

Wstęp

Tereny górskie stanowią jeden z najcenniejszych, a jednocześnie najtrudniejszych obiektów badawczych. Duża wartość przyrodnicza ekosystemów górskich wynika z obecności wysoce wyspecjalizowanych biotopów o niewielkiej tolerancji na zmiany w przyrodzie oraz mnogości powiązań między żywymi i abiotycznymi komponentami środowiska (Falińska, 1997). Przejawia się to w ogromnej różnorodności i skomplikowanej strukturze przestrzennej roślinności górskiej, która jest bardzo dobrym wskaźnikiem aktualnego stanu i procesów zachodzących w środowisku przyrodniczym gór. Badania nad roślinnością pociągają za sobą szereg problemów, dotyczących zarówno przedmiotu badań, jak i stosowanych metod. Problemy te są spowodowane głównie trudnościami eksploracyjnymi, długim okresem zalegania pokrywy śnieżnej oraz krótkim i zmiennym sezonem wegetacyjnym. Wszystko to wydłuża czas potrzebny do zebrania odpowiednich i statystycznie wiarygodnych informacji. Do niedawna problemem był dostęp do precyzyjnej lokalizacji obiektów (brak DGPS) oraz szczegółowych, wiarygodnych materiałów podkładowych i referencyjnych.

Teledetekcyjne badania obszarów wysokogórskich są także zaliczane do najtrudniejszych, gdyż:

- a) urozmaicona rzeźba terenu wpływa na kierunek odbicia promieniowania elektromagnetycznego. Na zdjęciach obserwuje się to w postaci zróżnicowanego oświetlenia powierzchni do- i odsłonecznych. W efekcie daje to zmienne charakterystyki spektralne obiektu, który znajduje się na różnych ekspozycjach terenu;
- b) duże deniwelacje terenu oraz heterogeniczność środowiska zwiększają liczbę mieszanych pikseli (miksele);
- c) wraz ze wzrostem bezwzględnej wysokości maleje miąższość atmosfery. Zwiększa to dopływ wysoce energetycznego promieniowania krótkofalowego

(UV), wymuszając na roślinach znaczące przystosowania morfologii i anatomii. Najważniejsze z nich to ilościowe zmiany:

- stosunków barwników fotosyntetycznie czynnych (np. wzrost chlorofilu b oraz karotenoidów, pełniących funkcję ochronną);
- struktur komórkowych (wzrost warstwy kutikuli);
- zawartości węgla, nutrientów, celulozy, lignin oraz pokrywania liści substancjami ochronnymi, np. woskami, kutikulą, czy odpowiedniego ustawiania liści do kierunku padania promieni słonecznych (Caldwell, 1971).

Adaptacje te na tyle zmieniają własności spektralne roślin, że są rejestrowane przez sensory teledetekcyjne (Barnes i inni, 1990) i utrudniają identyfikację roślinności położonej na różnych wysokościach bezwzględnych;

- d) obszary wysokogórskie cechują się dużą dynamiką zmian pogody i częstą obecnością chmur i ich cieni. Wyklucza to fragmenty obrazów z dalszych analiz;
- e) duże zróżnicowanie środowiska utrudnia znalezienie odpowiednio dużych i homogenicznych powierzchni kalibracyjnych oraz poligonów referencyjnych o odpowiednich charakterystykach spektralnych.

Wspomniane powyżej problemy wymagają stosowania licznych algorytmów eliminujących geometryczne i atmosferyczne zniekształcenia. Zastosowanie teledetekcji hiperspektralnej¹ pozwala na znaczącą eliminację

¹ Teledetekcja hiperspektralna pozyskuje dane w dużej liczbie kanałów (np. 300 w lotniczym skanerze APEX) w wąskich zakresach spektralnych (2-10 nm) i o dużej rozdzielczości radiometrycznej (np. 15-bitowej, co równa się 32 768 poziomom szarości pomiędzy czernią i bielą) oraz w przypadku obrazów lotniczych dużej rozdzielczości terenowej (1-5 m).

szumów i pozyskanie czystych spektralnie charakterystyk analizowanych obiektów (van der Meer, de Jong, 2001). Zatem zapis sygnału odbitego od obiektów w wielu zakresach promieniowania elektromagnetycznego pozwala rejestrować cenne informacje o komponentach ekosystemu wysokogórskiego. Na podstawie uzyskanych charakterystyk spektralnych tworzy się wskaźniki teledetekcyjne, które informują o jakości badanego obszaru.

