

UNIwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

Marlena Kycko

**Zastosowanie teledetekcji hiperspektralnej do oceny
kondycji dominujących gatunków muraw wysokogórskich
Tatrzańskiego Parku Narodowego**

AUTOREFERAT

Rozprawa doktorska
przygotowana pod kierunkiem
dr. hab. Bogdana Zagajewskiego
Zakład Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji

Warszawa 2017

1. Wstęp

Teledetekcja hiperspektralna¹ poprzez identyfikację cech spektralnych obrazuje procesy fizjologiczne, budowę anatomiczną i morfologiczną roślin (Jensen 1983). Do weryfikacji informacji spektralnej niezbędne są pomiary biometryczne, np. zawartości chlorofilu, czy fluorescencji chlorofilu (Ustin i in. 2004), która w literaturze nazywana jest „kodem kreskowym” fizjologicznych właściwości rośliny (Tyystjarvi i in.1999). Monitoring jest możliwy także z pułapu lotniczego (Ishii i in. 2009) i satelitarnego (misja ESA FLEX²; Moreno i in. 2014).

Celem rozprawy jest ocena kondycji dominujących gatunków muraw wysokogórskich Tatrzańskiego Parku Narodowego (TPN). To aplikacyjne zadanie wymaga opracowania i przetestowania nowatorskiej metody integrującej terenowe pomiary hiperspektralne oraz referencyjne zmienne biofizyczne. Hipotezą badań jest stwierdzenie, że cechy fizjologiczne, morfologiczne i anatomiczne roślin wpływają na właściwości spektralne, pozwalając na ocenę kondycji gatunków muraw wysokogórskich za pomocą detektorów hiperspektralnych. W trakcie analiz postawiono pytania badawcze: (1) czy metody naziemnej teledetekcji hiperspektralnej pozwalają odróżnić roślinność uszkodzoną poprzez wydeptywanie od roślinności referencyjnej? (2) które zakresy spektrum elektromagnetycznego oraz wskaźniki teledetekcyjne są optymalne do oceny kondycji roślinności wysokogórskiej? (3) w jaki sposób roślinność muraw reaguje na wydeptywanie? Czy zmiany te są utrwalane na kolejne lata, czy też roślinność podlega regeneracji?; (4) jaka jest kondycja dominujących gatunków muraw wysokogórskich TPN?

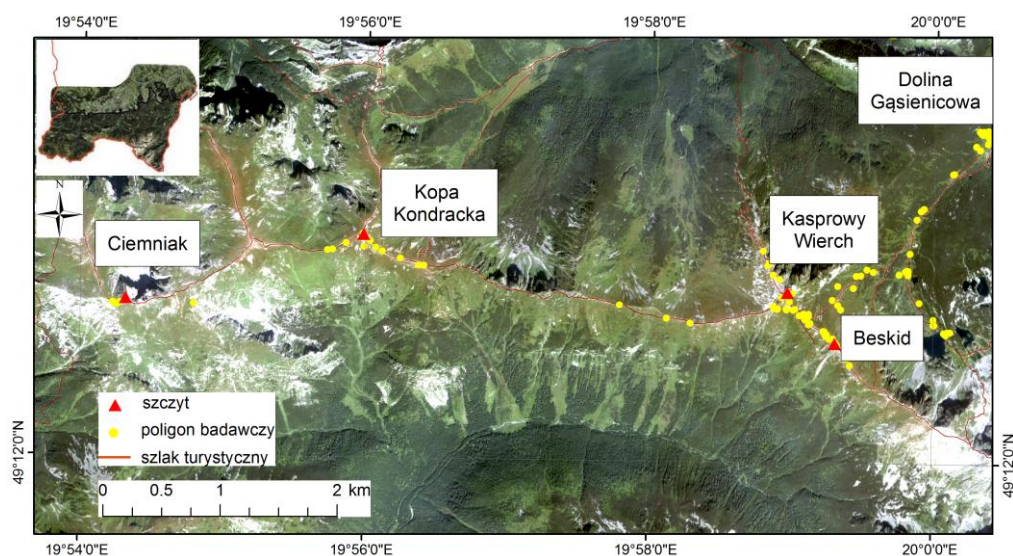
2. Obszar i obiekt badań

Obszar badań objął intensywnie wydeptywane tereny TPN: Kasprowy Wierch, Beskid, Dolinę Gąsienicową i Czerwone Wierchy (Kopa Kondracka, Ciemniak; Ryc. 1.). Na podstawie wykazu cennych składników flory GIOŚ³, a także mapy roślinności rzeczywistej (Kozłowska, Plit 2002) wybrano dominujące gatunki muraw wysokogórskich tj.: sit skucina (*Juncus trifidus*), boimka dwurzędowa (*Oreochloa disticha*), mietlica skalna (*Agrostis rupestris*), śmiełek pogięty (*Deschampsia flexuosa*), kostrzewa niska (*Festuca airoides*), kostrzewa barwna (*Festuca picta*), kosmatka brunatna (*Luzula alpino-pilosa*), bliźniczka psia trawka (*Nardus stricta*).

