

Hiperspektralna metoda badania i kartowania roślinności wysokogórskiej

Hyperspectral methods for high mountain vegetation analysis and mapping

Marcin SOBCZAK

Słowa kluczowe: metody hiperspektralne, roślinność wysokogórska, kartowanie *Key words*: hyperspectral methods, high mountain vegetation, mapping

Basing on recent studies with the use of hyperspectral data and on the results of vegetation characteristics comparison, it was assumed, that hyperspectral airborne images allow for identification and monitoring of chosen plant species in high mountain environment. Algorithms based on spectral mixture models give the possibility of describing pixel value as an aggregation of individual spectral responses. This helps in assessing percentage of each species cover in the plant community.

Main aim of this study was the continuation of previous studies on identification of spectral characteristics of high mountain plant species, with the view of creating local spectral library of those species. Furthermore, a method of automatic identification and mapping of high mountain vegetation should be developed.

Cel i zakres badań

Dotychczas wykorzystywane dane teledetekcyjne: panchromatyczne i barwne zdjęcia lotnicze, zdjęcia spektrostrefowe lub wielospektralne obrazy satelitarne pozwalają na kartowanie głównych typów pokrywy roślinnej, takich jak lasy liściaste, mieszane i iglaste, zarośla kosodrzewiny czy murawy (Bielecka 1986; Bielecka, Fedorowicz-Jackowski i Witkowska 1994), natomiast ich spektralna zdolność rozdzielcza jest niewystarczająca do identyfikacji poszczególnych gatunków lub zbiorowisk roślinnych. Jednymi z pierwszych w Polsce prób oszacowania możliwości wyznaczania wybranych zbiorowisk piętra alpejskiego i subalpejskiego co najmniej w randze zespołu, na różnych materiałach teThe study involved analysis of 5 species: *Luzula spadicea*, *Juncus trifidus, Calamagrostis villiosa, Deschampsia flexuosa and Nardus stricta*, and was conducted in Gasienicowa Valley in Tatra National Park in Poland.

For the assessment of possibilities of high mountain plant species identification and mapping, airborne hyperspectral images from DAIS 7915 scanner were used. Field measurements, used as a reference for airborne data, were taken with the use of GER 3700 and ASD FieldSpec spectrometers in 13 measurement locations. They were also used for analysis of spectral reflectance differences between the species.

Identification and mapping of plant species were realized using 4 different classification methods, of which Spectral Angle Mapper (SAM) method gave the best results. The results were compared to test data for accuracy assessment.

ledetekcyjnych (wielkoskalowych zdjęciach naziemnych oraz zdjęciach lotniczych i satelitarnych) z wykorzystaniem metod teledetekcji, były badania prowadzone przez A. Jakomulską w Zakładzie Teledetekcji Środowiska Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego (Jakomulska 1999b).

Autorka wykazała istnienie różnic spektralnych między badanymi zbiorowiskami, pozwalających na ich rozróżnienie, wskazała jednak na fakt, iż zastosowanie dość szerokich zakresów spektralnych do rejestracji promieniowania odbitego w dużej mierze ograniczyło możliwości identyfikacji badanych zbiorowisk roślinnych na zdjęciach lotniczych. Niska rozdzielczość przestrzenna wielospektralnego zdjęcia satelitarnego uniemożliwia efektywne zastosowanie klasyfikacji nadzorowanej do kartowania określonych płatów zbiorowisk roślinnych. Powoduje ona bowiem powstawanie tzw. pikseli mieszanych, których wartość jest wypadkowa promieniowania odbitego od każdego z badanych gatunków, uzależniona dodatkowo od poszczególnych współczynników odbicia oraz powierzchni zajmowanej przez te gatunki. A. Jakomulska (1999b) wskazuje możliwości rozwiązania powyższego problemu poprzez: zastosowanie od kilku do kilkunastu waskich zakresów spektralnych w paśmie widzialnym w zakresach absorpcji barwników fotosyntetycznych; uwzględnienie zakresów bliskiej podczerwieni (ok. 1,45 i 1,95 µm) odpowiadających maksimom pochłaniania promieniowania przez rośliny o wysokiej zawartości wody w tkankach; zwiększenie rozdzielczości przestrzennej (terenowej) do kilku metrów oraz wykonanie pomiarów fluorescencji z pułapu lotniczego (Chapelle i in., 1985).

Wszystkie powyższe czynniki są charakterystyczne dla obrazów hiperspektralnych rejestrowanych z pułapu lotniczego. Na podstawie wyników badań prowadzonych z użyciem hiperspektralnych skanerów lotniczych (Skidmore i Schmidt 1998), a także wyników uzyskanych z porównania charakterystyk roślinności zebranych w terenie (Zagajewski i in. 2004) przyjęto tezę, że hiperspektralne zdjęcia lotnicze pozwalają na identyfikację wybranych gatunków roślin występujących w wysokogórskim piętrze alpejskim (bazując na zróżnicowaniu ich właściwości spektralnych). Dzięki temu możliwe jest również dokładne kartowanie i monitoring tej roślinności. Dzięki zastosowaniu algorytmów wykorzystujacych modele mieszania odpowiedzi spektralnej wewnątrz każdego piksela na obrazie, możliwe jest określenie procentowego udziału poszczególnych gatunków roślinnych w tworzeniu wartości piksela reprezentujacego dane zbiorowisko roślinne.

Zatem celem niniejszego opracowania jest uzupełnienie badań naziemnych prowadzonych przez A. Jakomulską nad rozpoznaniem właściwości spektralnych wybranych gatunków roślin piętra alpejskiego, prowadzące do utworzenia bibliotek danych spektralnych roślinności badanego obszaru (przez badanie rozumie się w tym przypadku przede wszystkim identyfikację wybranych gatunków na podstawie ich charakterystyk spektralnych) oraz opracowanie na podstawie danych zgromadzonych w bibliotekach spektralnych i obrazów hiperspektralnych metody identyfikacji i kartowania roślinności wysokogórskiej.

Badania przeprowadzone zostały w Dolinie Gąsienicowej w Tatrach. Badaniami objęto pięć gatunków roślinności trawiastej piętra alpejskiego: kosmatkę brunatną (*Luzula spadicea*), sit skucinę (*Juncus trifidus*), trzcinnik owłosiony (*Calamagrostis villiosa*), śmiałka pogiętego (*Deschampsia flexuosa*) oraz bliźniczkę psią trawkę (*Nardus stricta*). Gatunki te zostały wybrane ze względu na fakt ich dominacji w głównych zbiorowiskach trawiastych występujących na badanym obszarze.

Do określenia możliwości identyfikacji i kartowania tych gatunków wykorzystane zostały lotnicze cyfrowe obrazy hiperspektralne zarejestrowane 04 sierpnia 2002 roku przez skaner DAIS 7915. Badania charakterystyk spektralnych wybranych gatunków roślinnych wykonane natomiast zostały naziemnymi spektrometrami: GER 3700 oraz ASD FieldSpec w 13 punktach pomiarowych. Bazując na wykonanych pomiarach podjęto również próbę określenia statystycznej istotności różnic występujących między poszczególnymi gatunkami, mogących przyczynić się do ich zdalnej identyfikacji, wykorzystując test t Studenta do oceny i porównania różnic odbicia promieniowania wewnątrz jednego gatunku i pomiędzy poszczególnymi gatunkami.

Identyfikację wyżej wymienionych gatunków roślinności oraz ich kartowanie wykonano poprzez klasyfikację danych spektralnych. Wykorzystano w tym celu algorytmy oparte na modelach mieszania odpowiedzi spektralnej obiektów wewnątrz pojedynczego piksela. Wyniki porównano z obszarami testowymi, na których zostały pomierzone charakterystyki spektralne poszczególnych gatunków w terenie.

Położenie obszaru badań

Ze względu na metodyczny charakter pracy, całość badań została przeprowadzona na fragmencie Doliny Gąsienicowej znajdującym się pomiędzy szczytem Kasprowego Wierchu, Świnicy, Koziego Wierchu i Kopy Magury. Szczegółowy przebieg granicy przedstawiony jest na ryc. 1. Granica zachodnia, południowa i wschodnia obszaru badań poprowadzona została wzdłuż grzbietów górskich, oddzielających analizowany teren od sąsiednich dolin. Północna granica o równoleżnikowym przebiegu została zdeterminowana prze zasięg danych wykorzystanych w badaniach. Całość analizowanego obszaru mieści się pomiędzy 49°13'43" a 49°15'14" szerokości geograficznej północnej oraz pomiędzy 19°58'50" a 20°01'26" długości geograficznej wschodniej. Powierzchnia obszaru badań wynosi 4.5 km².

Charakterystyka wykorzystanych materiałów

Terenowe pomiary spektrometryczne

Pomiary terenowe zostały przeprowadzone na przełomie lipca i sierpnia 2002, podczas kampanii lotniczej projektu HySens, a także w następnych latach. Spis punktów pomiarowych znajduje się w tabeli 1, natomiast ich przestrzenne rozmieszczenie przedstawione jest na ryc. 2. Każdorazowo badania te były przeprowadzane w tym samym okresie wegetacyjnym (początek sierpnia), co zapewniło porównywalność wyników z różnych lat. W trakcie badań terenowych zostało wykonanych szereg pomiarów mających na celu zbadanie właściwości radiometrycznych analizowanej roślinności.

Badania terenowe w roku 2002 wykonane zostały w dniu wykonania nalotu lotniczego oraz w dniach bezpośrednio poprzedzających nalot i następujących po nalocie. Przeprowadzone pomiary odpowiedzi spektral-



Ryc. 1: Położenie obszaru badań na tle Tatrzańskiego Parku Narodowego Fig. 1: Study area with Tatra National Park border in background

Lp	Nr. Punktu	Współrzędna X	Współrzędna Y	Dominujący gatunek				
No.	Point	X coordinate	Y coordinate	Dominant species				
1	1	426296	5453893	Kosmatka brunatna <i>Luzula spadicea</i>				
2	2	426505	5454554	Sit skucina Juncus trifidus				
3	3	426629	5454316	Bliźniczka psia trawka Nardus stricta				
4	5	426636	5454114	Śmiałek pogięty Deschampsia flexuosa				
5	6	426598	5453827	Kosmatka brunatna <i>Luzula spadicea</i>				
6	7	426322	5453669	Sit skucina Juncus trifidus				
7	8	426199	5453529	Sit skucina Juncus trifidus				
8	9	426353	5453320	Trzcinnik owłosiony Calamagrostis villiosa				
9	10	426521	5453402	Trzcinnik owłosiony Calamagrostis villiosa				
10	11	427096	5453486	Bliźniczka psia trawka Nardus stricta				
11	12	426899	5453966	Śmiałek pogięty Deschampsia flexuosa				
12	15	426376	5453650	Kosmatka brunatna <i>Luzula spadicea</i>				
13	16	426214	5453671	Kosmatka brunatna <i>Luzula spadicea</i>				

Tabela 1: Charakterystyka terenowych punktów pomiarowych Table 1: Characteristics of field measurement sites

nej były traktowane jako dane referencyjne do pomiarów wykonywanych z pułapu lotniczego, ale również jako dane wykorzystane do stworzenia lokalnej biblioteki spektralnej, na podstawie której można również określać kondycję poszczególnych roślin. Badania wykonywane w latach następnych służyły jako uzupełnienie stworzonej biblioteki spektralnej. Wszystkie pomiary terenowe wykonywane były w dobrych warunkach pogodowych, przy niebie bezchmurnym bądź też przy bardzo małym zachmurzeniu (rzędu 1-2), wysokim nasłonecznieniu, względnie niskiej wilgotności i braku opadów. W celu umożliwienia porównania wyników pomiary spektrometryczne były dodatkowo kalibrowane do spektralonu – wzorcowej powierzchni o bardzo wysokim albedo i lambertowskiej charakterystyce odbicia promieniowania.

