

# Teledetekcyjne badania roślinności w świetle literatury

W ostatnich dekadach dokonał się znaczący postęp w rozwoju narzędzi teledetekcyjnych do badania roślinności (Asner, 1998). Teledetekcja oparta na optycznej części spektrum elektromagnetycznego ewoluowała od sensorów wielospektralnych do skanerów hiperspektralnych. Dane hiperspektralne dostarczają lepszej jakości informacji na temat stanu i pokrywy roślinnej niż te pozyskane z szerokopasmowych sensorów, borykających się z problemem nasycenia przy analizie ilościowej i jakościowej (Mutanga, Skidmore, 2004). Spektroskopia obrazowa korzysta z sensorów obrazowych i nieobrazowych, które rejestrują setki wąskich, ciągłych kanałów pomiędzy 400 nm a 2500 nm, co pozwala na uchwycenie cech absorpcyjnych właściwych dla krzywej odbicia spektralnego roślin (Ustin i in., 2004). Metody i dane hiperspektralne umożliwiają wyodrębnienie cech biochemicznych roślinności, w tym np. zawartości barwników asymilacyjnych, m.in. chlorofilu (Daughtry i in., 1989; Jacquemoud i in., 1995a; Zarco-Tejada, 2004), zawartości wody (Ceccato i in., 2002), zawartości celulozy i skrobi (O'Neil i in., 2002). Wiedza na temat biochemicznych właściwości roślin ma znaczenie ze względu na ich wpływ na funkcjonowanie ekosystemów, ponieważ są z nimi powiązane procesy takie jak fotosynteza, respiracja, ewapotranspiracja czy dekompozycja. Znajomość zawartości i wzajemnych proporcji składników chemicznych w liściach jest podstawą do oceny stresu u roślin, przebiegu faz fenologicznych czy identyfikacji gatunków (Blackburn, 1998a; Kumar i in., 2001). Większość obecnie prowadzonych badań wykorzystujących szeroko rozumiane dane i metody hiperspektralne skupia się na wyodrębnianiu i modelowaniu fizjologicznych cech roślinności. Tego typu analizy przeprowadzane są przeważnie w warunkach laboratoryjnych na poziomie pojedynczych liści, a następnie ich wyniki są ekstrapolowane do poziomu zbiorowiska przy pomocy różnego rodzaju technik geometryczno-optycznych (Jacquemoud i in., 1995), zarówno bezpośrednich, jak i pośrednich (Underwood i in., 2003). Badania mające na celu powiązanie cech spektralnych

ze strukturą biochemiczną roślinności realizuje się także z pokładu samolotu w odniesieniu do całych płatów zbiorowisk roślinnych (Blackburn, 1998a). Kolejnym krokiem w rozwoju teledetekcji hiperspektralnej będzie przeniesienie wspomnianych doświadczeń na platformy satelitarne bez utraty szczegółowych informacji o fizjologii roślin, dostępnych obecnie w skali laboratoryjnej.

Ulepszona rozdzielczość spektralna wraz z coraz lepszą rozdzielczością geometryczną ułatwia analizę składu gatunkowego, określenie typów funkcjonalnych roślinności rozumianych jako zespół cech strukturalnych, fizjologicznych i/lub fenologicznych wytworzonych w odpowiedzi na warunki środowiska (Ustin, Gamon, 2010) i obliczanie wskaźników florystycznych (Schmidtlein, 2005). Ważne miejsce w badaniach roślinności zajmują studia nad jej strukturą biofizyczną, istotną w monitorowaniu i krótko- oraz długoterminowym prognozowaniu zmian ekosystemów. Do badanych elementów struktury roślinności należą m.in. powierzchnia projekcyjna liści – LAI (*ang. leaf area index*), skład gatunkowy, produktywność –  $f_{\text{APAR}}$  (*ang. fraction of absorbed photosynthetically active radiation*), zwarcie, wysokość (Chen i in., 1999; Broge, Leblanc, 2000; Haboudane i in., 2004; Schlerf i in., 2005). Większość badań dotyczących struktury zbiorowisk roślinnych wykorzystuje modele transferu promieniowania oraz empiryczne zależności pomiędzy informacją spektralną a poszczególnymi parametrami biofizycznymi (Gong i in., 1995; Schaepman i in., 2004). Techniki operujące wskaźnikami roślinnymi są szeroko stosowane do szacowania parametrów opisujących roślinność (np. LAI, biomase,  $f_{\text{APAR}}$ ). Takie podejście do analizy cech biofizycznych roślin ma zdecydowaną przewagę nad stosowaniem pojedynczych kanałów ze względu na to, że wskaźniki mogą zostać dobrane i zaprojektowane tak, aby zmniejszyć skutki wpływu zróżnicowania czynników zewnętrznych, takich jak jasność gleby czy efekty atmosferyczne (Baret, Guyot, 1989; Gao i in., 2000).

