

# Modelowanie charakterystyk spektralnych heterogenicznych zbiorowisk trawiastych przy użyciu modelu transferu promieniowania

*Simulating spectrum for heterogeneous meadows using a Radiative Transfer Model*

Anna JAROCIŃSKA

**Słowa kluczowe:** Model transferu promieniowania, łąki, PROSPECT

**Key words:** Radiative Transfer Model, meadows, PROSPECT

**Otrzymano:** 2 października 2010; **Zaakceptowano:** 31 sierpnia 2011

**Received:** 2 October 2010 **Accepted:** 31 August 2011

*Meadows are important ecosystems and should be protected. Also, in Poland organic agriculture and farming, where crops from meadows are used, is getting more popular. That is why meadows monitoring and predicting crops is important issue.*

*Much information can be calculated from spectrum of plants and that is why remote sensing data are very useful tool. Two approaches are used to calculate biophysical variables: statistical and modelling. In statistical, values from field measurements have to be compared with images. In modelling, radiative transfer models are used. RTM are physical models based on the fundamental equation of radiative transfer. After all necessary adjustments, models can give the description of the canopy with fewer field measurements.*

*In this paper model on leaf level was chosen. PROSPECT uses only five input variables: chlorophyll and carotenoid content, water content, dry matter and leaf structure parameter. Model is normally used to homogeneous canopy, like corn. In this paper, PROSPECT was used to simulate spectrum for heterogenic meadows using field measurements.*

*Biophysical variables were collected during field measurements in the Bystrzanka catchment in the Low Beskid Mountains. In the same time more than 10 samples of spectrum were*

*collected using ASD FieldSpec 3 FR and then averaged. The minimum size of polygon was 100m<sup>2</sup>. All input parameters for every polygon were included into the model and spectrum was modelled. Then spectrum was compared with measured samples of each polygon. In the end the vegetation indices were calculated using two kinds of spectrum and compared. All used vegetation indices are describing plant condition or crop monitoring: Normalized Difference Vegetation Index, Red Edge Normalized Difference Vegetation Index, Photochemical Reflectance Index, Normalized Difference Nitrogen Index, Normalized Difference Lignin Index, Cellulose Absorption Index, Carotenoid Reflectance Index, Water Band Index and Moisture Stress Index.*

*Researches shows, that it is possible to simulate spectra for heterogeneous meadows using PROSPECT. The average RMSE value for all polygons was 0,0346, which mean the spectra are well modelled. The biggest mistake was for near infrared range, where is the strongest influence of dry matter content. The differences between measured and modelled spectrum were also noticed on the part of visible light – 400-500nm.*

*For most calculated vegetation indices values were similar for both kinds of spectra. Values of NDVI, WBI and NDLI were very close. The biggest differences were noticed from PRI and CRI.*

## Wstęp

Spektroskopia umożliwia badanie obiektów przy użyciu krzywych odbicia spektralnego. Każdy obiekt absorbuje i odbija różną ilość promieniowania w zależności od długości fali elektromagnetycznej. Za pomocą analizy charakterystyk spektralnych możliwe jest bardzo precyzyjne badanie poszczególnych obiektów. Spektroskopia

stosowana jest w badaniach roślinności ze względu na możliwość analizy budowy roślin, ich składu chemicznego, struktur komórkowych, biomasy, zawartości wody i kondycji roślin.

Do badania właściwości pokrywy roślinnej używane są dwa podejścia: statystyczne oraz modelowanie (Kumar i in., 2006). W podejściu statystycznym korelowane są parametry roślinne pobrane w czasie pomia-

rów naziemnych z wartością odbicia lub transmitancji. Drugim sposobem jest opisywanie za pomocą praw fizyki drogi, jaką przebywają fotony w liściach używając modeli transferu promieniowania – *Radiative Transfer Model* (Jacquemoud i in., 1996). Modele są coraz szerzej stosowane ze względu na automatyzację procesu po dostosowaniu parametrów do badanego środowiska. Modele umożliwiają szybkie i precyzyjne badanie pokrywy roślinnej. Wprowadzane udoskonalenia umożliwiają badanie coraz bardziej złożonych zbiorowisk. W Polsce badania roślinności do tej pory odbywały się wyłącznie przy użyciu podejścia statystycznego, zarówno przy wykorzystaniu danych wielo- jak i hiperspektralnych (np.: Dąbrowska-Zielińska i in., 2009; Jarocińska i Zagajewski, 2009). Ograniczeniem podejścia statystycznego jest konieczność stałego wykonywania referencyjnych pomiarów terenowych, co wydłuża czas badań.

Modele transferu promieniowania wykorzystywane są do wielu rodzajów zbiorowisk roślinnych: zbóż, użytków zielonych, lasów. Model ujednocila pokrywę roślinności, więc im bardziej zróżnicowane zbiorowisko, tym większe ryzyko błędnego uogólnienia. Do analiz wybrano model PROSPECT, który opisuje roślinność na poziomie pojedynczych liści, a nie całej pokrywy. Mimo dokładności analizy ujednocila on parametry liści.

Przedmiotem analizy są zbiorowiska łąkowe, które na terenie Polski są zróżnicowane pod względem fitosocjologicznym i morfologicznym. Szczególnie dotyczy to łąk użytkowanych ekstensywnie. Model PROSPECT niezwykle rzadko stosowany jest do zbiorowisk heterogenicznych, dlatego jego użycie do tego typu roślinności jest nowatorskie.

Łąki to grunty zajęte pod uprawę traw lub innych upraw zielnych naturalnych lub powstałe w wyniku działalności rolniczej. Łąki najczęściej powstają na siedliskach polesnych, a ich istnienie warunkuje systematyczne wykaszanie. Charakterystyczną cechą zbiorowisk jest to, że korzenie i rozłogi roślinności tworzą darń, dzięki której łąka może się odradzać po każdym skoszeniu i przerwie zimowej. Łąki użytkowane są głównie kośnie, a pozyskiwaną z nich zielonkę suszy się na siano lub zakisza. Plony z łąk stanowią główne źródło pokarmu dla hodowlanych zwierząt roślinożernych.

Łąki wraz z pastwiskami składają się na użytki zielone. Trwale użytki zielone, które są porośnięte trwale roślinnością, a nie występują na gruntach ornych jako płodozmian, stanowią około 10% powierzchni całej Polski. W porównaniu z innymi państwami Europy i rolą, jaką spełniają w kształtowaniu krajobrazu, ich udział w powierzchni kraju jest niski. Ponadto nie wszystkie z trwałych użytków zielonych stanowią powierzchnię produkcyjną, część jest zaniedbana lub na terenach niedostępnych. Pomijając tego typu grunty szacuje się, że około 70% użytków jest wykorzystywanych: koszonych lub wypasanych.

Łąki mają zarówno znaczenie dla rolnictwa jak i znaczenie ekologiczne. Tego typu zbiorowiska są bardzo cenne przyrodniczo. Stanowią wartościowe siedliska rodzimych gatunków roślin i zwierząt, co ma także

związek z ich często naturalnym lub półnaturalnym charakterem. Łąki stanowią także magazyn wód powierzchniowych i podziemnych. Obecnie ze względu na coraz większą popularność rolnictwa ekologicznego znaczenie łąk wzrosło.

W artykule zaprezentowane są wyniki zastosowania modelu do symulowania krzywych odbicia spektralnego na niejednorodnych łąkach. Dane biofizyczne o roślinach pobrane w terenie zostały dostosowane, a następnie wprowadzone do modelu PROSPECT w celu uzyskania krzywych odbicia spektralnego. Następnie porównano je z wartościami odbicia zmierzonymi w terenie na tych samych poligonach. Przeanalizowano zgodność krzywych oraz wpływ poszczególnych parametrów biofizycznych na dokładność modelowania. Ostatnim etapem było policzenie z obu rodzajów krzywych teledetekcyjnych wskaźników roślinności i porównanie ich.

### Modele transferu promieniowania w badaniach roślinności

Modele RTM są modelami fizycznymi, które na podstawie praw fizycznych opisują, co dzieje się z promieniowaniem w atmosferze i kontakcie z pokrywą roślinną. Modele bazują na charakterystyce transferu energii w formie promieniowania elektromagnetycznego. Rozprzestrzenianie się promieniowania przez określone medium jest uwarunkowane procesami absorpcji, emisji i rozproszenia (Kumar i in., 2006). Pokrywa roślinności lub pojedyncze liście opisane są jako homogeniczne warstwy. Modele transferu promieniowania dostarczają informacji na temat promieniowania w zetknięciu z pokrywą roślinną. Przy ich użyciu można wyliczać zmienne biofizyczne roślin.

Pokrywa roślinna może być traktowana jako homogeniczna warstwa składająca się z liści oraz przestrzeni między nimi. Zarówno pojedyncze liście jak i całe baldachimy roślinności można opisać za pomocą trzech parametrów: odbicia, transmisji i absorpcji. Za absorpcję w świetle ultrafioletowym i widzialnym odpowiada kompozycja, ilość i rozmieszczenie pigmentów w liściach. Na odbicie w zakresie bliskiej i średniej podczerwieni wpływa wewnętrzna struktura liści oraz zawartość wody.

Główne substancje biochemiczne budujące liście wpływające na wielkość odbicia to celuloza, hemiceluloza, lignina, skrobia, azot oraz komponenty: białka i pigmenty (Tretyn, 2007). Chlorofil, który jest niezbędny do fotosyntezy, absorbuje światło w zakresach 430, 660nm (chlorofil a) i 460, 640nm (chlorofil b). Białka zawierające w sobie większość azotu absorbują światło w następujących długościach fali: 1500, 1680, 1740, 1940, 2050, 2170, 2290 oraz 2470nm. Celuloza absorbuje zakres 1220, 1480, 1930, 100, 2280, 2340, 2480nm oraz w podczerwieni termalnej. Od 10 do 35% suchej masy stanowi lignina pochłaniająca promieniowanie w zakresie 1450, 1680, 1930, 2270, 2330, 2380, 2500nm oraz w przedziale 2050-2140nm. Skrobia absorbuje światło o następujących długościach: 990, 1220, 1450, 1560,

1700, 1770, 1930, 2100, 2320 oraz 2480nm. Wymienione pięć substancji wywiera dominujący wpływ na kształt i wartości krzywej odbicia spektralnego dla liści. Są one odpowiedzialne za podobieństwo spektrum dla wszystkich roślin zielonych.