Pomiary spektrometryczne zostały wykonane spektrometrami GER3700 oraz FieldSpec HandHeld. Pomiar spektrometrem GER 3700 umożliwił zebranie charakterystyk spektralnych badanych obiektów



Ryc. 2: Przestrzenne rozmieszczenie punktów pomiarowych (szczegóły w tabeli 1) Fig. 2: Spatial arrangement of measurement sites (details in table 1)

w przedziale widma 350-2500 nm. Pomiar dokonywany był w 704 kanałach spektralnych. Pomiary wykonywane spektrometrem FieldSpec HH obejmowały 512 kanałów spektralnych w zakresie 325-1075 nm. Dane zebrane za jego pomocą były traktowane jako dane uzupełniające do tworzenia biblioteki spektralnej gatunków roślin na badanym obszarze. Badane zbiorowiska były mierzone w 10 powtórzeniach. Pomiar pozwolił obliczyć spektralny współczynnik odbicia, niezbędny do wykreślenia krzywych odbicia spektralnego.

Materiały kartograficzne

Wśród materiałów kartograficznych wykorzystywanych w niniejszym opracowaniu można wymienić dwa rodzaje map. Pierwszy z nich stanowią mapy topograficzne w skali 1:10 000. Zostały one wykorzystane w trakcie korekcji geometrycznej obrazów hiperspektralnych do pozyskiwania punktów kontrolnych, jak też do sprawdzenia poprawności wykonanej geometryzacji. Mapę tą wykorzystano również jako źródło danych do wykonania numerycznego modelu terenu (NMT). Został on utworzony poprzez interpolację poziomic znajdujących się na mapie, z jednoczesnym uwzględnieniem linii nieciągłości oraz dodatkowych punktów referencyjnych.

Innym źródłem danych kartograficznych była mapa roślinności rzeczywistej, wykonana przez dr Annę Kozłowską z Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk. Mapa ta została wykorzystana jako źródło wiedzy o roślinności rzeczywistej występującej na badanym obszarze.

Lotnicze zobrazowania hiperspektralne

Obrazy hiperspektralne wykonane zostały w ramach eksperymentu HySens przez Niemiecką Agencję Kosmiczną DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) przy użyciu skanera hiperspektralnego DAIS 7915 rejestrującego sygnał elektromagnetyczny w 79 kanałach i umieszczonego na pokładzie samolotu Dornier Do-228. Zdjęcia zostały wykonane nad obszarem badawczym Tatr dnia 4 sierpnia 2002 roku około godziny 10:30. W trakcie nalotu wysokość Słońca nad horyzontem wynosiła 38°, natomiast jego azymut 145°. Kierunek lotu samolotu został dobrany w taki sposób, aby pokrywał się z azymutem Słońca, dzięki czemu wyeliminowany został problem nierównomiernego doświetlenia krawędzi obrazu. Wykonane zostały 4 pasy zobrazowania, które po utworzeniu mozaiki objęły swoim zasięgiem cały obszar badań (ryc. 3).

Opracowanie lokalnych bibliotek spektralnych

Tworzenie bibliotek spektralnych jest niezmiernie ważnym etapem badań wykorzystujących obrazy hiperspektralne, gdyż w trakcie tego procesu opracowuje się krzywe spektralne wszystkich elementów występują-



Ryc. 3: Przestrzenne rozmieszczenie obrazu DAIS na tle Tatrzańskiego Parku Narodowego Fig. 3: Spatial coverage of DAIS image, with Tatra National Park border in background

cych na danym obszarze. Elementy te podczas klasyfikacji obrazów uznawane są za obiekty czyste spektralnie (ang. endmembers), to jest takie, których krzywe spektralne nie są tworzone przez inne obiekty, ale wynikaja wyłacznie z właściwości tego jednego obiektu. Obiekty czyste spektralnie są w centrum zainteresowania klasyfikacji subpikselowych, ponieważ to one tworzą wartości poszczególnych pikseli na obrazie cyfrowym. Biblioteki spektralne są również nieocenioną bazą danych zawierającą w sobie informacje dotyczące rozwoju i kondycji roślin, a pośrednio również warunków środowiska, w których dana roślina się znajduje. Dzięki odpowiedniej analizie krzywych spektralnych można uzyskać dane dotyczące stresu wodnego, zawartości barwników oraz ilości energii fotosyntetycznie czynnej akumulowanej przez roślinę. Mając zatem bibliotekę spektralną można przeprowadzić analizę środowiskową danego obszaru.

W trakcie badań wykonana została lokalna biblioteka spektralna dla roślinności alpejskiej obszaru Doliny Gąsienicowej w Tatrach. Pomiarami zostały objęte: kosmatka brunatna (*Luzula spadicea*), sit skucina (*Juncus trifidus*), trzcinnik owłosiony (*Calamagrostis villiosa*), śmiałek pogięty (*Deschampsia flexuosa*), bliźniczka psia trawka (*Nardus stricta*), które przedstawione są na ryc. 4. Wykonane zostały również pomiary: borówki czernicy (*Vaccinium myrtillus*), kosodrzewiny (*Pinus mugo*), skał oraz wody, które służyły jako uzupełniające obiekty w trakcie klasyfikacji obrazów hiperspektralnych. Poszczególne gatunki zostały pomierzone na kilku stanowiskach charakteryzujących się różnymi warunkami siedliskowymi. Celem takiego postępowania było uchwycenie w bibliotece spektralnej zmian współczynnika odbicia wynikającego nie z różnicy gatunku, a z warunków wzrostu rośliny, przede wszystkim wynikających z różnej lokalizacji na stoku (tabela 2).

Pomiary służące tworzeniu biblioteki spektralnej dla obszaru Doliny Gąsienicowej w Tatrach wykonywane są od 2002 roku, w tym samym okresie wegetacyjnym. Pomiary w 2002 roku zostały przeprowadzone w dniu wykonania lotniczych obrazów hiperspektralnych (t.j. 4 sierpnia), w dniach bezpośrednio poprzedzających nalot oraz w dniach bezpośrednio następujących po nalocie. W roku 2003 ponownie zostały wykonane pomiary spektrometryczne na analizowanym obszarze. Były one powtórzeniem i jednocześnie uzupełnieniem pierwszych pomiarów wykonanych w 2002 roku. Do rejestracji charakterystyk spektralnych użyto spektrometru ASD FieldSpec HandHeld.

Każdy pomiar składał się z pomiaru referencyjnego oraz serii pomiarów właściwych. Pomiar referencyjny polegał na rejestracji odbicia promieniowania słonecznego od płaskiej tarczy wykonanej ze spektralonu, który można traktować jako powierzchnię lambertowską, czyli powierzchnię odbijającą padające promieniowanie proporcjonalnie do cosinusa kąta padania (Ryan 1997). Wartości uzyskane podczas pomiaru referencyjnego traktowane są jako odpowiadające całkowitej ilości energii elektromagnetycznej docierającej ze Słońca do



Ryc. 4: Gatunki roślinne analizowane w trakcie badań *Fig. 4: Analysed plant species*

Tabela 2	2: Zróżnicowanie	topograficzne	punktów	pomiarowych
Table 2:	Topographic van	riability of me	asuremen	t sites

Lp No.	Nr. Punktu Point	Współ- rzędna X [m] X coordi- nate [m]	Współ- rzędna Y [m] Y coordi- nate [m]	Współ- rzędna Z [m n.p.m.] Z coordi- nate [m a.s.l]	Nachyle- nie stoku [°] Slope [°]	Ekspo- zycja Aspekt	Dominujący gatunek Dominant species
1	3	426629	5454316	1749	26,0	Е	Bliźniczka psia trawka Nardus stricta
2	11	427096	5453486	1676	1,8	W	Bliźniczka psia trawka Nardus stricta
3	1	426296	5453893	1808	13,7	NE	Kosmatka brunatna Luzula spadicea
4	6	426598	5453827	1727	16,3	NE	Kosmatka brunatna Luzula spadicea
5	15	426376	5453650	1854	24,5	NE	Kosmatka brunatna Luzula spadicea
6	16	426214	5453671	1972	23,0	N	Kosmatka brunatna Luzula spadicea
7	2	426505	5454554	1838	15,2	N	Sit skucina Juncus trifidus
8	7	426322	5453669	1868	18,3	NE	Sit skucina Juncus trifidus
9	8	426199	5453529	1974	30,1	N	Sit skucina Juncus trifidus
10	5	426636	5454114	1708	8,3	Е	Śmiałek pogięty Deschampsia flexuosa
11	12	426899	5453966	1626	7,9	NE	Śmiałek pogięty Deschampsia flexuosa
12	9	426353	5453320	1989	38,8	NE	Trzcinnik owłosiony Calamagrostis villiosa
13	10	426521	5453402	1833	31,4	NE	Trzcinnik owłosiony Calamagrostis villiosa

powierzchni Ziemi, a więc również do badanej roślinności, z podziałem na poszczególne kanały spektralne. Pomiar właściwy polegał natomiast na rejestracji promieniowania odbitego od badanego obiektu. Stosunek otrzymanych w ten sposób wartości do odpowiadających im wartości pomiaru referencyjnego odpowiada współczynnikowi odbicia i jest obliczany dla każdego kanału spektralnego oddzielnie.

Wszystkie pomiary zostały zebrane i podzielone w zależności od gatunku rośliny, a także względem lo-

kalizacji na stoku (np. kosmatka brunatna w środkowej części stoku i w dnie doliny). Pomiary przeprowadzone w poszczególnych punktach różnią się między sobą – różnice te spowodowane są wieloma czynnikami, między innymi różną zawartością pary wodnej w atmosferze czy różnymi warunkami siedliskowymi. Zróżnicowanie to powoduje inny przebieg krzywych spektralnych, co doskonale widać na rycinie 8.

Współczynniki odbicia głównych gatunków będących przedmiotem badań zostały poddane szczegółowym ana-

lizom statystycznym mającym na celu wskazanie istotności różnic wielkości odbicia w poszczególnych kanałach spektralnych pomiędzy poszczególnymi gatunkami. Celem takiego podejścia było sprawdzenie, czy odległości spektralne między dwiema wartościami reprezentujacymi dwie różne grupy roślin są większe niż różnice wewnątrz każdej z tych grup (ich rozrzut wartości) i wystarczająco duże, aby możliwe było ich rozróżnienie. Użyto w tym celu testu t dla prób niezależnych. Test ten jest najpowszechniej stosowanym testem do oceny różnic między średnimi w dwóch grupach. Mimo niewielkich liczności poszczególnych grup pomiarów zdecydowano się na zastosowanie tego testu, ponieważ wykonane pomiary reprezentują populację (pomiarów) posiadającą normalny rozkład prawdopodobieństwa. Tym niemniej, dla wybranych par średnich przeprowadzono równolegle analizy różnicy średnich za pomocą nieparametrycznego testu U Manna-Whitney'a (Statsoft, 2004), który nie wymaga założenia o normalności rozkładu w próbie.