Metody badania szaty roślinnej w Tatrach z wykorzystaniem technik teledetekcyjnych. Tatry przyciągały badaczy jeszcze zanim objęto je ochroną jako park narodowy. Wśród coraz liczniejszych badań prowadzonych na ich obszarze od przełomu XVIII i XIX wieku niewiele miejsca zajmowały prace wykorzystujące szeroko rozumiane metody teledetekcyjne. Naukowcy posługujący się zdjęciami lotniczymi i naziemnymi także nie od razu zwrócili uwagę na możliwość ich zastosowania do badania szaty roślinnej. M. Sokołowski jako pierwszy posłużył się zdjęciem naziemnym do interpretacji przebiegu górnej granicy lasu w Tatrach (1928). Podczas prac nad mapą Tatr, korzystając ze zdjęć fotogrametrycznych oraz lotniczych, pracownicy Wojskowego Instytutu Geograficznego (WIG) wyznaczyli m.in. zasięg występowania kosodrzewiny (Zawadzki, Dobrzański, bez daty). K. Trafas (1968) ocenił przydatność panchromatycznych zdjęć lotniczych z 1964 roku do badań środowiska przyrodniczego Tatrzańskiego Parku Narodowego (TPN). Zauważył przy tym, że z powodzeniem można wykorzystać materiały lotnicze do studiów nad zasięgiem pięter roślinnych na obszarze TPN. Przy czym stwierdził, że materiały teledetekcyjne jako jedyne pozwalają szczegółowo zinventaryzować kosodrzewinę. J. Dziura (1986) skupiła się na ocenie różnych zdjęć lotniczych wykonanych dla obszaru Tatr do badań przyrodniczych i wykonała klucz do interpretacji m.in. gleb, wód, rzeźby oraz roślinności.

Zastosowanie fotointerpretacji w badaniach tatrzańskiej roślinności miało miejsce dopiero w latach 80-tych XX wieku. E. Bielecka (1986) na podstawie fotogrametrycznej mapy Tatr oraz panchromatycznych zdjęć lotniczych dokonała analizy zmian w obrębie piętra subalpejskiego w latach 1934-1977. Przedmiotem analizy był m.in. obszar zajmowany przez zarośla kosodrzewiny. Badania E. Bieleckiej kontynuowali A. Paterek i J.R. Olędzki (2005), którzy na podstawie zdjęć PHARE z 1999 roku i wyników badań E. Bieleckiej określili zmiany, jakie zaszły w zasięgu zbiorowisk zonalnych dla pięter roślinnych od 1977 roku.

W nurt badań nad dynamiką roślinności wpisują się prace dotyczące ilościowej analizy zmian powierzchni zajmowanej przez kosodrzewinę w obrębie tras narcisarskich w sąsiedztwie Kasprowego Wierchu (Wężyk, Guzik, 2001), badania przemian w lasach regla górnego, w piętrze kosodrzewiny i hal zachodzących w Dolinie Suchej Stawiańskiej i w Dolinie Bystrej w okresie 1965-1999 wykonane na podstawie panchromatycznych (1965) i barwnych (1999) zdjęć lotniczych (Wężyk, Guzik, 2004) oraz analiza zmian pokrycia terenu przeprowadzona z wykorzystaniem zdjęć naziemnych (Wrzesień, Zwijacz-Kozica, 2007). Podobne prace realizowane są także w słowackiej części Tatr, gdzie w badaniach zmian struktury krajobrazu wykorzystywane są panchromatyczne zdjęcia lotnicze z różnych przekrojów czasowych oraz zdjęcia satelitarne (Landsat, Ikonos). M. Boltížiar (2004) na podstawie archiwalnych zdjęć lotniczych z 1949 i 1998 roku analizował jakościowe i ilościowe zmiany, jakie zaszły w okresie pięćdziesię-

ciu lat w piętrach alpejskim i subalpejskim w Dolinie Przednich Koperszadów w Bielskich Tatrach. Próbę odtworzenia przebiegu górnej granicy lasu, jak i stan oraz kierunki rozwoju lasu przeprowadzili J. Vladovič i V. Čaboun (2004) posilując się zdjęciami lotniczymi z 1949, 1962, 1973, 1986, 1998 roku oraz scenami satelitarnymi z satelitów Landsat – z 1994 i z 2000 i Ikonos – z 2000.

Zdjęcia spektrostrefowe zarejestrowane w 2002 roku zastosowano do kartowania szaty roślinnej TPN. Stereoskopowa interpretacja zdjęć umożliwiła wyodrębnienie między innymi klas w obrębie lasu (stadia rozwoju) i kosodrzewiny (np. płaty, zwarte łany) (Wężyk, Wrzodak, 2005). Zdjęcia w podczerwieni wykorzystano także do kartowania i charakteryzowania zbiorowisk roślinnych powyżej górnej granicy lasu (Koreň i in., 2004). Możliwość szczegółowej delimitacji zbiorowisk roślinnych piętra subalpejskiego i alpejskiego badał W. Próchnicki (2006) wykorzystując barwne kompozycje utworzone z wybranych kanałów cyfrowych zdjęć hiperspektralnych DAIS i ROSIS. M. Jodłowski (2007) posłużył się cyfrową ortofotomapą Tatr w celu wyznaczenia przebiegu górnej granicy kosodrzewiny w Dolinie Małej Łąki i w części Doliny Białej Wody. M. Guzik (2008) analizował przebieg górnej granicy lasu, górnej granicy kosodrzewiny i zasięgi pięter roślinnych w Tatrach, posługując się archiwalnymi zdjęciami lotniczymi oraz zdjęciem satelitarnym z 2004 roku (Ikonos).

