Metody analizy danych

Korekcja radiometryczna i geometryczna

Pierwszy etap analizy danych dotyczył korekcji zdjęć hiperspektralnych w celu wyeliminowania efektów wywołanych wpływem atmosfery i przeliczenia wartości radiancji zarejestrowanej przez sensor na współczynnik odbicia. Korekcja jest niezbędnym elementem przetwarzania zdjęć, aby usunąć wspomniane wyżej zakłócenia, aby zapewnić porównywalność danych obrazowych z wynikami pomiarów naziemnych i wykonanych w różnych terminach (Ferrand i in., 1994) oraz z powodu stosunkowo niedużego odbicia od gatunków iglastych (Schlerf i in., 2005). Przed przystapieniem do właściwej korekcji zostały rozpoznane kanały, w których wystąpiły szumy, dyskwalifikujące je jednocześnie z dalszej analizy. Były to kanały od 1 do 5, w związku z czym pozostałe operacje na obrazach dotyczą 96 kanałów spektralnych o numerach od 6 do 101. Po wykonaniu kalibracji radiometrycznej przystąpiono do rektyfikacji zdjęć, aby usunąć zniekształcenia spowodowane geometria lotu.

Zdjęcia hiperspektralne wymagają specjalnego podejścia do korekcji radiometrycznej i geometrycznej (Schläpfer, Richter, 2002; Richter, Schläpfer, 2002). W ramach projektu HySens zaplanowano, że zdjęcia zostaną poddane wstępnemu przetwarzaniu przez ich użytkowników z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania w DLR (Oberpfaffenhofen) pod kierunkiem tamtejszych specjalistów (Müller i in., 2002). Procedura przebiegła zgodnie z planem w odniesieniu do danych ze skanera DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer) rejestrowanych równolegle ze zdjęciami ze skanera ROSIS. W przypadku zdjęć z ROSIS'a w trakcie trwania nalotu wystąpiły problemy techniczne i nie zadziałały urządzenia nawigacyjne, których zadaniem było zapisanie parametrów niezbędnych jako dane wejściowe do przeprowadzenia korekcji geometrycznej za pomocą oprogramowania PARGE (PARametric GEocoding). Co za tym idzie, nie mogły

zostać wygenerowane pliki *.sca (tzw. scan angle file), zawierające informacje o względnym położeniu skanera i poszczególnych pikseli, służące jako dane wejściowe do korekcji radiometrycznej w oprogramowaniu ATCOR (Richter, 2003). Podobne problemy techniczne wystąpiły także w czasie innych kampanii, w których korzystano ze skanera ROSIS (Schläpfer i in., 2003). Do geometryzacji ROSIS'a próbowano zastosować informacje zarejestrowane równolegle dla DAIS'a, lecz osiągnięty wynik nie był satysfakcjonujący. Podjęto także próbę sztucznego wygenerowania pliku *.sca, lecz mimo tego korekcja radiometryczna z wykorzystaniem programu ATCOR nie powiodła się.

Korekcję atmosferyczną przeprowadzono stosując alternatywną metodę. Wykorzystano jedną z metod korekcji względnej – metodę linii empirycznej – EML (Empirical Line Method) dostępną w oprogramowaniu ENVI 4.3. Metoda EML jest prostym narzędziem i nie daje tak dobrych efektów jak procedury wykorzystujace modele transferu promieniowania (ang. radiative transfer codes) (Smith, Milton, 1999), jednak jej wyniki są akceptowalne i stosowano ją także do danych hiperspektralnych, np. CASI (Smith, Milton, 1999), AVIRIS (Ferrand i in., 1994), jak i DAIS (Sluiter i in., 2004). Korekcja metodą EML polega na porównaniu przynajmniej dwóch spektr pomierzonych w terenie (obiektu jasnego i ciemnego o silnie kontrastującym albedo) reprezentujących elementy pokrycia terenu, których charakterystyka spektralna nie ulega znaczącym zmianom w czasie (np. woda, skały) z odpowiadającymi im spektrami z korygowanego obrazu. Najlepsze efekty daje wykorzystanie czterech lub wiecej par spektr (Jakomulska, Sobczak, 2001). W wyniku porównania generowane są równania regresji, na podstawie których radiancja jest przeliczana na współczynnik odbicia (ryc. 2).