Jednym z parametrów otrzymywanych w zastosowanym teście jest parametr p określający prawdopodobieństwo popełnienia błędu polegającego na odrzuceniu hipotezy o braku różnic pomiędzy średnimi w sytuacji, gdy taka hipoteza jest w rzeczywistości prawdziwa. W prezentowanych badaniach za istotną statystycznie różnicę między średnimi wartościami odbicia spektralnego w poszczególnych kanałach uznano sytuację, w której parametr p przyjmuje wartość równą bądź mniejszą od 0,05.

Wstępne przetwarzanie obrazów hiperspektralnych

Głównymi źródłami zniekształceń obrazów hiperspektralnych są zniekształcenia geometryczne powstające w trakcie lotu samolotu, oraz zniekształcenia radiometryczne wywołane wpływem atmosfery. Zarówno pierwszy jak i drugi typ zakłóceń został usunięty w procesie wstępnego przygotowania danych, aby możliwe było nadanie wynikom dalszych analiz postaci kartometrycznej oraz aby możliwe było porównywanie wartości zarejestrowanych przez skaner lotniczy z pomiarami terenowymi, które pozbawione są negatywnego wpływu atmosfery.

Do korekcji geometrycznej danych ze skanera DAIS wykorzystano program PARGE (PARametric GEocoding), opracowany specjalnie dla danych hiperspektralnych przez Remote Sensing Laboratories (RSL) na Uniwersytecie w Zurychu (Schläpfer i Richter 2002). Program ten w precyzyjny sposób analizuje geometryczne zależności pomiędzy pozycją samolotu (skanera) a powierzchnią terenu, stosując następnie transformację pozwalającą uzyskać obraz w rzucie ortogonalnym. Dzięki wykorzystaniu danych nawigacyjnych, takich jak Inercyjny System Nawigacyjny (INS – Innertial Navigation System) oraz Globalny System Pozycjonowania (GPS – Global Positioning System), a także dzięki zastosowaniu numerycznego modelu wysokościowego dla skorygowania wpływu ukształtowania terenu, możliwe jest znaczne zmniejszenie liczby wymaganych do poprawnej geometryzacji punktów kontrolnych, w porównaniu z innymi metodami korekcji. Dokładność dopasowania osiąga przy tym wartości rzędu jednego piksela.

Drugim etapem procesu przygotowania obrazów hiperspektralnych jest ich korekcja radiometryczna. Jej celem jest wyodrębnienie z obrazu fizycznych parametrów charakteryzujących powierzchnię terenu, takich jak współczynnik odbicia czy temperatura (Richter i Schläpfer 2002). W niniejszym opracowaniu korekcja wykonana została za pomocą programu ATCOR4, który umożliwia przeprowadzenie korekcji dla obrazów pozyskanych z pułapu lotniczego przez skanery o szerokim polu widzenia.

Model użyty w tym programie stosuje do obliczeń takie parametry jak: promieniowanie ścieżki (ang. path radiance), przepuszczalność atmosfery (ang. atmospheric transmitance) oraz bezpośrednie i rozproszone promieniowanie słoneczne (ang. direct and diffuse solar flux), obliczane w wyniku zastosowania programów analizujących transfer promieniowania (ang. radiative transfer codes). Jako dane referencyjne dla korekcji atmosferycznej wykorzystane zostały pomiary terenowe, spośród których wybrano tylko niektóre spektra, o zróżnicowanych wartościach współczynnika odbicia: wodę, kosodrzewinę, śmiałka pogiętego oraz granit (skały). Obiekty dobrano w taki sposób, aby reprezentowane były zarówno obiekty ciemne, jak i te o średnim i wysokim albedo. Po określeniu rodzaju atmosfery przeprowadzona została korekcja niwelująca jej wpływ. W jej wyniku otrzymano obrazy, których wartości reprezentowane są przez współczynniki odbicia przy powierzchni terenu.

Klasyfikacja materiałów teledetekcyjnych

Głównym celem automatycznej klasyfikacji danych zawartych na obrazach teledetekcyjnych jest uzyskanie map tematycznych, w tym przypadku map roślinności rzeczywistej, w szczególności identyfikacja takich gatunków jak: kosmatka brunatna, sit skucina, trzcinnik owłosiony, śmiałek pogięty oraz bliźniczka psia trawka. Dążąc do tego celu wykonano klasyfikację nadzorowaną wykorzystując różne metody i algorytmy przeznaczone do analizy danych hiperspektralnych.

Pierwszym etapem postępowania klasyfikacyjnego w przypadku tego typu danych jest analiza i selekcja kanałów spektralnych przydatnych do klasyfikacji. Wybór ten w prezentowanych badaniach był utrudniony ze względu na to, że w zakresie od 41 do 72 kanału spektralnego (z wyjątkiem kanałów 49 – 53), dane obarczone były prążkowaniem. Po wizualnej analizie każdego z kanałów stwierdzono występowanie bardzo silnego efektu prążkowania w sześciu kanałach spektralnych: 41-42 oraz 69-72. W kanałach 43, 44, 46 oraz 55-68 był on mniejszy, jednak nadal powodował duże trudności w poprawnej interpretacji i analizie danych. Prążkowanie, wprowadzając szum do danych, powoduje jednocześnie obniżenie stosunku sygnału do szumu (SNR), co negatywnie wpływa na możliwości dalszego wykorzystania takich danych. Dodatkowo, kanały 45, 47, 48 oraz 54 charakteryzują się bardzo niską dynamiką zarejestrowanych wartości, co przejawia się występowaniem niewielu poziomów szarości. Z tego powodu analizy przeprowadzane w tych badaniach skupiały się na pierwszych 40 kanałach spektralnych pokrywających zakres od ok. 400 nm do ok. 1800 nm. Pozostałe kanały były wykorzystywane jako kanały pomocnicze w procesie klasyfikacji i interpretacji obrazów hiperspektralnych.

W celu przeprowadzenia klasyfikacji nadzorowanej, kolejnym etapem postępowania jest określenie na obrazie pól treningowych - obszarów o jednolitych charakterystykach spektralnych. W przypadku klasyfikacji obrazów hiperspektralnych proces ten polega na odszukaniu pikseli czystych spektralnie (ang. endmembers), z których tworzone są sygnatury treningowe. Uzyskuje się je poprzez wykonanie w terenie pomiarów spektrometrycznych. Zestaw krzywych spektralnych pomierzonych w ten sposób obiektów tworzy, jak wspomniano, lokalną bibliotekę spektralną. W niektórych przypadkach można również wykorzystać już istniejące biblioteki (np. ogólnodostepna biblioteke spektralna NASA), jednak ze względu na przestrzenną zmienność warunków siedliskowych, a co za tym idzie właściwości fizykochemicznych roślinności, zawarte w nich dane mają jedynie wartość danych przybliżonych. Do wyboru obszarów jednorodnych spektralnie wykorzystano więc dane zawarte w wykonanej bibliotece spektralnej.

Do analizy pokrycia terenu i stworzenia mapy roślinności wykorzystano cztery zaawansowane metody klasyfikacji obrazów hiperspektralnych: Spectral Angle Mapper; (SAM); Linear Spectral Unmixing (LSU); Matched Filtering (MF) oraz Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF). Są to metody stosujące algorytmy specjalnie przystosowane do charakteru danych hiperspektralnych i wykorzystujące terenowe pomiary spektrometryczne odgrywające kluczową rolę w definiowaniu obiektów czystych spektralnie. Ponadto, w przeciwień-

stwie do tradycyjnych metod klasyfikacji nadzorowanej, takich jak metoda największego prawdopodobieństwa czy najmniejszej odległości, przedstawione tu metody należa do grupy klasyfikatorów miękkich, stosujących metody logiki rozmytej (Jakomulska, 1999a; Jakomulska, 1999b; Zadeh, 1965). Dzięki temu unika się jednoznacznego przydzielenia piksela do danej klasy pokrycia terenu, co ma szczególne znaczenie w przypadku klasyfikacji zbiorowisk roślinnych, w których istnieje duża przestrzenna zmienność gatunków, a badane obiekty czyste spektralnie tworzą jedynie część wartości danego piksela. Wszystkie wymienione wyżej metody klasyfikacji wykorzystują spektrometryczne pomiary terenowe, jednak każda z nich w nieco odmienny sposób. Tym niemniej ich zastosowanie opiera się na wspólnej koncepcji pikseli mieszanych.

Koncepcja pikseli mieszanych zakłada, że sygnał rejestrowany przez sensor w obrębie jednego piksela jest tworzony przez ograniczoną liczbę obiektów czystych spektralnie, znajdujących się w jego polu widzenia, pomiędzy którymi nie zachodzi żadna interakcja. Jego wartość jest liniową kombinacją wartości generowanych przez poszczególne obiekty. Dla każdej składowej wartości przyporządkowywana jest waga, która uzależniona jest od zajmowanej przez dany obiekt powierzchni. Rozpatrując różne przypadki mieszania pikseli można wyróżnić dwa ich typy, przedstawione na ryc. 5, z czego drugi przypadek może mieć różne przyczyny powstawania.

Pierwszy przypadek przedstawia sytuację, gdy mieszanie promieniowania odbitego od różnych obiektów zachodzi na poziomie molekularnym. Nie jest więc ono spowodowane sąsiedztwem różnych typów pokrycia terenu, lecz raczej złożoną budową danego materiału (ryc. 6). Taki rodzaj powstawania mieszanki spektralnej jest bardzo skomplikowany, a ze względu na fakt, iż charakter takiego wymieszania jest nieliniowy, jest on również bardzo trudny do matematycznego opisania.

Drugi rodzaj powstawania pikseli mieszanych jest przedstawiony na ryc.6b. Zakłada on liniowe mieszanie odbicia promieniowania od powierzchni obiektów sąsiadujących ze sobą. Z takim rodzajem mieszania możemy mieć do czynienia zarówno w przypadku, gdy wielkość obiektów jest mniejsza niż wielkość odpowiadająca jed-



Ryc. 5: Różne typy mieszania obiektów wewnątrz pikseli: a) mieszanie na poziomie molekularnym b) mieszanie w przypadku obiektów mniejszych od chwilowego pola widzenia skanera c) mieszanie na granicy obiektów

Fig. 5: Different types of pixel mixing: a) molecular mixing b) mixing of objects smaller than IFOV c) mixing at object border



Ryc. 6: Różnica pomiędzy mieszaniem odbitego promieniowania na poziomie molekularnym (a) oraz wynikającym z sąsiedztwa obiektów (b)

Fig. 6: Difference between molecular mixing (a) and mixing at object border (b)

nemu pikselowi w terenie (ryc.5b), jak również wtedy, gdy dany piksel obejmuje swoim zasięgiem obszar leżący na granicy dwóch lub więcej typów obiektów (ryc.5c).