¹ Teledetekcja hiperspektralna – dziedzina teledetekcji obejmująca dane teledetekcyjne składające się z ponad 40 kanałów spektralnie ciągłych o szerokości połówkowej od 10 do 20 nm, obecnie jest to około 5 nm.

² FLEX (*Fluorescence EXplorer*), jest to pierwsza misja kosmiczna specjalnie zaprojektowana do oszacowania fluorescencji roślinności w skali globalnej – misja kosmiczna ESA w ramach programu Earth Explorer 8, z której pozyskiwanie danych planowane jest na 2022 r.

³ Główny Inspektorat Ochrony Środowiska (aktualizacja z dnia 18.04.2012); <http://siedliska.gios.gov.pl/index.php/przewodniki-metodyczne/pojedyncze-metodyki/dla-siedlisk-przyrodniczych> (30.09.2016)



Ryc. 1. Obszary badawcze wraz z lokalizacją poligonów pomiarowych na terenie Tatrzańskiego Parku Narodowego. Opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z TPN, w podkładzie zdjęcie IKONOS z 2004 roku.

3. Metodyka badań

Podstawą niniejszej rozprawy są dane pozyskane w trakcie badań terenowych w latach 2011-2014⁴. Pomiary rozpoczęły się od wyboru poligonów badawczych, które ze względu na zachowanie powtarzalności oraz porównywalności pomiarów, zostały zlokalizowane na homogenicznych kępach poszczególnych gatunków. Poligony zostały podzielone na: (a) wydeptywane murawy wysokogórskie, zlokalizowane w najbliższej odległości wzdłuż szlaku, wyznaczone w oparciu o warstwę rozdepczyk uzyskaną z TPN; (b) referencyjne, czyli znajdujące się w pewnym oddaleniu od poligonów wydeptywanych – zazwyczaj było to w oddaleniu 10 m (poligony te znajdowały się w transekcie poprzecznym do obszarów wydeptanych na siedliskach o podobnych warunkach środowiskowych); (c) obszary rekultywowane, czyli obszary wyodrębnione przez TPN posiadające ograniczony dostęp dla pieszych, np. przez fladry, maty jutowe.

Algorytm badawczy składał się z następujących kroków (Ryc. 2.):

1. Identyfikacja homogenicznych gatunkowo kęp, określeniu ich położenia za pomocą odbiornika GPS Trimble GeoXT, wykonaniu dokumentacji fotograficznej oraz założeniu na liście roślin klipsów LeafClip w celu wygaszenia procesów fotosyntezy;
2. Wykonanie pomiarów:
 - spektrometrycznych (spektrometrem ASD FieldSpec 3);
 - zawartości chlorofilu (miernikiem Chlorophyll Content Meter CCM-200); fluorescencji

⁴ W roku 2013, na prośbę TPN z racji na realizację projektu dedykowanego ochronie Czerwonych Wierchów przed turystyczną degradacją szlaków i okolic, do podstawowych powierzchni badawczych dodano obszar Czerwonych Wierchów (Kopa Kondracka, Ciemniak).

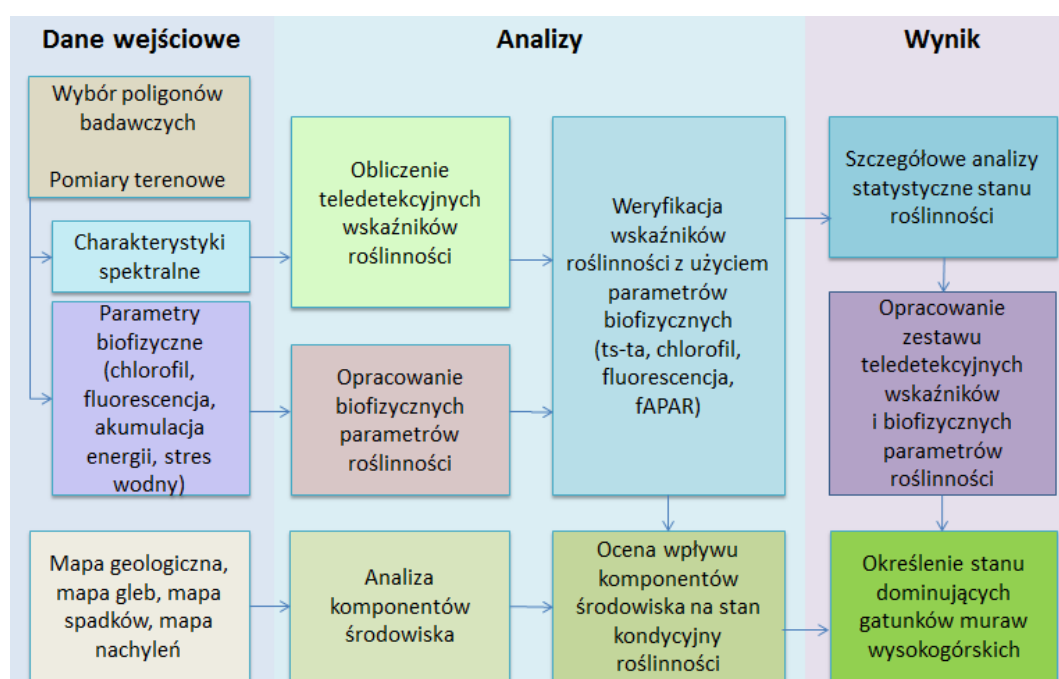
chlorofilu (fluorymetrem Plant Stress Meter (PSM Mark II)); temperatury termodynamicznej powietrza (t_a) i radiacyjnej powierzchni liści (t_s ; pirometrem IRtec MiniRay 100);

- zdolność akumulacji energii fotosyntetycznej czynnej (*Photosynthetic Active Radiation* – PAR, ceptomierzem liniowym AccuPAR PAR-80);

Dla każdego pomiaru wykonano 10 powtórzeń, natomiast pomiary spektrometryczne powtórzono 25 razy (łącznie wykonano 7295*25 pomiarów spektrometrycznych).