Równania regresji liniowej pozwalają usunąć efekty wywołane wpływem atmosfery i iluminacją. Każdy z kanałów rozpatrywany jest osobno (Karpouzli, Malthus, 2003; Smith, Milton, 1999). Ponadto metoda linii empi-



Ryc. 2. Przykład równania regresji wykorzystywanego w korekcji radiometrycznej obrazu ze skanera ROSIS. Na osi y zaznaczono współczynnik odbicia obiektów terenowych zmierzony spektrometrem GER, na osi x odpowiadające pomiarom terenowym wartości radiancji odczytane z obrazu ROSIS.

Fig. 2. Example of regression model used to radiometric correction of the ROSIS image. Y axis represents spectra acquired in the field, x axis represents radiance in the ROSIS image.

rycznej może także uwypuklić cechy absorpcyjne, dzięki czemu ułatwia analizy spektralne (Dwyer i in., 1995).

W prezentowanej pracy do uruchomienia modelu zastosowano po cztery pary spektr, wśród których znalazły się charakterystyki spektralne wody, skał (granit) i kosodrzewiny, która jest przedmiotem badań. Spektra kosodrzewiny dobrano tak, aby znalazły się wśród nich przykłady takich fragmentów obszaru badań, które otrzymały więcej światła i takich, które znajdowały się części lekko zacienionej, gdyż zacienienie ma duży wpływ na odpowiedź spektralna (Ardö, 1992). Jako dane referencyjne posłużyły spektra zmierzone spektrometrem GER3700 (350-2500 nm, 704 kanały) w czasie trwania nalotu oraz w dniach bezpośrednio poprzedzających nalot. Spektra zmierzone spektrometrem GER3700 przepróbkowano tak, by odpowiadały spektrom odczytanym ze zdjęcia z ROSIS'a. Ekstrahowanie spektr z obrazu poprzedziło określenie wielkości okna, w jakim mają być uśrednione wartości współczynnika odbicia zarejestrowane w poszczególnych pikselach. W każdym z punktów wybranych do wykonania korekcji radiometrycznej odczytano wartości współczynnika odbicia w oknach wielkości: 2x2, 3x3, 4x4, 5x5, 6x6, 7x7 i 8x8 pikseli (analiza większego okna była bezzasadna, ponieważ w przypadku pojedynczych płatów kosodrzewiny zasięg okna wykraczał znacznie poza ich zasięg). Obliczono średnie wartości (X) i odchylenia standardowe (s) wartości pikseli dla każdego z analizowanych punktów, a następnie obliczono współczynnik zmienności (V_l) według wzoru: $V_1 = \frac{s}{m}$ (Łomnicki, 1995) w celu określenia wielkości okrał, w ramach którego nie zwiększa się już więcej lokalne zróżnicowanie. Każdy z rozmiarów okna okazał się odpowiedni, ponieważ współczynnik zmienności zawarł się w przedziale 1-2%, przy czym największe wahania jego wartości wystąpiły przy oknie 8x8 pikseli. Charakterystyki spektralne odpowiadających obiektom terenowym elementów odczytano ze zdjęcia w oknie o rozmiarze 3x3 piksele.

Przygotowane spektra wprowadzono do modelu. Współczynniki potrzebne do korekcji zdjęć, obliczono dla każdego pasa oddzielnie, jednak lepsze rezultaty dało zastosowanie najlepiej dopasowanego modelu (pas nr 5) do pozostałych dwóch pasów (pas nr 4 i pas nr 6).

Kontrolę poprawności korekcji metodą EML wykonano porównując spektrum zmierzone w terenie za pomocą spektrometru FieldSpec HH z odpowiadającym mu spektrum wyekstrahowanym ze skorygowanego obrazu (w oknie 3x3 piksele). Współczynnik zmienności obliczony według wzoru: $V_2 = \frac{FieldSpecHH}{ROSIS} * 100\%$ (Ja-

rocińska, Zagajewski, 2008) osiągnął wartości nieprzekraczające 2%, zatem wynik przeprowadzonej korekcji należy uznać za zadawalający.