Metoda "spectral angle mapper" (SAM)

Klasyfikacja Spectral Angle Mapper (SAM) jest automatyczną metodą polegającą na porównaniu wektorów spektralnych obliczonych dla każdego piksela na analizowanym obrazie z wektorami spektralnymi utworzonymi dla obiektów czystych spektralnie. Metoda ta nie wymaga znajomości wszystkich obiektów czystych spektralnie występujących na danym obszarze, aczkolwiek do stworzenia mapy zawierającej wszystkie elementy pokrycia terenu wskazane jest użycie w klasyfikacji wszystkich elementów składowych. Każdy piksel z obrazu jest analizowany niezależnie. Obliczana jest kątowa odległość w miliradianach pomiędzy wektorem utworzonym przez ten piksel a każdym z wektorów odpowiadających poszczególnym obiektom wzorcowym. Wynikiem przeprowadzenia obliczeń dla wszystkich pikseli jest seria jednokanałowych obrazów, po jednym obrazie dla każdego obiektu czystego spektralnie, na których wartości pikseli reprezentują obliczoną odległość spektralną (ryc. 7). Mniejsze wartości świadczą o bliższym położeniu odpowiednich wektorów spektralnych, zatem na tej podstawie można ocenić, które piksele sa najbliższe spektralnie każdemu z obiektów wzorcowych. Metoda ta w swoim podejściu jest zbliżona do tradycyjnej metody Najmniejszych Odległości, w przeciwieństwie jednak do niej nie jest czuła na różnice



Ryc. 7: Schemat przedstawiający odległość kątową pomiędzy dwoma obiektami (piksel i wzorzec) w przestrzeni 2-wymiarowej

Fig. 7: Spectral angle between two objects (pixel data and reference data) in 2-Dimensions

w jasności obiektów. Dzięki temu obiekty tego samego typu, a więc podobne spektralnie, zostaną sklasyfikowane do jednej klasy nawet wtedy, gdy natężenie oświetlenia będzie dla nich różne. Ma to ogromne znaczenie zwłaszcza w takich przypadkach, gdy obiekty tej samej klasy znajdują się w miejscach o różnym poziomie oświetlenia, np. po północnej lub południowej stronie stoków górskich.

Metoda "linear spectral unmixing" (LSU)

Metoda ta, w odróżnieniu od poprzedniej, wymaga określenia wszystkich obiektów czystych spektralnie, które występują na badanym obszarze. Wynika to z faktu, że każdy piksel traktowany jest jako mieszanina tych elementów, a jego wartość jest wypadkową wartości poszczególnych obiektów wzorcowych. Przyjmując dodatkowe założenie, że mieszanie odpowiedzi spektralnych poszczególnych obiektów ma charakter liniowy, wartość wynikową piksela można przedstawić jako wektor X określony wzorem:

gdzie:

X – szukany wektor wartości we wszystkich kanałach;

X = M * f + e

- *M* macierz reprezentująca wzorcowe krzywe odbicia spektralnego;
- *f* wektor reprezentujący udział każdej z wzorcowych krzywych w tworzeniu wartości analizowanego piksela;
- e wektor błędu.

Liczba kanałów spektralnych użytych do przeprowadzenia klasyfikacji musi być większa niż liczba obiektów czystych spektralnie, gdyż tylko w takim przypadku możliwe jest uzyskanie rozwiązania powyższego układu równań. Niewiadomą w tym układzie jest wektor *f*, który reprezentuje udział każdego obiektu wzorcowego w tworzeniu wartości wynikowej piksela. Zatem poprzez wyznaczenie wektora *f* wyznaczane są również wartości mówiące o wpływie poszczególnych obiektów na wartość wektora X. Ponieważ mieszanie w obrębie jednego piksela zachodzi w sposób liniowy, możemy na podstawie znajomości wartości wektora *f* określić procentowy udział każdego z obiektów wzorcowych w powierzchni zajmowanej na obszarze objętym tym pikselem.

Wynikiem przeprowadzenia klasyfikacji metodą LSU jest seria obrazów, z których każdy odpowiada jednemu obiektowi wzorcowemu. Wartości pikseli na tych obrazach przyjmują wartości z przedziału 0-1 (dla metody nie ograniczonej warunkami sumowania do jedności). Wartość 0 oznacza, że dany piksel nie zawiera obiektu wzorcowego reprezentowanego przez dany obraz, wartość 1 oznacza, że obiekt ten zajmuje całą powierzchnię piksela, natomiast wartości pośrednie oznaczają odpowiedni procentowy udział tego obiektu w powierzchni analizowanego piksela, na przykład wartość 0.4 oznacza, że 40% powierzchni danego piksela jest pokryta przez ten obiekt.

Metoda "matched filtering" (MF)

Jest to metoda, która nie wymaga od użytkownika wiedzy o wszystkich spektralnie czystych obiektach występujących na badanym obszarze. Dzięki temu możliwa jest szybka identyfikacja wybranych obiektów, bez konieczności obliczania udziałów procentowych dla wszystkich obiektów znajdujących się na terenie badań i tworzacych wartości odbicia spektralnego pikseli. Algorytm tej klasyfikacji maksymalizuje odpowiedzi znanych obiektów tłumiąc jednocześnie odpowiedzi spektralne tzw. tła, a więc pochodzące od obiektów nieuwzględnionych w bibliotece spektralnej. Innymi słowy wariancja tworzona przez elementy czyste spektralnie nie będące w danym momencie obiektem zainteresowania jest traktowana całościowo i jednocześnie minimalizowana, natomiast obiekty pasujące do szukanego wzorca są silnie wzmacniane i oznaczane jako dobrze dopasowane (RSI Inc. 2001).

Metoda "mixture-tuned matched filtering" (MTMF)

Algorytm klasyfikacji zastosowany w metodzie MTMF jest bardzo zbliżony do algorytmu stosowanego w metodzie MF. Różnica polega na zwiększeniu możliwości rozpoznawania fałszywych alarmów (ang. *false positives*), które mogą pojawić się na obrazie będącym wynikiem zastosowania metody MF w przypadku rzadko występujących materiałów. Fałszywe alarmy to piksele na obrazie wynikowym posiadające wysokie wartości, a więc wskazujące na dość obfite występowanie danego obiektu, jednak w rzeczywistości nie występujące w tym miejscu (lub nie występujące w takiej ilości). W trakcie przeprowadzania klasyfikacji metodą MTMF do każdego obrazu generowany jest dodatkowy obraz reprezentujący "niewykonalność" czy też brak możliwości zaistnienia danego rozwiązania (ang. *infeasibility*).

Oszacowanie dokładności klasyfikacji

Oszacowanie dokładności klasyfikacji zostało w niniejszej pracy przeprowadzone na podstawie porównania otrzymanych wyników z testowymi poligonami wyznaczonymi w terenie i charakteryzującymi się dominacją danego gatunku. Dla każdego analizowanego gatunku określone zostały co najmniej dwa takie obszary, przy czym nie były one wykorzystywane jako źródło charakterystyk spektralnych użytych w procesie klasyfikacji. Powierzchnia każdego z obszarów testowych wynosiła co najmniej 25 m² tak, aby zawarł się w nim jeden piksel obrazu DAIS. Porównanie wyników klasyfikacji z obszarami testowymi pozwoliło na oszacowanie skuteczności wyznaczania obszarów zajętych przez analizowany gatunek.

Przy analizie dokładności należy pamiętać, iż wynikowe obrazy nie stanowią jednoznacznego przyporządkowania pikseli do poszczególnych klas pokrycia terenu, ale raczej określają procentowy udział danego typu pokrycia terenu w tworzeniu wartości każdego piksela. Ten fakt sprawia, że ocena dokładności przeprowadzonej klasyfikacji musi zostać poprzedzona etapem przygotowania. Etap ten polega na określeniu progu (bądź kilku progów) będącego graniczną wartością, od której dany piksel będzie uznawany za należący bądź nie należący do danej klasy. Przykładowo, w przypadku klasyfikacji metodą Spectral Angle Mapper próg będzie określał maksymalną odległość kątową wektora spektralnego danego piksela od analizowanej klasy, powyżej którego piksel ten nie zostanie do tej klasy właczony. Im wyższy próg zostanie zastosowany, tym większy obszar będzie zajmować dana klasa, gdyż więcej pikseli będzie spełniać zadany warunek dotyczący spektralnej odległości kątowej. Po zastosowaniu progu generowany jest obraz przedstawiający obszary zaklasyfikowane do danej klasy. Dopiero ten obraz jest wykorzystywany do sprawdzania zgodności wyznaczonych obszarów z danymi referencyjnymi.

Wyniki badań

Charakterystyki spektralne badanych obiektów

Podstawowym zadaniem spektrometrycznych pomiarów terenowych było zebranie charakterystyk spektralnych gatunków traw tworzących główne zbiorowiska na obszarze objętym badaniami i będących przedmiotem zainteresowania niniejszej pracy. W tym rozdziale przedstawiona została analiza krzywych spektralnych, polegająca głównie na porównaniu wszystkich gatunków między sobą. Porównane zostaną również współczynniki odbicia zebrane dla roślin należących do tego samego gatunku, ale występujących w innych sytuacjach siedliskowych. Rozpatrzone zostanie także zróż1,0





Fig. 8: Spectral reflectance curve calculated from median, for 5 analysed species

nicowanie charakterystyk spektralnych w ramach jednej rośliny, wynikające z odmiennego charakteru poszczególnych jej części. Ten ostatni typ analiz zostanie przedstawiony dla dwóch gatunków: kosmatki brunatnej i situ skuciny, gdyż spośród badanych roślin tylko w tych dwóch przypadkach występuje wyraźne ich zróżnicowanie widoczne również gołym okiem a wynikające ze specyficznego przystosowania do warunków nadmiernego promieniowania w postaci zwiększonej zawartości karotenoidów w stosunku do chlorofilów, co ma bezpośrednie przełożenie na wielkość odbicia promieniowania słonecznego.

Zestawienie krzywych odbicia spektralnego dla 5 badanych gatunków roślinności trawiastej przedstawione jest na ryc. 8. Wstępna ocena wizualna pozwala przede wszystkim na stwierdzenie dużego podobieństwa w przebiegu krzywych poszczególnych gatunków. Fakt ten jest dość istotny z punktu widzenia wyników klasyfikacji używających algorytmów bazujących na modelach mieszania pikseli (np. Linear Spectral Unmixing) czy na podobieństwie pikseli obrazu do wzorcowych krzywych spektralnych (np. Spectral Angle Mapper). Algorytmy te zakładają bowiem, że pomiędzy wspomnianymi krzywymi wzorcowymi istnieją różnice na tyle istotne, aby można było na tej podstawie ocenić, jak duży udział każdy z obiektów miał na tworzenie wartości piksela wynikowego. Im te różnice są większe, tym większe są również możliwości takiej oceny. W przypadku badanych krzywych odbicia spektralnego zaobserwowane różnice między 5 gatunkami roślinności trawiastej są na ogół niewielkie. Największe różnice między badanymi gatunkami występują w zakresie od około 750 nm do 1300 nm oraz od około 1500 nm do 1800 nm. Również istotny z punktu widzenia rozróżnialności gatunków roślinności trawiastej jest zakres od około 500 nm do około 650 nm.