Modele charakteryzujące pokrywę roślinną różnią się danymi wejściowymi i wyjściowymi, poziomem analizy, wprowadzanymi modyfikacjami uwzględniającymi zakłócenia oraz rodzajem roślinności, do jakich można je zastosować. Parametrami wejściowymi modeli są zmienne biofizyczne (np. zawartość chlorofilu, wody, biomasa, geometria pokrywy roślinnej, liści), a wyjściowymi na ogół krzywe odbicia spektralnego. Modele mogą analizować roślinność na dwóch poziomach: pokrywy roślinnej oraz liści. Mogą uwzględniać różnego rodzaju zakłócenia przez wprowadzanie elementów korygujących, np. efekt nadmiernego odbicia. Są dostosowywane do różnorodnych powierzchni, innego rodzaju stosowane są do powierzchni łąkowych niż w przypadku leśnych ze względu na inną strukturę zbiorowisk.

Modele, które opisują wielokierunkowe odbicie i rozproszenie na poziomie liści nazywane są *plate models*. Opisują wewnętrzną strukturę liści jako płaszczyzny i nie biorą pod uwagę atmosfery ani tła gleby. Do tego typu modeli należy PROSPECT (Jacquemoud, Baret, 1990), który został zastosowany w badaniach. Model pozwala na obliczenie odbicia i transmitancji liści w zakresie 400-2500nm. Jest jednym z najpopularniejszych używanych na świecie modeli obliczających charakterystyki spektralne (Darvishadeh i in., 2008; Haboudane i in., 2002; Jacquemoud i in., 2000; Jacquemoud i in., 1996; Verhoef i Bach, 2003a; Verhoef i Bach, 2003b). Na ogół jest stosowany do jednolitych powierzchni, takich jak zboża. Z czasem zaczęto wprowadzać modyfikacje modelu umożliwiające analizę bardziej złożonych formacji roślinnych. Model bardzo rzadko jest stosowany do roślinności niejednorodnej.

Model PROSPECT jest bardzo szeroko stosowany do odwzorowywania właściwości pokrywy roślinnej. Model używany jest jako samodzielny moduł lub jako kombinacja z innymi algorytmami charakteryzującymi całą baldachim roślinności. Do celów aplikacyjnych model stosowany był w badaniach zmiennych biofizycznych na poziomie pojedynczych: w szczególności zawartość chlorofilu, LAI (Darvishadeh i in., 2008; Feret i in. 2008) oraz wody (Ceccato i in., 2001). Używano go do analizy zarówno upraw jak i formacji trawiastych (Darvishadeh i in., 2008). Znacznie częściej samodzielnie model był opisywany w artykułach analizujących metodykę. Badano możliwości modelu w zakresie symulowania danych, szczególnie hiperspektralnych, opisujących roślinność (Verhoef, Bach 2003a; Jacquemoud i Baret, 1990; Fourty i in., 1996; Jacquemoud i in., 1996). Najczęściej wykorzystywany jest jako model obliczający parametry wejściowe do modeli. Może być łączony z modelami rolniczymi, czyli szacującymi rozwój roślin oraz plony (Blackburn i Ferwerda, 2008), a także z innymi RTM opisującymi pokrywę roślinną. Wśród drugiej grupy najczęściej pojawia się model SAIL oraz jego modyfikacje,

np. GeoSAIL (Koetz i in., 2007; Verhoef i Bach, 2003a). Model PROSAIL (połączenie PROSPECT i SAIL) służył do badania zmiennych biofizycznych: np. chlorofilu, wody, LAI (Haboudane i in., 2002; Jacquemoud i in., 2009, Zarco-Tejada i in., 2003). Szacowane były także błędy modelu dla różnego rodzaju upraw, np. zbożowych (Duke, Guérif, 1998).

Bez połączenia z modelem opisującym pokrywę roślinności może być używany jedynie dla danych pobranych na poziomie naziemnym. Model zakłada, że roślinność składa się z wielu prostych warstw liści o specyficznych właściwościach absorpcyjnych i refrakcyjnych oddzielonych od siebie warstwami powietrza (Fourty i in., 1996). Każda warstwa jest charakteryzowana przez rozpraszanie za pomocą współczynnika refrakcji liści i parametru opisującego strukturę liści. Przy tworzeniu modelu brano pod uwagę parametry roślinne takie jak zawartość wody, pigmentów, głównie chlorofilu, białka, celulozy i jej pochodnych, ligniny, skrobi oraz masę liści (Jacquemoud i in., 1996). Model zakłada, że liść i jego właściwości są takie same z obu stron, homogeniczne pod względem biochemicznym, a odbicie od liścia jest identyczne niezależnie od kierunku, co jest znacznym uproszczeniem.

## Teren badań

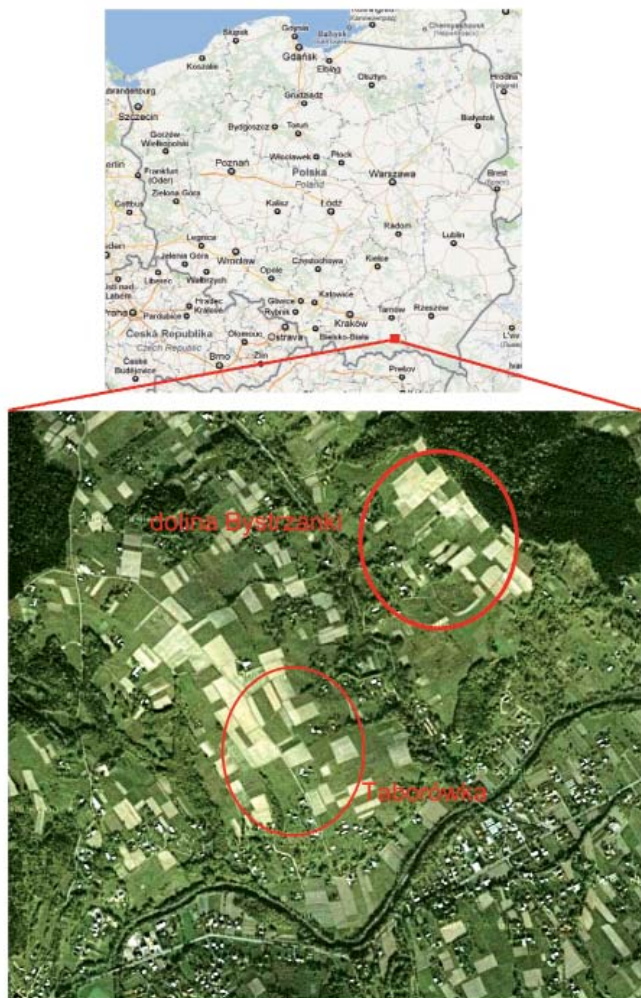
Teren badań obejmował obszar w Beskidzie Niskim na granicy Beskidów i Pogórza Karpackiego w zlewni Bystrzanki w okolicy Gorlic (Ryc. 1). Teren ten jest ekstensywnie użytkowany rolniczo. Obszar zlewni (13.6km<sup>2</sup>) pokryty jest w większości lasami oraz terenami rolniczymi. Dominującymi uprawami są zboża jare i ozime, rośliny okopowe i koniczyna. Grunty orne stanowią 19%, łąki i pastwiska 28%, najwięcej lasy 40%. Około 10% stanowią sady i zabudowania. Poligony badawcze znajdowały się na stokach wzgórza Taborówka oraz w dolinie Bystrzanki. Były one do siebie zbliżone pod względem fitosocjologicznym.

Przedmiotem badań były heterogeniczne zbiorowiska trawiaste – łąki. Analizowano zarówno łąki koszone jak i niekoszone. Wszystkie zbiorowiska są zróżnicowane, złożone z minimum 4 gatunków roślin. Większość z nich stanowiły łąki rajgrasowe, wykształcone na siedliskach świeżych. Dominowały rodzaje z rodziny wiechlinowatych: rajgras (w tym rajgras wyniosły), stokłosa (w tym stokłosa bezostna), a także perz i wiechlina. Spoza rodziny wiechlinowatych duży udział miała koniczyna łąkowa. Ze względu na koszenie łąki często miały różny stopień odrośnięcia. Dlatego podzielono poligony na łąki skoszone i łąki nieskoszone.

## Metodologia – pobieranie danych przekształcenia modelu

Pomiary w terenie wykonano w czasie 23, 24 lipca 2009 roku. W terenie wyznaczono 7 poligonów





Ryc. 1. Teren badań – zlewnia Bystrzanki. Źródło: Google-Earth, GoogleMaps

Fig. 1. Area of interest – Bystrzanka catchment (GoogleEarth, GoogleMaps)

testowych, gdzie dokonano pomiarów, trzy z nich na terenie Taborówki, cztery w dolinie Bystrzanki. Poza współrzędnymi geograficznymi pobrano referencyjne krzywe odbicia spektralnego, dane wejściowe do modelu PROSPECT oraz dodatkowe pomiary. Poligony zostały wybrane na podstawie zróżnicowania roślinności. Miały one wielkość około 1 ha. Na każdym z poligonów wybrano obszar reprezentatywny wielkości około 25m<sup>2</sup>, gdzie dokonywano pomiarów. Poligony pobrano dla regionów Taborówka (oznaczone symbolem T) i dolina Bystrzanki (symbol P).

Wykonano pomiary krzywych odbicia spektralnego przy użyciu ASD FieldSpec 3 FR w świetle naturalnym. Spektrometr mierzy współczynnik odbicia dla 1151 kanałów spektralnych o szerokości około 3nm w zakresie od 350 do 2500 nm. Wykonywany był pomiar kalibracyjny wzorca bieli

i czerni. Nie w każdym przypadku korekcja kalibracja spektrometru była udana, dlatego w zakresach absorpcji wody pomiary są zafalszowane. Dla każdego poligonu pobrano minimum 10 krzywych odbicia spektralnego, a następnie je uśredniono.

