

# Zastosowanie modeli transferu promieniowania do symulowania współczynnika odbicia od roślinności nieleśnej Karkonoszy

Anna Jarocińska<sup>1)</sup>, Bogdan Zagajewski<sup>1)</sup>, Adrian Ochtyra<sup>1,2)</sup>, Adriana Marcinkowska-Ochtyra<sup>1)</sup>, Piotr Jakubiec<sup>1)</sup> & Kacprzyk Monika<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Zakład Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji, [ajarocinska@uw.edu.pl](mailto:ajarocinska@uw.edu.pl)

<sup>2)</sup> Uniwersytet Warszawski, Kolegium Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych

## WSTĘP

Badanie stanu roślinności, w tym monitoring pokrywy roślinnej, jest istotnym problemem w skali globalnej, regionalnej i lokalnej. Monitorowanie zmian w szacie roślinnej pozwala na określenie zmian czasowych zachodzących w innych komponentach środowiska mających wpływ na rośliny, takich jak gleba czy stosunki wodne. Jest to szczególnie istotne na obszarach chronionych, gdzie monitorowanie stanu roślinności jest tematem ważnym, a jednocześnie badania roślinności powinny ją jak najmniej uszkadzać. W tym przypadku teledetekcja, która wykorzystuje techniki bezkontaktowe, jest niezwykle przydatna.

Techniki teledetekcyjne są dość często wykorzystywane do badania roślinności na świecie i w Polsce. Używane są dane z zakresu optycznego: wielospektralne i hiperspektralne (o wysokiej rozdzielczości spektralnej, co najmniej 40 kanałów spektralnie ciągłych), które pozwalają na bardziej szczegółową analizę. W monitoringu roślinności z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych są stosowane dwie metody: statystyczna i modelowanie (JACQUEMOUD 1993; KUMAR i in. 2006). W przypadku pierwszej z nich konieczne jest przeprowadzanie jednocześnie pomiarów terenowych podczas wykonywania zobrażenia. Druga metoda wykorzystuje modelowanie z użyciem modeli transferu promieniowania.

W statystycznych badaniach stanu roślinności nieleśnej w Polsce wykorzystywane były głównie dane wielospektralne (DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA i in. 2003). W Polsce wykonywano także badania przy użyciu danych hiperspektralnych na obszarach górskich. Badano kondycję roślin na obszarze Beskidu Niższego (JAROCIŃSKA & ZAGAJEWSKI 2009) oraz Tatr (ZAGAJEWSKI i in. 2004; SOB CZAK i in. 2005; KYCKO i in. 2014). Obrazy hiperspektralne wykorzystywane były także do klasyfikacji zbiorowisk w Tatrach (ZAGAJEWSKI 2010) i Karkonoszach (MARCINKOWSKA i in. 2014).

Modele transferu promieniowania (*Radiative Transfer Models* – RTM) opisują rozprzestrzenianie się promieniowania w ośrodku, np. w roślinności (KUMAR i in. 2006). Dane wejściowe do modeli to zmienne biofizyczne (np. zawartość chlorofilu, wody, powierzchnia projekcyjna liści), a wyjściowe to krzywe odbicia spektralnego. Modele są stosowane do obliczania spektralnego współczynnika odbicia. Jeśli symulacja danych hiperspektralnych jest skuteczna, modele po odwróceniu mogą być używane także do pozyskiwania informacji o parametrach biometrycznych i biofizycznych roślin z krzywych odbicia spektralnego. Modele transferu promieniowania są bardzo rzadko stosowane do symulowania charakterystyk spektralnych zróżnicowanych zbiorowisk naturalnych, jakimi są zbiorowiska nieleśne (JAROCIŃSKA 2012, 2014). Model PROSAIL stosowany w niniejszych badaniach opisuje odbicie

i rozproszenie od pokrywy roślinnej. Był wykorzystywany do pozyskiwania parametrów biofizycznych z łąk (CLEVERS i in. 2010; DARVISHZADEH i in. 2008; DARVISHZADEH i in. 2011; ZHANG & ZHAO 2009).