W przypadku geometryzacji zdjęć z ROSIS'a zastosowano transformację wielomianową drugiego stopnia, ponieważ dane zostały częściowo przetworzone z wykorzystaniem NMT i ich położenie względem zarówno NMT, jak i innych danych (map topograficznych, zdjęć z DAIS'a) wymagało jedynie niewielkich przesunięć. Dodatkowe, skomplikowane przetworzenia mogłyby znacząco wpłynać na wartości pikseli, a co za tym idzie, na analizy spektralnych cech kosodrzewiny. W celu wpasowania zdjęć ze skanera ROSIS wykorzystano zdjęcie satelitarne z satelity IKONOS z 25-08-2004 roku (w trybie wielospektralnym o rozdzielczości przestrzennej 4 m, wzmocnione kanałem panchromatycznym do 1 m). Na korygowanych obrazach i na obrazie referencyjnym odszukano odpowiadające sobie charakterystyczne punkty, które posłużyły do wpasowania obrazu. W tabeli 4 przedstawiono liczbę punktów referencyjnych zlokalizowanych na poszczególnych pasach i otrzymane błędy.

Tabela 4. Parametry geometryzacji. Table 4. Geometrization parameters.

Numer pasa Line number	Liczba punktów referencyjnych Number of con- trol points	Błąd transfor- macji [piksele] Transformation error [pixels]
4	181	3,88
5	270	2,87
6	338	4,30

Tworzenie modeli cyfrowych

W niniejszej pracy zastosowano modele cyfrowe wykonane na bazie NMT: mapę spadków, mapę ekspozycji, mapę hipsometryczną, mapę potencjalnego promieniowania słonecznego i mapę średniej rocznej temperatury powietrza.

Mapę ekspozycji i spadków utworzono korzystając z modułów programu ArcGIS $\rightarrow 3D$ Analyst Tools \rightarrow Raster Surface – odpowiednio – Aspect i Slope. Mapę nachylenia stoków sklasyfikowano według następującego 426,000

Global annual radiation [10³MJm⁻²] < 1,5 1,5 - 2,0

> 2,0 - 2,5 2,5 - 3,0 3,0 - 3,5 3,5 - 4,0 4,0 - 4,5

> 4,5

5456300

5455400

5454500

5453600

5452700

5456300

5455400

5454500

Ŵ

0

426000

426000

250 500

Średnia roczna

-2 - -1 -1 - 0 0 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 4

1 000 m

427000

428000

temperatura [°C] Annual mean temperature [°C] -4 - -3 -3 - -2





całkowitego (A) oraz mapa średniej rocznej temperatury powietrza (B).

25

5453600

5452700

429000

podziału: obszary płaskie, 1-3°, 3-6°, 6-10, 10-15°, 15-25°, 25-45°, 45-65° i obszary o nachyleniu >65°. Mapę ekspozycji podzielono na 8 kategorii zgodnie z podziałem na główne kierunki: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. Mapę hipsometryczną sklasyfikowano przyjmując przedziały 100-metrowe.

Model potencjalnego promieniowania słonecznego obliczono wykorzystując programy shortwavc.aml (liczący bezpośrednie promieniowanie docierające do powierzchni Ziemi) oraz diffusb.aml (liczący promieniowanie rozproszone) napisane przez dr N. Zimmermann'a z Szwajcarskiego Instytutu Badań Lasu, Śniegu i Krajobrazu (Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft - WSL) udostępnione na stronie internetowej: http://www.wsl.ch/staff/niklaus. zimmermann/progs.html. Jako dane wejściowe do modeli należało przygotować NMT, szerokość geograficzną analizowanego obszaru, datę początku i końca okresu obliczeniowego (czyli dla potrzeb niniejszego opracowania pierwszy i ostatni dzień roku 2002), dla jakiego mają zostać obliczone wartości promieniowania oraz interwał czasowy w ramach danego dnia (przyjęto 120 min.) (Kumar i in., 1997). Wykorzystując NMT, modele obliczają dla każdego piksela: wysokość bezwzględną, ekspozycję i nachylenie stoku, zacienienie wywołane występowaniem wyższych form terenu przy określonej pozycji Słońca. Zaproponowane modele liczą wartości promieniowania bezpośredniego i rozproszonego w warunkach bezchmurnego nieba, podczas gdy pomiary w terenie wykonywane bywają najczęściej w warunkach średniego zachmurzenia, co powoduje, że rezultaty obliczeń mają wartości wyższe niż pomiary bezpośrednie (por. Rojan, 1992; Baranowski, 2003). Jednak dla realizacji celów prezentowanej pracy zasadnicze znaczenie ma przestrzenne zróżnicowanie promieniowania, jakie dociera do kosodrzewiny. Po zsumowaniu map promieniowania bezpośredniego i rozproszonego otrzymano średnie roczne promieniowanie całkowite, którego wartości podzielono na przedziały o rozpiętości 500 MJ/m² (ryc. 3A).