Promieniowanie elektromagnetyczne odbite, absorbowane lub transmitowane przez organy roślin, procesy fizjologiczne oraz strumienie gazów zawartych w roślinie (CO_2 , O_2 , pary wodnej) interferują na poziomie liści (Jarvis, 1993; 1995). Na poziomie rośliny procesy te są modyfikowane przez składowe atmosfery znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie liści. Wpływa na to temperatura, wilgotność, ciśnienie, wiatr, promieniowanie odbite od innych obiektów oraz rozpraszanie światła, stężenie gazów (Ball i inni, 1986). Procesy te mają podobną intensywność na tzw. *leaf boundary layer*, czyli homogenicznych powierzchniach odpowiadających liściom (*leaf clusters*) cechujących się podobnymi właściwościami spektralnymi (Anderson i inni, 2003). Na przestrzeniach pomiędzy tymi powierzchniami zachodzą interakcje z innymi obiektami, np. glebami. Na poziomie baldachimu roślinności (*canopy*) następuje ujednoczenie strumieni gazów i termiki. Wysokość takiej homogenicznej warstwy, tzw. *atmospheric boundary layer* (ABL) wynosi do 50-100 m i zależy m.in. od rodzaju powierzchni i wysokości (lasu) analizowanego zbiorowiska (Anderson i inni, 2003; Wullschlegler i inni, 2000).

Właściwości materiałów, które generują sinusoidalną falę elektromagnetyczną – charakteryzującą dany obiekt w każdym zakresie widma – nazywa się właściwościami spektralnymi obiektu. Są one rejestrowane za pomocą urządzeń aktywnych (radary, lidary) lub pasywnych (spektrometry, radiometry, skanery). W pierwszym przypadku źródło promieniowania interferującego z obiektem jest częścią zestawu pomiarowego, w drugim zaś przypadku źródłem promieniowania jest najczęściej Słońce. Właściwości spektralne obiektów rejestrowane są jako charakterystyki spektralne obiektu (krzywe odbicia spektralnego).

Teledetekcyjna identyfikacja gatunków i zbiorowisk roślinnych bazuje na rejestracji promieniowania elektromagnetycznego, interferującego ze strukturami komórkowymi, morfologią i procesami fizjologicznymi roślin. Odbywa się ono w sposób powtarzalny i charakterystyczny w ściśle określonych przedziałach widma dla poszczególnych gatunków i zbiorowisk roślinnych. Rejestracja ta odbywa się w postaci fotointerpretacyjnych cech bezpośrednich i pośrednich² (Ciołkosz i inni, 1999). Wykorzystanie sieci neuronowych do klasyfikacji roślinności pozwala bazować nie

tylko na fototonie/barwie, ale także innych cechach fotointerpretacyjnych

We współczesnych badaniach środowiska kluczowym elementem jest dostęp do aktualnych danych, które obrazują zmiany zachodzące w przyrodzie w sposób trwały, powtarzalny i obiektywny. Teledetekcja, która pozyskuje informacje o obiektach w sposób zdalny, oferuje badaczom cenne produkty. Najprostsze z nich to aktualne materiały referencyjne, np. ortofotomapy, czy wysokorozdzielcze zdjęcia satelitarne. Dostępne są także wielokanałowe dane, które pozwalają na tworzenie teledetekcyjnych wskaźników wybranych komponentów (roślinność, gleby, wody, itp.). Jedną z najważniejszych korzyści wynikających z wykorzystania danych teledetekcyjnych jest to, że zobrazowanie terenu odbywa się w stosunkowo krótkim czasie i obejmuje relatywnie duże powierzchnie. Wszystko to odbywa się według ściśle określonych procedur, powtarzalnych w czasie.

Celem niniejszej publikacji jest przetestowanie nowej metody przetwarzania danych hiperspektralnych i ich klasyfikacji symulatorem sztucznych sieci neuronowych do tworzenia map roślinności rzeczywistej terenów wysokogórskich. Cel ten wymaga zastosowania licznych, także nowatorskich rozwiązań, takich jak:

- Parametryczna korekcja geometryczna. Polega ona na obliczeniu zależności geometrycznej pomiędzy skanerem a obrazowanym terenem przedstawionym w 3D przy uwzględnieniu wszystkich właściwości układu optyczno-mechanicznego skanera oraz Numerycznego Modelu Terenu (NMT). Pozwala to na wierne odwzorowanie wielkości i lokalizacji każdego piksela (w terenach górzystych wielkość piksela ze względu na deniwelację może się znacząco zmieniać) i naniesienie ich na wyidealizowane geometrycznie zobrazowanie. Do geometryzacji niezbędne są parametry lotu samolotu z inercyjnego systemu nawigacji (INS)³, na pokładzie którego zainstalowany jest obrazujący skaner hiperspektralny;

- Pełna korekcja atmosferyczna, z uwzględnieniem normalizacji topograficznej i radiometrycznej oraz empirycznego modelowania dwukierunkowości odbicia promieniowania (BRDF – *Bidirectional Reflectance Distribution Function*). Procedura ta ogranicza wpływ orografii terenu, zmienności atmosfery oraz geometrii słońce–obiekt–detektor, co w efekcie pozwala na radiometryczne porównanie odpowiedzi spektralnych obiektów przedstawionych na różnych liniach zobrazowania lub znajdujących się na różnych ekspozycjach terenu;

- Opracowanie metody tworzenia wzorców do klasyfikacji, a także weryfikacji danych poklasyfikacyjnych. Ze

² Fotointerpretacja obrazów teledetekcyjnych bazuje na cechach bezpośrednich (fototon, barwa, struktura, tekstura, kształt, wielkość, cień obiektu) oraz pośrednich (obecność innych obiektów, cień). Kompleksowa analiza zdjęć umożliwia rozróżnienie obiektów, których identyfikacja z innych materiałów jest utrudniona, np. łąka i pastwisko, las iglasty i liściasty.

³ Pochodzących z bezwładnościowego systemu rejestracji lotu samolotu (INS – *Inertial Navigation System*) oraz różnicowego GPS. Systemy te rejestrują w czasie rzeczywistym zmiany kierunku lotu we wszystkich osiach oraz przyspieszenia i opóźnienia, a także zmiany położenia i czasu względem punktu początkowego. Do najważniejszych parametrów, które rejestrowane są w trakcie lotu, należy zaliczyć: bieżącą pozycję i linię drogi, przyspieszenia, prędkość względem Ziemi, kierunek znoszenia, prędkości i przyspieszenia kątowe we wszystkich osiach, kurs rzeczywisty i magnetyczny.

względu na dużą liczbę oraz złożoność obiektów wymagana jest statystycznie duża próba, która posłużyłaby do klasyfikacji oraz weryfikacji danych poklasyfikacyjnych;

– Opracowanie algorytmu wyboru kanałów oraz kompresji danych. Ze względu na dużą ilość danych wejściowych do klasyfikacji (72 kanały zobrazowania, wzorce do uczenia sieci oraz NMT), jednym z priorytetowych kierunków działań jest optymalny wybór jakości i ilości poszczególnych kanałów zobrazowania;

– Wybór i opracowanie metody klasyfikacji. Ze względu na złożoną strukturę danych wejściowych (dane zapisane były w postaci 15- i 16-bitowej⁴) i wyjściowych (wzorce zbiorowisk roślinnych), optymalnym algorytmem klasyfikacji jest metoda nieparametryczna, czyli uwzględniająca w procesie klasyfikacji nie tylko cechy spektralne obrazu (fototonalne), ale także strukturalne i teksturalne (przestrzenne ułożenie pikseli tworzących poszczególne obiekty). Wykorzystanie danych hiperspektralnych, cechujących się rejestracją ciągłego widma (zapisanego w wielu wąskich kanałach w pełnym zakresie widma elektromagnetycznego o dużej rozdzielczości radiometrycznej), pozwala zastosować symulatory sztucznych sieci neuronowych i analizę zbiorów rozmytych⁵. Symulatory bazujące na logice rozmytej i analizie cech nieparametrycznych dostarczają większej ilości danych do systemu klasyfikującego niż ma to miejsce w standardowych klasyfikacjach, które bazują na jasności pikseli;

– Analiza poklasyfikacyjna obejmuje standardowe procedury: geometryzacji obrazów poklasyfikacyjnych, ich wektoryzację oraz analizy statystyczne uzyskanych dokładności. Do tego celu wykorzystany został pakiet ENVI 4.6. Ocena dokładności obejmuje opracowanie macierzy błędów, współczynnika kappa oraz dokładności: całkowitej, producenta i użytkownika, niedoszacowanie oraz przeszacowanie klasyfikacji. Uzyskane wyniki prezentowane są w postaci map i tabel wartości procentowych oraz liczby pikseli każdego sklasyfikowanego zbiorowiska.