Celem przeprowadzonych badań była ocena skuteczności modelu PROSAIL do symulowania odbicia promieniowania od niejednorodnej pokrywy roślinnej. Przeprowadzono symulację współczynnika odbicia, aby ocenić przydatność modelu PROSAIL do symulacji odbicia od górskich zbiorowisk nieleśnych Karkonoszy.

## OBSZAR BADAŃ

Badania były wykonywane w Karkonoszach na obszarze parku Krkonošský Národní Park oraz Karkonoskiego Parku Narodowego. Pomiary terenowe odbywały się na 37 poligonach badawczych w pobliżu miejscowości Malá Úpa (po czeskiej i polskiej stronie granicy), Velká Úpa i Pec pod Sněžkou. Badana roślinność była bardzo zróżnicowana, na większość roślinności składały się trawy, ale występowały także rośliny z rodziny motylkowych oraz mchów. Na tym samym poligonie najczęściej występowały zróżnicowane pod względem budowy gatunki roślin, a jednocześnie często te rośliny miały inną strukturę, co znacznie utrudnia modelowanie. Najczęściej notowane były trawy (np. *Deschampsia caespitosa*, *Nardus stricta*), rośliny motylkowe (np. *Lupinus polyphyllus*, *Trifolium pratense*) oraz rośliny o innej budowie, jak *Rumex alpinus* i *Vaccinium myrtillus*.

Badane poligony podzielono na cztery grupy związane typem zbiorowisk roślinnych: murawy (8 poligonów), zbiorowiska krzewinkowe (2 poligony), zbiorowiska synantropijne (7 poligonów) i ekosystemy łąkowe (20 poligonów). Murawy obejmowały tylko jedno zbiorowisko murawowe – murawy bliźniczkowe pokryte głównie bliźniczką psią trawką (*Nardus stricta*) (KNAPIK & RAJ 2013; ŻOŁNIERZ i in. 2012). Roślinność na tych obszarach była dość jednorodna gatunkowo, ale jednocześnie zróżnicowana pod względem kąta nachylenia liści. Do zbiorowisk krzewinkowych zaliczone zostały dwa poligony borówczyska czernicowego z dominacją borówki czarnej

(*Vaccinium myrtillus*). Pod względem struktury zbiorowisko jest dość złożone – występują liście ułożone w różnych kierunkach, co może obniżyć skuteczność modelowania. Kolejną grupą były zbiorowiska synantropijne, najczęściej o dużej ilości biomasy. Dominującymi gatunkami były: *Lupinus polyphyllus*, *Rumex alpinus* oraz *Urtica dioica*. Ta roślinność jest bardzo zróżnicowana pod względem struktury (różne kąty nachylenia liści, zmienne LAI w obrębie poligону). Najliczniejszą grupą były ekosystemy łąkowe, wykształcone pod wpływem człowieka, z licznymi gatunkami traw i mszaków, a także roślin motylkowych (np. *Trifolium pratense*). Pokrywa roślinna na tych poligonach była dość jednorodna pod względem struktury, co może ułatwiać modelowanie współczynnika odbicia.

## METODA

Do modelowania wykorzystano model PROSAIL, czyli połączenie modelu PROSPECT i SAIL (JACQUEMOUD & BARET 1990; VERHOEF 1984). Model opisuje wielokierunkowe odbicie i rozproszenie promieniowania od powierzchni pokrywy roślinnej. Jest on na ogół używany do opisywania zbiorowisk jednorodnych. Stosowany jest do upraw zbóż, ale także zróżnicowanych zbiorowisk naturalnych, np. lasów (JACQUEMOUD i in. 2009). Wśród założeń twórców modelu była jego uniwersalność.

