związany z niską rozdzielczością geometryczną obecnie dostepnych obrazów satelitarnych.

Wnioski

Wielokrotnie podkreślane zalety teledetekcji: szybkość, obiektywność i powtarzalność badań oraz możliwość jednoczesnego badania rozległych, jak również niedostępnych obszarów doprowadziły do rozpowszechnienia metod i szerokiego wykorzystania materiałów teledetekcyjnych. Bogata literatura, liczne projekty badawcze i operacyjność wielu systemów pozyskiwania, przetwarzania i analizy lotniczych i satelitarnych danych teledetekcyjnych stanowią dowód na wysokie osiągnięcia w tej dziedzinie i świadczą o tym, że teledetekcja jest sprawdzonym narzędziem badawczym, wspierającym tradycyjne metody badań. Ze względu na specyfikę środowisk wysokogórskich zastosowania metod teledetekcji w ich badaniach mają wciąż charakter metodyczny i eksperymentalny.

Należy tu wyraźnie podkreślić, że badania teledetekcyjne mają wybitnie interdyscyplinarny charakter, wymagają więc kompleksowego ujęcia przedmiotu badań. Interdyscyplinarność teledetekcji podkreśla fakt, że korzysta ona zarówno z fundamentalnych jak i szczegółowych wyników badań takich dziedzin nauki jak: fizyka (w tym w szczególności optyka), elektronika, telekomunikacja, matematyka i statystyka, informatyka, grafika, psychologia percepcji, i innych. Znajdując zastosowanie w wielu dziedzinach badawczych i praktycznych, teledetekcja korzysta z najnowszych osiągnięć techniki. Jednocześnie jednak, wydaje się, że dynamiczny postęp technologiczny, który obserwujemy w ostatnich latach, coraz częściej wyprzedza możliwości jej wdrażania do badań środowiska. Nierzadkie są przypadki, że technologia umożliwia nam obserwację i rejestrację zjawisk, których jednak nie potrafimy jeszcze interpretować. Z optymistycznego punktu widzenia, fakt że technika wyprzedza myśl stanowi obietnicę nowego "wieku odkryć" dla geografii, z pesymistycznego – nasza wiedza jest ciągle otwarta i niepełna i potrzeba jeszcze wielu badań, żeby ją zgłębić.

Charakterystyka obszaru i obiektów badań

Ze względu na szereg prac podejmujących problematykę badań przyrodniczych prowadzonych na obszarze Tatr, w niniejszej pracy uznano, że szczegółowy opis środowiska jest w tym miejscu zbędny. Scharakteryzowano tu pokrótce jedynie te geokomponenty i ich cechy, które mają bezpośredni związek z niniejszą pracą: charakter szaty roślinnej Tatr, roślinność wysokogórską, badane zbiorowiska i gatunki oraz rozkład natężenia promieniowania słonecznego.

Charakter szaty roślinnej Tatr

Szata roślinna Tatr charakteryzuje się swoistą specyfiką: występują tu endemity tatrzańskie i karpackie, wiele zbiorowisk ma tu swoje centrum występowania w Polsce. Zachowała ona jeszcze do dziś swój charakter naturalny, a miejscami nawet pierwotny, mimo, że od kilku stuleci znajdowała się pod presją różnorodnych oddziaływań człowieka (Piękoś-Mirkowa, 1981). Środowiska izolowane (wyspy) i trudno dostępne (góry wysokie) charakteryzuje wysoka bioróżnorodność (Falińska, 1996). W środowiskach wysokogórskich, rozdrobniona i mozaikowa struktura roślinności, jak również jej wyraźna zmienność w czasie, jest wyrazem ogromnego zróżnicowania i dynamiki czynników abiotycznych (Jakomulska, 1998; Kozłowska, 1999). Charakterystyczna cecha 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 Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, wydzielono szereg podzespołów: 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 mikromozaiki zbiorowisk, tworzącej się na skutek istnienia mikrorzeźby terenu oraz lokalnych różnic w wilgotności podłoża i długości zalegania pokrywy śnieżnej. Powoduje to występowanie tak małopowierzchniowych biochor poszczególnych zbiorowisk roślinnych, że trudno je uznać za odpowiadające jednostkom strukturalno-funkcjonalnym – ekosystemom. Dopiero taki powtarzalny, trwały kompleks zbiorowisk związany z danym typem stoku stanowi jednostkę funkcjonalną (Kozłowska, 1999).

Charakterystyczne dla gór jest 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. wysokość n.p.m., żyzność i wilgotność podłoża, miąższość gleby, temperatura, ciśnienie, nasłonecznienie).

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

Roślinność i flora wysokogórska

Terminem roślinność wysokogórska objęte sa zespoły roślinne występujące powyżej górnej granicy lasu. Nie stanowią one jednak jednej grupy: przeciwnie, różnice między nimi są na tyle duże, że zbiorowiska te zaliczane są do kilku odrębnych klas (Pawłowski, [w:] Szafer, Zarzycki, 1977). Cechą charakterystyczną roślinności wysokogórskiej jest przewaga lub nawet wyłączność gatunków wysokogórskich w ich składzie florystycznym. Gatunki niżowe występuja tu sporadycznie. Zbiorowiska wysokogórskie można jednak spotkać poniżej górnej granicy lasu, na specyficznych siedliskach, np. na piargach. Do grupy zbiorowisk wysokogórskich można zaliczyć: roślinność szczelin skalnych, roślinność piargową, murawy skalne, traworośla, ziołorośla, wyleżyska, zespoły źródliskowe oraz zespoły kosówki.

Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr ...

W niniejszej pracy analizie poddano trzy typowe i powszechne zbiorowiska wysokogórskie polskiej części Tatr, związane z podłożem niewapiennym: Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, Luzuletum spadiceae i Calamagrostietum villosae tatricum oraz trzy gatunki, które są dominującymi gatunkami badanych zbiorowisk (odpowiednio): Juncus trifidus, Luzula spadicea i Calamagrostis villosa.

W tabeli 1 (patrz: s. 18) przedstawiono udział powierzchni badanych zbiorowisk w całkowitej powierzchni pietra alpejskiego i subalpejskiego (bez powierzchni porośniętych kosodrzewiną) Kotłów: Gąsienicowego i Goryczkowego Świńskiego oraz Doliny Pięciu Stawów Polskich (Kozłowska, Jakomulska 1999; Kurnatowska, 1998).

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.

Charakterystyka badanych zbiorowisk roślinnych

Oreochloo distichae-Juncetum trifidi

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

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. 1; s. 19).

Luzuletum spadiceae

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

Luzula spadicea (kosmatka brunatna) tworzy powszechne, zielne zbiorowisko wyleżyskowe Luzuletum spadiceae (ryc. 2; s. 19), 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 starych, 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 zwarciem 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).

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; s. 20). 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*.

Charakterystyka badanych gatunków

Sit skucina

Juncus trifidus, Klasa: Jednoliścienne, Rząd: Liliowce, Rodzina: Sitowate

Sit skucina jest alpejską rośliną zielną wyższych części Karpat i Sudetów (ryc. 4a; s. 21). Porasta stoki, upłazy i szczeliny skalne na podłożu niewapiennym. W Tatrach występuje od wysokości ok. 1200 do 2600 m n.p.m. Wysokość kwitnących łodyg waha się od 10 do 25 cm. Liście mają ok. 15 cm długości, są wąskie, szydlaste, matowosiwozielone. Rośnie kępkami i tworzy bardzo gęstą i zwartą darń. Bezlistna łodyga miewa u góry, w obrębie kwiatostanu po 2, czasem 4 szydlaste liście, tzw. podsadki. Zakwita w lipcu, owoce dojrzewają pod koniec sierpnia i we wrześniu, w tym okresie zaczynają również czerwienieć liściowe podsadki. Sit skucina jest rośliną ogromnie wytrzymałą na wiatr, suszę i mróz (Pawłowski, 1956).

Kosmatka brunatna

Luzula spadicea, Klasa: Jednoliścienne, Rząd: Liliowce, Rodzina: Sitowate

Kosmatka brunatna jest wysokogórskim gatunkiem karpackim (ryc. 4b; s. 21). Jest rośliną zielną o szerokich liściach (2–3 mm). Osiąga wysokość do 30 cm. Zakwita w lipcu–sierpniu (kwiaty czarne lub ciemno brunatne).

Trzcinnik owłosiony

Calamagrostis villosa, Klasa: Jednoliścienne, Rząd: Plewowce, Rodzina: Trawy

Trzcinnik owłosiony dochodzi do wysokości 1 m, w Polsce występuje w całym łańcuchu Karpat, można jednak również spotkać formy niżowe i północne (ryc. 4c; s. 21). W wyższych położeniach tworzy zbiorowisko *Calamagrostietum villosae tatricum*, w piętrze subalpejskim podrasta płaty kosodrzewiny, natomiast w reglu górnym jest gatunkiem powszechnym i charakterystycznym runa podgórskiego boru trzcinnikowego (*Pino-Calamagrostidetum villosae*).

W celu uniknięcia powtarzania długich nazw gatunków i zespołów, w dalszej części pracy nazwy gatunków: *Juncus trifidus*, *Luzula spadicea* i *Calamagrostis villosa* używane są zamiennie z terminami (odpowiednio): sit, kosmatka i trzcinnik, natomiast nazwy zbiorowisk: *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi*, *Luzuletum spadiceae* i *Calamagrostietum villosae tatricum* zastąpiono terminami (odpowiednio): murawa, wyleżysko i traworośle.

Natężenie i skład spektralny promieniowania słonecznego

Nateżenie i suma energii słonecznej, która otrzymują rośliny, warunkuje szereg procesów fizjologicznych, fizycznych i chemicznych zachodzących w roślinie, np. fotosyntezę, oddychanie, wzrost, rozwój itp. Przebieg promieniowania całkowitego uwarunkowany jest przede wszystkim wielkością zachmurzenia. Roczny przebieg promieniowania całkowitego na stacji meteorologicznej w Zakopanem wykazuje, że w położeniach górskich od jesieni do wiosny, występują wyższe niż przeciętnie w Polsce wartości promieniowania słonecznego. W miesiącach letnich, często występujące zachmurzenie typu orograficznego obniża średnie wartości dobowe promieniowania w Zakopanem (Podogrodzki, 1970; Miara, Paszyński, Grzybowski, 1987). W dni pogodne o usłonecznieniu decydują natomiast: wysokość Słońca oraz przezroczystość atmosfery (zanieczyszczenie i zawartość pary wodnej). Do powierzchni Ziemi dociera jedynie dwie trzecie energii emitowanej przez Słońce – pozostała część ulega odbiciu, rozproszeniu i absorpcji atmosferycznej. W wyższych położeniach udział promieniowania bezpośredniego wzrasta, a promieniowanie rozproszone maleje. Badania aktynometryczne w Alpach wykazały, że w pogodnych warunkach w czerwcu, natężenie promieniowania całkowitego na wysokości 3000 m n.p.m. jest o 25% większe niż na wysokości 200 m (Barry, 1981). Gradient przyrostu promieniowania z wysokością waha się od 47 do 94 $\rm MJ/m^2$ na 100 m wysokości. Na Kasprowym Wierchu (1996 m n.p.m.) w miesiącach letnich średnie sumy dzienne całkowitego promieniowania słonecznego wzrastają o 13%, w stosunku do wartości pomierzonych na stacji w Zakopanem (857 m n.p.m.). Z punktu widzenia roślin oraz ich przystosowań do silnego natężenia promieniowania słonecznego, ważne jest maksymalne promieniowanie bezpośrednie. W dziesięcioleciu 1971–1980 maksymalne wartości wynosiły: w Zakopanem - 71%, a na Kasprowym Wierchu – 78% średniej wartości stałej słonecznej; przyrost nateżenia wynosi ok. 8 W/m² na każde 100 m wzniesienia (Rojan, 1988).