3. Opracowaniu danych:

- opracowaniu statystycznemu krzywych odbicia spektralnego oraz teledetekcyjnych wskaźników roślinności (Tabela 1);
- przygotowaniu map tematycznych i analizie komponentów środowiska.



Ryc. 2. Schemat metodyki badawczej (opracowanie własne).

Opracowanie statystyczne wyników objęło: a) analizę charakterystyk spektralnych metodą aglomeracji danych Warda⁵; b) analizę pomiarów spektrometrycznych i bioradiometrycznych na poziomie istotności statystycznej $\alpha=0,05$. Różnice w wartości odbicia spektralnego gatunków i wskaźników roślinnych w badanych wariantach poligonów sprawdzono metodą ANOVA Kruskala-Wallisa⁶. Zależności między wartościami, które uzyskały wskaźniki teledetekcyjne i bioradiometryczne, fluorescencja oraz komponenty środowiska sprawdzono stosując

⁵ Metoda Warda (ang. Ward's method) służy do oszacowania odległości między skupieniami wykorzystując analizę wariancji (Ward 1963). W wyniku zastosowania metod hierarchicznych uzyskujemy dendrogram, który ilustruje hierarchiczną strukturę zbioru obiektów ze względu na zmniejszające się podobieństwo między nimi; na wykresach tych na osi poziomej odłożone są odległości aglomeracyjne (odległość wiązana).

⁶ ANOVA Kruskala-Wallisa (ang. Kruskal – Wallis one-way analysis of variance by ranks) to jednoczynnikowa analiza wariancji więcej niż 2 porównywanych grup, które nie posiadają rozkładu normalnego.

współczynnik korelacji rang Spearmana (R_s)⁷; określono także współczynnik determinacji (R^2)⁸ oraz zastosowano wielozmienną regresję adaptacyjną z użyciem funkcji sklepanych – MARS⁹.

Tabela 1. Wybrane teledetekcyjne wskaźniki roślinności (istotne statystycznie w niniejszych badaniach).

Zastosowanie	Symbol	Nazwa	Wzór	Źródło informacji
Ocena ogólnego stanu roślinności	NMDI	<i>Normalized Multi-band Drought Index</i>	$NMDI = \frac{[R860 - (R1640 - R2130)]}{[R860 + (R1640 - R2130)]}$	Wang, Qu 2007
	ARVI	<i>Atmospherically Resistant Vegetation Index</i>	$ARVI = \frac{[R860 - (2 * R650 - R470)]}{[R860 + (R650 - R470)]}$	Kaufman, Tanre 1992
Ocena ilości barwników fotosyntetycznie czynnych	RARSa	<i>Ratio analysis of reflectance spectra algorithm chlorophyll a</i>	$RARSa = R675 / R700$	Chappelle i in. 1992
	GI	<i>Greenness Index</i>	$GI = R554 / R677$	Zarco-Tejada i in. 2004
Ocena zawartości azotu	NDNI	<i>Normalized Difference Nitrogen Index</i>	$NDNI = \frac{[\text{LOG}(1/R1510) - \text{LOG}(1/R1680)]}{[\text{LOG}(1/R1510) + \text{LOG}(1/R1680)]}$	Serrano i in. 2002
Ocena ilości światła wykorzystywanego w procesie fotosyntezy	SIPI	<i>Structure Insensitive Pigment Index</i>	$SIPI = (R800 - R445) / (R800 - R680)$	Peñuelas i in. 1995
	PRI	<i>Photochemical Reflectance Index</i>	$PRI = (R531 - R570) / (R531 + R570)$	Gamon i in. 1992
Ocena ilości suchej biomasy i węgla	CAI	<i>Cellulose Absorption Index</i>	$CAI = [0,5 * (R2000 + R2200)] - R2100$	Daughtry i in. 2000, Nagler i in. 2003
	PSRI	<i>Plant Senescence Reflectance Index</i>	$PSRI = (R680 - R500) / R750$	Merzlyak i in. 1999
Ocena zawartości wody	NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>	$NDWI = (R857 - R1241) / (R857 + R1241)$	Gao 1996
	WBI	<i>Water Band Index</i>	$WBI = R970 / R900$	Peñuelas i in. 1997

