

## Zróznicowanie spektralne wybranych gatunków muraw wysokogórskich Doliny Gąsienicowej narażonych na wydeptywanie

*Variability of spectral characteristics of selected high-mountain plant species of Gąsienicowa Valley exposed for trampling*

KYCKO Marlena, ZAGAJEWSKI Bogdan,  
KOZŁOWSKA Anna, OPRZĄDEK Magdalena

**Słowa kluczowe:** Tatrzański Park Narodowy, szata roślinna, teledetekcyjne wskaźniki roślinności, ruch turystyczny, wydeptywanie, Kasprowy Wierch, Dolina Gąsienicowa, pomiary spektrometryczne, ASD FieldSpec

**Key words:** Tatra National Park, vegetation, remote sensing vegetation indices, tourism, trampling, Kasprowy Wierch, Gąsienicowa valley, spectrometric measurements, ASD FieldSpec

**Otrzymano:** 20 lipca 2012; **Zaakceptowano** 30 lipca 2012

**Received:** 20 July 2012; **Accepted:** 30 July 2012

*This paper presents analysis of plant cover condition in Gąsienicowa Valley in the Tatra Mts. depending on various trampling intensity. Measurements were taken with ASD FieldSpec 3 spectrometer (its spectral range is 350-2500nm) on 8 dominant plant species of alpine swards: *Juncus trifidus*, *Oreochloa disticha*, *Agrostis rupestris*, *Deschampsia flexuosa*, *Festuca airoides*, *Festuca picta*, *Luzula alpino-pilosa*, *Nardus stricta*. These plant species were located: 0-5m, 5-10m and more than 10m distant from a touristic trail (control point). Spectral characteristics as well as vegetation indices were analyzed with ANOVA test, which showed differential resistance to trampling of investigated plant species. The most resistant species were: *Nardus stricta* and *Deschampsia flexuosa*, whereas *Oreochloa**

*disticha* and *Festuca airoides* appeared to be vulnerable to trampling. However, all vegetation indices for plant species were in its optimum range, so it proves that they are in a good condition. The analysis of vegetation indices enabled choosing those groups, which are the most useful in the research of mountain vegetation condition. They are: NDVI, ARVI, EVI from the broadband greenness group and  $mSR_{705}$  and  $mNDVI$  from narrowband greenness group (measuring chlorophyll content and cell structure), as well as WBI, NDWI, NDII from canopy water content group. The most important factor that effects investigated plant species condition is water content. The research showed that hyperspectral analysis is useful in studying human impact on vegetation cover and needs to be developed.

### Wstęp

Środowisko wysokogórskie jest szczególnie wrażliwe na niekorzystne oddziaływania i zmiany zarówno w skali lokalnej jak i globalnej. Dotyczy to także wpływu turystyki. Wydeptywanie roślinności znajdującej się w bezpośrednim sąsiedztwie szlaków turystycznych powoduje u niej stres (Grabherr, 1982; Whinam i in., 1999, 2003), który może doprowadzić do niekorzystnych zaburzeń funkcji i struktury organizmów roślin (Kopcewicz, Lewak, 2002). Zniszczenia pokrywy roślinnej

i rozszerzenia strefy antropopresji zwiększają erozję gleb (Degórski, 2002; Kiszka, 2010).

Stresogenny wpływ wydeptywania może być mierzony przy użyciu metod teledetekcyjnych. Charakterystyki spektralne umożliwiają identyfikację wybranych gatunków roślin (Zagajewski, 2010a) a także pozwalają obliczyć teledetekcyjne wskaźniki roślinności charakteryzujące: ogólną kondycję, zawartość chlorofilu, zawartość azotu, ilości światła wykorzystanego podczas procesu fotosyntezy, zawartość węgla w roślinie, zawartość wody w roślinie (Rouse i in., 1973; Gao, 1995; Gitelson, Merzylak

1997; Peñuelas, Filella 1998; Datt, 1999; Merzlyak i in., 1999; Haboudane i in., 2002; Daughtry i in., 2004).

Celem niniejszej publikacji jest określenie (za pomocą metod hiperspektralnych) spektralnych charakterystyk roślinności:

- wpływu wydeptywania na kondycję roślin znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie szlaków turystycznych Doliny Gąsienicowej a zwłaszcza w otoczeniu Kasprowego Wierchu,
- odporności wybranych gatunków roślin tatrzańskich na wydeptywanie,
- przydatności teledetekcyjnych wskaźników roślinności do badań antropopresji turystycznej.