Dla roślin ogromne znaczenie ma również skład spektralny promieniowania słonecznego. Przeciętnie, promieniowanie podczerwone stanowi 45–50% całkowitego promieniowania słonecznego, widzialne zaś – około 45%. Promieniowanie ultrafioletowe stanowi jedynie około 5-9% promieniowania całkowitego, jednak to właśnie nadfioletowa część promieniowania słonecznego, a zwłaszcza UV-A i UV-B (0,28-0,4 µm) jest najbardziej aktywna biologicznie (Szczesna-Kozłowska, Błażejczyk, 1998). Rozpraszanie zależy od wielkości cząstek w atmosferze i od długości fali. Najsilniejszemu rozpraszaniu ulega promieniowanie krótkofalowe: do powierzchni Ziemi nie dociera promieniowanie elektromagnetyczne o długościach fal krótszych niż 280 nm. W górach wysokich, gdzie warstwa atmosfery jest cieńsza niż na niżu, zwiększa się udział promieniowania krótkofalowego: ultrafioletu i promieniowania niebieskiego. W Polsce istnieje niestety tylko jedna stacja aktynometryczna wykonująca pomiary promieniowania nadfioletowego i to na niżu, w Legionowie - nie ma więc danych umożliwiających przedstawienie pionowego rozkładu wielkości promieniowania ultrafioletowego.

Położenie poligonów badawczych

Wybór poligonów badawczych podyktowany został dostępnością stoków do przeprowadzenia badań terenowych, a w szczególności do wykonania zdjęć naziemnych oraz dobrym rozpoznaniem i kartograficznym ujęciem roślinności na badanym terenie. Warunki te spełniły stoki Beskidu, których roślinność została dobrze rozpoznana i skartowana.

Badania przeprowadzono na 18 poletkach testowych o różnej wysokości nad poziomem morza, nachyleniu stoku i wilgotności podłoża, położonych wzdłuż trzech transektów na stoku Beskidu o różnej wystawie słonecznej i na wiatr:

transekt 1: wzdłuż rynny na północno-zachodnim zboczu Kotła Gąsienicowego z czynnymi procesami torencjalnymi,

transekt 2: wzdłuż rynny na północnym stoku Beskidu, od szczytu Beskidu do rozwidlenia szlaków na Kasprowy Wierch oraz Świnicę i Karb,

transekt 3: wzdłuż rynny na północno-wschodnim stoku Beskidu, od szczytu po szlak prowadzący na Kasprowy Wierch oraz Świnicę i Karb.

Wybór punktów pomiarowych w obrębie zróżnicowanych siedlisk miał na celu zapewnienie powtarzalności i reprezentatywności wyników badań. Dodatkowo wykonano kilkanaście pomiarów wybranych parametrów w niższych partiach piętra subapejskiego Doliny Gąsienicowej oraz w alpejskim piętrze Tatr Zachodnich, na stokach Starorobociańskiego Wierchu.

Zdjęcia naziemne Beskidu wykonano z Uhrocia Kasprowego. Położenie transektów i terenowych punków pomiarowych oraz zasięg zdjęć naziemnych przedstawiono na ryc. 5 (s. 22).

Badania z pułapu lotniczego i satelitarnego rozszerzono na obszar całej Doliny Gąsienicowej.

Charakterystyka wykorzystanych materiałów

Materiały teledetekcyjne

Materiały fotograficzne wykorzystane do wykonania zdjęć naziemnych

Zdjęcia naziemne wykonane zostały na profesjonalnych filmach małoobrazkowych (36 × 24 mm) firmy Kodak. Zdjęcia w podczerwieni wykonano na filmie KODAK Infrared High Speed, uczulonym na bliski ultrafiolet, widzialny zakres spektrum elektromagnetycznego oraz bliską podczerwień (do 0,9 µm, z maksimum uczulenia filmu przypadającym na fale o długości 0,75–0,84 µm). W celu wyeliminowania ultrafioletu i zakresu widzialnego zastosowano gęsty czerwony filtr ("czarny"), który przepuszcza fale o długości większej od 690 nm, z maksimum transmitancji (około 73%) fal o długości 750 nm (ryc. 6; s. 23).

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 (ryc. 6; s. 23).

Wykorzystane do badań filmy charakteryzują się wysoką rozdzielczością: KODAK Infrared High Speed: 80 linii/mm, a KODAK TMAX: 125 linii/mm.

Zdjęcie lotnicze

Badania z pułapu lotniczego prowadzono na barwnym zdjęciu lotniczym Doliny Gąsienicowej wykonanym w skali ok. 1:30 000, w dniu 4 lipca 1994 r. Zdjęcie to zostało wykonane na początku okresu wegetacyjnego, gdy w zacienionych 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 dla Tatr wielospektralnych ani spektrostrefowych zdjęć lotniczych.

Zdjęcie satelitarne

W analizie wykorzystano scenę satelitarną nr 187/ 26 zobrazowaną dnia 6 VII 1992 r. przez skaner Thematic Mapper umieszczony na satelicie Landsat 5. Zdjęcie wykonano w bardzo dobrych warunkach pogodowych: charakteryzuje się wysokim kontrastem i nie ma na nim chmur.

Landsat 5 dostarcza obecnie najczęściej wykorzystywane w badaniach użytkowania ziemi i roślinności materiały satelitarne. Powszechność stosowania danych Thematic Mapper wynika ze stosunkowo dobrych parametrów zdjęć, głównie rozdzielczości terenowej i spektrometrycznej oraz dostępności i niewygórowanej ceny. Dla porównania: zdjęcia SPOT, o lepszej rozdzielczości terenowej (20 m dla skanera wielospektralnego i 10 m dla panchromatycznego), mają dużo gorszą rozdzielczość spektrometryczną (3 zakresy: zielony i czerwony i bliska podczerwień) oraz znacznie wyższą cenę.

Materiały satelitarne z nowych, obecnie wchodzących na orbity satelitów o wyższej rozdzielczości terenowej nie były dostępne w trakcie prowadzenia niniejszych badań.

Kartograficzne materiały źródłowe

W pracy wykorzystano następujące materiały kartograficzne:

 mapy topograficzne w układzie współrzędnych 1942 w skali 1:50 000 (nr: M-34-100-b oraz M-34-101-a),

 podkład fotogrametryczny w skali 1:500, opracowany przez zespół geodetów z AGH pod kierownictwem dr W. Borowca,

- numeryczny model terenu,

 mapę roślinności wysokogórskiej Dolin: Pańszczycy, Gąsienicowej, Goryczkowej i Kondratowej w skali 1:20 000, red. A. Kozłowska² (materiały niepublikowane),

mapę roślinności Kotła Gąsienicowego w skali
1:1000, red. A. Kozłowska³ (Kozłowska, 1999).

Mapy topograficzne, podkład fotogrametryczny i numeryczny model terenu posłużyły do rektyfikacji materiałów teledetekcyjnych, natomiast mapy roślinności – do wyboru próbek treningowych w klasyfikacji nadzorowanej oraz oszacowania dokładności klasyfikacji.

Metody badawcze

Wielkoskalowe badania naziemne

Przed przystąpieniem do badań terenowych wykonano w warunkach kameralnych pilotażową analizę archiwalnych, naziemnych zdjęć spektrostrefowych. Jej celem było sprawdzenie, na ile zdjęcia naziemne mogą być pomocne w rozpoznaniu i kartowaniu roślinności zbiorowisk wysokogórskich. Badaniom poddano spektrostrefowe zdjęcie Żółtej Turni (ryc. 7; s. 24). Zdjęcie zostało zeskanowane z wysoką rozdzielczością (2000 dpi) i poddane zautomatyzowanej klasyfikacji nienadzorowanej i nadzorowanej. Klasyfikacja nadzorowana dała lepsze rezultaty niż klasyfikacja nienadzorowana. Rozpoznano zbiorowisko kosodrzewiny, zbiorowiska trawiaste, nagie skały, piargi i staw. W obydwu przypadkach jednak roślinność trawiastą i zielną udało się rozróżnić jedynie na podstawie zwartości roślin-

² 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.

³ Koncepcja merytoryczna, kartowanie terenowe i redakcja: A. Kozłowska, opracowanie cyfrowe i graficzne: A. Jakomulska.

ności, a nie według zbiorowisk roślinnych zdefiniowanych w typologii Braun-Blanqueta. Wyróżnione zostały zbiorowiska: zwarte, średnio zwarte oraz rozproszone na półkach skalnych. Przydatność zdjęć spektrostrefowych do wielkoskalowych badań roślinności określono jako niską. Wiąże się to z tym, że przy skanowaniu barwnego zdjęcia informacja z 3 kanałów zostaje zapisana w systemie RGB, ulegając przy tym pewnej deformacji.

Z tego względu zaprojektowano przeprowadzenie szczegółowych, naziemnych badań teledetekcyjnych. Badania miały charakter zintegrowany i objęły:

- laboratoryjną analizę barwników asymilacyjnych,
- laboratoryjną analizę fluorescencji,
- terenowe pomiary transpiracji,
- pomiary zawartości wody w tkankach,
- terenowe pomiary biomasy,
- terenowe pomiary radiometryczne oraz

 – wykonanie i cyfrową analizę naziemnych zdjęć w czerwonym i podczerwonym zakresie spektrum elektromagnetycznego.

Podstawowym zadaniem było tu określenie zróżnicowania badanych gatunków roślin i zbiorowisk roślinnych pod kątem ich właściwości optycznych w celu oszacowania możliwości identyfikacji badanych zbiorowisk "z lotu ptaka" oraz określenia rangi zbiorowisk, których delimitacja możliwa jest za pomocą zautomatyzowanej klasyfikacji nadzorowanej.

Zintegrowane pomiary z zakresu fizjologii roślin, biometrii i teledetekcji

Badania terenowe prowadzono w drugiej połowie sierpnia w okresie największego wigoru i zróżnicowania roślinności: analizy barwników fotosyntetycznych wykonano w 1997 i 1998 r.; pomiary: biomasy, zawartości wody w tkankach oraz spektrometryczne – w roku 1997, zaś pomiary transpiracji – w 1998 r.

Mimo zbliżonego terminu wykonywanych badań, rok 1997 charakteryzuje się krótszym okresem wegetacyjnym i przyspieszonym rozwojem roślinności w stosunku do roku 1998. Rozkłady średnich temperatur dobowych oraz usłonecznienia w badanych miesiącach, mających bezpośredni wpływ na starzenie się roślinności, przedstawiono na ryc. 8 (s. 26). Sierpień 1998 r. charakteryzuje się wyższymi sumami usłonecznienia (średnia miesięczna: 5,83 h) oraz wyższymi średnimi temperaturami dobowymi (średnia miesięczna: $11,25^{\circ}$ C); w sierpniu 1997 r. zanotowano natomiast niższe usłonecznienie, a temperatury niższe i bardziej wyrównane (odpowiednio: 4,80 h i 10,73°C).