Pomiary wejściowe do modelu PROSPECT obejmowały pomiary chlorofilu, masy suchej oraz zawartości wody. Zawartość chlorofilu mierzono za pomocą urządzenia CCM-200 Chlorophyll Content Meter, które nieinwazyjnie mierzy wskaźnik Chlorophyll Content Index. Dla każdego z poligonów wykonano po 10 pomiarów, które następnie uśredniono. Zawartość wody i masa sucha określone były przez zważenie biomasy świeżej i suchej. Biomase z 0,25m<sup>2</sup> ścięto i zważono. Następnie wysuszone i zważono masę suchą. W ten sposób uzyskano zawartość wody w liściach i masy suchej w g/m<sup>2</sup>.

Wykonano także pomiary dodatkowe. Należały do nich: pomiary temperatury powietrza i roślin, LAI, APAR i fAPAR. Pomiary LAI wykonane były urządzeniem LAI Plant Canopy Analyzer, które liczy powierzchnię projekcyjną liści na 1m<sup>2</sup>. Pomiary wartości LAI zostały użyte do przeliczania danych wejściowych do modelu.

Wykonano towarzyszące pomiary temperatury radiacyjnej roślin (Ts) oraz temperatury powietrza (Ta) i obliczono wskaźnik Ts-Ta. Temperaturę mierzono termohigrometrem i pirometrem IR-Tec. Za pomocą wskaźnika uzyskano dane o stresie wodnym roślin. Zmierzono także Akumulowane Promieniowanie w Zakresie Fotosyntezy (APAR) oraz jego frakcję fAPAR. Na tej podstawie określono produktywność roślin oraz ich kondycję.

Poligony pierwszego regionu – Taborówki miały nieco mniejszą zawartość chlorofilu, a także znacząco niższą zawartość wody w porównaniu z roślinami doliną Bystrzanki. Trzy poligony (T1, T9 i P2.2) zostały określone jako łąka skoszona z odrastającą roślinnością, a cztery jako łąka nieskoszona. Poligony łąki skoszonej miały nieco mniejszą wartość powierzchni projekcyjnej liści (LAI wynosiło od 1,43 do 2,86) w porównaniu z nieskoszonymi, gdzie wartość wahała się od 1,85 do 4,35.

Do badań wybrano model PROSPECT-5, czyli najnowszą wersję algorytmu. Parametry wejściowe do modelu to: parametr opisujący strukturę liści – zawartość warstw liści (N), zawartość chlorofilu a i b (Cab) oraz

Tabela 1. Dane wejściowe do modelu PROSPECT-5.

Table 1. Input biophysical variables for PROSPECT-5

Symbol <i>Symbol</i>	Jednostka <i>Unit</i>	Zakres wartości <i>Range of values</i>	Zmienna <i>RTM variables</i>
N	Bezzjednostkowy / no units	1,2-3	Parametr strukturalny liści / Leaf structure index
Cab	µg/ cm <sup>2</sup>	30-109	Zawartość chlorofilu / Leaf chlorophyll content
Car	µg/ cm <sup>2</sup>	8-22	Zawartość karotenoidów / Leaf carotenoid content
Cm	g/cm <sup>2</sup>	0,004-0,05	Masa sucha liści / Dry matter content
Cw	cm	0,01-0,05	Zawartość wody w liściach / Equivalent Water Thickness

karotenoidów (Car), zawartość materii suchej (Cm) i masa wody w liściach (Cw). Dane wraz z jednostkami zamieszczone są w Tabeli 1. Wyjściowym elementem modelu jest wartość współczynnika odbicia i transmitancji dla każdej długości fali od 400 do 2500nm co 1nm.

Model PROSPECT\_5 składa się z czterech podprogramów. Jeden z nich oblicza transmitancję na powierzchni liści dla danego trójwymiarowego kąta padania. Drugi ustala długości fali, jakie będą używane w programie (od 400 do 2500nm). Trzeci nadaje wartości współczynnika refrakcji i absorpcji dla chlorofilu, karotenoidów, wody i materii suchej. Do ostatniego programu używającego wymienione moduły wczytywane są dane wejściowe: N, Cab, Car, Cw, Cm. Danymi wyjściowymi jest tablica składająca się z trzech kolumn: długości fali, wartości odbicia i transmitancji dla danej długości fali. Obliczanie odbywa się pojedynczo dla każdej długości fali. Pierwszym etapem jest obliczenie współczynnika absorpcji na podstawie zawartości poszczególnych parametrów przemnażanych przez współczynniki absorpcji, następnie w zależności od jego wartości, w różny sposób obliczana jest absorpcja i transmitancja.

Dla każdego zbiorowiska przeliczono dane z pomiarów na dane wejściowe we właściwych jednostkach. Zawartości chlorofilu z wartości CCI zostały przeliczone według wzoru, który był ustalony empirycznie w badaniach dla tego instrumentu. Zależność ustalono na podstawie ponad 200 losowo wybranych punktów. Mierzono zawartość chlorofilu instrumentem, a następnie dla tej samej rośliny badano zawartość chlorofilu w µg. Następnie zawartość chlorofilu dla każdego poligonu została podzielona przez powierzchnię liści w cm<sup>2</sup>, które były uzyskane z pomiarów LAI.

Zawartość karotenoidów przeliczono na podstawie zależności karotenoidów w stosunku do chlorofilu dla zdrowych roślin dla tego terenu. Przeliczone je na podstawie wzoru: Car=Cab/5. Karotenoidy używane są w modelowaniu jedynie zakresu od 400 do 600nm, a ich wpływ jest niewielki w porównaniu z wpływem chlorofilu.

Zawartość wody podawana w cm, jako frakcja całkowitej zawartości wody w roślinie (*Equivalent Water Thickness*), czyli miara grubości wody, jaka byłaby wymagana do naśladowania elementów absorbujących wodę mierzonych w zakresie 580-1100nm. Określana jest na podstawie ilości wody w roślinie w cm<sup>3</sup> w stosunku do powierzchni liści w m<sup>2</sup> (Yilmaz i in., 2008). Zawartość obliczono na podstawie różnicy wagi między biomasa świeżą a suchą. Ilość wody zważoną w pomiarach przeliczono na zawartość w procentach i zawartość wody na 1cm<sup>3</sup>, a następnie na cm, dzieląc przez powierzchnię liści w cm<sup>2</sup>. Zawartość masy suchej w g/cm<sup>2</sup> wyznaczono z ilości masy suchej modyfikując jednostki.

Ostatnią daną wejściową jest parametr strukturalny N. Jego zakres dla waha się od 1 do prawie 6, ale na ogół zamyka się w przedziale od 1 do 4. Dla zwartych pokryw jednoliściennych parametr waha się od 1 do 1,5, dla dwuliściennych 1,5 do 2,5, natomiast wartości powyżej 2,5 przyjmują rośliny z dużą liczbą liści o nieorganizowanej strukturze wewnętrznej (Jacquemoud,

Baret, 1990). Parametr można obliczyć z *Specific Leaf Area*, czyli powierzchni liści na jednostkę masy suchej materii mierzonej w cm<sup>2</sup> na gram. Autorzy modelu podają następujący wzór:

$$N = \frac{0,9 \times SLA + 0,025}{SLA - 0,1}$$

Kolejny wzór na obliczenie N z SLA zaproponowali Veroustraele i Gond (Ceccato i in., 2001):

$$N = \sqrt[4]{\left(\frac{1}{SLA - 0,1}\right)}$$

Oba wzory nie zawsze dają możliwość prawidłowego określenia parametru. Dla niewielkich wartości SLA równanie nie może być zastosowane. Dlatego często ten parametr strukturalny wyznacza się empirycznie (Ceccato i in., 2001).

W badaniach wykorzystano obydwa wzory. Parametr SLA został wyliczony z danych o powierzchni projekcyjnej liści, gdzie LAI jest mierzony na 1 metr kwadratowy, a masa sucha została pobrana z powierzchni ¼ metra kwadratowego. Po obliczeniu parametru SLA został obliczony N za pomocą dwóch wzorów. Dla obu sposobów obliczania, dane wahały się od 0,9 do 1, co oznacza, że żaden ze wzorów nie może być zastosowany. Błędne wyliczenie parametru najprawdopodobniej wynika z heterogeniczności zbiorowisk. Parametr strukturalny został dopasowany empirycznie osobno dla każdego poligonu. Dla wszystkich pomiarów wahał się on od 1 do 2,3.

Program PROSPECT uzupełniono i na podstawie wczytanych danych, utworzono krzywe odbicia spektralnego. Konieczne były wielokrotne próby dopasowania parametru N, aby krzywe były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych.

## Analiza danych

Poddano weryfikacji krzywe na podstawie porównania z oryginałem. Zestawiono całe krzywe oraz wycinki w zależności od zakresu promieniowania. Został obliczony pierwiastek z średniego błędu kwadratowego (*Root Mean Square Error* – RMSE). Policzony został dla wszystkich krzywych odbicia spektralnego w zakresie od 400 do 2500 nm. Ponadto, wydzielono cztery przedziały widma, dla których wyliczono RMSE. Zakres widzialny podzielono na dwie części: 400-600 nm oraz 400-800 nm. Jest to związane z zakresami wartości absorpcji poszczególnych substancji. Na wartość współczynnika odbicia w zakresie między 400 a 600nm mają wpływ wszystkie parametry: karotenoidy, chlorofil, zawartość wody, ilość materii suchej oraz parametr strukturalny N. Ponadto policzono wartości błędu RMSE dla zakresów: 800-1500 nm oraz 1500-2500 nm. Podzielono także łąki na skoszone i nieskoszone, a następnie obliczono wartości RMSE dla tych grup.

Ze względu na błędy w kalibracji w czasie pomiarów terenowych wartości współczynnika odbicia były zaburzone w zakresie od 1350 do 1400 nm, około 1810 do 1945 nm oraz powyżej 2450 nm. Do obliczenia RMSE dla każdej krzywej wycięto fragment o niewłaściwych wartościach dla krzywej z terenu i modelowanej przez PROSPECT.