Model średniej rocznej temperatury powietrza powstał na podstawie wzorów empirycznych opracowanych przez M.T. Hessa i innych (1975) dla polskiej części Karpat Zachodnich. Do wykonania mapy średniej rocznej temperatury posłużono się mapami form wklęsłych i wypukłych oraz mapami stoków o ekspozycjach południowej i północnej. Do wyznaczenia form wklęsłych i wypukłych wykorzystano model toposcale. aml (http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/ progs.html). Występowanie poszczególnych form terenu rozpatrywane jest na podstawie NMT w ramach przeszukującego okna, w obrębie którego model liczy średnią wysokość i porównuje ją do wysokości centralnego piksela. Ekspozycje określono na podstawie NMT za pomocą funkcji programu ArcGIS \rightarrow 3D Analyst Tools \rightarrow Raster Surface \rightarrow Aspect. Ponieważ zależności wypracowane przez M.T. Hessa i innych (1975) odnosza się do wysokości n.p.m., na podstawie wygenerowanych map form wklęsłych, wypukłych, ekspozycji północnej i południowej utworzono maski. Dzięki nim z NMT wyekstrahowano jednostkowe mapy wysokości n.p.m. reprezentujące rozpatrywane formy, a następnie obliczono średnią roczną temperaturę na podstawie wzorów zaproponowanych przez M.T. Hessa i innych (1975). Po połączeniu poszczególnych map otrzymano mapę średniej rocznej temperatury dla obszaru badań (ryc. 3B). Przebieg charakterystycznych izoterm wyznaczono co 1°C.

Opracowanie wyników pomiarów terenowych

Spektra zmierzone spektrometrem FieldSpec HH opracowano w każdym z punktów testowych, korzystając z oprogramowania załączonego do instrumentu, automatycznie przeliczającego pomierzone wartości na współczynnik odbicia. W pierwszej kolejności eliminowano te krzywe, których kształt znacząco odbiegał od pozostałych zmierzonych w danym punkcie (nagły podmuch wiatru, przypadkowe poruszenie spektrometrem). Następnie obliczono średnią (X) i odchylenie standardowe (s) z wartości współczynnika odbicia zarejestrowanych w każdej z lokalizacji. W przypadku, gdy pomiar wykraczał poza ±2s także go wykluczano i ponownie obliczono średnią z pozostałych wartości. Aby wyeliminować zakłócenia i szumy zastosowano ruchomy filtr niskoprzepustowy (low-pass filter) w oknie 5x5. W przypadku spektr zmierzonych w laboratorium zastosowano taką samą procedurę.

Spektralne wskaźniki stanu roślinności (LAI i $f_{A.}$ _{PAR}) opracowano w podobny sposób – obliczając średnią i odchylenie standardowe dla wszystkich jednostkowych pomiarów w danym punkcie. W przypadku, gdy wynik nie zawierał się w przedziale wyznaczonym przez ±2*s*, był wykluczany a średnią obliczano ponownie.

W celu oceny spektralnego zróżnicowania kosodrzewiny dla każdej długości fali znaleziono wartość minimalną i maksymalną dla 21 pomiarów, obliczono średnią (X), odchylenie standardowe (s) i współczynnik zmienności (V_i) oraz za pomocą testu t-Studenta przeprowadzono analizę istotności statystycznej różnic pomiędzy średnimi obliczonymi dla spektr zarejestrowanych spektrometrem FieldSpec HH w każdym z rozpatrywanych punktów pomiarowych. Test przeprowadzono dla każdej pary spektr kosodrzewiny (Schmidt, Skidmore, 2003). Oceniono istotność statystyczną różnic charakterystyk spektralnych pomiędzy kosodrzewiną a pozostałymi gatunkami roślin iglastych występujących w Tatrach. Porównano także kształt krzywych spektralnych (Schmidt, Skidmore, 2001).