Pomiary spektrometryczne oraz zdjęcia naziemne wykonano w bardzo dobrych warunkach pogodowych, w optymalnych warunkach oświetlenia stoku. Dla przykładu podano parametry meteorologiczne zarejestrowane w obserwatorium meteorologicznym na Kasprowym Wierchu, 6 sierpnia 1997 r., o godz. 8.00, w trakcie wykonywania zdjęcia północnego stoku Beskidu: temperatura : $+6,7^{\circ}$ C, wilgotność: 78%, ciśnienie: 801,0 hPa, widzialność: 50 km, zachmurzenie: 1/ 8, prędkość wiatru: 0 m/s. Ze względu na często występujące latem zachmurzenie typu orograficznego, większość badań wykonano w godzinach rannych, toteż natężenie promieniowania było niższe od maksymalnego. Przykładowy, dzienny rozkład promieniowania pomierzony 8 sierpnia 1998 r. na Hali Gąsienicowej⁴ przedstawiono na ryc. 9 (s. 26).

Oznaczenia barwników fotosyntetycznych oraz fluorescencji wykonano dla zielonych liści, bez widocznych śladów uszkodzeń lub oznak starzenia się rośliny (m.in. dla situ pomiary wykonano dla dolnej, zielonej części rośliny).

Pomiary biomasy i transpiracji wykonano w stacjach naukowych PAN na Hali Gąsienicowej i na Antałówce, natomiast analizy laboratoryjne w Zakładzie Fizjologii Roślin II Wydziału Biologii UW.

Analizę zdjęć prowadzono metodami cyfrowego przetwarzania obrazów, w programach: ERDAS IMA-GINE 8.2 i 8.3 oraz IDRISI for Windows 4.0. Większość prac z tego zakresu wykonano na stacji roboczej Silicon Graphics INDIGO 2, w Zakładzie Teledetekcji Środowiska Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW.

Ilościowe i jakościowe oznaczenie barwników fotosyntetycznych

Próbki liści badanych gatunków roślin: Juncus trifidus, Luzula spadicea i Calamagrostis villosa pobrano z pól testowych (materiał roślinny zebrano w trzech powtórzeniach z jednego płatu tego samego zbiorowiska roślinnego; rośliny rosły w odległości kilku metrów od siebie). Próby te zostały przewiezione do laboratorium, gdzie przeprowadzono oznaczenie zawartości barwników fotosyntetycznych in vitro techniką spektrofotometrii absorpcyjnej według metody Lichtenthalera i Wellburna (1983). Absorpcję światła mierzono przy następujących długościach fal: chlorofilu *a* i *b*: 663,2 nm, i 646,8 nm, karotenoidów (całkowita zawartość): 470 nm oraz karotenów: a- i b-karotenu: 446, 453 nm; ksantofili: luteiny: 445 nm, wiolaksantyny: 443 nm oraz neoksantyny: 439 nm. Pomiary spektrofotometryczne dla każdej z prób wykonano dwukrotnie. Ilościowe oznaczenie zawartości poszczególnych karotenoidów przeprowadzono metodą chromatografii cienkowarstwowej na żelu krzemowym wg metody Daviesa (1996).

Pomiary fluorescencji

Pomiary szybkiej fluorescencji chlorofilu *a* przeprowadzono przy pomocy Biomonitora (Plant Stress Meter) na odciętych liściach badanych gatunków, inkubowanych przed pomiarem 30 minut w ciemności. Wykonano po 30 pomiarów dla każdej z prób. Zmierzono następujące parametry szybkiej fluorescencji chlorofilu *a* (poniżej 1s): fluorescencję maksymalną (F_m), sta-

⁴ J. Baranowski, dane niepublikowane.

łą (${\rm F_o}$), zmienną (${\rm F_v}$), połówkowy czas wzbudzenia fluorescencji od ${\rm F_o}$ do ${\rm F_m}~({\rm t_{1/2}})$ oraz ${\rm F_v/F_m}$. Parametr ${\rm t_{1/2}}$ wyraża wielkość puli akceptorów elektronu po redukcyjnej stronie fotoukładu II (PS II), natomiast wielkość ${\rm F_v/F_m}$ jest proporcjonalna do potencjalnej wydajności pierwotnych reakcji fotochemicznych PS II.

Analiza transpiracji

Pomiary transpiracji badanych gatunków roślin wykonano przy pomocy potometru. Z każdego poligonu pobrano 3 próby, dla każdej próbki wykonano po 2 pomiary. Mierzono czas pobierania 10 µl wody przez odcięte liście roślin, umieszczone w kuwecie z wodą. Pomiary wykonano w stałych warunkach: temperatury (ok. 20°C), wilgotności względnej powietrza (76%) i natężenia światła (ok. 30 W/m²).

Oszacowanie zawartości wody w tkankach

Z każdego poligonu pobrano po trzy próby materiału roślinnego do pomiarów. Zawartość wody określono metodą wagową. Z każdej próby wybrano po dwie 10-gramowe próbki liści, które suszono w suszarce w temperaturze 105°C przez 48 godzin, a następnie ważono. Badania przeprowadzono na stacji naukowej PAN na Antałówce oraz w Zakładzie Fizjologii Roślin II, na Wydziale Biologii UW.

Badania biomasy

Biomasę nadziemnej części roślin oszacowano na podstawie próbek zebranych z powierzchni 0,25 m², z tych samych powierzchni, dla których wykonano pomiary zawartości wody w tkankach. W sumie zebrano około 70 próbek po ok. 70–410 g każda. Biomasę, (a dokładniej tzw. stan biomasy zbliżony do maksymalnego) wyliczono na podstawie suchej masy próbki.

Pomiary spektrometryczne

Pomiary spektrometryczne, wykonano spektrometrem 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). Kąt widzenia spektrometru wynosi 14° ; dla pomiarów wykonanych z wysokości 1 m wielkość chwilowego pola widzenia odpowiada ok. 0,625 m². Otrzymane wyniki są więc reprezentatywne nie tyle dla gatunków, co dla biochor.

W sumie wykonano 500 pomiarów: po 20 pomiarów w każdym z pól testowych. Dodatkowo, oprócz badanych zbiorowisk roślinnych, dla porównania zmierzono odbicie spektralne dla piargów i nagich skał. Przeprowadzono kalibrację danych związaną ze zmiennym natężeniem promieniowania słonecznego w trakcie wykonywania pomiarów. Ostatecznie wyliczono Znormalizowany Wskaźnik Zieleni NDVI=(IR–R)/ (IR+R).

Wykonanie pomiarów miało między innymi na celu sprawdzenie dokładności i poprawności działania przyrządu SP-1. Ze względu na fakt, że zakres kanału czerwonego jest bardzo szeroki, i że obejmuje maksimum, jak i minimum absorpcji roślinności, pomiary wykonane w tym zakresie dały wyniki zawyżone. Niezbędne było przeprowadzenie korekcji wartości pomierzonych przez spektrometr w zakresie czerwonym: parametry te zostały opracowane we współpracy z dr M. Ratajem z Zakładu Teledetekcji Centrum Badań Kosmicznych PAN. W przyszłości parametry korekcji zostaną wprowadzone do programu wewnętrznego spektrometru.

We wstępnej analizie statystycznej przeprowadzonej dla wszystkich wykonanych pomiarów odrzucono te wyniki, których odchylenie standardowe od wartości średniej było wyższe od 2.

Analiza zdjęć naziemnych

Wykonanie zdjęć

Zdjęcia wykonano z przeciwstoku, dwoma aparatami firmy PRAKTICA, 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 barwne. Zdjęcia wykonano obiektywami o ogniskowej 50 mm, przeciętne parametry naświetlania podano w tabeli 2 (s. 27).

Każde ze zdjęć wykonano trzykrotnie, stosując tzw. bracketing, czyli naświetlanie tego samego kadru na trzech kolejnych klatkach filmu, przy tym samym czasie i zmiennej wielkości przysłony (skok o 1 w górę i w dół od wartości pomierzonej przez światłomierz). Metoda ta zwiększa prawdopodobieństwo wykonania zdjęć o wysokim kontraście, co miało istotne znaczenie przy eksperymentalnym wykonywaniu zdjęć z filtrem czerwonym i "czarnym". Zdjęcia wywołano w procesie czarno-białym z wywoływaczem HC-110, w laboratorium Kodaka. Z każdej serii zdjęć wybrano zdjęcie o najlepszym kontraście zbiorowisk roślinnych.

Przetworzenie zdjęć na format cyfrowy

Negatywy zdjęć przetworzono z formy analogowej na numeryczną profesjonalnym skanerem fotogrametrycznym (OrthoVision 950 XL) w firmie Geosystems Polska, z rozdzielczością geometryczną: 10 mikronów (2540 dpi) i radiometryczna: 8-bitów. Zastosowanie tak wysokiej rozdzielczości skanowania podyktowane było szczegółową skalą opracowania, a jednocześnie możliwe dzięki wysokim parametrom technicznym zastosowanych filmów. Wykonane zdjęcia mają charakter zdjęć perspektywicznych (rvc. 10, 11 i 12 (ss. 28, 29, 31) i charakteryzują się niejednolitą skalą (jednakowa skala zachowuje się tylko wzdłuż linii terenowych znajdujących się w tej samej odległości od obiektywu). Pierwszy plan (roślinność tuż przed aparatami) i ostatni plan (niebo) zdjęć charakteryzują się silnymi zniekształceniami i nie były brane pod uwagę w analizie. Piksele na przednim planie odpowiadaja ok. 10×10 cm w terenie, zaś na tylnym – ok. 20×20 cm. Najmniejszym zarejestrowanym na obrazie elementem jest obszar o wielkości ok. 0,2 m² w terenie, co pozwala na szczegółową analizę biochor. Zastosowane parametry skanowania spełniają więc zasadę Nyquista (Prat, 1978; Green, 1989; Kaczyński, 1993), według której okres próbkowania obrazu musi być równy lub mniejszy od połowy wielkości najmniejszego detalu na skanowanym obrazie. Wielkość piksela odpowiada również w przybliżeniu powierzchni, dla której wykonano pomiary odbicia spektrometrem polowym. Różnica w wielkości piksela na przednim i tylnym planie nie powinna mieć istotnego wpływu na wyniki analizy.

Rejestracja zdjęć

Czarno-białe zdjęcia w zakresie czerwonym i w podczerwieni wykonywane były na statywie umożliwiającym zamontowanie dwóch aparatów, co zapewniło równoczesność wykonywania zdjeć i umożliwiło uchwycenie tego samego kadru na obydwu zdjęciach. Metoda ta pozwoliła na rejestrację zdjęć, wykonanych w różnych zakresach spektralnych do wspólnego, lokalnego układu współrzędnych. Próba rektyfikacji do układu współrzędnych prostokątnych płaskich, na podstawie podkładu fotogrametrycznego w skali 1:1000 zakończyła się niepowodzeniem, ze względu na nierównomierne rozłożenie terenowych punktów kontrolnych niezbędnych do wyliczenia przekształcenia geometrycznego. Punkty te udało się zlokalizować głównie wzdłuż elementów liniowych (piarg i ścieżka prowadząca na Kasprowy Wierch) zlokalizowanych w centrum zdjęć, co spowodowało wysokie zniekształcenia zewnętrznych fragmentów zdjęć. Rejestracja wykonanych zdjęć do wspólnego układu współrzędnych lokalnych okazała się natomiast stosunkowo prosta, a błąd zniekształcenia rejestrowanego zdjęcia był niewielki i nie przekroczył standardowo dopuszczalnego błedu (RMS < 0.5 piksela). Aby ułatwić wizualną analizę zdjęć, wykonano standardową kompozycje barwną w barwach nierzeczywistych (ryc. 13; s. 32): składowe barwy: R, G, B reprezentują odpowiednio kanały: IR, R, G (za zdjęcie w zakresie zielonym, podstawiono zdjęcie panchromatyczne).