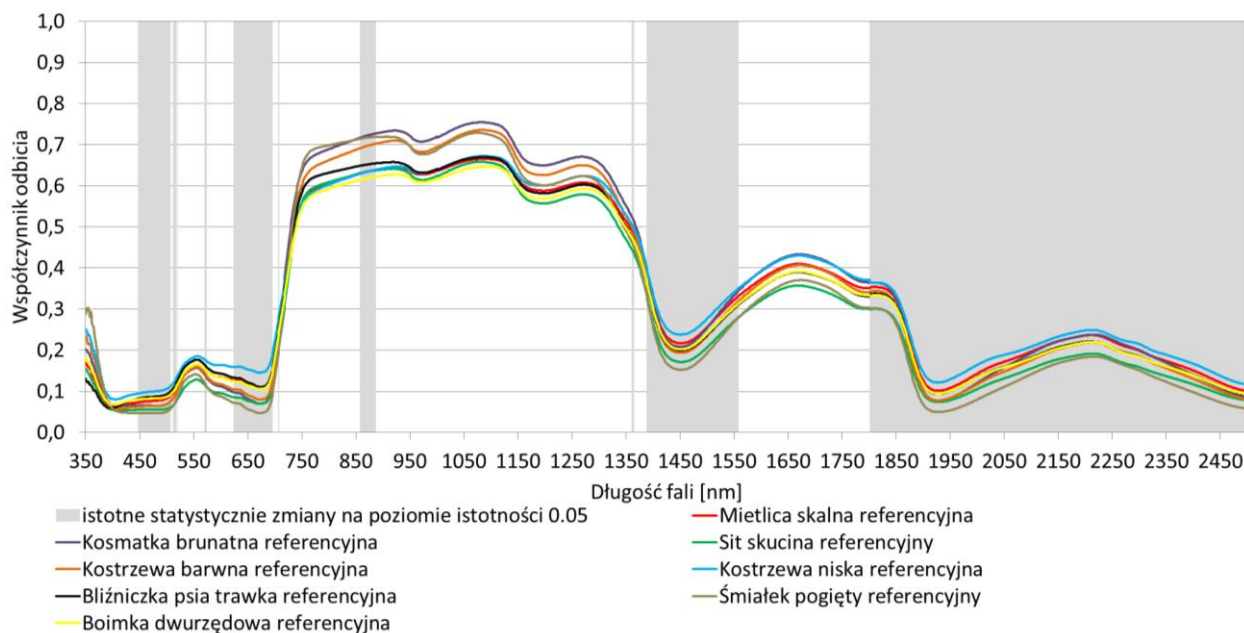
4. Najważniejsze wyniki badań

Analiza statystyczna pozyskanych charakterystyk spektralnych dominujących gatunków muraw wysokogórskich pozwoliła ocenić kondycję gatunków w zależności od lokalizacji poligonu. Wydzielono istotne statystycznie zakresy spektrum elektromagnetycznego, które obrazowały różnice cech spektralnych roślin wydeptywanych, rekultywowanych i referencyjnych (Ryc. 3.). Zakresy spektrum potwierdziły zmienną zawartość chlorofilu, wody w baldachimie oraz zawartość suchej masy i substancji budulcowych roślin (Tabela 2.). Kondycja roślinności muraw wysokogórskich w poligonach referencyjnych i rekultywowanych mieści się w zakresie wartości optymalnych. Dla gatunków zlokalizowanych przy szlakach zaobserwowano spadek zawartości chlorofilu i wody w roślinie, a także mniejszą zdolność absorpcji światła w procesie fotosyntezy, co przekłada się na gorszy rozwój roślin.

⁷ Korelacja Spearmana (ang. Spearman's rank-order correlation coefficient) to metoda prezentacji zależności między zmiennymi ilościowymi, które nie posiadają rozkładu normalnego.

⁸ Współczynnik determinacji (R^2 , ang. Coefficient of determination) jedna z podstawowych miar jakości dopasowania modelu; opisuje jaką część zmienności zmiennej objaśnianej została wyjaśniona przez model.

⁹ MARS (ang. Multivariate Adaptive Regression Splines) procedura nieparametryczna służąca do modelowania zjawisk, znalezienie wartości zmiennych wyjściowych (zależnych) na podstawie zmiennych wejściowych (predykcyjnych).