Wizualna ocena różnic pomiędzy krzywymi odbicia

spektralnego dla poszczególnych gatunków, przeprowadzona powyżej, pozwala wstępnie ocenić możliwości wyróżnienia badanych obiektów bazując na ich charakterystykach spektralnych, nie daje jednak ilościowej informacji o tych różnicach ani też o ich istotności statystycznej. Taka szczegółowa informacja może natomiast być uzyskana na podstawie testów statystycznych analizujących istotność różnic pomiędzy medianami obliczonymi dla każdego z analizowanych gatunków. W niniejszych badaniach wspomniane analizy statystyczne przeprowadzone zostały za pomocą testu t Studenta. Dodatkowo zastosowano test U Manna-Whitney-'a, będącego nieparametrycznym odpowiednikiem testu t, w celu potwierdzenia otrzymanych wyników. Wyniki te analizowano na poziomie istotności p wynoszącym 0,05. Jest to powszechnie przyjęty w naukach przyrodniczych poziom istotności określający granicę akceptowalnego błędu, w tym przypadku związanego z odrzuceniem hipotezy zerowej H₀ mówiącej o braku istotności różnic średnich w porównywanych grupach (StatSoft, Inc. 2004).

Wyniki analiz statystycznej istotności różnic pomiędzy średnimi wartościami współczynnika odbicia zostały przedstawione dla każdej pary gatunków oddzielnie. Wskazują one na duże statystyczne różnice występujące pomiędzy średnimi wartościami odbicia spektralnego (liczonymi jako mediana) dla sześciu par gatunków: trzcinnik-śmiałek, trzcinnik-kosmatka, trzcinnik-bliźniczka, śmiałek-kosmatka, kosmatka-sit oraz kosmatka-bliźniczka (odpowiednio ryc. 9, ryc. 10, ryc. 12, ryc. 13, ryc. 16 oraz ryc. 17). Świadczy to o dużych możliwościach rozróżnienia pomiędzy tymi gatunkami na podstawie ich charakterystyk spektralnych, ponieważ niemal w całym zakresie spektralnym (315-2500 nm) występują różnice statystycznie istotne. Gorzej sytuacja wygląda w przypadku pary trzcinnik-sit (ryc. 11), gdzie

calamagrostis deschampsia 0.8 współczynnik odbicia Reflection coefficient 60 0,2 300 500 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 2100 2300 2500 długość fali wave ight [nm]

Ryc. 9: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków trzcinnik-śmiałek, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 9: Statistical significance of reflectance differences for Calamagrostis-Deschampsia species, with significance level of p<0.05



Ryc. 10: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków trzcinnik-kosmatka, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 10: Statistical significance of reflectance differences for Calamagrostis-Luzula species, with significance level of p<0.05

statystyczna istotność występuje w zakresie spektralnym poniżej 1350 nm. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku par śmiałek-sit oraz bliźniczka-sit (ryc. 14 oraz ryc. 18). Tu istotne statystycznie różnice średnich występują głównie w zakresach spektralnych powyżej 1350 nm. Największe trudności w identyfikacji na podstawie krzywych spektralnych mogą wystąpić w przypadku pary śmiałek-bliźniczka (ryc. 15). W tym przypadku jedynie w kilku wąskich zakresach spektralnych daje się zaobserwować statystycznie istotne różnice współczynnika odbicia między tymi gatunkami.

W celu określenia, które kanały spektralne są najbardziej przydatne w procesie identyfikacji badanych gatunków roślinności trawiastej, wyniki testów dla poszczególnych par zostały zebrane na zbiorczym wykre-



Ryc. 11: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków trzcinnik-sit, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 11: Statistical significance of reflectance differences for Calamagrostis-Juncus species, with significance level of p<0.05



Ryc. 12: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków trzcinnik-bliźniczka, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 12: Statistical significance of reflectance differences for Calamagrostis-Nardus species, with significance level of p<0.05

sie (ryc. 19). Przedstawia on liczebność występowania statystycznie istotnej różnicy średnich wartości współczynnika odbicia w poszczególnych zakresach spektralnych (lewa oś wykresu – szare słupki). Dla łatwiejszej interpretacji na wykres naniesiona została również krzywa odbicia spektralnego dla roślinności trawiastej obliczona jako wartość średnia dla trzcinnika owłosionego (prawa oś wykresu – zielona krzywa).

Uzyskane dane potwierdzają możliwość teledetekcyjnego zróżnicowania większości spośród badanych obiektów. Najczęściej różnice pomiędzy analizowanymi gatunkami występują w zakresie od około 2100 nm do około 2350 nm. Również w zakresie bliskiej podczerwieni od około 700 nm do około 1900 nm wspomniane różnice występują dość często, za wyjątkiem zakresu oko-

1.0



Ryc. 13: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków śmiałek-kosmatka, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 13: Statistical significance of reflectance differences for Deschampsia-Luzula species, with significance level of p<0.05



Ryc. 14: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków śmiałek-sit, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 14: Statistical significance of reflectance differences for Deschampsia-Juncus species, with significance level of p < 0.05

ło 1100 nm, gdzie różnice te zanikają, co uwidacznia się na wykresie spadkiem częstości. W paśmie widzialnym istotne statystycznie różnice pomiędzy gatunkami występują najczęściej w zakresie zielonym. Najrzadziej natomiast występują w zakresie krótkiego promieniowania niebieskiego oraz w zakresie czerwonym, co jest związane z ogólnym niskim poziomem odbicia promieniowania w tych zakresach widma elektromagnetycznego.

Przy ocenie charakterystyk spektralnych zebranych w terenie należy pamiętać, że będą one wykorzystywane w procesie klasyfikacji po wcześniejszym ich przepróbkowaniu do rozdzielczości spektralnej sensora, którym pozyskane zostały obrazy hiperspektralne. Dlatego też zdolność do rozróżniania pomiędzy poszczegól-



Ryc. 15: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków śmiałek-bliźniczka, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 15: Statistical significance of reflectance differences for Deschampsia-Nardus species, with significance level of p<0.05



Ryc. 16: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków kosmatka-sit, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 16: Statistical significance of reflectance differences for Luzula-Juncus species, with significance level of p<0.05

nymi gatunkami na podstawie krzywych spektralnych będzie ograniczona. Powyższe wykresy określają zatem możliwości tego typu danych, a nie ich rzeczywistą przydatność, która jest uzależniona od docelowej rozdzielczości użytej w klasyfikacji.

Wyniki klasyfikacji lotniczych zobrazowań hiperspektralnych

Po przeprowadzeniu klasyfikacji treści zdjęć hiperspektralnych wszystkimi metodami opisanymi we wcześniejszych rozdziałach, uzyskano szereg obrazów charakteryzujących występowanie na badanym obszarze gatunków roślin objętych analizami. Każdy z gatunków, dla danej metody klasyfikacji, zaprezentowany został

luzula nardus 0.8 współczynnik odbicia Reflection coefficient b b b 0.2 0.0 300 500 700 900 1100 1300 1500 1700 1900 2100 2300 2500 długość fali wavelenght [nm]

Ryc. 17: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków kosmatka-bliźniczka, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 17: Statistical significance of reflectance differences for Luzula-Nardus species, with significance level of p<0.05



Ryc. 18: Wykres statystycznej istotności różnic w odbiciu spektralnym dla pary gatunków bliźniczka-sit, na poziomie istotności p<0.05

Fig. 18: Statistical significance of reflectance differences for Nardus-Juncus species, with significance level of p<0.05

na pojedynczej mapie, przedstawiającej stopień pokrycia danego obszaru przez ten gatunek. Uzyskane obrazy zostały następnie poddane szczegółowej analizie mającej na celu ocenę dokładności wyznaczenia zasięgu poszczególnych gatunków. Najlepsze wyniki uzyskano dla klasyfikacji przeprowadzonej metodą Spectral Angle Mapper, dlatego też zostaną one omówione dokładniej niż wyniki pozostałych metod klasyfikacji.

Wyniki klasyfikacji metodą Spectral Angle Mapper (SAM)

Wyniki otrzymane w procesie klasyfikacji metodą Spectral Angle Mapper dały najlepsze rezultaty spośród wszystkich metod zastosowanych w niniejszej pracy. W efekcie otrzymano 5 obrazów w odcieniach szarości, z których każdy reprezentuje jedną z analizowanych



Ryc. 19: Histogram statystycznie istotnych różnic pomiędzy średnimi wartościami współczynnika odbicia dla 5 badanych gatunków, obliczonych za pomocą testu t Studenta (zielona linia reprezentuje przykładową krzywą spektralną roślinności) Fig. 19: Histogram of statistically significant differences between reflectance mean values of 5 analysed species, calculated with t Student statistical test (green line represents spectral reflectance curve of vegetation)

klas. Przedstawione są one na ryc. 20, ryc. 21, ryc. 22, ryc. 23 oraz ryc. 24 odpowiednio dla kosmatki brunatnej, trzcinnika owłosionego, śmiałka pogiętego, situ skuciny oraz bliźniczki psiej trawki. Na prezentowanych obrazach wartości pikseli reprezentują kątową odległość spektralną od wektora spektralnego reprezentującego daną klasę. Ciemniejszy odcień na obrazie odpowiada niższym wartościom piksela, natomiast odcień jaśniejszy – wartościom wyższym. Zatem im ciemniejszy jest dany piksel, tym większe jest jego podobieństwo do krzywej spektralnej reprezentującej daną klasę. Większe jest też wtedy prawdopodobieństwo, że piksel ten powinien do wspomnianej klasy należeć.

Wyniki klasyfikacji metodą Linear Spectral Unmixing (LSU)

Wyniki otrzymane dzięki zastosowaniu liniowego spektralnego rozmieszania pikseli jest w dużej mierze zależna od zastosowanych charakterystyk spektralnych obiektów uznanych za spektralnie czyste. W niniejszych badaniach do tego celu wykorzystano dane zebrane w lokalnej bibliotece spektralnej w trakcie badań terenowych.