Klasyfikacja nadzorowana

Rozpoznanie zbiorowisk roślinnych przeprowadzono na podstawie szczegółowej klasyfikacji nadzorowanej, na podstawie mapy zbiorowisk roślinnych w skali 1:1000 opracowanej przez A. Kozłowską (1999). Mapa ta zawiera 36 wydzieleń legendy, w tym 23 wydzielenia reprezentujące zespoły, podzespoły lub kompleksy przestrzenne zbiorowisk *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi, Luzuletum spadiceae* i *Calamagrostietum villosae tatricum*. Wykaz wszystkich jednostek legendy, które posłużyły do utworzenia sygnatur zamieszczono w tabeli 3 (s. 33).

Ze względu na fakt, że analizowane zdjęcia nie zostały sprowadzone do prostokątnego układu współrzędnych, oszacowanie dokładności klasyfikacji poprzez porównanie wyników klasyfikacji z rzeczywistym układem zbiorowisk roślinnych (na mapie) nie była możliwa. Do oceny wiarygodności klasyfikacji zastosowano statystyczną metodę identyfikacji błędnie sklasyfikowanych pikseli, opartą na określeniu progu odległości spektralnej (Mahalanobisa) pikseli próbek treningowych od średniej wartości próby (ERDAS, 1993). Progi te zostały wyznaczone na podstawie rozkładu chikwadrat (χ^2).

Cyfrowe przetwarzanie zdjęć lotniczych i satelitarnych

Przetwarzanie wstępne

Diapozytyw zdjęcia lotniczego przetworzono na postać numeryczną profesjonalnym skanerem Photo-Scan PS-1 Zeiss/Intergraph, z rozdzielczością (850 dpi). Ortorektyfikację zdjęcia lotniczego i satelitarnego przeprowadzono na podstawie map topograficznych w układzie współrzędnych 1942 oraz numerycznego modelu terenu. Przy rektyfikacji zastosowano metodę najbliższego sąsiedztwa oraz funkcję przekształcenia geometrycznego drugiego rzędu. Błąd ortorektyfikacji dla zdjęcia lotniczego wyniósł: 6 m, natomiast satelitarnego – 16 m i mieści się w granicach standardowo dopuszczalnego błędu rektyfikacji.

Korekcja radiometryczna

W celu eliminacji wpływu tzw. "mgiełki atmosferycznej" przeprowadzono korekcję radiometryczna obrazów metodą transformacji Tasseled Cap. Różnice wartości pikseli obrazu satelitarnego po korekcji atmosferycznej w stosunku do wartości oryginalnych nie były wysokie i nie przekroczyły 5% zakresu radiometrycznego obrazu satelitarnego (rozdzielczość radiometryczna Landsata: 8-bit). W tabeli 4 (s. 34) przedstawiono różnice wartości pikseli po i przed korekcja: najwieksze różnice zanotowano dla kanału pierwszego promieniowanie krótkofalowe (w zakresie niebieskim) charakteryzuje się bowiem największym rozproszeniem. Satelitarne obrazy obszarów wysokogórskich charakteryzują się znacznym (w porównaniu z obrazami obszarów nizinnych) wpływem grubości atmosfery na zróżnicowanie odbicia promieniowania słonecznego tych samych obiektów. Przestrzenny rozkład zmian przedstawiono na ryc. 14 (s. 35), na tle numerycznego modelu terenu i kompozycji barwnej w barwach rzeczywistych, ilustrujacej pokrycie terenu. Dla obszarów wysokogórskich, gdzie warstwa atmosfery jest cieńsza, niż na obszarach o niewielkim wyniesieniu, zmiany wartości pikseli po korekcji radiometrycznej były minimalne $(1-2 \text{ DN}^5)$ lub zerowe.

Klasyfikacja nadzorowana

Klasyfikację nadzorowaną zdjęć: satelitarnego i lotniczego przeprowadzono dla fragmentów obejmujących obszar Doliny Gąsienicowej. Ze względu na brak materiałów lotniczych w zakresie podczerwonym oraz termin wykonania zdjęcia, analiza zdjęcia lotniczego miała

⁵ DN – data number, wartość piksela na obrazie rastrowym.

charakter wstępnego rozpoznania. Klasyfikację zdjęcia satelitarnego przeprowadzono na podstawie 6 kanałów, z wyłączeniem kanału termalnego. Na obydwu zdjęciach pola treningowe do klasyfikacji wyznaczono na podstawie numerycznej mapy roślinności w skali 1:20 000.

Dokładność klasyfikacji oszacowano poprzez porównanie obrazu otrzymanego w wyniku klasyfikacji z mapą roślinności. Weryfikację przeprowadzono na podstawie reprezentatywnej próby pikseli, wybranych metodą proporcjonalnego losowania warstwowego.

Zastosowanie logiki rozmytej w klasyfikacji nadzorowanej

Analizę zbiorowisk mieszanych przeprowadzono eksperymentalna metoda 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). Teoria ta dopuszcza pewien stopień ignorancji (niewiedzy); zakłada się bowiem, że nie podano wzorca, czyli próbki treningowej dla jakiegoś typu pokrycia terenu, a więc dany piksel może należeć do innej klasy, niż wyznaczone klasy wzorcowe. W przeciwieństwie do teorii Bayesa brak dowodu na potwierdzenie hipotezy nie daje powodu do jej odrzucenia. Teoria Dempstera-Shafera operuje trzema podstawowymi parametrami: wiarą (belief), wiarygodnością (*plausibility*) i różnicą między tymi parametrami (belief interval). Wiara wyraża stopień, w jakim istnieją dowody na poparcie danej hipotezy. Jest ona równoznaczna z prawdopodobieństwem a posteriori w teorii Bayesa i wyraża sie wzorem:

$$p(h \mid e) = \frac{p(e \mid h)p(h)}{\sum_{i} p(e \mid h)p(h)}$$

.

gdzie:

p(h|e) – prawdopodobieństwo a posteriori zdarzenia, p(e|h) – prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia, p(h) – prawdopodobieństwo a priori zdarzenia,

i – liczba klas.

Wiarygodność wyraża stopień, w jakim dowody nie pozwalają na odrzucenie danej hipotezy. Wiarygodność jest dopełnieniem sumy wszystkich prawdopodobieństw przynależności do pozostałych od klas Przykładowo, w przypadku analizy trzech klas (A, B i C), wiarygodność przynależności piksela do klasy A wyraża się wzorem:

$$W_A = 1 - [p(h|e)_B + p(h|e)_C]$$

Ostatecznie, różnica między wiarygodnością a wiarą jest miarą niepewności klasyfikacji. Niepewność wyraża stopień ignorancji lub niewiedzy. Im wyższa wartość niepewności, tym bardziej prawdopodobne, że dany piksel nie należy do żadnej z klas, dla których wyznaczono próbki treningowe i sygnatury.

Interpretacja wyników badań naziemnych

Wyniki badań terenowych

Zawartość barwników fotosyntetycznych oraz ich wpływ na widmo absorpcji

Analiza jakościowa i ilościowa barwników fotosyntetycznych zawartych w liściach badanych gatunków roślin wykazała znaczne różnice między gatunkami. Największą zawartość chlorofilu (a+b) na 1 g świeżej masy zawierał trzcinnik: 2,1–3,4 mg, następnie kosmatka: 1,6–2,5 mg, a sit posiadał tylko 0,5–0,9 mg (ryc. 15; s. 36).

Z punktu widzenia funkcji życiowych roślin ważny jest stosunek zawartości poszczególnych barwników: chlorofilu *a* do chlorofilu *b* oraz sumarycznej zawartości chlorofili do karotenoidów. Dla kosmatki stosunek chlorofilu *a* do chlorofilu *b* waha się w zakresie: 1,9-4,2; dla trzcinnika: 2,1-3,4, zaś dla situ 5,5-8,6. Stosunek 3:1 charakterystyczny jest dla barwników tylakoidów gran, natomiast w tylakoidach stromy obserwuje się względnie niższy udział chlorofilu b, wyrażający się stosunkiem chlorofilu a do b rzędu 5:1. Wysoki stosunek chlorofilu a:b zaobserwowany dla situ świadczy najprawdopodobniej o tym, że gatunek ten ma gorzej wykształcony układ granalny, a większość błon tylakoidowych występuje jako lamelle stromy. W błonach tylakoidowych występują 4 zróżnicowane pod względem składu i funkcji kompleksy białkowe, biorace udział w reakcjach świetlnych fotosyntezy. W centrum gran występuje kompleks PSIIa charakteryzujący się dużym systemem antenowym, natomiast w lamellach stromy występuje PSIIb, który ma o około 60-70% mniejsze anteny zbierające światło. U gatunków poddanych długotrwałemu działaniu światła o wysokim natężeniu, synteza chlorofilu b jest obniżona, co pociąga za sobą zmniejszenie sumarycznej wielkości anten energetycznych zbierających światło (Romanowska, 1999). Można to zaobserwować właśnie na przykładzie situ, który występuje na najwyższych półkach skalnych Tatr i jest narażony na nadmierne promieniowanie słoneczne: w liściach kosmatki i trzcinnika chlorofil b stanowi 25% ogólnej zawartości barwników fotosyntetycznych, natomiast u situ – jedynie 10% (rvc. 16: s. 37)).

Sit zawiera stosunkowo dużo karotenoidów. Stosunek chlorofilu do karotenoidów dla situ zawiera się w przedziale 1,9–3,1, podczas gdy dla trzcinnika i kosmatki, odpowiednio 3,6–5,6 i 3,5–5,3 (tab. 5; s. 37). Średni udział karotenoidów w ogólnej puli barwników asymilacyjnych zilustrowano na ryc. 16 (s. 37): sit zawiera aż 28% karotenoidów, podczas gdy kosmatka i trzcinnik – jedynie po 18%.

Karotenoidy określane są mianem barwników towarzyszących. Rola karotenoidów w organizmach roślinnych jest jednak dość różnorodna, (Włoch, Więckowski, 1982; Tuckendorf, 1979):

 współudział w fotosyntezie: mogą one absorbować światło w zakresie długości fali nie absorbowanym przez chlorofil, a następnie przekazywać energię stanu wzbudzonego na cząsteczkę chlorofilu, działając jak antena (udział karotenów w procesie fotosyntezy jest znacznie większy niż ksantofili, ze względu na fakt, że przekazywanie energii wzbudzenia elektronowego z karotenów na chlorofil *a* odbywa się z wydajnością prawie 100%, natomiast na ogół ze znacznie mniejszą – z ksantofili),

– przeciwdziałanie fotooksydacji lipidów błon tylakoidowych zachodzącej w warunkach tlenowych (głównie: anteraksantyna, zeaksantyna i *b*-karoten).

Udział poszczególnych karotenoidów w liściach badanych gatunków roślin jest podobny, poza wiolaksantyną, której zawartość była obniżona w sicie. Istotne różnice zanotowano natomiast dla suchej wiechy situ, która charakteryzuje sie obniżona zawartościa wiolaksantyny, a w szczególności neoksantyny. Stosunek karotenoidów do ksantofili jest tam prawie dwukrotnie wyższy niż dla zielonej części situ oraz dla liści trzcinnika i kosmatki. Z licznych badań wynika, że lamelle stromy są wzbogacone w karoteny, natomiast lamelle gran zawierają względnie więcej barwników ksantofilowych (Włoch, Więckowski, 1982), stąd też zwiększona zawartość b-karotenu i obniżona zawartość ksantofili obserwuje się dla roślin rosnących w warunkach wysokiego natężenia promieniowania słonecznego. Zwiększony udział b-karotenu w podsadkach situ jest z pewnością związany z dodatkowym zabezpieczeniem rośliny przed nadmiernym promieniowaniem. Sucha wiecha situ starzeje się szybciej niż dolna, zielona część rośliny: zawiera ona bezwzględnie mniej barwników asymilacyjnych: w tym aż o około 50% mniej chlorofilu *a* i *b* i tylko o 15% mniej karotenoidów, w związku z czym zwiększa się względna zawartość karotenoidów.