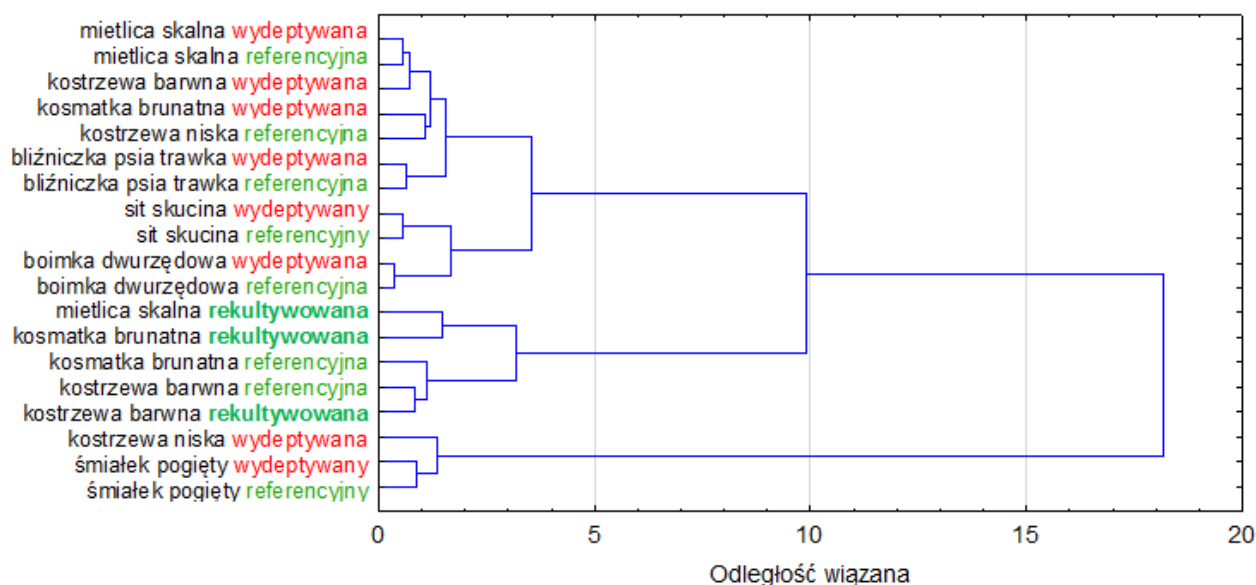


Ryc. 3. Charakterystyki spektralne (średnie wartości współczynnika odbicia dla 8 badanych gatunków w latach 2011-2014). Wnioskowanie statystyczne przeprowadzono za pomocą testu ANOVA na poziomie istotności $\alpha=0.05$, szarym fototonem zaznaczone są zakresy spektralne istotne statystycznie na poziomie $\alpha=0,05$; $n=94\ 000$.

Tabela 2. Zakresy spektrum elektromagnetycznego obrazujące istotne statystycznie zmiany na poziomie istotności 0.05, porównanie wykonane pomiędzy gatunkami muraw wysokogórskich w wariantach wydeptywany – referencyjny.

Opis cech roślin	Zakresy spektrum (nm)
absorpcja barwników fotosyntetycznie czynnych	446-506,511-519,569-573,623-695,706-707
struktury komórkowe roślinności	857-886
zawartość wody, zawartość suchej masy, absorpcja białek i azotu	1360-1364,1388-1557,1801-2500

Zróznicowaną kondycję dominujących gatunków muraw wysokogórskich (wydeptywanych, referencyjnych i rekultywowanych) zaobserwowano stosując metodę aglomeracji krzywych odbicia spektralnego (metoda Warda; Ryc. 4.). Charakterystyki spektralne gatunków występujących na poligonach wydeptywanych posiadały największą wartość odległości wiązanej (co oznacza, że różniły się w największym stopniu) w porównaniu z odpowiednikiem danego gatunku w poligonie referencyjnym lub rekultywacyjnym. Zaobserwowano to dla: kosmatki brunatnej; kostrzewy niskiej; kostrzewy barwnej. Silne podobieństwo cech spektralnych (odległość wiązana < 2) roślin rekultywowanych do roślin referencyjnych odnotowano dla kosmatki brunatnej i kostrzewy barwnej; Ryc. 4.) Niewielkie różnice spektralne boimki dwurzędowej, situ skucina, mietlicy skalnej oraz bliźniczki psiej trawki wystąpiły natomiast na poligonach roślin referencyjnych i wydeptywanych (odległość wiązana < 1 ; Ryc. 4.).