Dane wejściowe do modelu to: ilość chlorofilu i karotenoidów na jednostkę powierzchni liści, udział brązowych pigmentów w roślinie, ilość wody, zawartość masy suchej w liściach, parametr strukturalny liści (określający stopień złożoności liści), powierzchnia projekcyjna liści (LAI), średni kąt nachylenia liści, parametr określający jasność gleby (określany jako stały w sytuacji, gdy gleba jest niewidoczna) opisujący stosunek promieniowania rozproszonego do bezpośredniego i parametry określające efekt nadmiernego odbicia oraz geometria odbicia (kąt zenitalny Słońca, kąt zenitalny i azymutalny urządzenia pomiarowego).

Pomiary wykonywano w dniach 28-30 sierpnia 2013 roku. Dane pochodziły z 37 poligonów badawczych o minimalnej

wielkości 100 m<sup>2</sup>, określono ich pozycję i występujące gatunki roślin. Pomiar referencyjnych krzywych odbicia spektralnego wykonano przy użyciu spektrometru ASD FieldSpec 3 na tych samych poligonach.

Wykonano pomiary parametrów biofizycznych, określono powierzchnię projekcyjną liści (*Leaf Area Index, LAI*), wskaźnik zawartości chlorofilu w liściach (*Chlorophyll Content Index, CCI*) oraz zawartość wody. Wskaźnik *LAI* to sumaryczna powierzchnia liści, która bierze pod uwagę ich kształt, mierzona na jednostkę terenu. Pomiary *LAI* wykonano urządzeniem *LAI-2000 Plant Canopy Analyzer*. Zawartość chlorofilu oceniana była na podstawie *CCI*, którego pomiar wykonano za pomocą urządzenia *CCM-200 Chlorophyll Content Meter*. Na każdym poligonie wykonano co najmniej 10 pomiarów chlorofilu, które następnie uśredniono. Zawartość wody określano porównując świeżą biomasę z wysuszoną. Pobrano próbki roślinności, zważono je, a następnie wysuszono i ponownie zważono. Z tych danych obliczono też zawartość materii suchej.

Poza wymienionymi zmiennymi resztę danych do obliczenia parametrów wejściowych do modelu określono w terenie wizualnie lub ustalono jako stałe (JAROCIŃSKA 2014). Po przeliczeniu danych terenowych na dane wejściowe do PROSAIL, dla każdego z poligonów obliczono krzywą odbicia spektralnego

w rozdzielczości spektralnej 1 nm, którą zestawiono z wartościami odbicia spektralnego zmierzonymi w terenie.

Aby zweryfikować poprawność modelowania obliczono pierwiastek błędu średniokwadratowego (*Root Mean Square Error, RMSE*) na podstawie wartości modelowanych i pobranych w terenie. Przeanalizowano wielkość błędu w zakresie całego pasma optycznego od 400 do 2500 nm oraz w czterech zakresach związanych z dominującym wpływem barwników, biomasy i wody na wartości odbicia: 400-600 nm, 400-800 nm, 800-1500 nm i 1500-2500 nm. Następnie policzono średnie wartości *RMSE* w obrębie analizowanych grup zbiorowisk: murawy, zbiorowiska synantropijne, zbiorowiska krzewinkowe i ekosystemy łąkowe.

## REZULTATY – MODELOWANIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA ODBICIA Z UŻYCIEM MODELU PROSAIL

Przedstawiono wyniki analiz określające, czy można zastosować model transferu promieniowania PROSAIL do symulowania współczynnika odbicia spektralnego od badanych zbiorowisk roślinnych. Określono średnią wartość błędu *RMSE* w całym modelowanym zakresie promieniowania oraz w poszczególnych zakresach promieniowania (Tab. 1). Gene-