Wyniki klasyfikacji wykonanej metodą LSU nie dały satysfakcjonujących rezultatów. Taki wynik jest najprawdopodobniej spowodowany niedostateczną liczbą wejściowych obiektów czystych spektralnie. W zastosowanej metodzie zakłada się bowiem, że znane są wszystkie elementy występujące na danym terenie, a brak określenia charakterystyki spektralnej któregoś z nich może prowadzić do niedokładności w oszacowaniu udziału innych obiektów w tworzeniu wartości pikseli mieszanych. Użyte w przedstawionych badaniach krzywe spektralne reprezentują 5 głównych gatunków mu-

1,0



Ryc. 20: Wynik klasyfikacji metodą Spectra Angle Mapper dla kosmatki brunatnej (ciemniejszy ton oznacza mniejszą odległość kątową)

Fig. 20: Spectral Angle Mapper classification result for Luzula spadicea (darker areas indicate smaller spectral angle)



Ryc. 21: Wynik klasyfikacji metodą Spectra Angle Mapper dla trzcinnika owłosionego(ciemniejszy ton oznacza mniejszą odległość kątową)

Fig. 21: Spectral Angle Mapper classification result for Calamagrostis villiosa (darker areas indicate smaller spectral angle)



Ryc. 22: Wynik klasyfikacji metodą Spectral Angle Mapper dla śmiałka pogiętego(ciemniejszy ton oznacza mniejszą odległość kątową)

Fig. 22: Spectral Angle Mapper classification result for Deschampsia flexuosa (darker areas indicate smaller spectral angle)



Ryc. 23: Wynik klasyfikacji metodą Spectral Angle Mapper dla situ skuciny (ciemniejszy ton oznacza mniejszą odległość kątowa)

Fig. 23: Spectral Angle Mapper classification result for Juncus trifidus (darker areas indicate smaller spectral angle)



Ryc. 24: Wynik klasyfikacji metodą Spectal Angle Mapper dla bliźniczki psiej trawki (ciemniejszy ton oznacza mniejszą odległość kątową)

Fig. 24: Spectral Angle Mapper classification result for Nardus stricta (darker areas indicate smaller spectral angle)

raw występujących na badanym obszarze. Dodatkowo, jako tło dla badanych roślin, wykorzystane zostały charakterystyki zmierzone dla zarośli borówki i kosodrzewiny oraz dla obszarów skalnych i wodnych. Oczywistym jest fakt, że na analizowanym obszarze występuje wiele innych gatunków roślin, które nie zostały włączone do badań ze względu na mniejszy udział w tworzeniu zbiorowisk roślinnych. W takiej sytuacji niemożliwe stało się poprawne rozdzielenie sygnału zarejestrowanego w danym pikselu na części składowe za pomocą prezentowanej metody LSU, gdyż brak było referencyjnych charakterystyk spektralnych wszystkich obiektów, które na tym obszarze występują.

Wyniki klasyfikacji metodą Matched Filtering (MF)

Wyniki klasyfikacji metodą MF reprezentują stopień względnego dopasowania każdego piksela do referencyjnej krzywej odbicia spektralnego reprezentowanej przez obiekty czyste spektralnie, jednocześnie wskazując na względny udział tego obiektu w tworzeniu wartości piksela. Podobnie jak w przypadku metody LSU, klasyfikacja Matched Filtering nie dała satysfakcjonujących rezultatów. Widoczne na prezentowanych obrazach jaśniejsze obszary wskazują na miejsca, gdzie udział danego obiektu, dla którego dana mapa została wykonana, jest względnie wysoki. Dokładna analiza jest jednak w znacznej mierze utrudniona ze względu na dużą ziarnistość występującą na obrazach wynikowych. Dlatego też obrazy te nie były poddawane szczegółowym analizom dokładności.

Wyniki klasyfikacji metodą Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)

Wyniki klasyfikacji metodą MTMF, przedstawiają względny udział pięciu badanych gatunków roślin w powierzchni reprezentowanej przez każdy piksel. Są one bardzo zbliżone do wyników uzyskanych za pomocą algorytmu MF. Dodatkowo, opracowane zostały również wyniki przedstawiające tak zwaną "niewykonalność" (ang. infeasibility), czyli parametr określający prawdopodobieństwo, że dany piksel na obrazie wynikowym w rzeczywistości może należeć do innej klasy roślinności niż został przypisany. Im to prawdopodobieństwo jest wyższe, tym wartość parametru niewykonalności też jest wyższa. Analizując zatem obraz wynikowy uzyskany poprzez zastosowanie metody MTMF należy jednocześnie uwzględnić zarówno wartość piksela przedstawiającą udział danego gatunku, jak też niewykonalność.

Podobnie jak w przypadku metody MF, tu również duża ziarnistość obrazów uniemożliwiła poprawną interpretację wyników i ocenę dokładności klasyfikacji. Wyniki te nie zostały zatem poddane dalszym szczegółowym analizom.

Konstrukcja hiperspektralnej mapy roślinności rzeczywistej

Przedstawione w poprzednim rozdziale wyniki pokazują, że najlepsze rezultaty w identyfikacji i kartowaniu badanych gatunków muraw alpejskich uzyskano przy zastosowaniu metody Spectral Angle Mapper. Różnice w jakości uzyskanych wyników między tą metodą a metodami pozostałymi są na tyle istotne, że w dalszej części pracy analizie poddane zostały tylko wyniki uzyskane metodą SAM.

Pierwszym etapem była analiza wyników otrzymanych dla różnych progów określających przynależność do danej klasy. W zależności od jego wielkości różna jest powierzchnia zajmowana przez analizowaną klasę. Należy przy tym zauważyć, że mimo odpowiadających sobie powierzchni zajmowanych przez dany gatunek na mapie roślinności rzeczywistej i według klasyfikacji SAM, rozmieszczenie przestrzenne poszczególnych płatów może się różnić. Porównując mapę będącą rezultatem przeprowadzenia klasyfikacji treści lotniczych obrazów hiperspektralnych z mapą roślinności rzeczywistej wykonaną tradycyjnymi metodami w terenie łatwo jest stwierdzić, że stosując np. próg o wartości 0,07 w przypadku kosmatki brunatnej, obszary wskazujące tę klasę na obu mapach różnią się między sobą. Wynika z tego pytanie, czy dane z klasyfikacji metoda SAM moga być porównywane z nanoszonymi na podkład topograficzny granicami zbiorowisk roślinnych. Między mapami pokrycia terenu sporządzonymi tradycyjnymi metodami kartograficznymi a odrysami ze zdjęć lotniczych (kalkami interpretacyjnymi wykonywanymi w ramach niezależnych badań) istnieje znaczna różnica wyznaczanych powierzchni tych samych elementów topograficznych. Biorac pod uwage charakter zdjęć lotniczych i ich wierne odwzorowanie rzeczywistości można przyjąć, iż pewniejszym źródłem informacji pozostaje obraz lotniczy. Mapa roślinności rzeczywistej Doliny Gąsienicowej posłużyła jedynie do wyznaczenia optymalnego progu przynależności pikseli do klas poszczególnych gatunków roślinności. Wynik klasyfikacji wykonanej według powyższych założeń przedstawiony jest na ryc. 25. Przedstawiono na niej występowanie na badanym obszarze kosmatki brunatnej, trzcinnika owłosionego, śmiałka pogietego, situ skuciny oraz bliźniczki psiej trawki. Do ich prezentacji dobrano próg wynoszący 0,04. Oznacza to, że wszystkie piksele, których kątowa odległość spektralna od wektora reprezentującego daną klasę jest równa bądź niższa od tej wartości, zostały przydzielone do tej klasy.

Wiarygodność hiperspektralnej mapy roślinności rzeczywistej

Uzyskane w wyniku przeprowadzenia klasyfikacji obszary reprezentujące poszczególne gatunki muraw badane w niniejszej pracy poddano analizie mającej na celu oszacowanie dokładności użytej metody. Wyniki uzyskane w trakcie oszacowania dokładności przeprowadzonych klasyfikacji wskazują na metodę Spectral Angle Mapper jako najbardziej przydatną w rozróżnianiu gatunków muraw alpejskich. Pozostałe metody klasyfikacji zastosowane w trakcie niniejszych badań nie dały tak zadowalających rezultatów. Pozwoliły one jednak dostrzec, jak wiele trudności i problemów związanych jest ze szczegółową identyfikacją gatunków roślin wysokogórskich o podobnym charakterze.

Zastosowany sposób oceny wyników uzyskanych poprzez zastosowanie różnych metod klasyfikacji polega na porównaniu rezultatów z obszarami testowymi, wyznaczonymi w terenie dla każdego z analizowanych gatunków. Sposób ten, mimo swoich niedoskonałości wynikających z małej liczby obszarów testowych wykorzystywanych do porównania, daje możliwość oceny potencjału wykorzystanych danych i metod w identyfikacji badanych gatunków roślin. W przypadku tej metody istnieje zróżnicowanie wyników – część gatunków idealnie pokrywa się z rezultatem klasyfikacji, część natomiast tylko częściowo. Dokładność klasyfikacji, określana dla poszczególnych gatunków, jest zróżnicowana. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, iż jest ona zależna od poziomu progu zastosowanego po klasyfikacji w procesie określania obszarów należących do danej klasy. W zależności od zastosowanego progu, obszar przydzielony do danej klasy może zajmować różna powierzchnię.

Wyniki uzyskane poprzez zastosowanie opisanej metody oceny dokładności klasyfikacji wskazują na spore możliwości identyfikacji za pomoca algorytmu SAM. Najwyższe dokładności uzyskane zostały dla kosmatki brunatnej (ryc. 26). Obszary testowe, zaznaczone na mapie kolorem czerwonym, idealnie pokrywają się z obszarami, które w wyniku zastosowania metody Spectral Angle Mapper okazały się najbliższe klasie kosmatki brunatnej (oznaczone kolorem czarnym). Przy zastosowaniu progu nawet 0.12 żaden z pozostałych poligonów testowych odpowiadających innym badanym gatunkom nie został wskazany jako obszar zajmowany przez kosmatkę brunatną. Wynik ten jest praktycznie idealny - brak jest jakiegokolwiek wymieszania z innymi gatunkami analizowanymi w pracy. Dla trzcinnika owłosionego również uzyskana została wysoka zgodność z polami testowymi (ryc. 27), chociaż dopasowanie nie jest już tak dobre. Na trzy poligony reprezentujące ten gatunek we wszystkich przypadkach stwierdzono zgodność, mimo że pokrycie nie wystąpiło na całej ich powierzchni. W tym przypadku jednak jako trzcinnik wyznaczone zostały także obszary w rzeczywistości porośnięte przez sit skucinę.

Mniej obiecująco wyglądają możliwości prezentowanej metody hiperspektralnej w kartowaniu pozostałych analizowanych gatunków. W przypadku bliźniczki psiej trawki tylko w jednym z dwóch poligonów testowych wystąpiła zgodność z wynikiem klasyfikacji. Sytuacja ta przedstawiona jest na ryc. 28, która prezentuje poligony testowe dla tego gatunku na tle wyniku klasyfikacji. Pozostałe badane gatunki roślin nie zostały przy zadanym progu zidentyfikowane jako bliźniczka psia trawka, co świadczy o wysokim poziomie dokładności użytkownika.

W przypadku situ skuciny na trzy poligony testowe w dwóch uzyskano dość wysoką zgodność - ponad połowa każdego z nich pokrywa się z wynikami klasyfikacji dla progu 0,04 (ryc. 29). Trzeci z poligonów nie został natomiast wskazany przez wynik klasyfikacji. Jego kątowa odległość spektralna jest na tyle duża, że po zastosowaniu progu na wyższym poziomie rozszerzającym obszar wskazany przez wynik klasyfikacji na ten poligon, inne obszary testowe reprezentujące pozostałe analizowane gatunki również zostają wskazane jako sit skucina. Wyniki klasyfikacji dla tego gatunku wykazuja wysoka skuteczność z punktu widzenia producenta, bowiem aż dwa z trzech poligonów testowych zostały wskazane jako pożądana klasa. Jednak z punktu widzenia użytkownika wynikowej mapy rezultat nie jest już tak dobry, ze względu na fakt, iż także dwa poligony testowe reprezentujące bliźniczkę psią trawkę zostały zaliczone do klasy situ (przy optymalnie dobranych progach). Rezultaty te potwierdzają również wyniki statystycznych analiz różnic średnich z pomiarów terenowych, które w przypadku pary sit-bliźniczka wykazały brak istotności w zakresie od promieniowania widzialnego (z wyłączeniem początku zakresu "red edge") aż do długości fali około 1900nm.