W analizie roślinności szerokie zastosowanie mają wskaźniki, które pozwalają na szczegółową analizę. Jest to szczególnie precyzyjna metoda badawcza przy użyciu danych hiperspektralnych. Teledetekcyjne wskaźniki roślinności to miary bazujące na krzywych odbicia spektralnego roślinności służące do badania szaty roślinnej (Jensen, 1983). Łączą dane teledetekcyjne z biofizycznymi charakterystykami powierzchni roślin. Teledetekcyjne wskaźniki roślinności są powszechnie wykorzystywane w prognozowaniu plonów, analizie produkcji biomasy, kondycji roślinności i identyfikacji poszczególnych gatunków.

Kończącym etapem analizy charakterystyk spektralnych było policzenie teledetekcyjnych wskaźników roślinności na krzywych pobranych z terenu i modelowanych za pomocą PROSPECT. Dla wszystkich wskaźników porównano wartości dla dwóch rodzajów krzywych. Obliczono następujące wskaźniki w przewadze dedykowane do danych hiperspektralnych:

*Normalized Difference Vegetation Index* bazując na maksymalnym odbiciu w bliskiej podczerwieni i maksymalnej absorpcji w paśmie czerwonym. Określa pokrycie terenu przez roślinność i jej kondycję (Rouse i in., 1973). We wzorze wykorzystano wartości maksymalnego odbicia w bliskiej podczerwieni i minimalnego w paśmie czerwonym

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

*Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* służy do badania nawet niewielkich zmian roślinności dzięki wykorzystaniu wartości odbicia z pasma Red Edge (Gitelson i Merzlyak, 1994). Spełnia podobne funkcje jak NDVI.

$$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$$

*Photochemical Reflectance Index* jest wrażliwy na zmiany zawartości karotenoidów, dlatego jest używany do badania światła wykorzystywanego do procesu fotosyntezy (Gamon i in., 1992)

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$$

*Normalized Difference Nitrogen Index* jest używany do badania względnej zawartości azotu w roślinach (Serrano i in., 2002). Stosowany w rolnictwie, analizach ekosystemów i zarządzaniu lasami. Wykorzystuje zakresy, w których azot absorbuje promieniowanie.

$$NDNI = \frac{\log(1/\rho_{1510}) - \log(1/\rho_{1680})}{\log(1/\rho_{1510}) + \log(1/\rho_{1680})}$$

*Normalized Difference Lignin Index* przeznaczony do oszacowania zawartości ligniny – suchej materii w roślinach (Serrano i in., 2002). Stosuje się go do analizy ekosystemów i badania ilości zeschniętych części roślin, zagrożenia pożarowego.

$$NDLI = \frac{\log(1/\rho_{1754}) - \log(1/\rho_{1680})}{\log(1/\rho_{1754}) + \log(1/\rho_{1680})}$$

*Cellulose Absorption Index* określa, ile jest materii suchej reprezentowanej w przewodzie przez celulozę (Nagler i in., 2003). Używany do badania produktywności roślin, szacowania ich suchych części i biomasy.

$$CAI = 0,5 \times (\rho_{2000} + \rho_{2200}) - \rho_{2100}$$

*Carotenoid Reflectance Index* określa zawartość karotenoidów w pokrywie roślinności (Gitelson i in., 2002)

$$CRI = \left(\frac{1}{\rho_{510}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right)$$

*Water Band Index* mierzący zawartość wody w pokrywie roślinności (Peñuelas i in., 1997). Wskaźnik wykorzystywany w analizie stresu wodnego roślin, w przewidywaniu produktywności roślin, modelowaniu, analizie zagrożenia pożarowego i rolnictwie

$$WBI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{970}}$$

*Moisture Stress Index* określa zmiany zawartości wody w roślinach (Rock i in., 1985). Wykorzystywany do badania stresu wodnego roślin.

$$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}}$$

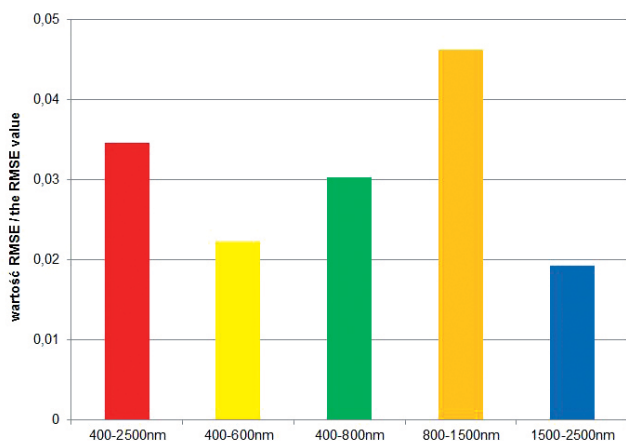
Wartości wskaźników mówią o kondycji roślinności oraz ilości biomasy. Ich wykorzystanie pozwala na oszacowanie tego typu danych. Dlatego istotne jest sprawdzenie, czy dane modelowane mogą służyć do obliczania wskaźników, oraz zweryfikowanie ich wartości.

## Wyniki

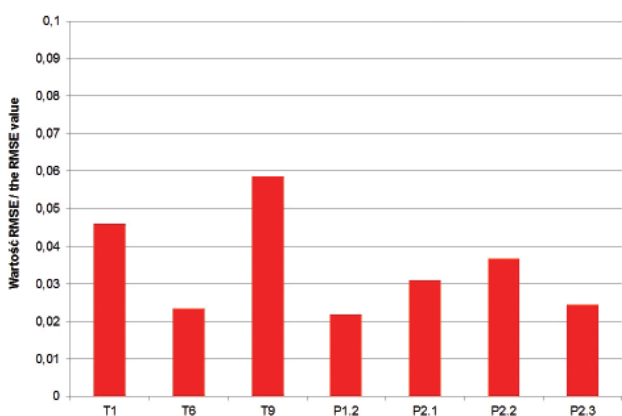
Porównując wartości zmiennych biofizycznych z dwóch regionów większość modelowanych krzywych odbicia spektralnego daje bardzo dobre wyniki. Średni błąd RMSE dla wszystkich krzywych wyniósł 0,0346. Oznacza to, że krzywe są dobrze dopasowane, a model PROSPECT może służyć do modelowania tego typu zbiorowisk na poziomie pojedynczych liści. Średnio największy błąd został zanotowany w zakresie od 800 do 1500 nm, a najmniejszy dla zakresu od 1500 do 2500 nm (ryc. 2).

Na rycinie 3 zamieszczony jest rozkład wartości RMSE dla poszczególnych poligonów. Najmniejszy błąd równa się 0,0219 i został obliczony dla poligonu P1.2 – łąka nieskoszona o LAI równym 3,13 (Ryc. 4a), tylko nieco większą wartość (0,0234) zanotowano dla





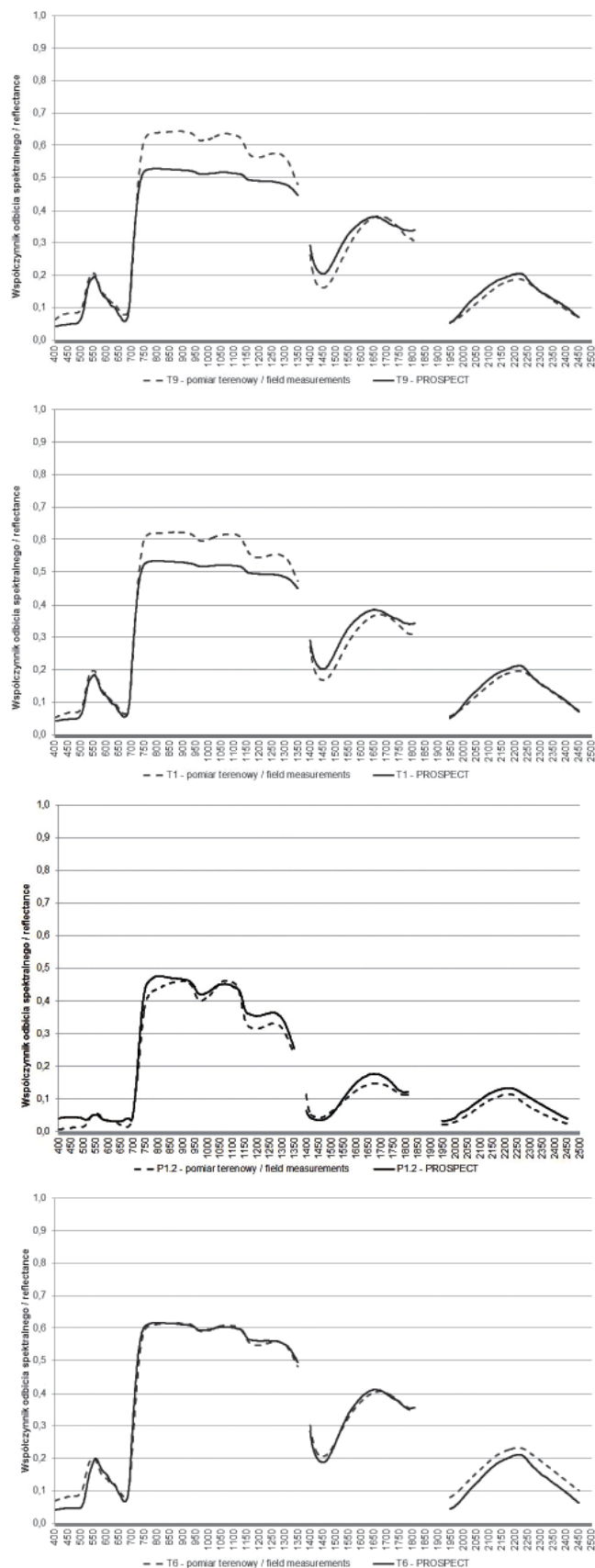
Ryc. 2. Średnia wartość RMSE dla zakresów 400-2500, 400-600, 400-800, 800-1500 i 1500-2500 nm  
 Fig. 2. The average RMSE value for ranges: 400-2500, 400-600, 400-800, 800-1500 i 1500-2500 nm



Ryc. 3. Wartość RMSE dla 400-2500nm  
 Fig. 3. The RMSE value for all modelled spectrum 400-2500 nm