Zakres w nm	400-2500	400-600	400-800	800-1500	1500-2500
Wartości <i>RMSE</i> dla wszystkich poligonów					
maksimum	0,259	0,077	0,181	0,402	0,187
minimum	0,088	0,002	0,022	0,104	0,030
średnia	0,164	0,017	0,095	0,242	0,085
Wartości <i>RMSE</i> w podziale na grupy					
ekosystemy łąkowe	0,166	0,020	0,097	0,242	0,086
murawy	0,168	0,020	0,094	0,244	0,106
zbiorowiska synantropijne	0,155	0,004	0,095	0,239	0,055
zbiorowiska krzewinkowe	0,162	0,010	0,091	0,237	0,099

Tab. 1. Średnie wartości pierwiastka błędu średniokwadratowego określające błąd symulacji współczynnika odbicia z użyciem modelu PROSAIL w podziale na zakresy.

ralnie notowane błędy były dość duże, szczególnie w zakresie podczerwieni. Średnio błąd był równy 0,16, co jest wysoką wartością (DARVISHZADEH i in. 2011; ZHANG & ZHAO 2009). Najmniejsze błędy występowały w zakresie od 400 do 600 nm (gdzie dominujące znaczenie na wartości odbicia mają barwniki), największe natomiast w bliskiej podczerwieni (w tym zakresie duże znaczenie ma ilość biomasy). W tym zakresie także występowały największe wartości błędów dla pojedynczych poligonów. Znacznie mniejsze błędy notowane były w zakresie średniej podczerwieni, gdzie największy wpływ na wielkość odbicia ma zawartość wody.

Największy wpływ na wysokie wartości w całym analizowanym zakresie miały duże wartości RMSE w bliskiej podczerwieni. Może to wskazywać na niedostosowanie modelu do analiz roślinności zróżnicowanej pod względem wielkości parametru LAI i zawartości masy suchej. Z drugiej strony, dość niskie wartości błędów były notowane w zakresie światła widzialnego, a szczególnie w paśmie 400-600 nm, co wskazuje, że model w tym zakresie działa poprawnie. Tym samym ten przedział może być wykorzystywany w procesie inwersji. Przeanalizowano także wartości błędów w zależności od typów zbiorowisk roślinności: ekosystemów łąkowych, muraw, zbiorowisk krzewinkowych i synantropijnych. We wszystkich zakresach wartości błędów w obrębie grup były zbliżone. Jedynie w średniej podczerwieni oraz w zakresie 400-600 nm widoczne były mniejsze różnice w wielkości RMSE. W przypadku średniej podczerwieni najmniejsze błędy zanotowano w przypadku zbiorowisk synantropijnych o wysokiej zawartości wody), a największe w przypadku muraw i zbiorowisk krzewinkowych (o niższej zawartości wody). Z różnic w zawartości wody może wynikać mniejszy błąd w przypadku zbiorowisk synantropijnych.

## WNIOSKI

Przedstawiono ocenę poprawności symulacji wartości odbicia spektralnego od pokrywy roślinnej z wykorzystaniem modelu transferu promieniowania PROSAIL. Model PROSAIL

może być zastosowany do symulacji współczynnika odbicia od górskiej zróżnicowanej roślinności nieleśnej. Jednak, aby możliwe było dalsze wykorzystanie wyników do przeprowadzenia procesu inwersji, w którym parametry biofizyczne będą pozyskiwane automatycznie z wartości odbicia, konieczne jest wykonanie kalibracji modelu.