Pomiary zawartości barwników w latach 1997 i 1998 wykonano w tym samym okresie (ostatnia dekada sierpnia). Mimo to okazało się, że w 1998 r. rośliny były we wcześniejszym stadium rozwoju. Wyniki badań z 1997 r. można więc uznać za reprezentatywne dla późniejszego okresu sezonu wegetacyjnego (starzenie się gatunków). W miarę starzenia się kosmatki wzrasta bezwzględna zawartość chlorofilu b (o około 20%) i karotenoidów (11%) – zawartość chlorofilu a nie ulega zmianie. U trzcinnika wzrasta zawartość chlorofilu b (13%). Wzrasta więc względna zawartość barwników ochronnych. W późnym stadium rozwoju u situ bezwzględna zawartość chlorofilu a i b znacznie spada (odpowiednio o 27 i 61%), podczas gdy zawartość karotenoidów praktycznie się nie zmienia. Na podstawie analizy procentowej zawartości barwników, wyraźną zmianę ich zawartości można obserwować u situ: w późniejszym stadium rozwoju zawartość chlorofilu b maleje na rzecz karotenoidów o około 8%.

Skład ilościowy i jakościowy barwników asymilacyjnych danego gatunku może podlegać wahaniom adaptacyjnym. W niniejszej pracy niewielka liczba prób zebranych z poligonów o identycznych warunkach siedliskowych nie upoważnia do wyciągania wniosków w tym zakresie, wydaje się jednak, że wraz z wysokością u kosmatki i trzcinnika względny udział chlorofilu a i karotenoidów rośnie, a chlorofilu b maleje, natomiast u situ zawartość chlorofili maleje, a karotenoidów rośnie. W obrębie piętra alpejskiego zmiany te nie przekraczają jednak 2% i nie powinny mieć wpływu na odbicie spektralne zbiorowisk położonych na różnych wysokościach.

Widmo absorpcyjne chlorofilu b w stosunku do widma chlorofilu a charakteryzuje się przesunięciem krzywej absorpcji w kierunku fal dłuższych (ryc. 17; s. 38) w zakresie niebiesko-zielonym oraz w kierunku fal krótszych, w zakresie czerwonym.

Przy zastosowaniu radiometrów lub skanerów obrazujących, rejestrujących wąskie zakresy promieniowania: ok. 440 i 470 nm oraz 646 i 663 nm, można by wiec rozpoznać gatunki różniace sie zawartościa chlorofilu b. Ze względu na silne rozpraszanie światła niebieskiego, zakres ten rzadko jest używany w teledetekcji. Wyraźnie inną krzywą absorpcji charakteryzują się natomiast karotenoidy, które absorbują światło niebiesko-zielone, 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 wywiera istotny wpływ na absorpcję światła (ryc. 18; s. 39). Sit, zawierający mniej barwników chlorofilowych i stosunkowo dużo karotenoidów w stosunku do pozostałych dwóch badanych gatunków wykazuje podwyższone odbicie światła w zakresie niebieskim i czerwonym. Widmo absorpcyjne suchej wiechy situ w zakresie czerwonym jest zbliżone do widma zielonej części rośliny, natomiast w zakresie niebieskim absorpcja wyraźnie wzrasta, co jest wynikiem wysokiej względnej zawartości karotenoidów. Trzcinnik i kosmatka charakteryzują się wysoką absorpcją fotosyntetycznie czynnego światła, przy czym najwyższa absorpcje ma trzcinnik.

Analiza spektrofotometryczna widma absorpcyjnego poszczególnych karotenoidów jest utrudniona ze względu na fakt, że wykazują one kilka maksimów absorpcji (na ogół 3) w zbliżonych pasmach, skupionych w przedziale 410-490 nm (ryc. 19; s. 39). Zdalna identyfikacja gatunków, różniacych się jakościowym i ilościowym zróżnicowaniem karotenoidów, wymagałyby zastosowania danych hiperspektralnych, o wąskich zakresach kanałów. Ponadto stwierdzono (Goedheer, 1969), że in vivo karotenoidy wykazują nieco inne właściwości fizyko-chemiczne niż in vitro, np. in vivo główne pasma absorpcji w zakresie promieniowania widzialnego są przesunięte o kilkanaście nm w kierunku fal dłuższych w stosunku do analogicznych pasm absorpcji barwników w rozpuszczalnikach organicznych.

Parametry fluorescencji chlorofilu a

Fluorescencja chlorofilu *a* odzwierciedla wydajność fotochemiczną PS II, który jest szczególnie wrażliwy na czynniki stresowe takie jak: wysoka i niska temperatura oraz susza. Średnio wydajność fotochemiczna PSII gatunków zielonych wyrażona parametrem F./ F_m waha się w przedziale 0,780–0,865 (Öquist, Wass, 1988). Nadmierne oświetlenie liścia prowadzi do fotoinhibicji wyrażającej się obniżeniem fluorescencji zmiennej. Dla badanych gatunków otrzymano następujące wartości średnie: trzcinnik: 0,726, kosmatka 0,692, sit 0,630 – wszystkie badane rośliny mają więc dość niską wydajność fotochemiczną PS II; przy czym najmniejszą fluorescencję wykazuje sit. Krótki połówkowy czas wzbudzenia fluorescencji ($t_{1/2}$) charakterystyczny jest dla gatunków cieniolubnych, które zawierają większą pulę LHCPII (kompleksów białkowobarwnikowych, funkcjonujących jako główna, peryferyczna antena zbierająca światło). W przeprowadzonych analizach otrzymano następujące wyniki $t_{1/2}$: trzcinnik: 55 ms, kosmatka 67 ms, sit 119 ms (ryc. 20; s. 40).

Natężenie transpiracji

Wyniki pomiarów transpiracji przedstawiono na ryc. 21 (s. 40). Transpiracją, tak jak innymi procesami wymiany gazowej rządzą prawa dyfuzji: intensywność transpiracji zależna jest od warunków zewnętrznych oraz od szeregu procesów przebiegających wewnątrz organizmu roślinnego decydujących o gospodarce wodnej, a przede wszystkim związanych z ciśnieniem osmotycznym i stanem aparatów szparkowych. Duża powierzchnia liścia w stosunku do jego masy wzmaga straty wody wskutek znacznej powierzchni kontaktu rośliny z otaczającym powietrzem. Wyjaśnia to szybszą transpirację trzcinnika i kosmatki w stosunku do cienkiej, zwiniętej blaszki liściowej situ.

W niniejszym doświadczeniu pomiary wykonano w stałych warunkach, zmierzoną transpirację można więc uznać za potencjalną, zależną jedynie od czynników anatomicznych. Intensywność transpiracji związana jest między innymi z sumaryczną objętością przestrzeni międzykomórkowych. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że miękisz gąbczasty trzcinnika zawiera stosunkowo duże przestrzenie międzykomórkowe. Wpływ struktury liścia na odbicie promieniowania elektromagnetycznego omówiono w rozdziale zawierającym wyniki terenowych pomiarów spektrometrycznych.

Na ryc. 21 (s. 40) przedstawiono średni czas transpiracji 0,01 cm³ wody przez 1 g masy badanych gatunków roślin dla punktów pomiarowych położonych w piętrze alpejskim i subalpejskim; w piętrze subalpejskim zarejestrowano krótszy czas transpiracji. W niniejszej pracy nie wykonano pomiarów wskaźnika powierzchni liścia (LAI), można jednak wysnuć hipotezę, że większe natężenie transpiracji roślin zebranych z piętra subalpejskiego jest związane ze wzrostem powierzchni blaszek liściowych.

Zawartość wody w tkankach

Trzcinnik i sit wykazują zbliżoną zawartość wody w tkankach: odpowiednio: 70,5% i 71,3%, natomiast

kosmatka, która jest gatunkiem wilgotnych siedlisk wyleżyskowych, zawiera aż 78,9% wody. Trzcinnik wykazuje nieznaczny spadek zawartości suchej masy wraz z wysokością, natomiast kosmatka i sit – niewielki wzrost.

Charakterystyki spektralne badanych zbiorowisk

Pomiary spektrometryczne badanych zbiorowisk potwierdziły wyniki badań terenowych i laboratoryjnych, prowadzonych na poziomie gatunku. Tak jak oczekiwano, sit charakteryzuje się większym odbiciem promieniowania we wszystkich badanych zakresach światła (ryc. 22; s. 41).

Większe odbicie dla situ w zakresie światła czerwonego, jest wynikiem wysokiego udziału karotenoidów w ogólnej puli barwników fotosyntetycznych, które nie absorbują promieniowania w tym zakresie. Trzcinnik, który zawiera ok. 1,5 razy więcej barwników w 1g masy niż kosmatka, wykazuje większe pochłanianie w fotosyntetycznie czynnym (czerwonym) zakresie światła i mniejsze w nieczynnym fotosyntetycznie (dla barwników chlorofilowych) zakresie zielonym. Zróżnicowanie odbicia promieniowania w zakresie widzialnym jest jednak niewielkie. Wynika to przede wszystkim z faktu, że pomiary wykonano w kanałach o bardzo szerokich zakresach. Ponadto na odbicie ma również wpływ ułożenie liści oraz podłoże.

Badane gatunki roślin różnią się natomiast istotnie odbiciem w podczerwonym zakresie promieniowania elektromagnetycznego. W zakresie 800-1100 odbicie zależy od ilości i wielkości przestworów międzykomórkowych liści: gatunki o zwartym miękiszu gąbczastym odbijają znacznie mniej promieniowania podczerwonego w zakresie 0,75-1,35 µm, niż gatunki o znacznym udziale przestrzeni międzykomórkowych w mezofilu (Gausman, 1974). Można więc wnioskować, że sit, który wykazuje najmniejsze odbicie w tym zakresie charakteryzuje się zwartą budową miękiszu, natomiast trzcinnik, o największym odbiciu - strukturą luźną. Istnieje korelacja pomiędzy ilością odbitego światła w zakresie 800–1100 nm a intensywnością transpiracji: trzcinnik, charakteryzujący się wysoką transpiracją ma największe odbicie w tym zakresie, natomiast sit, który transpiruje niewielkie ilości wody - najmniejsze. Wynika to z zależności pomiędzy transpiracją, a anatomiczną budową liścia. Natężenie transpiracji jest przede wszystkim zależne od stopnia rozwarcia aparatów szparkowych i od wewnętrznej powierzchni parowania. Duże przestwory międzykomórkowe wydatnie przyczyniają się do powiększenia ogólnej powierzchni parowania, toteż gatunki o luźnej strukturze mezofilu charakteryzują się podwyższoną transpiracją (Górski, 1962).