Poligony testowe śmiałka pogiętego prezentują umiarkowany stopień dopasowania spośród wszystkich pięciu analizowanych gatunków (ryc. 30). Z dwóch obszarów sprawdzających, zgodność uzyskano w jednym z nich. Gatunek ten najbardziej mieszał się z bliźniczką psią trawką. Nie jest to jednak niespodziewany efekt, gdyż analizy statystyczne wskazują jednoznacznie na bardzo małe możliwości rozróżnienia między tymi dwoma gatunkami.

Przedstawione powyżej wyniki, prezentujące skuteczność zastosowanej metody w teledetekcyjnym rozróżnianiu gatunków trawiastych, powinny być rozpatrywane w aspekcie ich zróżnicowania spektralnego. Nie jest bowiem problemem, przy obecnym poziomie zaawansowania technik teledekcyjnych, rozróżnienie obiektów charakteryzujących się jednoznaczną, wysoce specyficzną odpowiedzią spektralną. Świadczy to o tym, że techniki hiperspektralne prawidłowo identyfikuja jednolite powierzchnie zajmujące zwarte obszary. W przypadku roślinności muraw alpejskich jest to trudne przede wszystkim dlatego, iż istnieje duże prawdopodobieństwo zarejestrowania odpowiedzi spektralnej jednocześnie od kilku gatunków roślin, spowodowane faktem, iż występują one w zbiorowiskach roślinnych, a nie monokulturach. Tak więc wskazane na mapie hiperspektralnej miejsca należy oceniać jako te, w których może dominować dany gatunek, ale może on również występować wspólnie z innymi gatunkami roślinności alpejskiej. W przypadku gatunków muraw alpejskich mamy także do czynienia z obiektami o bardzo zbliżonej charakterystyce spektralnej. Dlatego też otrzymane wyniki, zagregowane w tabeli 3, należy traktować jako satysfakcjonujące.



Ryc. 25: Wynik klasyfikacji metodą SAM dla 5 analizowanych gatunków łącznie Fig. 25: SAM classification results for 5 analysed species



Ryc. 26: Poligony kosmatki brunatnej (czerwone poligony) na tle wyników klasyfikacji dla tego gatunku (czarne obszary) Fig. 26: Polygons of Luzula spadicea (red) with classification results for this species in background (black)



Ryc. 27: Poligony trzcinnika owłosionego (czerwone poligony) na tle wyników klasyfikacji dla tego gatunku (czarne obszary) Fig. 27: Polygons of Calamagrostis villiosa (red) with classification results for this species in background (black)



Ryc. 28: Poligony bliźniczki psiej trawki (zielone poligony) na tle wyników klasyfikacji dla tego gatunku (czarne obszary) Fig. 28: Polygons of Nardus stricta (red) with classification results for this species in background (black)



Ryc. 29: Poligony situ skuciny (czerwone poligony) na tle wyników klasyfikacji dla tego gatunku (czarne obszary) Fig. 29: Polygons of Juncus trifidus (red) with classification results for this species in background (black)

W niniejszej pracy podjęto również próbę porównania otrzymanych wyników z mapą topograficzną w skali 1:10000 oraz istniejącą mapą roślinności rzeczywistej, również w skali 1:10000. W pierwszym przypadku porównanie to miało na celu określenie dokładności dopasowania granic przestrzennych obiektów, które maja swoją reprezentację na mapach topograficznych i zostały jednocześnie wydzielone w trakcie przeprowadzania klasyfikacji nadzorowanej. Znalazły się wśród nich takie obiekty jak kosodrzewina, zbiorniki wodne oraz obszary skał. Porównanie polegało na ocenie wizualnej, dokonywanej po nałożeniu warstwy reprezentującej wynik klasyfikacji na mapę topograficzną. Najwyższą zgodność zaobserwowano w przypadku zbiorników wodnych, które tylko w znikomej części mieszały się z obszarami silnie zacienionymi.

Zaobserwowana zgodność przebiegu granic wyżej opisanych obiektów z mapą będącą materiałem tworzonym na podstawie bezpośrednich badań terenowych, świadczy pośrednio o poprawności zastosowanej metody klasyfikacji, która wykorzystując charakterystyki spektralne pomierzone w terenie pozwoliła na precyzyjne wydzielenie obiektów przez nie reprezentowanych. Na tej podstawie można założyć, że podejście zastosowane do wydzielenia analizowanych w niniejszej pracy gatunków muraw alpejskich również jest poprawne metodologicznie.

Zestawienie wyników klasyfikacji metodą SAM z istniejąca mapą roślinności rzeczywistej w skali 1:10000 miało na celu analizę porównawczą oraz ocenę zgodno-

ści obu produktów. Porównanie to jednak napotkało na wiele trudności, wynikających z różnego charakteru obu źródeł informacji. Głównym problemem okazała się niezgodność przestrzenna. Mapa roślinności rzeczywistej, mimo swojej niewatpliwej wartości merytorycznej i bogatej zawartości, ze względu na charakter wykonywania nie jest tak dokładna geometrycznie jak hiperspektralne zdjęcia lotnicze, na podstawie których wykonana została klasyfikacja metoda SAM. Powodowało to duże niezgodności zasięgów poszczególnych gatunków muraw alpejskich, widoczne przede wszystkim w pobliżu granicy ich występowania. Fakt ten sprawia, że przy porównaniu obu map powstają duże błędy spowodowane źle dopasowaną geometrią, a nie niezgodnością występowania poszczególnych gatunków. Kolejnym elementem utrudniającym porównanie obu rodzajów materiałów jest inny charakter wydzielenia obiektów na obu mapach. Mapa roślinności rzeczywistej tworzona metodą tradycyjną przedstawia zbiorowiska roślinne, a więc asocjacje wielu gatunków, spośród których jeden lub więcej jest charakterystyczny bądź dominujący. Wyniki klasyfikacji SAM przedstawiają natomiast mapy występowania poszczególnych gatunków niezależnie, wskazując pośrednio na ich udział na danej powierzchni. Dopiero kompilując poszczególne mapy udziałów w jedna całość, z zastosowaniem indywidualnych progów dla każdego gatunku wchodzacego w skład mapy wynikowej, można utworzyć bądź mapę dominujących gatunków, bądź też pokusić się o stworzenie mapy zbiorowisk roślinnych. W ostatnim przypadku



Ryc. 30: Poligony śmiałka pogiętego (czerwone poligony) na tle wyników klasyfikacji dla tego gatunku (czarne obszary) Fig. 30: Polygons of Deschampsia flexuosa (red) with classification results for this species in background (black)

	Kosmatka brunatna Luzula spadicea	Trzcinnik owłosiony Calamagrostis villiosa	Bliźniczka psia trawka Nardus stricte	Sit skucina Juncus trifidus	Śmiałek pogięty Deschampsia flexuosa
Poligony testowe Test sites	2	3	2	3	2
Poligony zgodne Matched sites	2	3	1	2	1
Udział % Percentage %	100	100	50	66	50

Tabela 3: Zestawienie wyników porównania z obszarami testowymi Table 3: Results of comparison with test sites

trzeba jednak pamiętać o tym, że wynikiem przeprowadzenia klasyfikacji SAM są mapy występowania stworzone dla ograniczonej liczby dominujących gatunków. W rzeczywistości na badanym obszarze gatunków jest dużo więcej. Dlatego też mapy hiperspektralne mogą przyczynić się przede wszystkim do uszczegółowienia map sporządzonych metodami tradycyjnymi.

Ocena przydatności metody hiperspektralnej w badaniu roślinności wysokogórskiej

Wyniki przedstawione w pracy są swego rodzaju oceną możliwości danych hiperspektralnych w identyfikacji zbiorowisk roślinnych wybranych gatunków wysokogórskich reprezentujących roślinność trawiastą. Wyniki te możemy podzielić na dwie grupy: te, które odnoszą się do terenowych pomiarów charakterystyk spektralnych oraz te, które odnoszą się do rezultatów otrzymanych na podstawie analizy lotniczych zdjęć hiperspektralnych.

Pierwsza grupa wyników jednoznacznie wskazuje, że w metodach hiperspektralnych leży ogromny potencjał w zakresie wykrywania poszczególnych gatunków. Jest to szczególnie dobrze widoczne po zastosowaniu testów statystycznych określających istotność różnic średnich charakterystyk spektralnych zebranych w terenie dla badanych gatunków. Z testów tych wynika bowiem, że praktycznie we wszystkich zakresach spektralnych używanych przez skaner DAIS do rejestracji promieniowania odbitego możliwe jest rozróżnienie dwóch lub więcej gatunków na poziomie istotności wynoszącym 0.05. Poziom ten oznacza, że istnieje zaledwie 5% prawdopodobieństwo, że powyższe stwierdzenie o różnicy średnich jest błędne i wynika jedynie z przypadku.

Dokładna analiza wykresów istotności stworzonych dla pomiarów naziemnych pozwala również na określenie, które gatunki są łatwiejsze, a które trudniejsze do identyfikacji. Jest to możliwe poprzez stwierdzenie liczby kanałów spektralnych, w których występują istotne statystycznie różnice średnich. Najwięcej możliwości daje zatem zestawienie trzcinnika ze śmiałkiem oraz trzcinnika z kosmatką. Te kombinacje gatunków charakteryzują się bowiem największą liczbą kanałów spektralnych o istotnych statystycznie różnicach średnich. Bardzo dobrze prezentują się również pary: trzcinnik i bliźniczka, śmiałek i kosmatka oraz kosmatka i sit. Trochę gorzej zestawienie takie wyglada w przypadku zestawienia trzcinnika i situ, gdzie istotne statystycznie różnice średnich występują głównie w zakresach widzialnym i bliskiej podczerwieni, do zakresu około 1400 nm. Na podobnym poziomie kształtuje się ten wskaźnik również w przypadku śmiałka i situ oraz bliźniczki i situ, z tym jednak, że w tych przypadkach to zakresy dalsze, powyżej 1400 nm, pozwalają na lepsza identyfikację tych gatunków. Najbardziej zbliżone do siebie i jednocześnie najtrudniejsze do rozróżnienia jest zestawienie śmiałka i bliźniczki. W tym wypadku jedynie w kilku kanałach spektralnych istnieje potwierdzona statystycznie różnica w wartościach średnich. Jest to głównie zakres w okolicach 700 nm, odpowiadający zakresowi występowania "red edge", a także zakres 2400-2500 nm, w którym spektralny współczynnik odbicia dla bliźniczki gwałtownie maleje. Zakres około 1900 nm również jest potencjalnym zakresem, w którym istnieje statystycznie istotna różnica średnich, ale należy przy tym pamiętać, iż jest to zakres absorpcji przez parę wodną, co powoduje z jednej strony niski poziom współczynnika odbicia, a dodatkowo wprowadza dużą ilość szumów. Spowodowany tym gwałtowny spadek stosunku sygnału do szumu może w dużej mierze wpływać na powstawanie istotnych statystycznie różnic w średnich, będących skutkiem wspomnianych zakłóceń.