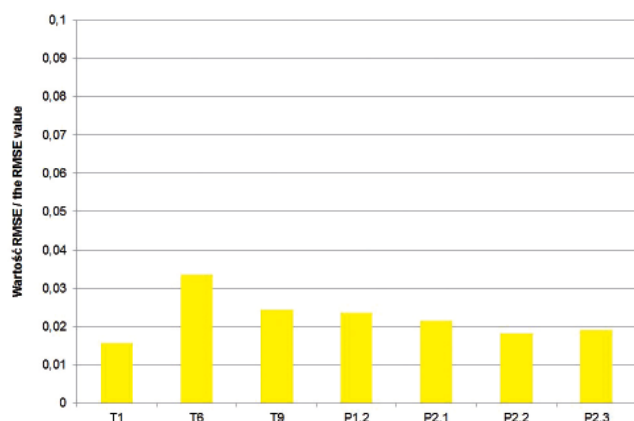
poligonu T6 – łąki podsiewanej (Ryc. 4b). Najwyższą wartość (0,0586) zanotowano dla poligonu T9 – łąki odrastającej o niskich wartościach LAI 1,43 (Ryc. 4d), a nieco mniejszą (0,0461) dla łąki skoszonej odrośniętej T1 (Ryc. 4c). Przy analizie wartości odbicia widoczne jest gorsze dopasowanie krzywych w rejonie bliskiej podczerwieni. W przypadku części poligonów istotne są także różnice w odbiciu 400-500nm, gdzie bardzo duże znaczenie ma zawartość karotenoidów. Poza tymi zakresami nie można stwierdzić, że jakiś zakres jest źle modelowany. Dobrze modelowana jest część światła widzialnego: 500-700nm, gdzie dominuje zawartość chlorofilu, a także średnia podczerwień z dominującym wpływem zawartości wody w liściach. Krzywe dla regionu Taborówka mają nieco większe wartości RMSE.

Różnice w dokładności dopasowania występują także w poszczególnych zakresach promieniowania elektromagnetycznego. Najpierw przeanalizowano zakres od 400 do 600 nm, gdzie na wartość odbicia mają wpływ wszystkie parametry wejściowe. Średni błąd RMSE dla wszystkich poligonów wyniósł 0,0224. Wartość RMSE



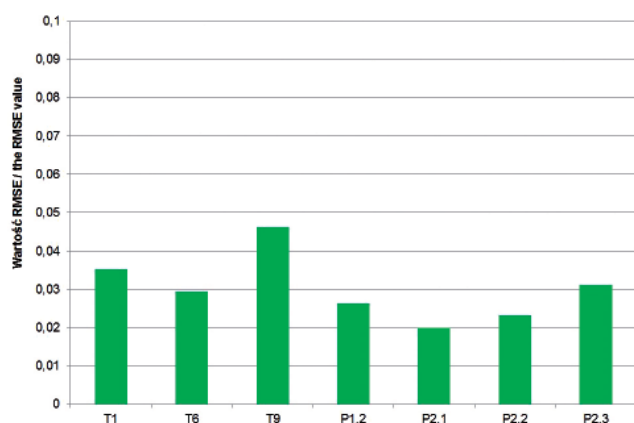
Ryc. 4. Krzywe odbicia spektralnego modelowane i pobrane w czasie pomiarów terenowych. Najlepiej dopasowane spektra w a – poligon P1.2 i b – T6, najgorzej c – T9 i d – T1.  
 Fig. 4. Spectrum modelled using PROSPECT and measured during field measurements: the best fitted (a – polygon P1.2 and b – T6) and the worst (c – T9 and d – T1)

była największa dla poligonu T1 – 0,0158, natomiast największa dla poligonu T6 – 0,0335 (Ryc. 5).



Ryc. 5. Wartości błędu RMSE dla zakresu 400-600nm  
Fig. 5. The RMSE value for 400-600nm

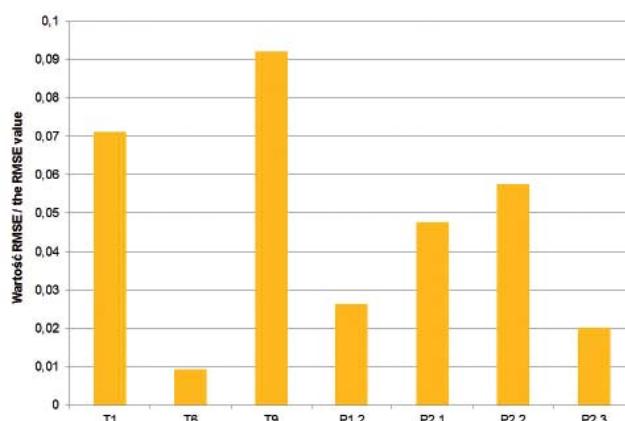
Kolejny wydzielony przedział – 400-800nm obejmuje zakres światła widzialnego i fragment bliskiej podczerwieni tzw Red Edge. W tym zakresie dominuje wpływ chlorofilu na wartość odbicia. Mniejszy wpływ na odbicie mają woda i zawartość masy suchej. W tym zakresie RMSE dla wszystkich poligonów średnio równał się 0,0303. Wartości RMSE dla poszczególnych poligonów (Ryc. 6) nie wykazują znaczących odchyłeń od średniej. Minimalna wartość wynosi 0,2006 (dla P1.2), a maksymalna 0,0463 (dla T9). Pomimo mniejszej zawartości chlorofilu na terenie poligonu Taborówka, nie zanotowano różnic w skuteczności modelowania w zależności od regionu. Wynika z tego, że krzywe są dobrze dopasowane niezależnie od ilości chlorofilu.



Ryc. 6 Wartości błędu RMSE dla zakresu 400-800nm  
Fig. 6. The RMSE value for 400-800 nm

Największy średni błąd RMSE (0,0463) zanotowano dla zakresu bliskiej podczerwieni 800-1500nm. W tym zakresie na wartość odbicia, poza parametrem strukturalnym, wpływa zawartość wody i masa sucha, z czego dominujący wpływ ma druga zmienna. W tym zakresie wartość RMSE wahała się od 0,0093 dla poligonu T6 –

łąka podsiewana o dużej ilości biomasy do 0,0921 dla poligonu T9 – łąka odrastająca z mniejszą ilością masy suchej (Ryc. 7). Także dla pozostałych poligonów, gdzie występuje łąka skoszona, wartości RMSE są większe od pozostałych. Można stwierdzić, że w przypadku mniejszej ilości biomasy (np. w wyniku jej skoszenia) modelowanie wartości współczynnika odbicia jest mniej dokładne. Na skuteczność dopasowania krzywych wpływa także nieuwzględnienie wartości powierzchni projekcyjnej liści, która ma duże znaczenie w przypadku modelowania tego zakresu promieniowania. Taki parametr jest jedynie związany z masą suchą i nie jest uwzględniany w modelu PROSPECT na poziomie pojedynczego liścia, jednak ma wpływ na modelowanie krzywej.

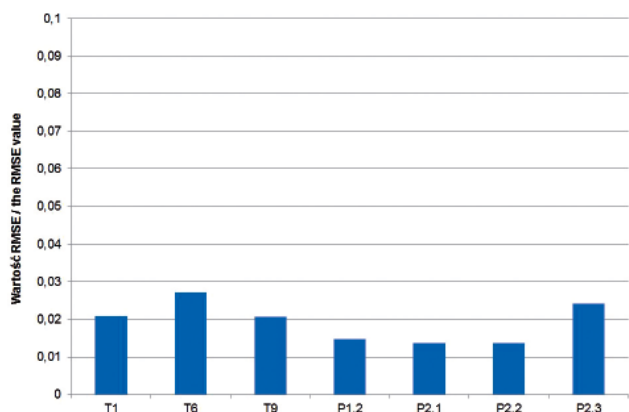


Ryc. 7. Wartości błędu RMSE dla zakresu 800-1500nm  
Fig. 7. The RMSE value for 800-1500nm

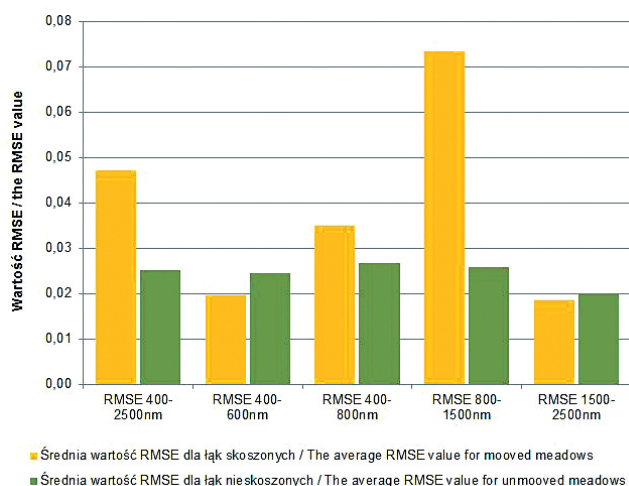
Na odbicie w zakresie średniej podczerwieni (1500-2500nm) największy wpływ, poza parametrem strukturalnym, ma zawartość wody w roślinach, natomiast nieco mniejszą zawartość materii suchej. W tym zakresie występują kanały absorpcji wody, które mają znaczący wpływ na wartości krzywej odbicia spektralnego. Średnia wartość RMSE dla tego zakresu była najmniejsza w porównaniu z pozostałymi i wyniosła 0,0193. W tym przypadku najmniejsze wartości RMSE – 0,0137 zanotowano dla poligonu P2.1 (łąka nieskoszona, jednorodna), natomiast największe – 0,02717 dla poligonu T6, czyli łąki podsiewanej nieskoszonej, niejednorodnej (Ryc. 8). Może być to związane z większym zróżnicowaniem poligonu T6.

Zbiorowiska podzielono na dwie kategorie roślinności: łąkę skoszoną i nieskoszoną. Wartości RMSE dla dwóch zbiorowisk różnią się od siebie: dla łąki nieskoszonej średni błąd dla zakresu 400-2500 nm wyniósł 0,0252, natomiast dla skoszonej 0,0471. Na rycinie 9 zamieszczono wartość RMSE dla całego zakresu oraz porównanie dla poszczególnych jego fragmentów. Znaczące różnice w dopasowaniu występują dla podczerwieni od 800 do 1500 nm, gdzie RMSE dla łąk skoszonych wyniósł 0,0735, a dla nieskoszonych 0,0259. Błąd dla łąk skoszonych jest znacznie większy, co oznacza, że w przypadku skoszenia występuje błąd dla zakresu, gdzie wartość suchej biomasy ma największy wpływ na wielkość odbicia.