Uzasadnieniem podjęcia się zadania opracowania metody klasyfikacji danych hiperspektralnych sieciami neuronowymi w celu uzyskania mapy roślinności jest fakt, iż do chwili obecnej nie powstała szczegółowa mapa roślinności rzeczywistej polskiej części Tatr, mimo licznych i szczegółowań opracowań naukowych, które są prowadzone od początku XX w. (Szafer i inni, 1923, 1927; Pawłowski i inni, 1928; Pawłowski, 1956; Balcerkiewicz, Wojterska, 1978; Balcerkiewicz, 1984; Mirek, 1996; Kozłowska, Plit, 2002; Kozłowska, 2006). Opraco-

wanie algorytmu klasyfikacji danych hiperspektralnych pozwoli w perspektywie kilku najbliższych lat⁶ opracować dane źródłowe w postaci wstępnej wersji mapy roślinności, weryfikowanej w wyniku terenowych prac fitosocjologicznych, których efektem będzie szczegółowa mapa roślinności Tatr. Dane teledetekcyjne będą mogły także stanowić jeden z głównych elementów stałego monitoringu rozmieszczenia i kondycji roślinności tatrzańskiej.

Hipotezą badawczą niniejszego opracowania jest stwierdzenie, że zastosowanie obrazów hiperspektralnych, które charakteryzują się dużą rozdzielczością przestrzenną, spektralną oraz radiometryczną, pozwala traktować je jako dane ciągłe (ciągłość zapisu spektralnego i radiometrycznego), a to umożliwi zastosowanie symulatorów sieci neuronowych bazujących na koncepcji logiki rozmytej do klasyfikacji zbiorowisk roślinnych obszarów wysokogórskich.

Obszar badawczy objął polską część Tatr Wysokich. Szczegółowe prace terenowe prowadzone były na poligonie kluczowym Dolina Gąsienicowa. Analizie poddano 42 klasy wydzieleni; do głównych jednostek należy zaliczyć: pionierskie zbiorowiska roślin zarodnikowych, zbiorowiska porostów naskalnych, zbiorowiska piargów i żwirków, zbiorowiska wyleżyskowe (4 wydzielenia), ubogie murawy piętra alpejskiego (10 wydzieleni), kompleksy przestrzenne ubogich muraw alpejskich z innymi zbiorowiskami (3), żyzne murawy alpejskie, torfowiska i młaki (3), traworośla i ziołorośla (5), subalpejskie murawy powypasowe (4), borówczyska (4), liściaste zbiorowiska zaroślowe, subalpejskie zarośla kosodrzewiny (3), bór górnoreglowy oraz wody powierzchniowe. Na badanym obszarze dominują naturalne i półnaturalne zbiorowiska roślinne (Kozłowska, 2006).

Opracowanie automatycznych metod przetwarzania i klasyfikacji danych jest szczególnie ważne w aspekcie wykorzystania powszechnie dostępnych danych hiperspektralnych (np. Hyperion). W perspektywie 2-3 najbliższych lat powinny być dostarczane nowe dane z sensorów EnMAP oraz PRISMA. DLR⁷ oraz GFZ⁸ planują, że dane EnMAP⁹ będą udostępniane bezpłatnie. Wpłyne to niewątpliwie na wzrost zainteresowania badaniami nad wykorzystaniem technik hiperspektralnych do analiz ekosystemów lądowych i morskich. Dlatego wszelkie prace studyjne są w pełni uzasadnione, gdyż rozwijają algorytmy i metody, dostarczając gotowych narzędzi mniej zaawansowanym naukowo odbiorcom.

⁴ Dane tzw. oryginalne, czyli po korekcji geometrycznej i atmosferycznej, cechowały się rozdzielczością 15-bitową, natomiast dane po dekorelacji szumu i analizie głównych składowych (tzw. transformacji Minimum Noise Fraction – MNF) zapisane były w skali 16-bitowej.

⁵ Do niniejszych analiz wykorzystany został symulator fuzzy ARTMAP, opracowany przez zespół prof. Paolo Gamby z Uniwersytetu w Pawii i udostępniony autorowi w ramach kontraktu ESR 6 (*advanced classification algorithms*) projektu UE MCRTN Hyper-i-net (www.hyperinet.eu).