Dość dobre wyniki uzyskano w przypadku zakresu 400-600 nm, gdzie dominujący wpływ na wielkość współczynnika odbicia mają barwniki – zawartość chlorofilu i karotenoidów. Największe błędy notowane były w zakresie bliskiej podczerwieni, gdzie duże znaczenie ma zawartość biomasy reprezentowana przez LAI. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że konieczna jest modyfikacja modelu, szczególnie w zakresie bliskiej podczerwieni. Przy błędach takiej wielkości zakresem możliwym do zastosowania w inwersji modelu jest jedynie fragment światła widzialnego (DARVISHZADEH i in. 2011; ZHANG & ZHAO 2009). Jednocześnie, wielkość błędów w zakresie podczerwieni nie jest na tyle wysoka, żeby nie było możliwe użycie modeli w procesie inwersji. W przypadku tak zróżnicowanych zbiorowisk modelowanie jest znacznie trudniejsze, co zostało zaobserwowane także na obszarze nizinnym (JAROCIŃSKA 2012; 2014). Niektóre z parametrów modelu powinny być ustalone jako stałe, pomimo zmienności w obrębie zbiorowisk. Kalibracja pozwoli na zmniejszenie błędów i wykorzystanie całego zakresu promieniowania od 400 do 2500 nm do pozyskiwania zmiennych biofizycznych. Zbliżone wyniki z użyciem modeli transferu promieniowania zostały uzyskane w przypadku badań zbiorowisk łąkowych na terenie Mazowsza (JAROCIŃSKA 2012; 2014). Oznacza to, że modele są dosyć uniwersalne – mogą być stosowane do bardzo zróżnicowanych zbiorowisk górskich i łąk występujących na niżu polskim.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że modele transferu promieniowania mogą być używane do tak zróżnicowanych zbiorowisk, jakie występują na terenie Karkonoszy, ale konieczna jest kalibracja modelu, aby mogły być użyte do inwersji i pozyskiwania zmiennych biofizycznych z danych spektralnych.