Ryc. 8. Wartości błędu RMSE dla zakresu 1500-2500nm  
 Fig. 8. The RMSE value for 1500-2500nm



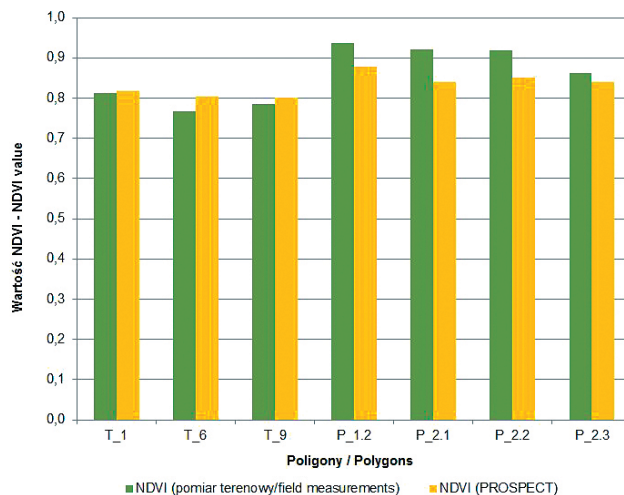
Ryc. 9. Wartości błędu RMSE w zależności od rodzaju łąki  
 Fig. 9. The RMSE value for two kinds of meadows: mowed and not mowed

Także w zakresie widzialnym (400-800nm) większy błąd zanotowano dla łąk skoszonych.

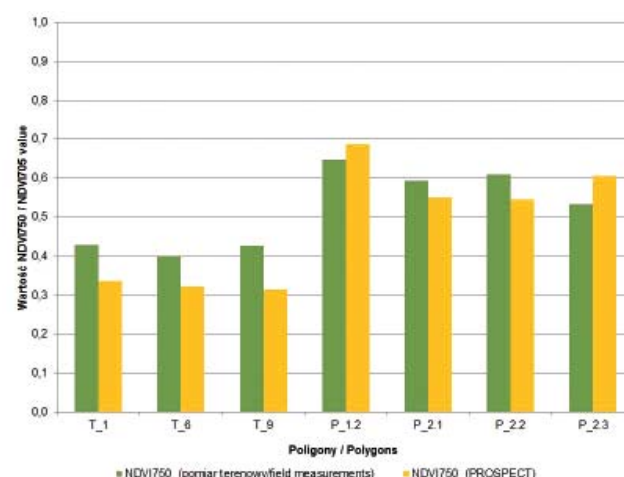
Następnie przeanalizowano wartości teledetekcyjnych wskaźników roślinności obliczonych z dwóch rodzajów krzywych odbicia spektralnego.

Wartości wskaźnika NDVI są zbliżone dla obu rodzajów krzywych (Ryc. 10). Największe różnice nie przekraczają 0,07 dla wszystkich poligonów, co oznacza niewielkie wahanie nie wpływające na interpretację wartości wskaźnika. Sam wskaźnik przyjmuje wartości między -1 a 1 (Rouse i in., 1973). Wskaźnik z krzywych modelowanych jest nieco zaniżony dla poligonów dolinnych. W przypadku Taborówki wahania są nieznaczne.

Wskaźnik NDVI705 wykazuje większe różnice (Ryc. 11). Dla większości poligonów, z wyjątkiem P1.2 i P2.3, wartości wskaźnika na podstawie modelowanych krzywych są zaniżone w stosunku do realnych wartości. Największa różnica wyniosła 0,11 dla poligonu T9 oraz 0,09 dla T1, natomiast zakres wartości dla tego wskaźnika dla roślin zielonych to 0,2 do 0,9 (Gitelson



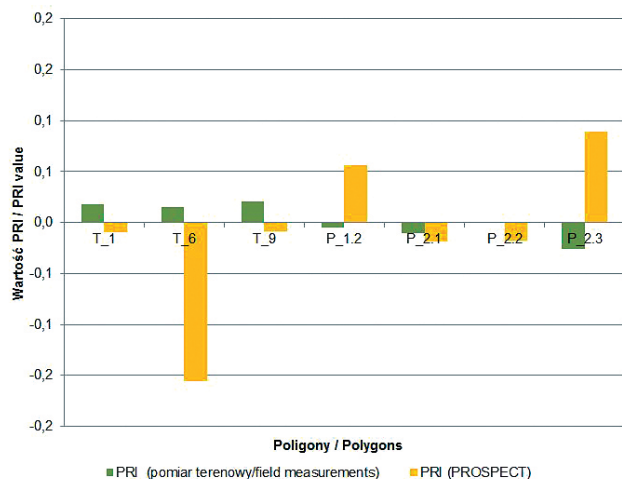
Ryc. 10. Wartość Normalized Difference Vegetation Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
 Fig. 10. Value of Normalized Difference Vegetation Index calculated from measured and modelled spectrum



Ryc. 11. Wartość Red Edge Normalized Difference Vegetation Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
 Fig. 11. Value of Red Edge Normalized Difference Vegetation Index calculated from measured and modelled spectrum

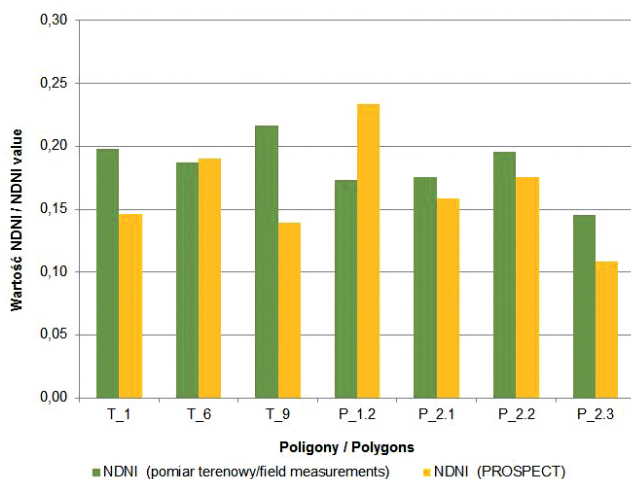
i Merzlyak, 1994). Oba poligony T1 i T9 zaliczają się do kategorii łąk skoszonych, a poligon T1 ma niską wartość LAI. Różnice tej wielkości w wartościach wskaźników mogą wpływać na błędne wnioskowanie np. o kondycji roślinności.

Bardziej zróżnicowane były wartości wskaźnika Photochemical Reflectance Index (Ryc. 12). Wartości oscylowały wokół 0. Dla dwóch poligonów T2 i P2.1 wartości miały ten sam znak. W przypadku poligonu T6 różnica między wartością modelowaną z zmierzoną wyniosła 0,17, nieco mniejsza wystąpiła dla poligonu P2.3 (0,12). Wskaźnik osiąga wartości między -1 a 1, a dla roślin zielonych typowe to od -0,2 do 0,2 (Gamon i in., 1992). Różnice między wartościami modelowanymi a realnymi są istotne i nie wykazują prawidłowości.



Ryc. 12. Wartość Photochemical Reflectance Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
 Fig. 12. Value of Photochemical Reflectance Index calculated from measured and modelled spectrum

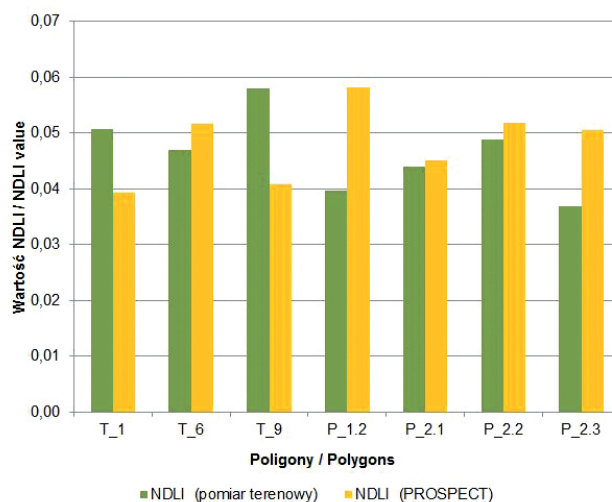
Modelowany wskaźnik *Normalized Difference Nitrogen Index* osiągał wartości na ogół dość zbliżone do realnych (Ryc. 13). Wskaźnik osiąga wartości od 0 do 1 (Serrano i in., 2002), natomiast największa różnica na badanych poligonach wyniosła 0,077 dla łąki T9, która ma niską wartość LAI i została skoszona. Dla znacznej większości punktów wartości są do siebie dostatecznie zbliżone. Na ogół wartości zmierzone w terenie są wyższe niż modelowane.



Ryc.13. Wartość Normalized Difference Nitrogen Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
 Fig. 13. Value of Normalized Difference Nitrogen Index calculated from measured and modelled spectrum

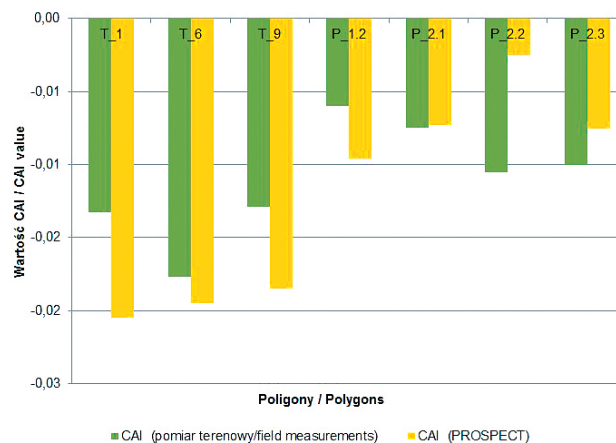
Wartości wskaźnika *Normalized Difference Lignin Index* w większości przypadków były zbliżone dla obu sposobów obliczania (Ryc. 14). Zakres wahania wskaźnika nie przekroczył 0,02 (dla poligonu P1.2), podczas gdy wartości wskaźnika mają zakres od 0 do 1, natomiast dla zielonej roślinności na ogół wynoszą między 0,005

a 0,05 (Serrano i in., 2002). Dla dwóch poligonów (łąk skoszonych T1 i T9) wartość modelowana była mniejsza niż realna, dla pozostałych wartość była zawyżona. Można stwierdzić, że dla większości poligonów wartości są dostatecznie zbliżone, żeby można je było uznać za wiarygodne, jednak różnice w wartościach mogą wpłynąć na niedoszacowanie lub przeszacowanie ilości biomasy.