Konstruowanie hiperspektralnych wskaźników roślinnych

Hiperspektralne wskaźniki roślinne zostały obliczone na bazie trzech typów danych spektralnych:

- skorygowanych zdjęć ze skanera ROSIS (96 kanałów spektralnych), z których wyekstrahowano spektra w oknie 3x3 piksele (por. korekcja radiometryczna),
- wyników pomiarów spektrometrycznych kosodrzewiny z pomiarów terenowych (751 kanałów, FieldSpec HandHeld)
- wyników pomiarów laboratoryjnych (2150 kanałów, FieldSpec Pro II).

Wskaźniki obliczone na podstawie danych uzyskanych podczas pomiarów laboratoryjnych ze względu na niewielką liczbę prób (możliwość odniesienia wyników tylko do 5 punktów w terenie) mają na celu sprawdzenie, czy zastosowanie sensora obejmującego pełne spektrum może wpłynąć na poprawę wyników analizy.

Do obliczenia hiperspektralnych wariantów wskaźników roślinnych brano pod uwagę wszystkie dwukanałowe kombinacje, możliwe do skomponowania na podstawie dostępnych danych (tabela 5). Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnie w tym celu napisanego programu. Program został stworzony w środowisku IDL. Wersję testową napisał dr Alexander Damm z Geomatics Lab, Geography Department, Humboldt-Universität zu Berlin, a autorka prezentowanej pracy zmodyfikowała ją dopasowując do poszczególnych typów danych i rozpatrywanych wskaźników.

Wskaźniki roślinne, które wykorzystano w analizie, zostały wybrane jako występujące najczęściej w badaniach roślinności (Gong i in., 1995; Chen i in., 1999; Gong i in., 2003; Schlerf i in., 2005; Darvishzadeh i in., 2006). Hiperspektralne warianty wskaźników roślinnych: VI, NDVI, PVI, SAVI2 i TSAVI obliczono według wzorów przedstawionych w tabeli 6. Tabela 5. Liczba kombinacji kanałów wykorzystanych do skonstruowania hiperspektralnych wskaźników roślinnych.

Table 5. Number of possible two-band combinations used to compute hyperspectral vegetation indices.

Źródło danych spektralnych Spectral data source	Liczba kombinacji kanałów Number of band combina- tions	
ROSIS	9 216	
FieldSpec HH	564 001	
FieldSpec Pro	$4\ 622\ 500$	

PVI, SAVI2 i TSAVI wymagają wprowadzenia parametrów charakteryzujących tzw. linię gleby. Ponieważ nie wykonywano pomiarów spektralnych gleb, w celu określenia cech gleby, przyjęto wartości: a=0,9 i b=0,1. Założono, że linia gleby określona dla przestrzeni spektralnej pomiędzy pasmem czerwonym a bliską podczerwienią może zostać przeniesiona także na inne zakresy spektralne (Schlerf i in., 2005; Darvizadeh i in., 2006).

Analiza zależności roślinnych wskaźników spektralnych od cech biofizycznych kosodrzewiny

Spektralne wskaźniki są często korelowane z parametrami biofizycznymi roślinności (np. LAI) poprzez empiryczne modele liniowe lub wykładnicze w zależności od tego czy pojawia się efekt wysycenia. Efekt wysycenia wskaźnika roślinnego wraz ze wzrostem wartości LAI nie został do tej pory zbadany w odniesieniu do gatunku i struktury badanej rośliny czy zbiorowiska

Tabela 6. Dwukanałowe spektralne wskaźniki roślinne najczęściej wykorzystywane w badaniach roślinności (Thenkabail i in., 2000).