Przedmiotem badań były następujące gatunki roślin: sit skucina (*Juncus trifidus*), boimka dwurzędowa (*Oreochloa disticha*), mietlica skalna (*Agrostis rupestris*), śmiałek pogięty (*Deschampsia flexuosa*), kostrzewa niska (*Festuca airoides*), kostrzewa barwna (*Festuca picta*), kosmatka brunatna (*Luzula alpino-pilosa*), bliźniczka psia trawka (*Nardus stricta*). Jako kryterium stopnia narażenia wydeptywaniem przyjęto odległość od ścieżki turystycznej.

Teren badań leży na obszarze Tatrzańskiego Parku Narodowego, a więc podległym ochronie, gdzie prowadzona jest restytucja szaty roślinnej w otoczenia Kasprowego Wierchu (lata 1993-2001). Można więc przyjąć założenie, że zbiorowiska roślinne Tatr są w dobrym stanie kondycyjnym a turystyka piesza nie wywiera mierzalnego, rejestrowanego na dużych powierzchniach wpływu na stan roślinności. Zniszczenia można obserwować jedynie lokalne, w pobliżu szlaków turystycznych, ich rozwidleń lub też miejsc wyjątkowo cennych widokowo. Niniejsze badania terenowe były prowadzone za pozwoleniem oraz przy wsparciu TPN.

### Wpływ wydeptywania na kondycję roślinności

Obszary chronione cechują się dużą atrakcyjnością turystyczną, co lokalnie powoduje nadmierną presję w stosunku do możliwości regeneracji występujących tam ekosystemów. Prace z zakresu ich ochrony prowadzi się praktycznie na całym świecie, mają one z jednej strony ograniczyć straty i szkody wywołane turystyką, a z drugiej określić zdolności regeneracyjne ekosystemów oraz dopuszczalne parametry infrastruktury turystycznej, w tym liczbę zwiedzających turystów. Ze względu na strefowe i regionalne zróżnicowanie ekosystemów nie ma wypracowanych uniwersalnych standardów i metod monitoringowych.

Od lat trwają badania nad pojemnością turystyczną Tatrzańskiego Parku Narodowego oraz prowadzone są działania zmierzające do dostosowania infrastruktury do potrzeb turystyki, w celu zachowania równowagi w czasie nasilającej się presji turystycznej na środowisko Tatr (Czochański, Szydarowski, 2000). Nasilenie antropopresji nie jest równomierne, zmienia się zarówno w czasie jak i w przestrzeni (Czochański, Szydarowski, 2000; Pociask-Karteczka i in. 2007). Obserwuje się silne,

stałe oddziaływanie turystów na najbliższe otoczenie Kasprowego Wierchu, od roku 1936 – a więc od momentu otwarcia kolejki – do 1992 wjechało nią aż 28 mln osób (Skawiński, Krzan, 2000). Z tego powodu obszar wokół kolejki jest monitorowany oraz proponuje się rozmaite rozwiązania dla jego ochrony (Skawiński, Krzan, 2000, 2002). Wprowadzony ostatnio monitoring przyrodniczy obejmuje m. in. badania wielkości pogłębienia i poszerzania szlaków w skutek procesów erozji i denudacji oraz zmian formy rzeźby w ich bezpośrednim sąsiedztwie, a także zmiany pokrywy roślinnej (stopień wydeptywania) oraz występowanie gatunków wskaźnikowych dla antropopresji (Rączkowska, Kozłowska, 2010). Warto podkreślić, że badania M. Guzika (2001) wykazały, że współcześnie narciarstwo wywołuje mniejsze szkody niż dawny intensywny wypas owiec oraz że skanalizowanie ruchu turystycznego w rejonie Kasprowego Wierchu pozwoliło na regenerację wysokogórskich muraw.

Badania wpływu wydeptywania prowadzone były także w słowackiej części Tatrzańskiego Parku Narodowego – TANAP-ie (Piscová i in. 2011). Podczas badań prowadzono eksperyment na wydeptywanej murawie piętra alpejskiego (*Juncetum trifidi*) w Tatrach Bielskich (Somsák i in., 1979). Celem badań było opisanie reakcji roślinności na różnych etapach wydeptywania, uwzględniając efekt sezonowości i fenologii. Efektem prac było stwierdzenie, że wydeptywanie na początku sezonu wegetacyjnego ma większy wpływ na roślinność, niż wydeptywanie w późniejszej części sezonu (Piscová i in., 2011).