Zróżnicowanie ilościowe badanych zbiorowisk

Analiza produkcji biomasy wykazuje następujące uporządkowanie gatunków: kosmatka (średnia: 2421 kg/ha, zakres: 1600–3260 kg/ha), trzcinnik (2126 kg/ha; 1700–2680 kg/ha), sit (1554 kg/ha; 960–2360 kg/ ha). Zaobserwowano znaczny spadek produktywności z wysokością, jednocześnie, badane zbiorowiska wykazują dużą zmienność produktywności w zależności od warunków siedliskowych (ryc. 23; s. 41). Najmniejszą zmiennością charakteryzuje się trzcinnik. Statystycznie ważna interpretacja zmienności produktywności jest jednak niemożliwa ze względu na niewielką ilość próbek zebranych z poligonów o jednakowych warunkach siedliskowych.

Analiza wskaźnika zieleni obliczonego na podstawie terenowych pomiarów spektrometrycznych również wykazuje duże zróżnicowanie wartości współczynnika NDVI dla badanych zbiorowisk (NDVI = 0,58– 0,78). Wartości średnie i zakres zarejestrowanego NDVI zestawiono w tabeli 7 (s. 43). Najwyższym zróżnicowaniem wyróżniają się zbiorowiska wyleżyskowe. Ze względu na silne zróżnicowanie produktywności i wskaźnika NDVI od lokalnych warunków siedliskowych, rozróżnienie badanych zbiorowisk na podstawie NDVI nie wydaje się możliwe.

Ocena możliwości identyfikacji badanych zbiorowisk roślinnych

Badane gatunki wykazały wyraźne przystosowania do środowiska wysokogórskiego, co znalazło wyraz w zróżnicowaniu wszystkich badanych parametrów z zakresu fizjologii roślin: ilości i jakości barwników asymilacyjnych, fluorescencji oraz transpiracji i zawartości wody w tkankach. Parametry te mają istotny wpływ na odbicie promieniowania elektromagnetycznego w poszczególnych zakresach, co zostało potwierdzone przez wyniki terenowych pomiarów spektrometrycznych. Ze względu na fakt, że pomiary spektrometryczne prowadzone były dla zbiorowisk, a nie gatunków oraz w dość szerokich zakresach, zanotowane zróżnicowanie było mniejsze. Zróżnicowanie zbiorowisk jest jednak wyraźne w podczerwieni, co pozwala na identyfikację badanych zbiorowisk.

Zanotowane zróżnicowanie gatunków pod względem zawartości i jakości karotenoidów jest istotne, ale niestety trudne do uchwycenia w badaniach teledetekcyjnych, ze względu na silne rozpraszanie promieniowania krótkofalowego. Ewentualne próby badań prowadzonych w tym zakresie wymagałyby przeprowadzenia zaawansowanej korekty radiometrycznej.

Wysoka zmienność biomasy i wskaźnika NDVI nie pozwalają wprawdzie na identyfikację badanych zbiorowisk, pomiary ilościowe mogą jednak pozwolić na analizę rozprzestrzeniania się i wigoru zbiorowisk w zależności od warunków siedliskowych.

Wyniki opracowań kameralnych

Klasyfikacja nadzorowana zdjęć naziemnych

Klasyfikacja nadzorowana zdjęć wykonanych w zakresie czerwonym i w podczerwieni dała dobre rezultaty i pozwoliła na rozpoznanie następujących zbiorowisk roślinnych: Oreochloo distichae–Juncetum trifidi, Luzuletum spadiceae, Rhizocarpetalia (zbiorowisko porostów naskalnych), zbiorowisko pionierskich zbiorowisk mszystych porastających wilgotne żleby oraz Pogonato-Oligotrichetum (antropogenicznych zbiorowisk wykształconych wzdłuż ścieżek turystycznych). W wyniku klasyfikacji skartowano również następujące podzespoły i postaci zbiorowiska Oreochloo distichae–Juncetum trifidi: herbaceae (z wierzbą zielną, występujące na stokach z długo zalegającą pokrywą śnieżną), typicum, typicum postać mszystą, caricetosum sempervirentis, powypasową postać subalpejską oraz kompleks zbiorowisk Luzuletum spadiceae i Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis (ryc. 24; s. 42).

Histogramy sygnatur dla pól treningowych trzech badanych zbiorowisk roślinnych: Luzuletum spadiceae, Oreochloo distichae-Juncetum trifidi typicum i Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis potwierdzają wyniki pomiarów radiometrycznych i laboratoryjnej analizy barwników fotosyntetycznych: zbiorowiska zdominowane przez alpejski gatunek Juncus trifidus mają podwyższone odbicie promieniowania elektromagnetycznego w zakresie czerwonym, w podczerwieni natomiast odbicie to jest obniżone w stosunku do zbiorowiska wyleżyskowego (ryc. 25; s. 44). W zakresie promieniowania czerwonego niemożliwe jest rozróżnienie wyżej wymienionych podzespołów z udziałem situ skuciny. W podczerwieni natomiast, histogramy tych zbiorowisk są rozłączne, co pozwala na łatwe rozróżnienie podzespołów zespołu Oreochloo distichae–Juncetum trifidi.

Oszacowanie dokładności klasyfikacji

Na ryc. 26 (s. 45) przedstawiono odległości Mahalanobisa pikseli od wartości średnich próbek treningowych: im większe te odległości, tym mniejsze prawdopodobieństwo, że dany piksel należy do klasy, do której został przydzielony. Kolorem jasnym zaznaczono duże odległości, natomiast czarnym – małe. Statystyczną charakterystykę rozkładu odległości Mahalanobisa przedstawiono w tabeli 8 (s. 43).

Najgorzej zaklasyfikowały się piksele przydzielone do klas: piargi, cień oraz zbiorowiska mszyste, których sygnatury nie są rozłaczne. Szczegółowa analize dokładności klasyfikacji przeprowadzono na podstawie rozkładów odległości pikseli prób treningowych od wartości średnich tych prób (ryc. 27; s. 46)). Na osi odciętych zaznaczono odległości Mahalanobisa (uwzględniające wariancję i kowariancję kanałów), natomiast na osi rzędnych - liczbę pikseli. Rozkłady odległości aproksymowane są rozkładem chi-kwadrat. Odległości progowe, powyżej których odrzucono piksele zaklasyfikowane do danej klasy przyjęto na poziomie istotności 0,01. Dla trzech stopni swobody (liczba kanałów) i poziomu istotności 0,01, wartość χ^2 wynosi 11,345. Powyżej tej wartości (oznaczonej na ryc. 27 (s. 46) czerwoną, pionową kreską) piksele zostały zaliczone do klasy "niezaklasyfikowane". Procent pikseli zaklasyfikowanych poprawnie przedstawiono w tabeli 9 (s. 47).

Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr ...

Większość badanych zbiorowisk roślinnych zostało zaklasyfikowanych dobrze. Najgorzej zaklasyfikowane zostały piksele klasy mieszanej: Oreochloo distichae–Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis w kompleksie z Luzuletum spadiceae. Na histogramie odległości dla tej klasy, można zauważyć, że znaczna część pikseli charakteryzuje się dużymi odległościami od wartości średniej. Wynika to ze specyfiki klasy, która charakteryzuje się wysoką heterogenicznością – jest to bowiem klasa mieszana. Próba rozwiązania problemu klasyfikacji pikseli mieszanych i zautomatyzowanego kartowania kompleksów zbiorowisk zostanie podjęta w dalszej części pracy. Ostateczne wyniki klasyfikacji, po odrzuceniu pikseli zaklasyfikowanych błędnie na poziomie istotności 0,01 przedstawiono na ryc. 28 (s. 48).

Ocena możliwości zautomatyzowanej delimitacji badanych zbiorowisk na wielkoskalowych materiałach teledetekcyjnych

Na podstawie przeprowadzonej klasyfikacji nadzorowanej zdjęć naziemnych można stwierdzić, że zdalna delimitacja wysokogórskich zbiorowisk roślinnych jest możliwa nawet w randze podzespołu. W dalszej części pracy podjęta zostanie próba weryfikacji wyników uzyskanych w badaniach wielkoskalowych na materiałach lotniczych i satelitarnych.

Próba ekstrapolacji wyników badań naziemnych na zdjęciach: lotnicze i satelitarne

Klasyfikacja nadzorowana zdjęcia lotniczego

Ze wzgledu na brak informacji w zakresie podczerwonym na zdjęciu lotniczym, w klasyfikacji nadzorowanej podjęto próbę identyfikacji jedynie badanych zbiorowisk: muraw, wyleżysk i traworośli oraz: zarośli kosodrzewiny, świeżych piargów bez roślinności, piargów ze śladami roślinności pionierskiej, stawów i cienia. Kanały 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. 29; s. 49), a uporzadkowanie sygnatur według wielkości odbicia wykazuje taki sam układ we wszystkich kanałach (ryc. 30; s. 50). Jedynym wyjątkiem jest tu klasa muraw i traworośli, których 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.

Rezultat klasyfikacji przedstawiono na ryc. 31 (s. 51); niską 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 10 (s. 47) przedstawiono macierz błędów klasyfikacji zdjęcia lotniczego.

Klasyfikacja nadzorowana zdjęcia satelitarnego

Zasięg opracowania klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia satelitarnego przedstawiono na kompozycjach barwnych: w barwach rzeczywistych (ryc. 32; s. 52) oraz trzech kompozycjach w barwach nierzeczywistych (odpowiednio: R,G,B): kanały 4, 3, 2 (ryc. 33; s. 53), kanały: 5, 4, 3 (ryc. 34; s. 54) i kanały 7,5,3 (ryc. 35; s. 55).

W pierwszym podejściu podjeta została próba opracowania sygnatur dla wszystkich klas wydzielonych na dostępnej mapie (38 klas), jednak ze względu na nierozłączność sygnatur, klasyfikacja ta nie dała pozytywnych wyników. Przeprowadzono więc klasyfikację badanych w niniejszej pracy zespołów roślinnych: muraw, wyleżysk i traworośli, dodatkowo wyróżniono klasy: zarośli kosodrzewiny, nagich skał i piargów oraz stawów. Próbki treningowe wyznaczono w obrębie powierzchni, które charakteryzowały się jednorodnością (wybrano próby ze stosunkowo dużych płatów 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.

Rycina 36 (s. 56) ilustruje rozkład średnich wartości DN badanych klas. Krzywe spektralne badanych zbiorowisk: muraw, traworośli i wyleżysk mają przebieg zgodny z przebiegiem uzyskanym w wyniku pomiarów radiometrycznych w czterech pierwszych, pomierzonych zakresach. Zbiorowisko muraw charakteryzuje się najwyższym odbiciem w zakresie widzialnym. Wyraźne zróżnicowanie widać w zakresie bliskiej podczerwieni. W kanale 4 największe odbicie mają traworośla, następnie zbiorowiska wyleżyskowe, najniższe zaś – murawy. Jak już wspomniano, w zakresie tym odbicie zdeterminowane jest wielkością i ilością przestworów międzykomórkowych, a uporządkowanie gatunków względem wielkości odbicia w tym kanale potwierdza wyniki uzyskane w badaniach transpiracji.

Zróżnicowanie odbicia jest wyraźne również w kanałach 5 i 7. W zakresach tych wpływ na odbicie ma 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 siega 79%.

Kanał niebieski charakteryzuje się bardzo niską

przydatnością w klasyfikacji: zbliżone wartości DN zanotowano dla wszystkich badanych klas, za wyjątkiem skał i piargów nie porośniętych roślinnością.