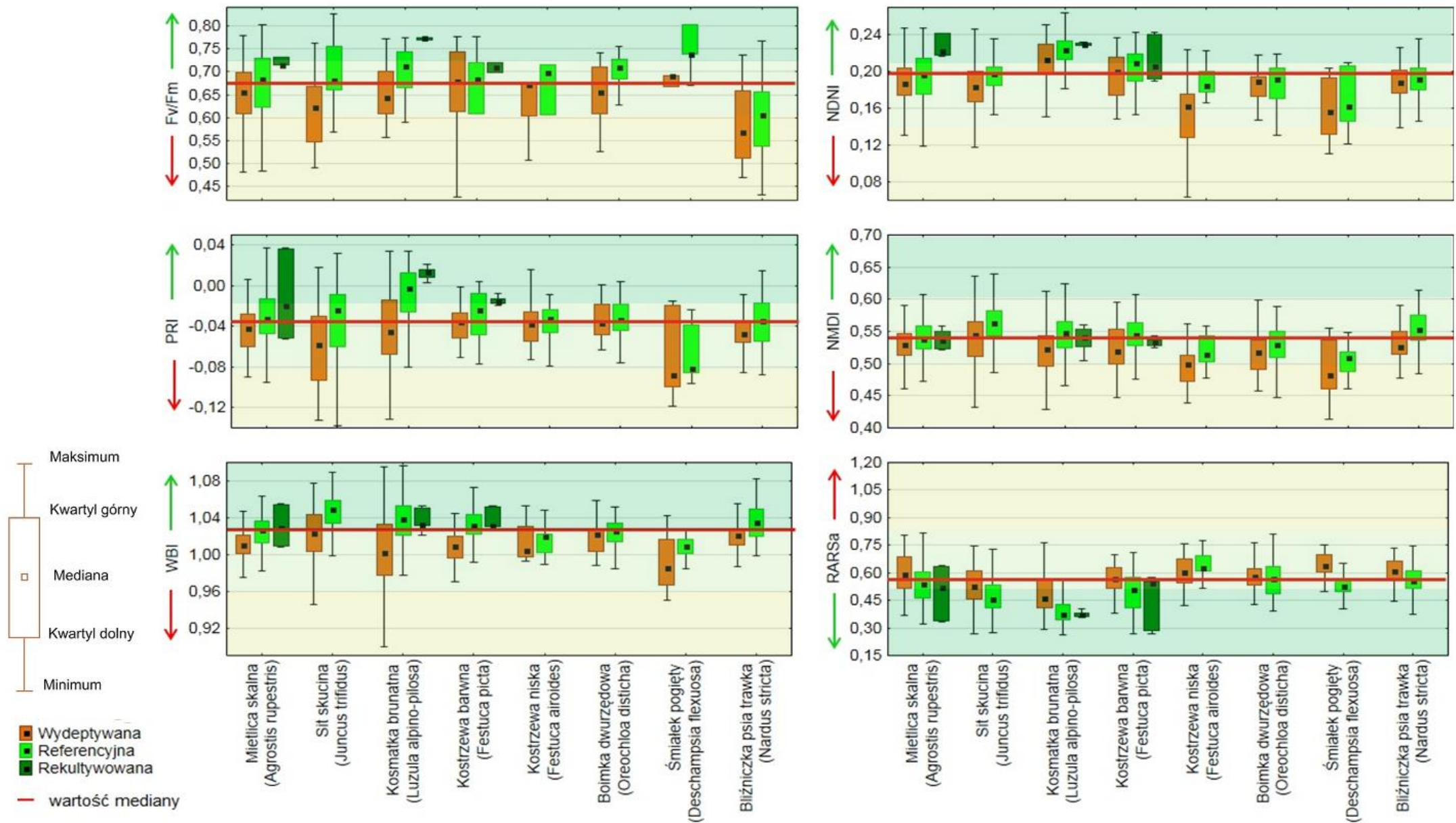
Ryc. 4. Aglomeracja¹⁰ krzywych odbicia spektralnego (metodą Warda) w okresie badawczym 2011-2014 dla dominujących gatunków muraw wysokogórskich, n=182 375.

Analiza zarówno krzywych odbicia spektralnego, jak też teledetekcyjnych wskaźników roślinności i parametrów biofizycznych wykazała, że kluczowe dla oceny kondycji badanych gatunków są następujące właściwości roślin (Ryc. 5.): zawartość chlorofilu w roślinie (wskaźnik RARSa); ilość światła wykorzystywanego w procesie fotosyntezy (wskaźnik PRI); wydajność fotosyntezy mierzona poprzez fluorescencję (wskaźnik F_v/F_m) oraz zawartość wody (WBI).

Największą zawartość *chlorofilu a* posiadają gatunki referencyjne i rekultywowane: kosmatki brunatnej, kostrzewy barwnej, mietlicy skalnej (wartości 0,28-0,53), a najniższą posiadają kostrzewa niska, boimka dwurzędowa i bliźniczka psia trawka (0,58-0,78). Najwyższa produktywność charakteryzuje gatunki z obszarów poddanych rekultywacji. Zarówno wykorzystanie światła w procesie fotosyntezy (PRI) jak też wartość fluorescencji (F_v/F_m) jest najwyższa dla tych trzech gatunków (mietlica skalna, kosmatka brunatna, kostrzewa barwna) w porównaniu z poligonami wydeptywanymi. Wartości wskaźnika F_v/F_m mieszczą się w przedziale 0,69-0,78 dla tych poligonów rekultywacyjnych, a w poligonach referencyjnych jest to zakres 0,54-0,81. Natomiast dla roślin wydeptywanych wartości te są niższe (w zależności od gatunku spadek o ok. 10-40 %), co oznacza, że powstaje mniej produktów fotosyntezy.

Na poligonach wydeptywanych zaobserwowano spadek ilości wody; wskaźnik zawartości wody WBI uzyskiwał wartości o około 10-30 % niższe niż dla odpowiadających im poligonów referencyjnych tego samego gatunku. Jednakże wszystkie wartości mieszczą się w optymalnym zakresie wskaźnika, przyjętym dla roślinności zielonej od 0,8-1,2.

¹⁰ Metody aglomeracyjne opierają się na miarach odległości między skupieniami. Zasadniczo przy zadanym grupowaniu wstępnym, w celu zredukowania liczby skupień łączą one te dwa skupienia, które są najbliższe sobie. Za każdym razem łączone są dwa najbliższe skupienia, a proces ten jest powtarzany do momentu, gdy istnieje tylko jedno skupienie zawierające wszystkie elementy danych.



Ryc. 5. Wartości teledetekcyjnych wskaźników roślinności (strzałka zielona – wzrost kondycji, większa zawartość badanego parametru; strzałka czerwona – spadek kondycji, mniejsza zawartość badanego parametru). Fv/Fm – wskaźnik wydajności fotosyntezy mierzonej fluorescencją, PRI – Photochemical Reflectance Index, WBI – Water Band Index, NDNI – Normalized Difference Nitrogen Index, NMDI – Normalized Multi-band Drought Index, RARSa – Ratio analysis of reflectance spectra algorithm chlorophyll a.