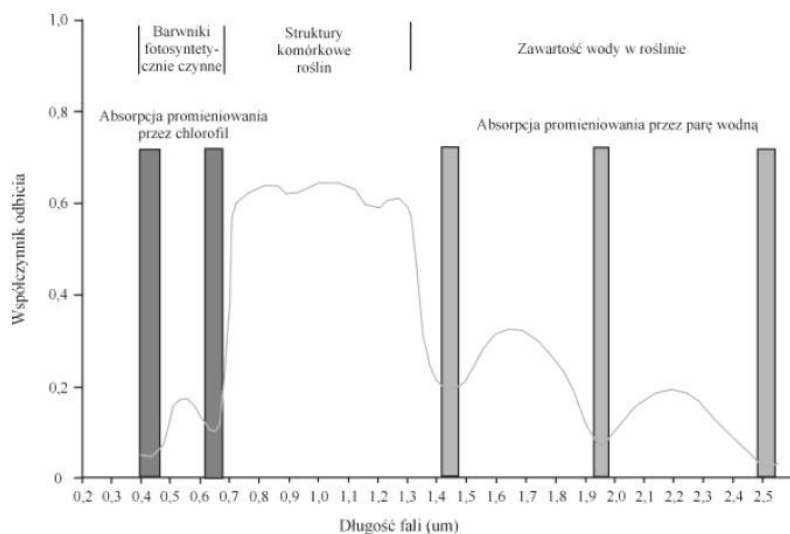
W Alpach Austriackich kondycja roślin muraw piętra alpejskiego pogorszyła się po wybudowaniu kolejek górskich (Grabherr, 1982). Monitoring wpływu turystyki był realizowany poprzez analizy zmian na transektach o różnym natężeniu ruchu turystycznego. Pozwoliło to analizować zmiany biomasy i struktury roślin w poszczególnych obszarach (Grabherr, 1982). Zaobserwowano zróżnicowanie roślinności w strefach o różnej intensywności deptania (niewielkie, umiarkowane oraz intensywne wydeptywanie). Zauważono, że nawet słabe wydeptywanie roślinności wysokogórskiej niszczy naturalny skład gatunkowy. Najbardziej intensywnie wydeptywane obszary cechowały się zmianami gęstości i objętości gleby, co obniża zdolność regeneracji roślin (Grabherr, 1982).

Badania monitoringowe muraw Alp Centralnych wykazały zmiany: struktury poziomej i pionowej roślin, biomasy oraz składu gatunkowego i zróżnicowania roślinności. Zaobserwowano, że gatunki odporne na wydeptywanie rozmnażają się dobrze, jednakże deptany teren uniemożliwia im kiełkowanie, co prowadzi do zaburzeń w regeneracji (Klug, i in., 2002). Eksperymentalne próby badania wpływu wydeptywania na roślinność przeprowadzono w ciągu czteroletnich badań zbiorowisk roślinnych piętra alpejskiego i subalpejskiego w zachodniej Tasmanii. Stwierdzono różnice w odporności wynikające z morfologii roślin, zwłaszcza – formy życiowej, rośliny płożące (o wielu rozgałęziających się pędach), typowe dla piętra alpejskiego, najłatwiej się regenerują (Whinam i in., 1999, 2003).

## Zastosowanie spektrometrii do analizy roślinności

Spektrometria zajmuje się rejestracją i pomiarami oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z badaną materią (Swain, Davis, 1987; Zagajewski, 2010a). Cechy spektralne obiektu są charakterystyczne dla każdego badanego obiektu i powstają w wyniku oddziaływania energii z cząstkami gazów, ciał stałych i pyłów. Między poszczególnymi układami istnieją wzajemne interakcje.

Poszczególne obiekty absorbują, odbijają oraz rozpraszają promieniowanie w sposób selektywny, zależny od materii oraz długości fali. Powszechnie do analiz teledetekcyjnych wykorzystuje się współczynnik odbicia spektralnego (Scheapman-Strub i in., 2006). Współczynnik ten przedstawia się na wykresie jako krzywą odbicia spektralnego, nazywaną także charakterystyką spektralną obrazu. Każdy badany obiekt wykazuje zmiany dla różnych przedziałów widma elektromagnetycznego (Jensen, 1983; Bannari i in., 1995). Charakterystykę spektralną danego obiektu można uzyskać poprzez pomiar spektrometrem, który określa ilość odbitej energii od danego obiektu względem dochodzącej energii w funkcji długości fali.



Ryc. 1. Charakterystyka odbicia spektralnego zielonej, zdrowej rośliny w zakresie spektralnym od 0,4 µm do 2,5 µm (za: Zagajewski i in., 2007)

Fig. 1. Spectral reflectance characteristics of health, green vegetation for the wavelength interval 0.4 µm do 2.5 µm (after: Zagajewski et al., 2007)

Teledetekcyjne charakterystyki spektralne są bardzo dobrym odzwierciedleniem parametrów biofizycznych roślin, umożliwiającym prowadzenie analiz ilościowych i jakościowych wybranych gatunków (Jensen, 1983; Bannari i in., 1995; Jarocińska, Zagajewski, 2008).