Możliwości zautomatyzowanego kartowania roślinności wysokogórskiej

Możliwość kartowania roślinności jest bezpośrednim następstwem możliwości jej identyfikacji, bowiem od poprawnej identyfikacji danego gatunku zależy poprawność otrzymanej mapy wynikowej. Przy interpretacji uzyskanej dokładności należy wziąć pod uwagę kilka czynników, które mogły wpłynąć na otrzymane wyniki. Przede wszystkim należy pamiętać, że krzywe spektralne poszczególnych gatunków roślin analizowanych w niniejszych badaniach są do siebie bardzo zbliżone. Powoduje to poważne zaburzenia w przebiegu procesów klasyfikacji wykorzystujących metody porównujące ze sobą krzywe spektralne obiektów czystych spektralnie (ang. endmembers). W takim przypadku metody te nie

są w stanie wykazać na tyle istotnych różnic występujących pomiędzy poszczególnymi typami roślin, które to różnice pozwalałyby na jednoznaczne przypisanie danego piksela do konkretnego gatunku. Problem ten nasila się wraz ze wzrostem liczby elementów o zbliżonej charakterystyce spektralnej. Niedawne badania przeprowadzone między innymi w Portugalskim Instytucie Geograficznym (Carrão i in. 2006) wykazały, że największe trudności w klasyfikacji napotkano w przypadku naturalnych zbiorowisk trawiastych, dla których dokładność klasyfikacji obrazu wykonanego skanerem MODIS o 7 kanałach spektralnych (459-2155 nm) wyniosła niecałe 30% przy ogólnej całkowitej dokładności wynoszącej prawie 90%. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że badania te były prowadzone na obszarach nizinnych, a więc cały proces analizy obrazów nie był obarczony dodatkowymi błędami wynikającymi ze zróżnicowanej rzeźby terenu.

Kolejna rzecz, o której należy wspomnieć przy analizie dokładności, dotyczy samych danych wykorzystanych w badaniach. Dane ze skanera DAIS 7915 mają stosunkowo duży procent kanałów charakteryzujących się niską wartością stosunku sygnału do szumu. Współczynnik ten określa jakość danych: im jest niższy tym większy negatywny wpływ mają szumy rejestrowane w trakcie wykonywania zobrazowania. W przypadku badań opisywanych w niniejszym opracowaniu problem ten wystąpił w wielu kanałach, powodując jednocześnie stratę informacji spektralnej wywołanej koniecznością odrzucenia zaszumionych kanałów. Należy jednak przypuszczać, że w miarę rozwoju technik hiperspektralnych, w szczególności technologii wykonywania sensorów wykorzystywanych do rejestracji obrazów hiperspektralnych, wspomniany problem stanie sie dużo mniej uciążliwy, a z czasem zniknie. Już teraz istnieją bowiem skanery lotnicze charakteryzujące się dużo lepszym wskaźnikiem stosunku sygnału do szumu i przynoszące bardzo dobre rezultaty w badaniach Ziemi.

Podsumowanie i wnioski

W opracowaniu przedstawiono metody badawcze wykorzystania hiperspektralnych danych naziemnych i obrazów lotniczych do identyfikacji i kartowania roślinności wysokogórskiej. Wykorzystano do tego celu algorytmy specjalnie dostosowane do dużej liczby kanałów spektralnych. Badaniami prowadzonymi we fragmencie Doliny Gąsienicowej objęto pięć gatunków roślinności trawiastej: kosmatkę brunatną (*Luzula spadicea*), trzcinnik owłosiony (*Calamagrostis villiosa*), śmiałka pogiętego (*Deschampsia flexuosa*), sit skucinę (*Juncus trifidus*) oraz bliźniczkę psią trawkę (*Nardus stricta*).

Uzyskane wyniki, zgodnie z założonym celem pracy świadczą o tym, że pomiary naziemne w dobrym, a co najmniej dostatecznym stopniu pozwalają na rozróżnienie badanych gatunków roślin. Przeprowadzone testy statystyczne badające istotność statystyczną różnic średnich wartości odbicia spektralnego jednoznacznie pokazują, że nawet w przypadku bardzo podobnych spektralnie gatunków, takich jak śmiałek pogięty i bliźniczka psia trawka, istnieje możliwość rozróżnienia pomiędzy gatunkami na podstawie wybranych zakresów spektralnych. Zestawienie tych wyników pokazuje, że najbardziej przydatne do tego celu zakresy znajdują się w okolicach tzw. "red edge", a więc obszaru na pograniczu zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni, gdzie gwałtownie wzrasta odbicie promieniowania przez rośliny. Pozwoliło to stwierdzić, że w danych hiperspektralnych leży duży potencjał, który może zostać wykorzystany do kartowania roślinności, a także określenia jej kondycji (Zagajewski i in., 2004).

Wyniki statystycznych analiz danych uzyskanych w terenie wskazuja tym samym, że w dalszym postępowaniu zmierzającym do wykonania mapy roślinności rzeczywistej metodą hiperspektralną można zastosować hiperspektralne dane obrazowe pozyskane z pułapu lotniczego za pomoca skanera DAIS 7915. Dotyczy to przede wszystkim dwóch gatunków spośród badanej roślinności: kosmatki brunatnej i trzcinnika owłosionego, dla których uzyskano wysoką zgodność wyników klasyfikacji i obszarów testowych wyznaczonych w terenie. W przypadku pozostałych gatunków zgodność nie była już tak dobra. Dotyczy to zwłaszcza wyników uzyskanych w przypadku śmiałka pogiętego, czego można było się spodziewać po analizach statystycznych krzywych spektralnych pobranych w terenie. Wyniki terenowych pomiarów spektrometrycznych są o wiele dokładniejsze od pomiarów z pułapu lotniczego ze względu na fakt, iż praktycznie nie występuje tu osłabienie sygnału spowodowane obecnością atmosfery. Dlatego też szerokość kanałów spektralnych jest mniejsza niż w przypadku skanerów lotniczych. Dane zebrane w terenie są z reguły danymi referencyjnymi i służą głównie do wstępnego wytypowania zakresów spektralnych do analizy obrazów lotniczych oraz do bezinwazyjnej oceny kondycji roślin. Dane zebrane z pułapu lotniczego dają charakterystyki spektralne osłabione poprzez grubość i stan atmosfery, modyfikującej w sposób niekorzystny dane spektralne. Poza tym mają mniejszą rozdzielczość przestrzenną. Stąd też sprawdzenie danych lotniczych pomiarami naziemnymi z zasady daje wynik, który w pewnym sensie deprecjonuje dane lotnicze. Mimo to uzyskane wyniki oceny jakości mapy roślinności rzeczywistej opracowanej metodą hiperspektralną wypadło nadspodziewanie dobrze.

Mając na uwadze przedstawione powyżej spostrzeżenia, jak również fakt, iż badane gatunki są do siebie bardzo podobne, należy stwierdzić, że uzyskane w niniejszej pracy wyniki klasyfikacji treści lotniczych obrazów hiperspektralnych z sensora DAIS pozwalają i upoważniają do wykonania na ich podstawie mapy badanych gatunków roślinności wysokogórskiej. Ze względu na swój charakter, który określa procentowy udział poszczególnych gatunków w danej powierzchni, wyniki te mogą również posłużyć do ulepszenia istniejących opracowań prezentujących występowanie roślinności, poprzez ich uszczegółowianie zarówno pod względem treści, jak też geometrii.

Literatura

- Bielecka E., 1986: Photointerpretation survey of changes in the range of the Tatra subalpine forests. Miscellanea Geographica, Warszawa
- Bielecka E., Fedorowicz-Jackowski W., Witkowska E., 1994: An integrated geographical information system for managment of the national and landscape parks, nature reserves and other protected area. GIS for environment, Kraków, 25 - 27 November 1993 (Pilot Study for the Tatra National Park, Proceedings of the IALE Conference, Warsaw, October, 1993)
- Carrão H., Gonçalves P., Caetano M., 2006: Use of intra-annual satellite imagery time-series for land cover characterization purpose. Prezentacja na 26. Sympozjum EARSeL, 29 maja-02 czerwca 2006, Warszawa
- Chapelle E. W., Frank M. W. Jr, Newcomb W. W., McMurtrey J. E. III, 1985, Laser-induced fluorescence of green plants. 3: LIF spectral signatures of five major plant types, Applied Optics, Vol. 24, No. 1
- Jakomulska A., 1999a: Zastosowania logiki rozmytej w klasyfikacji nadzorowanej. Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji, T.27, PTG KTŚ, Warszawa

- Jakomulska A., 1999b: Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr w świetle badań teledetekcyjnych [maszynopis]. Praca doktorska pod kierunkiem prof. dr hab. Jana R. Olędzkiego, wykonana w Zakładzie Teledetekcji Środowiska WGiSR UW, Warszawa
- Richter R., Schläpfer D., 2002: Geo-atmospheric Processing of Airborne Imaging Spectrometry Data. Part 2: Atmospheric/Topographic Correction. International Journal of Remote Sensing, Nr 23 (13), str. 2631-2649, Londyn
- RSI Inc., 2001: Envi User's Manual.
- Ryan A., 1997: The light measurement handbook. International Light Inc., Newburyport, USA
- Schläpfer D., Richter R., 2002: Geo-atmospheric Processing of Airborne Imaging Spectrometry Data. Part 1: Parametric Ortho-Rectification Process. International Journal of Remote Sensing, Nr 23 (13), str. 2609-2630, Londyn
- Skidmore A.K., Schmidt K.S., 1998: Mapping rangeland vegetation using hyperspectral vegetation spectra. Materiały konferencyjne z 1st EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy, University of Zurich, Szwajcaria, str. 285-297
- StatSoft, Inc., 2004: Electronic Statistics Textbook. StatSoft, Tulsa, (dostępny na stronie: http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html)
- Zadeh L. A., 1965: Fuzzy Sets. Information and Control, 8, 338-353
- Zagajewski B., Sobczak M., Wrzesień M., 2004: Badania górskich zbiorowisk roślinnych z użyciem technik hiperspektralnych. Przegląd Geofizyczny, XLIX, 3-4, Warszawa



Marcin Sobczak jest absolwentem Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Studia magisterskie ukończył w Zakładzie Teledetekcji Środowiska (obecnie Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji). W roku 2002 stypendysta programu Sokrates-Erasmus na Universidad Complutense de Madrid. W roku 2004 i 2005 uzyskał stypendium dla młodych naukowców Fundacji na rzecz Nauki Polskiej. Interesuje się wykorzystaniem geoinformacji w zarządzaniu infrastrukturą liniową, a także nowoczesnymi technikami przetwarzania obrazów lotniczych i satelitarnych, ze szczególnym uwzględnieniem spektroskopii obrazowej. Tematyką zdjęć hiperspektralnych zajmuje się aktywnie od 2002 roku.

E-mail: msobczak@uw.edu.pl