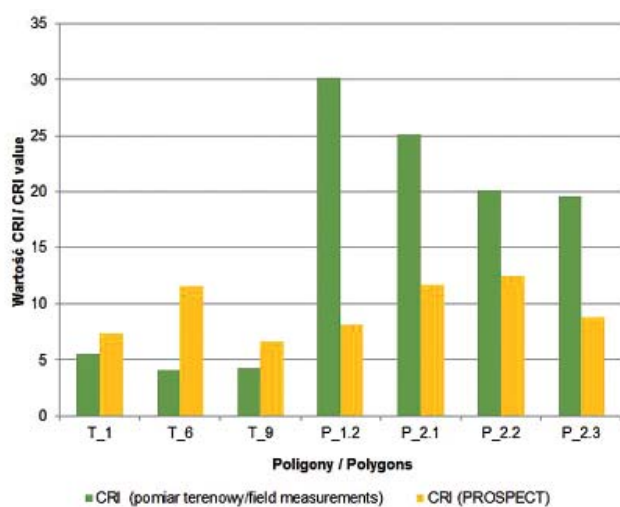
Ryc. 14. Wartość Normalized Difference Lignin Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
 Fig. 14. Value of Normalized Difference Lignin Index calculated from measured and modelled spectrum

Zakres wskaźnik *Cellulose Absorption Index* wynosi na ogół od -3 do 4, natomiast dla roślinności zielonej od -2 do 4 (Nagler i in., 2003). Wartości tego wskaźnika zmierzone w terenie wahają się od -0,018 do -0,006, natomiast modelowane od -0,019 do -0,002, co oznacza, że wartości wskaźnika w odniesieniu do jego zakresu są bardzo niewielkie (Ryc. 15). Najbardziej znacząca różnica 0,008 została zanotowana dla poligonu łąki skoszonej P2.2.



Ryc. 15. Wartość Cellulose Absorption Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
 Fig. 15. Value of Cellulose Absorption Index calculated from measured and modelled spectrum

Zdecydowanie większe różnice w skuteczności modelowania są widoczne na podstawie wskaźnika *Carotenoid Reflectance Index* (Ryc. 16). Zakres jego wahań może wynosić od 0 do 15 (Gitelson i in., 2002). Dla poligonów położonych w dolinie wartości zmierzone w terenie znacznie przekraczają obliczone z modelowanych krzywych wartości. Dla Taborówki wartości modelowane i zmierzone są dość zbliżone dla trzech poligonów, z wyjątkiem T6. Ponadto, w przypadku poligonów dolinnych wartości modelowane są zawyżone i nie mieszczą się w zakresie dla tego wskaźnika. Takie wyniki mogą wskazywać na błędy w wartościach odbicia w poszczególnych kanałach krzywych pobieranych w terenie.

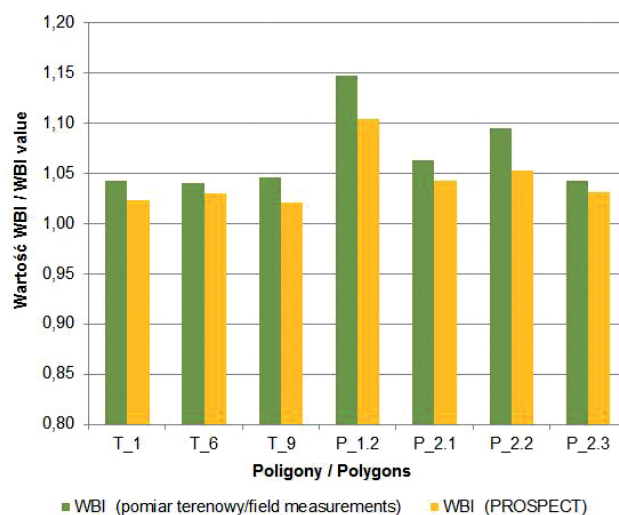


Ryc. 16. Wartość Carotenoid Reflectance Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
Fig. 16. Value of Carotenoid Reflectance Index calculated from measured and modelled spectrum

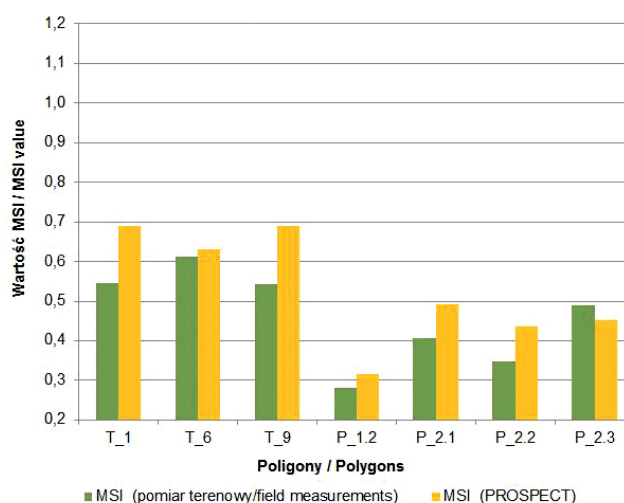
Wskaźnik *Water Band Index* ma zakres od 0,8 do 1,2 dla zielonych roślin (Peñuelas i in., 1997). Wartości zmierzone i modelowana oscylują wokół wartości 1 (Ryc. 17). Największa różnica między wskaźnikiem modelowanym a obliczonym z pomiarów terenowych wyniosła 0,042 dla poligonu P1.2. Różnice te są niewielkie. Na ogół wartości modelowane są nieco niższe niż rzeczywiste.

Wartości wskaźnika *Moisture Stress Index* są nieco mniej spójne niż w przypadku poprzedniego wskaźnika analizującego zawartość wody (Ryc. 18). Zakres wartości wskaźnika to od 0 do 3, z czego dla zielonej roślinności najczęściej wynoszą od 0,4 do 2 (Rock i in., 1985). Wartości modelowane wahają się od 0,32 do 0,69, a zmierzone od 0,28 do 0,61. Wartości dla obu grup są do siebie dość zbliżone, największą różnicę – 0,149 zanotowano dla poligonu T9. Na ogół wartości modelowane są zawyżone w stosunku do zmierzonych w terenie.

Dla większości wskaźników wartości modelowane były zbliżone do zmierzonych w terenie. Najbardziej wiarygodne były wskaźniki NDVI, NDVI705 oraz WBI, czyli wskaźniki określające kondycję roślinności oraz zawartość wody. Najbardziej rozbieżne wartości osiągały



Ryc. 17. Wartość Water Band Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
Fig. 17. Value of Water Band Index calculated from measured and modelled spectrum



Ryc. 18. Wartość Moisture Stress Index policzona z krzywych modelowanych i zmierzonych w terenie  
Fig. 18. Value of Moisture Stress Index calculated from measured and modelled spectrum

wskaźniki CRI oraz PRI. Oba wskaźniki wykorzystują pasmo absorpcji karotenoidów, czyli pasmo niebieskie, dla którego były duże różnice w wielkości współczynnika odbicia między krzywą modelowaną a zmierzoną w terenie. Ponadto często większe rozbieżności w wielkości wskaźników wykazują poligony, gdzie roślinność została skoszona.

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że możliwe jest zastosowanie modelu PROSPECT do modelowania niejednorodnych użytków zielonych ekstensywnie użytkowanych rolniczo. Zbiorowiska



niejednorodne są zróżnicowane pod względem fitosocjologicznym, morfologicznym oraz biochemicznym, dlatego ich modelowanie oraz uogólnianie jest znacznie utrudnione.

Na podstawie poszczególnych wartości błędów RMSE można stwierdzić, że uzyskano dostatecznie dobre rezultaty symulacji danych hiperspektralnych przy zastosowaniu odpowiednich parametrów. Ze względu na zastosowanie krzywych odbicia spektralnego do badania roślin, nawet najmniejsze różnice w odbiciu powodują zmianę wskaźników, dlatego błąd RMSE nie może być pominięty. Ze względu na niejednorodny charakter zbiorowisk trawiastych wysoki poziom zgodności jest bardzo trudny do uzyskania. Stwierdzono, że osiągnięty stopień dopasowania jest wystarczający na podstawie obliczonego błędu RMSE oraz wartości większości wskaźników. Dane wejściowe były wielokrotnie przeliczane i dostosowywane oddzielnie dla każdej krzywej. Taka procedura nie może być stosowana przy większej ilości krzywych odbicia spektralnego ze względu na dużą czasochłonność. Jednocześnie model PROSPECT nie może być samodzielnie zastosowany do modelowania pokrywy roślinności.

Bazując na informacjach o zakresach absorpcji światła przez poszczególne substancje oraz na procedurze modelowania można stwierdzić, jakie substancje mają dominujący wpływ na odbicie dla łąk w różnych zakresach spektrum. W przypadku chlorofilu ma on wpływ na odbicie wyłącznie w świetle widzialnym i początku bliskiej podczerwieni (tzw. *Red Edge*) 400-800nm. Karotenoidy mają wpływ na odbicie w świetle widzialnym: zakresie niebieskim i mniejszy w zielonym (400-600nm). Wpływ tych dwóch substancji jest od siebie zależny, natomiast na podstawie modelowania można stwierdzić, że zdecydowanie większy jest wpływ chlorofilu. Woda oraz zawartość masy suchej mają wpływ w bliskiej i średniej podczerwieni. Zaznacza się dominujący wpływ masy suchej w bliskiej podczerwieni i duży wpływ wody w średniej podczerwieni.

Pomiary wartości chlorofilu były wykonywane przy pomocy urządzenia CCM-200, a nie techniką laboratoryjną. Mimo to stopień dopasowania krzywych jest dostatecznie dobry. Karotenoidy nie mają dużego wpływu na całość krzywej, jednak mają znaczenie w przypadku obliczania niektórych wskaźników, dlatego błąd w modelowaniu nie może być pominięty.