Po lewej stronie ryc. 37 (s. 57) zilustrowano ułożenie pikseli należących do próbek treningowych badanych klas w spektralnej przestrzeni cech (ang. feature space). Odległości spektralne wyrażone są w skali 8bitowej. Największą liczbę pikseli oznaczono kolorem czerwonym, a najmniejszą – purpurową. Po prawej stronie ryc. 37 (s. 57) przestawiono natomiast wzajemne położenie klas. Poszczególne barwy wyrażają klasy wydzielone w wyniku klasyfikacji (kolory jak na ryc. 38; s. 58). Na ryc. 37a oraz d widać, że 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. 38 (s. 58), a macierz błędów w tabeli 11 (s. 56). 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 zdjęcia. Tak, jak wykazano powyżej, do identyfikacji badanych zbiorowisk wystarczą nawet trzy kanały zdjęcia Landsat TM. Przyczyną uzyskanej, niskiej dokładności klasyfikacji jest geometria 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

Analizy krzywych spektralnych i położenia klas w przestrzeni spektralnej świadczą o tym, że zbiorowiska typowe ("czyste") mogą być rozróżnione na podstawie zdjęć satelitarnych, nawet o tak niskiej rozdzielczości spektrometrycznej, jaką ma Landsat TM. 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 tabeli 12 (s. 59).

Większość pikseli poddanych analizie w klasyfikacji nadzorowanej jest więc silnie heterogeniczna. Jednym z możliwych rozwiązań problemu granic przejściowych, jest zastosowanie zbiorów rozmytych (Wang, 1992; Haußecker, Tizhoosh, 1999). Problem ten zostanie podjęty w ostatniej części pracy.

Problem pikseli mieszanych

Dostępne zdjęcie satelitarne charakteryzuje 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 rozdzielczość zadowalającą. W przypadku szczegółowego kartowania roślinności charakteryzującej się tak ogromną zmiennością przestrzenną, piksel zobrazowany przez Landsata jest pikselem heterogenicznym, który obejmuje kilka typów roślinności. Na ryc. 39 (s. 60) przedstawiono ten sam obszar zarejestrowany na zdjęciu lotniczym i na zdjęciu satelitarnym. Wybrane fragmenty mają powierzchnię 300 $\times 240$ m i na zdjęciu Landsata reprezentowane są przez 80 pikseli. Zdjęcie lotnicze, wykonane w skali ok. 30 000 ilustruje zróżnicowanie pokrycia terenu w obrębie jednego piksela Landsata.

Problem generalizacji

Trzecim problemem, z którym wiąże się uzyskany, niski wynik dokładności 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 wydzieleń,

• łączenie drobnych, jednorodnych konturów w większe.

Przykłady generalizacji mapy roślinności przedstawiono na ryc. 39 (s. 60). Generalizacja jest jedna z ważniejszych właściwości klasycznych map; bez abstrahowania, uogólnienia i uproszczenia, które składają się na generalizacje, 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 przedstawienia a czytelnym przedstawieniem graficznym jest jednym z ważniejszych problemów kartografii (Saliszczew, 1984; Eckert, 1921). Jednym z możliwych rozwiązań problemu generalizacji map tematycznych jest rastrowy system prezentacji i analizy. Umożliwia on nie tylko przedstawienie drobnych, dyskretnych wydzieleń (Sziriajew, 1977), ale również ich analize. Cyfrowe przetwarzanie materiałów teledetekcyjnych ma więc dodatkowo tę zaletę, że nie ma potrzeby prowadzenia generalizacji po przeprowadzeniu analiz prowadzących do opracowania map tematycznych (np. klasyfikacji). W związku z tym charakter tych materiałów, stanowiących "wierny model terenu" nie ulega deformacji.

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 posiada takich parametrów technicznych, które umożliwiłyby wydzielenie badanych zbiorowisk roślinnych 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 nie pozwala jednak na ich kartowanie. Wyniki analizy zdjęcia satelitarnego zwróciły jednak uwagę na problem powszechnego występowania zbiorowisk mieszanych na badanym terenie oraz ich silnego wpływu na dokładność zautomatyzowanej klasyfikacji. Metodyczny problem kartowania kompleksów zbiorowisk zarysowano we wstępie pracy; próbę rozwiązania tego problemu podjęto w ostatniej części niniejszej pracy.

Ocena zastosowania logiki rozmytej w klasyfikacji

Specyfika roślinności wysokogórskiej wyraża się między innymi poprzez zonalny charakter wielu granic oraz powszechne występowanie kompleksów zbiorowisk. Przykładem mogą być zbiorowiska oznaczone w tabeli 3 numerami: 8, 10, 21⁶ i 17, gdzie, klasy 10 i 21 stanowią formy przejściowe od *Luzuletum spadiceae* (klasa 8) do *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* (klasa 21). Innym przykładem mogą być zbiorowiska o różnym stopniu wykształcenia, wyrażającego się poprzez zwartość – np. zbiorowiska 2 i 3 oraz 7 i 8.

Jak wykazano na przykładzie klasyfikacji nadzorowanej zdjęcia satelitarnego, występowanie różnych postaci zbiorowisk oraz ich kompleksów uniemożliwia prawidłową klasyfikację zdjęcia. Zautomatyzowane rozpoznanie tych zbiorowisk metodami tradycyjnej klasyfikacji nadzorowanej jest utrudnione i w większości przypadków prowadzi do opracowania map tematycznych o niskiej dokładności.

W niniejszej pracy podjęto próbę zautomatyzowanej delimitacji zbiorowisk mieszanych. 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*, *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis* oraz kompleksu 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. 40 (s. 61) przedstawiono położenie sygnatur badanych zbiorowisk w dwukanałowej przestrzeni cech (kanał czerwony i podczerwony). Sygnatura dla kompleksu badanych zbiorowisk leży pomiędzy sygnaturami analizowanych zbiorowisk "czystych".

W analizie opartej o logikę rozmytą wystarczy określić jedynie sygnatury "czyste": w tym przypadku dla zbiorowisk Luzuletum spadiceae i Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis, a następnie określić kryteria wyznaczające granicę klasy mieszanej. Na rycinie 43 (s. 65) przedstawiono prawdopodobieństwa przynależności pikseli do klas: Luzuletum spadiceae i Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis. Największe prawdopodobieństwa dla klasy Luzuletum spadiceae można zaobserwować w prawym dolnym rogu obrazu, natomiast do Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis – w lewym górnym (por. ryc. 24; s. 42). Na obydwu obrazach występują jednak 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 standardowa klasyfikację nadzorowana, z pominięciem próbki treningowej dla kompleksu zbiorowisk Luzuletum spadiceae i Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis. Klase te wydzielono poprzez identyfikację pikseli mieszanych, które wyznaczono na podstawie wartości progowej wiarygodności przynależności do obu klas: Luzuletum spadiceae i Oreochloo distichae-Juncetum trifidi caricetosum sempervirentis. Przyjęto, że w przypadku gdy wiarygodność była zawarta w przedziale (0,1; 0,9), piksele będą należeć 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 klas i najprawdopodobniej należą do innej klasy. W tabeli 13 (s. 66) przedstawiono przykładowe rozkłady prawdopodobieństw przynależności pik-

⁶ Kserofilna postać *Oreochloo distichae-Juncetum trifidi* z *Juncus trifidus* występuje na grubokamienistych piargach i głazowiskach o wystawie południowej. Odznacza się luźną kęp-kową strukturą. Ponieważ postać ta jest słabo wyróżniona flory-stycznie, nie nadano jej rangi podzespołu, natomiast formalnie należałoby ją włączyć do podzespołu typowego ([za:] Balcerkie-wicz 1984).

seli do trzech klas oraz rozwiązanie problemu klasyfikacji w wyniku zastosowania tradycyjnej metody klasyfikacji oraz zasady decyzyjnej opartej na teorii Dempstera-Shafera.

Klasyfikacja przeprowadzona tą metodą dała pozytywne wyniki (ryc. 43; s. 65), 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 ilości klas przejściowych pomiędzy klasami "czystymi" – w zależności od celów i skali opracowania.

Podsumowanie wyników badań i dyskusja

Zróżnicowanie badanych gatunków w świetle badań z zakresu fizjologii roślin

Badane gatunki wysokogórskie wykazują istotne różnice w budowie anatomicznej jak i funkcjonalnej, co wyraża się poprzez zróżnicowanie wszystkich badanych parametrów z zakresu fizjologii roślin: zawartości i jakości barwników fotosyntetycznych, fluorescencji oraz transpiracji i zawartości wody w tkankach. Ilościowa i jakościowa zawartość barwników asymilacyjnych umożliwia rozróżnienie situ od dwóch pozostałych gatunków: kosmatki i trzcinnika. Zawartość wody w tkankach różnicuje natomiast kosmatkę od trzcinnika i situ. Parametry fluorescencji oraz wielkość transpiracji są natomiast zróżnicowane dla wszystkich badanych gatunków.

Zróżnicowanie badanych zbiorowisk w świetle badań teledetekcyjnych

Wyniki funkcjonalnego zróżnicowania zaobserwowane na poziomie gatunku zostały potwierdzone przez charakterystyki spektralne badanych zbiorowisk. Na podstawie wykonanych pomiarów spektrometrycznych oraz analizy zdjęć naziemnych i zdjęcia satelitarnego wykazano, że zróżnicowanie badanych zbiorowisk w zakresie widzialnym jest niewielkie, ale zauważalne. Niższe zróżnicowanie obserwowane na materiałach teledetekcyjnych, w stosunku do zróżnicowania zarejestrowanego w wyniku badań zawartości barwników asymilacyjnych, wynika z wpływu dodatkowych czynników (ułożenie liści, odbicie od podłoża) na wielkość odbicia spektralnego oraz ze stosunkowo szerokich zakresów spektralnych wykorzystanych w badaniach. Istotne zróżnicowanie zaobserwowano natomiast w zakresie podczerwonym; ułatwia ono rozróżnienie badanych zbiorowisk. Na materiałach teledetekcyjnych możliwa jest również identyfikacja zbiorowisk w randze podzespołu (podzespoły i postaci zbiorowiska Oreochloo distichae-Juncetum trifidi) oraz kompleksów zbiorowisk. Na podstawie analizy charakterystyk spektralnych i rozkładu sygnatur w spektralnej przestrzeni cech określono, że największą przydatność do zautomatyzowanego kartowania roślinności z wykorzystanych w niniejszym doświadczeniu zakresów, mają zakresy spektralne: czerwony oraz podczerwień w zakresie 0,76–0,90 i 2,08–2,35 μ m.

Oszacowanie przydatności teledetekcji w kartowaniu roślinności wysokogórskiej

Zautomatyzowane, szczegółowe kartowanie roślinności wysokogórskiej metodami teledetekcji na obecnie dostępnych dla Tatr materiałach teledetekcyjnych wydaje się zadaniem trudnym. Podstawowym problemem jest tu niska rozdzielczość geometryczna. Na uwagę natomiast zasługują dwie cechy obrazów teledetekcyjnych, które są cenne z punktu widzenia kartografii roślinności:

a) Rastrowy system organizacji i prezentacji danych, pozwalający na wierne odwzorowanie realnie istniejącej, drobnopowierzchniowej mozaiki zbiorowisk roślinnych. Uniknięcie błędu generalizacji wydaje się istotną zaletą przy opisie środowisk o tak wielkim zróżnicowaniu przestrzennym.

b) Klasyczna metodyka szczegółowego kartowania roślinności wysokogórskiej, stoi przed problemem graficznej prezentacji i analizy drobnopowierzchniowej mozaiki zbiorowisk oraz kompleksów zbiorowisk roślinnych i granic przejściowych. Założenia środkowoeuropejskiej szkoły fitosocjologicznej pozwalają wprawdzie na umiejscowienie tych jednostek w systematyce, jednak kartowanie roślinności w skalach szczegółowych, a w szczególności techniczne możliwości prezentacji map o dużej liczbie wydzieleń legendy są ograniczone. Jednym z rozwiązań technicznego problemu związanego z trudnością graficznej prezentacji zbiorowisk uszeregowanych według cech gradientowych, wydaje się być zastosowanie metod opartych o teorię logiki rozmytej. Metody te umożliwiają nie tylko graficzną prezentację przyrodniczych zjawisk o charakterze "rozmytym", ale również ich analizę. W przypadku analizy roślinności możliwe jest zautomatyzowane rozpoznawanie kompleksów zbiorowisk. Kartowanie oparte o częściową przynależność 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 byłoby dzięki uwzględnieniu następujących uwag, wynikających z niniejszego eksperymentu:

1. Zwiększenia rozdzielczości spektralnej materiałów teledetekcyjnych, w tym:

 Zastosowanie od kilku do kilkunastu wąskich kanałów w zakresie widzialnym, odpowiadających maksimom absorpcji głównych i towarzyszących barwników fotosyntetycznych (chlorofil a, chlorofil b, karotenoidy). Szczególnie przydatne byłoby tu wykorzystanie zakresów ok. 646 i 663 nm, odpowiadających maksimom absorpcji chlorofilu b i a (odpowiednio) oraz zakresu ok. 470 nm, przypadającego na maksimum absorpcji karotenoidów (ogółem).