Dla gatunków występujących na poligonach referencyjnych i rekultywacyjnych wskaźnik ogólnej kondycji roślinności NMDI osiągał wartości powyżej 0,54 – co oznacza górną część przedziałów optymalnych, jedynie obniżoną wartość wskaźnika NMDI o ok. 25% zaobserwowano dla gatunku śmiałka pogiętego i kostrzewy niskiej. Widoczna jest także obniżona wartość tego wskaźnika (spadek wartości o ok. 10-40%) dla poligonów wydeptywanych w odniesieniu do ich referencji, co świadczy o pogorszeniu kondycji gatunków muraw zlokalizowanych przy szlaku. Największym spadkiem wartości wskaźnika NMDI, a zarazem ogólnej kondycji roślinności charakteryzuje się kosmatka brunatna i kostrzewa barwna.

5. Podsumowanie, wnioski

Kondycję dominujących gatunków muraw wysokogórskich należy ocenić jako dobrą, gdyż mieściła się ona w zakresach optymalnych lub nieznacznie poniżej. Najczęściej gorsze wartości kondycji cechowały: kosmatkę brunatną, kostrzewę barwną i sit skucinę. Gatunki te cechują się dużą podatnością na zniszczenia wywołane wydeptywaniem, a spowodowane jest jego budowa morfologiczną tj. budową blaszki liści, ich miąższością i wielkością. Z kolei boimka dwurzędowa jest rośliną o bardziej twardych liściach i łodydze, co przekłada się na mniejszy procent (42%) zmian wywołanych wydeptywaniem, podobnie jak mietlica skalna gdzie zmiany te wynoszą ok. 55%.

Opracowana i przetestowana metoda bazuje na precyzyjnych zapisach cech spektralnych w całym zakresie widma elektromagnetycznego (350-2500 nm) z rozdzielczością 1,3-5,0 nm. Tak wąskie zakresy widma pozwalają na monitoring poszczególnych procesów oraz substancji budulcowych rośliny. Potwierdzone to zostało wysokimi korelacjami zmiennych biofizycznych pozyskanych za pomocą niezależnych pomiarów. Integracja terenowych pomiarów hiperspektralnych oraz referencyjnych zmiennych biofizycznych z fluorescencją pozwala w sposób obiektywny i nieinwazyjny dokładnie ocenić parametry roślinne. Jest to ważny element monitoringu obszarów chronionych. Przeprowadzona analiza statystyczna potwierdza, że metody naziemnej teledetekcji hiperspektralnej pozwalają zaobserwować wszelkie zmiany w roślinach wywołane zarówno czynnikami abiotycznymi i biotycznymi. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność wysokorozdzielczych lotniczych danych hiperspektralnych.

Odpowiadając na pytania badawcze postawione w niniejszej pracy należy stwierdzić:

1. *Czy metody naziemnej teledetekcji hiperspektralnej pozwalają odróżnić roślinność uszkodzoną poprzez wydeptywanie od roślinności referencyjnej?* Tak, analizy statystyczne przeprowadzone na dużej liczbie niezależnych pomiarów spektrometrycznych potwierdziły, że kluczowymi przedziałami widma elektromagnetycznego jest zakres absorpcji

promieniowania przez barwniki fotosyntetycznie czynne, zawartość wody oraz substancji budulcowych roślin. Zaobserwowane zmienności potwierdziły się w analizie kondycji gatunków muraw wysokogórskich wykonanych niezależnymi miernikami.

2. *Które zakresy spektrum elektromagnetycznego oraz wskaźniki teledetekcyjne są optymalne do oceny kondycji roślinności wysokogórskiej?* Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano zakresy spektrum elektromagnetycznego, które są optymalne do oceny kondycji roślinności, a obrazują one absorpcję barwników fotosyntetycznie czynnych (446-506, 511-519, 569-573, 623-695, 706-707 nm), stan struktur komórkowych (857-886 nm) oraz zawartość wody w roślinach (1360-1364, 1388-1557, 1801-2500 nm). Potwierdzeniem tych zakresów są teledetekcyjne wskaźniki roślinności bazujące na tych, istotnych statystycznie długościach fali. Do tych wskaźników należą: NMDI, ARVI (ocena ogólnego stanu roślin); RARSa, GI (ocena ilości barwników fotosyntetycznie czynnych); SIPI, PRI (ocena ilości światła wykorzystywanego w procesie fotosyntezy); CAI, PSRI (ocena ilości suchej biomasy i węgla); NDWI, WBI (ocena zawartości wody).
3. *W jaki sposób roślinność muraw reaguje na wydeptywanie? Czy zmiany te są utrwalane na kolejne lata, czy też roślinność podlega regeneracji?* Parametry gatunków znajdujących się na poligonach wydeptywanych są obniżone np. chlorofil (wartość wskaźnika RARSa wzrasta o ok.10-20% w stosunku do poligonów referencyjnych, co oznacza spadek ilości chlorofilu w roślinie); mniejszą ilość wody (wskaźnik WBI maleje w poligonach wydeptywanych o ok. 10-30%); zmniejszona ilość światła wykorzystywanego w procesie fotosyntezy (spadek wartości PRI w poligonach wydeptywanych ok. 10-40%); a także ogólne obniżenie kondycji roślin (spadek wartości wskaźnika NMDI średnio o ok. 10-40% w stosunku do wartości otrzymanych dla poligonów referencyjnych. Analiza cech fizjologicznych, morfologicznych i anatomicznych – aspektów, które warunkują kondycję roślinności – pokazała, iż cechy te mają odzwierciedlenie we właściwościach spektralnych badanych gatunków, a także w teledetekcyjnych wskaźnikach roślinności oraz zmiennych biofizycznych. Przystosowania roślinności do wzrostu w warunkach wysokogórskich pozwalają na jej regenerację i odbudowę w otoczeniu szlaków. Badania gatunków poddanych rekultywacji potwierdziły stan kondycyjny zbliżony do cech roślin referencyjnych, czyli zmiany wywołane wydeptywaniem ulegają regeneracji.