## LITERATURA

- CLEVERS J. G. P. W., KOOISTRA L. & SCHAEPMAN M. E. 2010: ESTIMATING CANOPY WATER CONTENT USING HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING DATA. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION* 12: 119-125.
- DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA K., KOWALIK W., GRUSZCZYŃSKA M. & HOŚCIŁO A. 2003: Wskaźniki roślinne dla obszaru bagien Biebrzańskich wyprowadzone ze zdjęć satelitarnych. *ARCHIWUM FOTOGRAMETRII, KARTOGRAFII I TELEDETEKCJI* 13B: 349-359.
- DARVISHZADEH R., ATZBERGER C., SKIDMORE A. & SCHLERF M. 2011: MAPPING GRASSLAND LEAF AREA INDEX WITH AIRBORNE HYPERSPECTRAL IMAGERY: A COMPARISON STUDY OF STATISTICAL APPROACHES AND INVERSION OF RADIATIVE TRANSFER MODELS. *ISPRS JOURNAL OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING* 66 (6): 894-906.
- DARVISHZADEH R., SKIDMORE A., ATZBERGER C. & VAN WIJEN S. 2008: ESTIMATION OF VEGETATION LAI FROM HYPERSPECTRAL TERM REFLECTANCE DATA: EFFECTS OF SOIL TYPE AND PLANT ARCHITECTURE. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION* 10 (3): 358-373.
- JACQUEMOUD S. & BARET F. 1990: PROSPECT: A MODEL OF LEAF OPTICAL PROPERTIES SPECTRA. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* 34: 75-91.
- JACQUEMOUD S. 1993: INVERSION OF THE PROSPECT+SAIL CANOPY REFLECTANCE MODEL FROM AVIRIS EQUIVALENT SPECTRA: THEORETICAL STUDY. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* 44: 281-292.
- JACQUEMOUD S., VERHOEF W., BARET F., BACOUR C., ZARCO-TEJADA P. J., ASNER G. P., FRANÇOIS H. & USTIN S. L. 2009: PROSPECT+SAIL MODELS: A REVIEW OF USE FOR VEGETATION CHARACTERIZATION. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* 113: 556-566.
- JAROCIŃSKA A. & ZAGAJEWSKI B. 2009: REMOTE SENSING TOOLS FOR ANALYZING STATE AND CONDITION OF VEGETATION, *ANNALS OF GEOMATICS* VII, 2(32): 47-53.
- JAROCIŃSKA A. 2012: OCENA SKUTECZNOŚCI MODELI TRANSFERU PROMIENIOWANIA W BADANIACH STANU ROŚLINNOŚCI ŁĄK, *TELEDETEKCJA ŚRODOWISKA* 48: 3-52.
- JAROCIŃSKA A. 2014: RADIATIVE TRANSFER MODEL PARAMETRIZATION FOR SIMULATING THE REFLECTANCE OF MEADOW VEGETATION. *MISCELLANEA GEOGRAPHICA — REGIONAL STUDIES ON DEVELOPMENT* 18 (2): 1-5, ISSN (PRINT) 2084-6118, DOI: 10.2478/MGRSD-2014-0001, FEBRUARY 2014.
- KNAPIK R. & RAJ A. (RED.) 2013: PRZYRODA KARKONOSKIEGO PARKU NARODOWEGO, KARKONOSKI PARK NARODOWY, JELENIA GÓRA.
- 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*. SPRINGER, HOLANDIA: 111-155.
- KYCKO M., ZAGAJEWSKI B. & KOZŁOWSKA A. 2014: VARIABILITY IN SPECTRAL CHARACTERISTICS OF TRAMPLED HIGH-MOUNTAIN GRASSLANDS. *MISCELLANEA GEOGRAPHICA — REGIONAL STUDIES ON DEVELOPMENT* 18 (2): 1-5. ISSN (PRINT) 2084-6118, DOI: 10.2478/MGRSD-2014-0003, FEBRUARY 2014.
- MARCINKOWSKA A., ZAGAJEWSKI B., OCHTYRA A., JAROCIŃSKA A., RACZKO E., KUPKOVA L., STYCH P. & MEULEMAN K. 2014: MAPPING VEGETATION COMMUNITIES OF THE KARKONOSZE NATIONAL PARK USING APEX HYPERSPECTRAL DATA AND SUPPORT VECTOR MACHINES. *MISCELLANEA GEOGRAPHICA — REGIONAL STUDIES ON DEVELOPMENT* 18 (2): 1-5, ISSN (PRINT) 2084-6118, DOI: 10.2478/MGRSD-2014-0001, FEBRUARY 2014.
- SOBCZAK M., FOLBRIER A., KOZŁOWSKA A., KRÓWCZYŃSKA M., PABJANEK P., WRZESIEŃ M. & ZAGAJEWSKI B. 2005: ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF HYPERSPECTRAL DATA AND TECHNIQUES FOR MOUNTAIN VEGETATION ANALYSIS. *IMAGING SPECTROSCOPY. NEW QUALITY OF ENVIRONMENTAL STUDIES, EARSEL I UNIwersYTET WARSZAWSKI, WARSZAWA*.
- VERHOEF W. 1984: LIGHT SCATTERING BY LEAF LAYERS WITH APPLICATION TO CANOPY REFLECTANCE MODELING: THE SAIL MODEL. *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* 16: 125-141.
- ZAGAJEWSKI B. 2010: OCENA PRZYDATNOŚCI SIECI NEURONOWYCH I DANYCH HIPERSPEKTRALNYCH DO KLASYFIKACJI ROŚLINNOŚCI TATR WYSOKICH. *TELEDETEKCJA ŚRODOWISKA* 43: 1-113.
- ZAGAJEWSKI B. SOBCZAK M. & WRZESIEŃ M. 2004: BADANIA GÓRSKICH ZBIOROWISK ROŚLINNYCH Z UŻYCIEM TECHNIK HIPERSPEKTRALNYCH. *PRZEGLĄD GEOFIZYCZNY* 3-4: 115-129.
- ZHANG N. & ZHAO Y. 2009: ESTIMATING LEAF AREA INDEX BY INVERSION OF REFLECTANCE MODEL FOR SEMIARID NATURAL GRASSLANDS. *SCIENCE IN CHINA SERIES D: EARTH SCIENCES* 52 (1): 66-84.
- ŻOŁNIERZ L., WOJTUŃ B. & PRZEWOŹNIK L. 2012: EKOSYSTEMY NIELEŚNE KARKONOSKIEGO PARKU NARODOWEGO. KARKONOSKI PARK NARODOWY, JELENIA GÓRA: ss. 100.