Wraz z rozwojem technik teledetekcyjnych wśród badaczy zwiększyło się zainteresowanie ich zastosowaniem w badaniach środowiska Tatr. E. Bielecka i inni (1994) wykorzystali metody cyfrowego przetwarzania obrazów do badania górnej granicy lasu. Na problem kartowania roślinności piętra alpejskiego zwróciła uwagę A. Jakomulska (1999a, b). W prowadzonych w rejonie Hali Gąsienicowej badaniach nad możliwością zdalnego kartowania na poziomie gatunków i zbiorowisk trawiających charakterystycznych dla piętra hal zastosowała metody fizjologii roślin, teledetekcji naziemnej, cyfrowe przetwarzanie zdjęć lotniczych i satelitarnych.

Zagadnienie wpływu form rzeźby na rozmieszczenie zbiorowisk roślinnych w Tatrach Wysokich analizował K. Kački (2004), wykorzystując zdjęcie z satelity Ikonos i numeryczny model terenu (NMT).

Ważnym wydarzeniem z punktu widzenia badań teledetekcyjnych roślinności w Tatrzańskim Parku Narodowym była realizacja w lecie 2002 roku międzynarodowego projektu HySens PL05\_02, w którym wzięli udział pracownicy i studenci Katedry Geoinformatyki i Teledetekcji (ówcześnie Zakładu Teledetekcji Środowiska) Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego oraz pracownicy Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk we współpracy z przedstawicielami Niemieckiej Agencji Kosmicznej (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR). W ramach projektu zostały zarejestrowane cyfrowe zdjęcia hiperspektralne. Zobrazowania wykonano za pomocą dwóch skanerów DAIS 7915 (Digital Airborne Imaging Spectrometer

7915) i ROSIS (Reflective Optics System Imaging Spectrometer) umieszczonych na pokładzie samolotu Dornier Do-228. W dniach bezpośrednio poprzedzających nalot, jak i podczas rejestracji zdjęć przeprowadzono serię pomiarów terenowych. Badano cechy biofizyczne i zebrano materiał do analizy biochemicznej roślinności, pomierzono charakterystyki spektralne roślin i podstawowych elementów pokrycia terenu, wykonano szereg zdjęć fitosocjologicznych i pomiarów meteorologicznych. Badania terenowe i analiza zdjęć hiperspektralnych zaowocowały powstaniem licznych publikacji dotyczących stanu charakterystycznych dla piętra alpejskiego zbiorowisk roślinnych, zróźnicowania parametrów biofizycznych roślin (Zagajewski i in., 2004; Wrzesień i in., 2005; Zagajewski i in., 2005 a, b, c; Zagajewski i in., 2006 a, b) oraz możliwości kartowania roślinności wysokogórskiej z wykorzystaniem metod cyfrowego przetwarzania obrazów hiperspektralnych, zarówno klasyfikacji tradycyjnych – nadzorowanej i nienadzorowanej, jak i klasyfikacji zarezerwowanych do danych hiperspektralnych – m.in. *spectral angle mapper* czy *spectral unmixing* (Sobczak i in., 2005; Zagajewski i in., 2005a, c; Zagajewski i in., 2006 a).

W teledetekcji środowiska przyrodniczego na obszarze Tatr, ze szczególnym uwzględnieniem zdalnych badań roślinności, dominują prace poświęcone dynamice formacji roślinnych. Wykorzystują one przede wszystkim istniejące materiały archiwalne, a podstawową metodą analizy jest interpretacja zdjęć fotogrametrycznych i lotniczych, pozwalająca jedynie na wyznaczanie zasięgów poszczególnych pięter roślinnych i zmian zachodzących w kolejnych okresach. Próbę szczegółowego kartowania z wykorzystaniem technik cyfrowego przetwarzania obrazów podjęła dopiero dr A. Jakomulska (1999a, b), ale z powodu niedostatecznej jakości dostępnych wówczas danych nie udało się drogą klasyfikacji rozpoznać zbiorowisk dominujących w piętrze alpejskim TPN. Kontynuację badań dr A. Jakomulskiej stanowi projekt HySens wykorzystujący dane i metody hiperspektralne, pozwalające na automatyczne sklasyfikowanie roślinności piętra alpejskiego i subalpejskiego (Sobczak, 2009), ocenę jej stanu (Zagajewski i in., 2005a, b, c), jak również na wykonanie spektralnej charakterystyki poszczególnych gatunków.