Dobrze dopasowane są zakres światła widzialnego i podczerwieni od 1500 do 2500 nm. Najbardziej problemowym zakresem promieniowania jest bliska podczerwień do 800 do 1500 nm, gdzie dominuje wpływ zawartości masy suchej. W tym zakresie zanotowano największy błąd RMSE. Na skuteczność dopasowania krzywych wpływa także nieuwzględnienie w modelu PROSPECT wartości powierzchni projekcyjnej liści. Mimo związku z masą suchą, nieuwzględnienie parametru ma wpływ na modelowanie krzywej. Jest to widoczne w przypadku analizowanych krzywych, szczególnie dla łąk skoszonych o zredukowanej biomase.

Duży wpływ na skuteczność modelowania ma zawartość wody w liściach. Mimo dobrego dopasowania

krzywych zanotowano, że wraz ze wzrostem jej zawartości w liściach wzrasta błąd RMSE. Podobne analizy związku między wielkością odbicia a substancją były przeprowadzane przy użyciu modelu PROSPECT na badaniach liści drzew uzyskując zbliżone wyniki (Ceccato i in., 2001).

Analizując pomiary przestrzennie, nieco większe błędy w modelowaniu występują dla poligonów na terenie wzniesienia Taborówka, które charakteryzowały się nieco mniejszą zawartością chlorofilu i mniejszą zawartością wody. Gorsze dopasowanie może być związane z błędami pomiaru. Im mniejsza wartość parametru biofizycznego, tym trudniejsze dokładne określenie jego wartości.

Typ pokrycia terenu, czyli usunięcie biomasy przez skoszenie ma znaczenie w przypadku modelowania odbicia w zakresie od 800 do 1500 nm, czyli tam, gdzie największe znaczenie ma ilość masy suchej. Przy usunięciu biomasy modelowanie staje się mniej skuteczne.

Na podstawie wartości wskaźników nie można stwierdzić, że charakterystyki spektralne jakiegoś poligonu są źle dopasowane. Nie można także stwierdzić jednoznacznie, że wartości wskaźników są zaniżane lub zawyżane. Dla większości wskaźników wartości były bardzo zbliżone: najbardziej zbliżone były wartości wskaźników NDVI, natomiast największe błędy zanotowano dla wskaźników *Carotenoid Reflectance Index* i *Photochemical Reflectance Index*. Często nieco większe różnice między wartościami wskaźników modelowanych i zmierzonych w terenie występowały w przypadku łąk o skoszonej roślinności. Bardziej różnią się wskaźniki, które wykorzystują pasmo niebieskie, gdzie dominuje wpływ karotenoidów. Teledetekcyjne wskaźniki roślinności na ogół wykorzystują pasmo widzialne, bliską podczerwień ze szczególnym uwzględnieniem tzw. *Red Edge* i okolic 1500nm oraz pojedyncze kanały z zakresu średniej podczerwieni. Większość tych zakresów jest dobrze modelowana, właśnie ze względu na użycie modelu, który uwzględnia najważniejsze parametry opisujące roślinność. Na podstawie analizowanych wskaźników można stwierdzić, że większość z nich jest dostatecznie zbliżona do wartości obliczonych ze zmierzonych krzywych. Krzywe obliczane przy użyciu modelu PROSPECT mogą być stosowane do badań przy wykorzystaniu teledetekcyjnych wskaźników roślinności.

Modelowanie krzywych spektralnych wymaga pobrania danych w optymalnych warunkach, a także w tym samym czasie. Ważne jest także odpowiednie przygotowanie próbek masy świeżej a następnie suchej do pomiaru.

Dla większości krzywych można stwierdzić, że wartości odbicia są zbliżone do rzeczywistych (średni błąd RMSE wyniósł 0,035). Krzywe mogą być używane do dalszych przekształceń.

Wadą stosowania modelu PROSPECT jest modelowanie wyłącznie na poziomie liścia, a nie całej pokrywy roślinności, dlatego także sam model PROSPECT jest rzadko wykorzystywany. Najczęściej jest łączony z modelem SAIL lub jego modyfikacjami, które uwzględnia

ją budowę baldachimu roślinności. W takim połączeniu modele mogą być używane zarówno do badań terenowych jak i danych lotniczych. Konieczne jest pobranie dodatkowych danych, które pozwalają na uogólnienie i modelowanie krzywych dla całej pokrywy roślinnej, nie jedynie pojedynczych liści.

## Literatura:

- Blackburn G. A., Ferwerda J. G., 2008, Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis, *Remote Sensing of Environment*, nr 112, str. 1614-1632
- Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemoud S., Grégoire J.-M., 2001, Detecting vegetation leaf water content using reflectance on the optical domain, *Remote Sensing of Environment*, nr 77, str. 22-33.
- Dąbrowska-Zielińska K., Budzyńska M., Lewiński S., Hościło A., Bojanowski J., 2009, Application of remote and in situ information to the management of wetlands in Poland. *Journal of Environmental Management*, nr 90, str. 2261–2269
- Darvishadeh R., Skidmore A., Schlerf M., Atzberger C., 2008, Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in heterogeneous grassland, *Remote Sensing of Environment*, nr 112, str. 2592-2604
- Duke C., Guérif M., 1998, Crop Reflectance Estimate Errors from the SAIL Model Due to Spatial and Temporal Variability of Canopy and Soil Characteristics, *Remote Sensing of Environment*, nr 66, str. 286-297
- Feret J., François C., Asner G. P., Gitelson A. A., Martin R. E., Bidet L. P. R., Ustin S., le Maire G., Jacquemoud S., 2008, PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments, *Remote Sensing of Environment*, nr 112, str. 3030-3043
- Gamon J. A., Peñuelas J., Field C. B., 1992, A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency, *Remote Sensing of Environment*, nr 41, str. 35-44
- Gitelson A. A., Zur Y., Chivkunova O. B., Merzlyak M. N., 2002, Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy, *Photochemistry and Photobiology*, nr 75, str. 272-281
- Gitelson A., Merzlyak M. N., 1994, Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation, *Journal of Plant Physiology*, nr 143, str. 286-292
- Haboudane D., Miller J. R., Tremblay N., Zarco-Tejada P., Dextraze L., 2002, Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture, *Remote Sensing of Environment*, nr 81, str. 416-426
- Jacquemoud S., Bacour C., Poilvé H., Frangi J. P., 2000, Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance: Direct and Inverse Mode, *Remote Sensing of Environment*, nr 74, str. 471-481
- Jacquemoud S., Baret F., 1990, PROSPECT: A Model of Leaf Optical properties Spectra, *Remote Sensing of Environment*, nr 34, str. 75-91
- Jacquemoud S., Ustin S. L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B., 1996, Estimating Leaf Biochemistry Using the PROSPECT Leaf Optical Properties Model, *Remote Sensing of Environment*, nr 56, str. 194-202
- Jacquemoud S., Verhoef W., Baret F., Bacour C., Zarco-Tejada P., Asner G., François C., Ustin S., 2009, PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization, *Remote Sensing of Environment*, nr 113, str. 556-566
- Jarocińska A., Zagajewski B., 2009, Remote sensing tools for analysis of vegetation condition in extensively used agricultural areas. W: Ben-Dor E. [red.] *Proceedings of the 6th EARSeL Imaging Spectroscopy SIG Workshop 'Imaging Spectroscopy: Innovative Tool for Scientific and Commercial Environmental Applications'*, ISPRS technical commission VII. Tel Aviv, Israel, March 16-18, 2009. Tel Aviv, str. 1-6
- Jensen J. R., 1983, Biophysical Remote sensing – Review Article, *Annals of the Associations of American Geographers*, t. 73, nr 1, 111-132
- Koetz B., Sun G., Morsdorf F., Ranon K. J., Kneubühler M., Itten K., Allgöwer B., 2007, Fusion of imaging spectrometer and LIDAR data over radiative transfer models for forest canopy characterization, *Remote Sensing of Environment*, nr 106, str. 449-459
- Kumar L., Schmidt K., Dury S., Skidmore A., 2006, Imaging spectrometry and vegetation science, W: van der Meer F. D., de Jong S. M. [red.], *Imaging Spectrometry. Basic principles and Prospective Applications*, wyd. Springer, Holandia, str. 111-155
- Nagler P. L., Inoueb Y., Glenn E. P., Russ A. L., Daughtry C.S.T., 2003, Cellulose absorption index (CAI) to quantify mixed soil-plant litter scenes, *Remote Sensing of Environment*, nr 87, str. 10-325
- Peñuelas J., Pinol J., Ogaya R., Filella I., 1997, Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970), *International Journal of Remote Sensing*, nr 18, str. 2863-2868
- Rock B. N., Williams D. L., Vogehmann J. E., 1985, Field and airborne spectral characterization of suspected acid deposition damage in red spruce (*Picea rubens*) from Vermont. *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*, Purdue University, Lafayette, IN, str. 71-81
- Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1973, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, nr. E73-106393, 93. (NTIS No. E73-106393)
- Serrano L., Peñuelas J., Ustin S. L., 2002, Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals, *Remote Sensing of Environment*, nr 81, str. 355-364
- Tretyn A., 2007, Podstawy strukturalno-funkcjonalne komórki roślinnej; W: Kopcewicz J., Lewak S., [red.], *Fizjologia roślin*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, str. 22-87
- Verhoef W., Bach H., 2003a, Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models, *Remote Sensing of Environment*, nr 87, str. 23-41
- Verhoef W., Bach H., 2003b, Remote sensing data assimilation using coupled radiative transfer models, *Physics and Chemistry of the Earth*, nr 28, str. 3-13
- Yilmaz M. T., Hunt Jr R., Jackson T. J., 2008, Remote sensing of vegetation water content from equivalent water thickness using satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, nr 112, str. 2514-2522
- Zarco-Tejada P. J., Rueda C. A., Ustin S. L., 2003, Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods, *Remote Sensing of Environment*, nr 85, str. 109-124.



Mgr Anna Jarocińska absolwentka studiów magisterskich na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji. Obecnie uczestniczka Studium Doktoranckiego w macierzystej jednostce.

Adres do korespondencji: [ajarocin@gmail.com](mailto:ajarocin@gmail.com); telefon: 606491444; fax: + 48 22 5521521