Literatura

- Chappelle E.W., Kim M.S., McMurtrey J.E., 1992, Ratio Analysis of Reflectance Spectra (RARS): An Algorithm for the Remote Estimation of the Concentrations of Chlorophyll A, Chlorophyll B, and Carote in Soybean Leaves. *Remote Sensing of Environment*, 39, 239-247.
- Daughtry C., Walthall C.L., Kim M. S., Brown de Colstoun E., McMurtrey J.E., 2000, Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74, 229-239.
- 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*, 41, 35-44.
- Gao B.C., 1996, NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257-266.
- Ishii J., Lu S., Funakoshi S., Shimizu Y., Omasa K., Washitani I., 2009, Mapping potential habitats of threatened plant species in a moist tall grassland using hyperspectral imagery. *Biodiversity and Conservation*, 18, 2521-2535.
- Jensen J.R., 1983, Biophysical remote sensing – Review article. *Annals of the Associations of American Geographers*, 73 (1), 111-132.
- Kaufman Y.J., Tanre D., 1992, Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30 (2), 261-270.
- Kozłowska A., Plit J., 2002, Mapa roślinności wysokogórskiej Tatr (od Krzyżnego do Przełęczy Kondrackiej) w skali 1:10 000 i 1:20 000 [w:] W. Borowiec, A. Kotarba, A. Kownacki, Z. Krzan i Z. Mirek, *Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr*. Tatrzański Park Narodowy, Kraków-Zakopane, 197-201.
- Merzlyak J.R., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Rakitin V.Y., 1999, Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, 106, 135-141.
- Moreno J., Alonso L., Delegido J., Rivera J.P., Ruiz-Verdú A., Sabater N., Tenjo C., Verrelst J., Vicent J., 2014, FLEX (Fluorescence Explorer) mission: Observation fluorescence as a new remote sensing technique to study the global terrestrial vegetation state. *Revista de Teledetección [S.I.]*, 41, 111-119.
- Nagler P.L., Inoue 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*, 87, 310-325.
- Peñuelas J., Baret F., Filella I., 1995, Semi-empirical indices to assess Carotenoids/Chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica*, 31, 221-230.
- 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*, 8 (13), 2869-2875.
- Serrano L., Penuelas J., Ustin and S.L., 2002, Remote Sensing of Nitrogen and Lignin in Mediterranean Vegetation from AVIRIS Data: Decomposing Biochemical from Structural Signals. *Remote Sensing of Environment*, 81, 355-364.
- Tyystjärvi E., Koski A., Keranen M., Nevalainen O., 1999, The Kautsky curve is a built-in-barcode. *Biophysical Journal*, 77, 1159-1167.
- Ustin S.L., Roberts D.A., Gamon J.A., Asner G.P., Green R.O., 2004, Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. *Bioscience*, 54 (6), 523-533.
- Wang L., Qu J., 2007, NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, 34, L20405.
- Ward J. H. Jr., 1963, Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association*, 58 (301), 236-244.
- Zarco-Tejada P.J., Bejron A., Miller J.R., 2004, Stress detection in crops with hyperspectral remote sensing and physical simulation models. *Airborne Imaging Spectroscopy Workshop, 8 October 2004 - Bruges, Belgium*.

Podziękowania za pomoc w tworzeniu rozprawy doktorskiej chcę skierować do:

Promotora – dr hab. Bogdana Zagajewskiego; dr hab. Anny Kozłowskiej, prof. IGIPZ; prof. dr hab. Elżbiety Romanowskiej; Koleżanek i Kolegów z Zakładu Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji WGiSR UW; Pracowników oraz Wolontariuszy Tatrzańskiego Parku Narodowego; Fundacji im. Anny Pasek; Rodziny i Przyjaciół.

Badania częściowo były również finansowane w projekcie *Assessment of Vegetation damages using Remote Sensing (AVeReS)*. Opracowana metodyka pomiarów spektrometrycznych była testowana w ramach projektu *Ecosystem stress from the combined effects of winter climate change and air pollution – how do the impacts differ between biomes?* (WICLAP).