⁶ Na rok 2011-2012 planowane jest umieszczenie hiperspektralnego skanera EnMAP na orbicie satelitarnej. Rejon Tatr jest jednym z kluczowych obszarów badawczych, a Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW jest naukowym partnerem tego przedsięwzięcia (zajmuje się badaniami roślinności górskiej i pogórskiej).

⁷ Deutsches Luft und Raumfahrt Zentrum (Niemiecka Agencja Kosmiczna).

⁸ GeoForschungsZentrum Potsdam (Niemcy).

⁹ Environmental Mapping and Analysis Program – niemiecka hiperspektralna misja satelitarna.

Kartowanie roślinności z wykorzystaniem technik hiperspektralnych sięga początku lat 1990. (Adams i inni, 1993; Benediktsson, 1995; Ray, Murray 1996; Ashton, Schaum, 1998). Prace te koncentrowały się głównie nad rozwojem metod i koncepcji badań hiperspektralnych. Chodziło o analizę cech spektralnych, pozyskanych ze zwiększonej liczby kanałów danego piksela. Z jednej strony punktem wyjścia były dane wielospektralne, a z drugiej strony tworzone były modele empiryczne bazujące na nieobrazujących pomiarach hiperspektralnych z eksperymentów polowych i laboratoryjnych.

W Polsce badania hiperspektralne rozpoczęły się 13.08.2001 r. zobrazowaniem AISA (SPECIM¹⁰). Sensor ten został wykorzystany do zobrazowania Puszczy Niepołomickiej w 32 kanałach spektralnych w ramach programu 5FP EU IST 1999-2002 Foremms. Polskim uczestnikiem tego projektu był Wydział Leśny AR w Krakowie, a kierownikiem projektu dr Piotr Wężyk (Solberg, Wężyk, 2000; Wężyk i inni, 2003; Wężyk, Wertz, 2005). Kolejny rozdział badań hiperspektralnych z pełną, ciągłą rejestracją widma elektromagnetycznego przypadł na

¹⁰ Spektrometr AISA wykonuje zobrazowania w modułach pracujących w zakresie 430-900 nm ze zmienną rozdzielczością spektralną w zakresie 1,63-9,8 nm, umożliwiając wykonanie zobrazowania do 286 kanałów. Pole widzenia wynosi 21° w linii poprzecznej do lotu i 0,055° wzdłuż linii lotu, dając przestrzenną rozdzielczość 360 pikseli w linii zobrazowania, co przy wysokości lotu 1000 m daje rozdzielczość przestrzenną 1 m. Firma SPECIM jest współpartnerem Katedry Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW w kontrakcie ESR10 europejskiego projektu Hyper-i-net.

rok 2002, w którym wykonane zostały naloty dwoma hiperspektralnymi skanerami: ROSIS z rejestracją 115 kanałów oraz DAIS 7915 (79 kanałów) nad 3 polskimi obszarami badawczymi: Tatrami Wysokimi, zlewnią Bystrzanki w Beskidzie Niskim oraz kopalnią siarki w Machowie i Jeziórcie. Dwa pierwsze poligony zobrażowano w ramach projektu HySens PL02_05 przygotowanego przez Zakład Teledetekcji Środowiska WGiSR UW, a uzyskane obrazy DAIS 7915 są przedmiotem analizy xprezentowanej w niniejszej publikacji. Poligon z Tarnobrzieskiego Zagłębia Siarkowego był zobrażowany w ramach projektu HySens PL02_04 przygotowanego przez Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej, WGGiŚ AGH (Hejmanowska, Głowienka, 2004).

Do innych prac naukowych wykorzystujących zobrazowania hiperspektralne należy zaliczyć badania jakości wód z wykorzystaniem satelitarnych zobrazowań CHRIS/Proba jezior mazurskich (Osińska-Skotak i inni, 2005) oraz danych Hyperion Zbiornika Dobczyckiego (Hejmanowska i inni, 2006).

Autor niniejszej publikacji od lat zajmuje się wykorzystaniem teledetekcji hiperspektralnej w badaniach roślinności i tworzeniem nowych algorytmów pozwalających na kartowanie gatunków i zbiorowisk roślinnych, analizę ich stanu biofizycznego oraz analizę wpływu czynników stresogennych na odpowiedź spektralną, np. zwiększone promieniowanie w warunkach wysokogórskich, czy obecności substancji toksycznych (Zagajewski, Sobczak, 2003; Zagajewski i inni, 2004; 2007; Zagajewski, Jarocińska, 2009; Zagajewski, Olesiuk, 2009).