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

2. Zwiększenia rozdzielczości geometrycznej obrazów satelitarnych. Wykorzystane w niniejszym doświadczeniu zdjęcie satelitarne charakteryzuje się wystarczającą rozdzielczością spektralną i radiometryczną do identyfikacji badanych zbiorowisk. Przeprowadzenie poprawnej, wiarygodnej i zautomatyzowanej klasyfikacji zdjęcia uniemożliwia natomiast zbyt niska rozdzielczość geometryczna. Zdjęcie do szczegółowych badań roślinności powinno mieć rozdzielczość geometryczną rzędu kilku metrów.

3. Wykonanie pomiarów fluorescencji z pułapu lotniczego. 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. W miarę możliwości warto by 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. wymarzanie kosodrzewiny, deptanie zbiorowisk zielnych i trawiastych położonych w pobliżu ścieżek turystycznych).

Wydaje się natomiast, że przydatność wskaźnika NDVI do identyfikacji zbiorowisk roślinnych Tatr jest niewielka, ze względu na ogromne zróżnicowanie produktywności zbiorowisk, w zależności od wysokości wystepowania zbiorowiska oraz od mikroklimatu i innych warunków lokalnosiedliskowych (Breymeyer, Uba, 1988). Również najnowsze badania nad korelacją wskaźnika NDVI z fotosyntezą netto i produktywnościa jako wykładnikami fizjologicznego stanu roślin poddają w wątpliwość przydatność tego wskaźnika (Buschmann, Lichtenthaler, 1988): wymaga on bowiem przeprowadzenia szeregu zaawansowanych kalibracji w oparciu o pomiary biometryczne i meteorologiczne. Lepszym wskaźnikiem, umożliwiającym oszacowanie produktywności jest natomiast wskaźnik powierzchni liścia LAI. Również w tym wypadku niezbędne jest przeprowadzenie jego kalibracji, ale uzyskane wyniki są wiarygodne i pozwalają na ilościowe określenie wielkości produkowanej biomasy. W przyszłości pomiary

wskaźnika LAI byłyby z pewnością interesujące i pozwoliłyby na badanie siedliskowych uwarunkowań występowania i wigoru zbiorowisk roślinnych.

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.

Prowadzone do tej pory badania roślinności wysokogórskiej na podstawie materiałów teledetekcyjnych pozwoliły jedynie na zgrubną identyfikację roślinności (tj. lasy liściaste, lasy iglaste, zbiorowiska krzewiaste, zbiorowiska zielne i trawiaste, nagie skały). Na podstawie materiałów i metod badawczych zastosowanych w niniejszej pracy badawczej można sądzić, że wielkoskalowe (w randze zespołu i niższej) badania roślinności wysokogórskiej "z lotu ptaka", z zastosowaniem zautomatyzowanych metod cyfrowego przetwarzania obrazów są zadaniem wymagającym, ale realnym.

W przypadku podjęcia szczegółowego kartowania roślinności wysokogórskiej metodami teledetekcji, autorka widzi możliwość i potrzebę rozszerzenia badań. Wstepne przetwarzanie materiałów teledetekcyjnych powinno objąć przede wszystkim przeprowadzenie korekcji atmosferycznej z uwzględnieniem szczegółowego numerycznego modelu terenu, co umożliwiłoby korekcję wpływu różnej grubości atmosfery oraz nachylenia i wystawy stoków na obraz zarejestrowany na zdjęciach. Numeryczny model terenu o dokładności rzędu kilku metrów mógłby dostarczyć również dodatkowe warstwy informacyjne, których uwzględnienie przy klasyfikacji nadzorowanej podniosłoby jej wiarygodność. Na podstawie cyfrowego przetwarzania NMT można uzyskać szereg informacji pośrednich o warunkach: mikroklimatycznych (wysokość nad poziomem morza, ekspozycja) i 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. Opracowanie NMT o wysokiej rozdzielczości geometrycznej możliwe byłoby na podstawie stereopar zdjęć lotniczych.

Do podjęcia badań w zakresie teledetekcyjnych badań roślinności wysokogórskiej, z uwzględnieniem wyżej wymienionych uwag skłaniają trzy przesłanki:

1. Dynamiczny rozwój technologiczny wyrażający się między innymi poprzez wprowadzanie na orbity satelitarne skanerów nowej generacji o wysokiej rozdzielczości geometrycznej (kilku-, a nawet jednometrowej), a w szczególności rozpowszechnienie hiperspektralnych skanerów obrazujących umieszczanych na platformach lotniczych (AVIRIS, DAIS).

2. Techniczne problemy terenowego kartowania roślinności oraz potrzeba szybkiego opracowania dokładnych materiałów kartograficznych dokumentujących przestrzenne zróżnicowanie, dynamikę i zagrożenia roślinności Tatrzańskiego Parku Narodowego. Zaletą zastosowania technik teledetekcyjnych jest obiektywność, szybkość i powtarzalność badań. Obecnie można tu jeszcze dodać stosunkowo niskie koszty badań teledetekcyjnych. Rozwój techniki, jak również szerokie 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 czasochłonnych i kosztochłonnych prac terenowych. Ze względów technicznych, badania i pomiary terenowe ograniczają się wielokrotnie do badań punktowych (punkty i poligony) oraz liniowych (transekty i trasy marszrutowe), co wymaga następnie ekstrapolacji wyników badań. Teledetekcja umożliwia natomiast poddanie analizie całego obszaru badań.

3. Możliwość rozwiązania problemu kartografii geobotanicznej związanej z delimitacją zbiorowisk o charakterze przejściowym i granic zonalnych.

Na zakończenie autorka chciałaby jeszcze raz zwrócić uwagę na interdyscyplinarny charakter zaprezentowanego tu projektu badawczego. Ewentualne rozszerzenie badań roślinności wymagałoby współpracy specjalistów z zakresu teledetekcji, geobotaniki i kartografii. Należy tu również 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 w oparciu o gruntowne, ale punktowe badania terenowe.



Anna Kurnatowska and Edelweiss (*Leontopodium alpinum*) on Kopa Magury at the Tatra Mountains (at the time of collecting materials for her master thesis). Image by Anna Kozłowska.

Anna Kurnatowska z szarotkami na Kopie Magury w Tatrach (podczas zbierania materiałów do pracy magisterskiej). Fot. Anna Kozłowska.



Conferment of the degree of Doctor of Philosophy at the commencement ceremony at the University of Warsaw on 6 December 2000. From left to right: Dean of the Faculty of Geography and Regional Studies – Professor M. Skoczek, Deputy Rector – Professor A.W. Wierzbowski, Dr. A. Jakomulska, professor conferring the degree – Professor J.R. Olędzki.

Uroczyste nadanie stopnia naukowego doktora na Uniwersytecie Warszawskim w dniu 6 grudnia 2000 r. Od lewej: dziekan Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych – prof. M. Skoczek, prorektor – prof. A.W. Wierzbowski, dr A. Jakomulska, promotor – prof. J.R. Olędzki.



MAKROLAB – International Interdisciplinary Research Project, Scotland 2002. MAKROLAB – Międzynarodowy interdyscyplinarny projekt badawczy, Szkocja 2002 r.



After the graduation examination of Marcin Sobczak under Dr. Anna Jakomulska's charge (28 June 2002). From left: Dr. E. Wołk-Musiał, Deputy Dean Dr. K. Olszewski, M.A. M. Sobczak, Dr. A. Jakomulska.

Po egzaminie magisterskim Marcina Sobczaka, podopiecznego dr Anny Jakomulskiej (28 czerwca 2002 r.). Od lewej: dr E. Wołk-Musiał, prodziekan dr K. Olszewski, mgr M. Sobczak, dr A. Jakomulska.



Dr. Anna Jakomulska documenting measurement data in the course of the HySens experiment, Uhrocie Kasprowe, 27 July 2002. *Image by Alicja Folbrier*.

Dr Anna Jakomulska dokumentująca pomiary w trakcie eksperymentu HySens, Uhrocie Kasprowe, 27 lipca 2002 r. Fot. Alicja Folbrier.



On the day of a hyperspectral flight within the framework of the HySens experiment, 4 August 2002. Image by Andreas Müller

 $W\,dniu\,\,wykonania\,\,nalotu\,\,hiperspektralnego\,\,w\,\,ramach\,\,eksperymentu\,\,HySens,\,4\,\,sierpnia\,\,2002\,\,r.\,Fot.\,\,Andreas\,\,M\ddot{u}ller.$



Measuring group in Dolina Gąsienicowa in the Tatra Mountains, 4 August 2002. From left: M.A. M. Sobczak, K. Kącki, M. Habermeyer, A. Müller, W. Gawryła, Dr. A. Jakomulska. Image by Anna Jakomulska.

Grupa pomiarowa w Dolinie Gąsienicowej w Tatrach, 4 sierpnia 2002 r. Eksperyment HySens. Od lewej: mgr M. Sobczak, K. Kącki, M. Habermeyer, A. Müller, W. Gawryła, dr A. Jakomulska. Fot. Anna Jakomulska.



Participants of HySens experiment in front of the Station for Nival Surveys of the Institute of Meteorology and Water Economy (IMGW) and the Research Station of the Polish Academy of Sciences (IGiPZ PAN) in Dolina Gasienicowa in the Tatra Mountains, 5 August 2002. From top left: A. Klińska, A Pyrgiel, M.A. A. Folbrier, M.A. M. Sobczak, M. Piechal, A. Nowak, M.A. D. Ziółkowski, Dr. A. Jakomulska, M. Habermeyer; from bottom left: K. Zaremski, M. Wrzesień, K. Kącki, W. Gawryła. Image by Andreas Müller

Uczestnicy eksperymentu HySens przed Stacją Badań Niwalnych IMGW oraz Stacją Badawczą IGiPZ PAN w Dolinie Gąsienicowej w Tatrach, 5 sierpnia 2002 r. Od lewej u góry: A. Klińska, A Pyrgiel, mgr A. Folbrier, mgr M. Sobczak, M. Piechal, A. Nowak, mgr D. Ziółkowski, dr A. Jakomulska, M. Habermeyer; od lewej u dołu: K. Zaremski, M. Wrzesień, K. Kącki, W. Gawryła. Fot. Andreas Müller.