Table 6. The most often used in vegetation studies two-channel spectral vegetation indices (Thenkabail i in., 2

Nazwa wskaźnika* Spectral index	Skrót Abbreviation	Formuła Equation	Odwołanie do literatury References
Simple ratio/Ratio vegetation index (Wskaźnik zieleni)	VI/SR /RVI	$\boldsymbol{\mathcal{R}} / RVI = \frac{\rho_{\lambda 1}}{\rho_{\lambda 2}}$	Pearson, Miller, 1972
Normalized difference vegeta- tion index (Znormalizowany różnicowy wskaźnik zieleni)	NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{\lambda 1} - \rho_{\lambda 2}}{\rho_{\lambda 1} + \rho_{\lambda 2}}$	Rouse i in., 1974
Perpendicular vegetation index	PVI	$PVI = \frac{\rho_{\lambda 1} - a\rho_{\lambda 2} - b}{\sqrt{1 + a^2}}$	Richardson, Wiegand, 1977
Second soil-adjusted vegetation index	SAVI2	$SAVI2 = \frac{\rho_{\lambda 1}}{\rho_{\lambda 2} + \frac{b}{a}}$	Major i in., 1990
Transformed soil-adjusted vegetation index	TSAVI	$TSAVI = \frac{a(\rho_{\lambda 1} - a\rho_{\lambda 2} - b)}{a\rho_{\lambda 1} + \rho_{\lambda 2} - b}$	Baret i in., 1989

 ρ – współczynnik odbicia; λ_i , λ_s – długość fali; *a* i *b* – współczynniki charakteryzujące linię gleby

 ρ – reflectance; $\lambda_1 \lambda_2$ – wavelength; *a* i *b* – coefficients describing soil line

* Podano tylko powszechnie stosowane polskie odpowiedniki nazw wskaźników NDVI i VI. Nie proponowano polskich wersji pozostałych indeksów, ponieważ stosowane są najczęściej nazwy w języku angielskim.

(Schlerf i in., 2005). W przypadku gatunków iglastych stosowano z sukcesem modele liniowe, ponieważ saturacja występuje tylko przy wysokich wartościach LAI, co zaobserwowali J.M. Chen i J. Cihlar (1996) w badaniach z wykorzystaniem materiałów satelity Landsat TM (NDVI a LAI). Efekt wysycenia może również nie wystąpić, jak piszą J.M. Chen i in. (2002), którzy korzystali danych z satelity SPOT VEGETATION (VI a LAI). Także w badaniach zależności między VI a LAI w lesie świerkowym z użyciem danych hiperspektralnych nie zaobserwowano efektu wysycenia (Schlerf i in., 2005). W niniejszej pracy posłużono się zatem modelem regresji liniowej. Analizę regresji przeprowadzono pomiędzy hiperspektralnymi wskaźnikami roślinnymi a spektralnymi wskaźnikami stanu kosodrzewiny – LAI i f_{APAR}.

Na podstawie utworzonych modeli empirycznych wygenerowano mapy przedstawiające przestrzenny rozkład wartości spektralnych wskaźników stanu roślinności.

Ocena poprawności modeli regresji

Weryfikację modeli zależności pomiędzy spektralnymi wskaźnikami stanu kosodrzewiny a indeksami roślinnymi przeprowadzono posługując się zestawem danych, które nie brały udziału w konstruowaniu modeli empirycznych. Do oceny poprawności modeli wykorzystano mapy tematyczne przedstawiające przestrzenny rozkład analizowanych spektralnych wskaźników stanu roślinności. Mapy \mathbf{f}_{APAR} i LAI zostały wygenerowane w oprogramowaniu ATCOR4 ver. 4.0 (Richter, 2005) jako produkty korekcji radiometrycznej obrazów ze skanera DAIS rejestrowanych równolegle ze zdjęciami ze skanera ROSIS. Wysoka jakość stosowanych danych referencyjnych została potwierdzona poprzez porównanie z danymi terenowymi (Zagajewski i in., 2005b; Jarocińska, Zagajewski, 2008). Na mapy referencyjne i na mapy otrzymane w wyniku zastosowania opracowanych modeli empirycznych, nałożono zestaw losowo wybranych punktów, w których odczytano wartości rozpatrywanych wskaźników. Uzyskane wartości porównano następnie stosując analizę regresji. Zależność wyrażona wielkością współczynnika R² oraz RMSE pozwoliła ocenić poprawność wykonanych modeli.