Do analizy roślinności wykorzystywany jest zakres od 350 nm do 2500 nm, oznacza to, że analiza bazuje na paśmie widzialnym promieniowania a także bliskiej podczerwieni i średniej podczerwieni (Jensen, 1983; Zagajewski i in., 2007). Krzywa odbicia spektralnego w tym

zakresie przyjmuje zmienny kształt, który jest zależny od barwników fotosyntetycznie czynnych, struktur komórkowych roślin a także zawartości wody w roślinie (Ryc. 1.; Zhang i in., 1997; Asner, 1998; Zagajewski i in., 2007; Clevers i in., 2008).

Odbicie w zakresie 740-1100 nm opisuje struktury komórkowe roślin; większa ilość aerenchymy, która charakteryzuje się względnie mniejszą zawartością wody i większą ilością wolnych przestrzeni wypełnionych powietrzem, powoduje wzrost odbicia promieniowania nawet do 90%, natomiast większy udział miąższu palisadowego obniża odbicie promieniowania NIR do około 40-50% (Zagajewski, 2010b). Wartość tego odbicia jest jednak zmienna, zależna od okresu fenologicznego i warunków środowiskowych (Asner, 1998; Zagajewski i in., 2009).

Wzajemne relacje barwników świadczą o stanie kondycyjnym roślinności i są charakterystyczne dla poszczególnych gatunków (Ruban i in., 1993; Gitelson, Merzlyak, 1997;). Wysokie stężenie chlorofilu w roślinach świadczy o ich dobrej kondycji, co przejawia się dużym odbiciem w zielonym zakresie widma i dużej absorpcji niebieskiego i czerwonego promieniowania (Gamon, Surfus 1999; Datt, 2000). Absorpcja chlorofilu obserwowana jest w zakresie 400-700 nm.

Karotenoidy występują w znacznych ilościach w obumierających komórkach roślinnych. Dodatkowo wspomagają proces absorpcji światła i pomagają chronić rośliny przez szkodliwym działaniem promieniowania, szczególnie w terenach górzystych (Asner, 1998; Ruban i in., 1993).

Przy analizie zawartości wody w roślinie istotny jest zakres 1300-2500 nm. W przedziale tym zaznaczają się minima 1450 nm, 1950 nm oraz 2500 nm, gdzie absorpcja promieniowania przez parę wodną nasila się, natomiast największy współczynnik odbicia mamy dla fal o długości 1600 nm oraz 2200 nm (Ryc. 1., Aldakheel, Danson, 1997; Clevers i in., 2010). Zawartość wody jest cechą charakterystyczną dla danego gatunku i zależy od morfologii i geometrii liścia, baldachimu roślinności a także zapotrzebowania

na wodę i zdolności ewapotranspiracyjnych (Fourty, Baret, 1998). Wśród roślin tego samego gatunku może być także zróżnicowanie w uwodnieniu, wynikające głównie z dostępności wody, zdrowia i turgoru wodnego rośliny (Dawson i inni, 1998). Roślinność siedlisk wilgotnych jest bardziej produktywna i mniej narażona na oparzenia i przegrzanie niż siedlisk suchych (Aldakheel, Dawson, 1997; Fourty, Baret, 1998).



## Teledetekcyjne wskaźniki roślinności

Wykorzystanie specyficznych przedziałów widma elektromagnetycznego pozwala na tworzenie teledetekcyjnych wskaźników roślinności, które są kombinacją odbicia spektralnego różnych długości fal elektromagnetycznych w zależności od analizowanych cech roślinności. Opisują one strukturę i stan roślinności, co pozwala monitorować zmiany zachodzące w ekosystemach.

Istnieją różne podziały teledetekcyjnych wskaźników roślinności, m.in. podział na wskaźniki wielospektralne i hiperspektralne a także podział związany z rodzajem analizowanych danych (czyli na podstawie parametrów, jakie określają te wskaźniki).

Teledetekcyjne wskaźniki roślinności zgrupowano w 7 grup głównych (ENVI 4.5 User's Guide, 2005) w zależności od parametrów, jakie określają:

- ogólny wigor roślin – *Broadband Greenness*: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, Rouse i in., 1973), Simple Ratio Index (SR, Rouse i in., 1973), Enhanced Vegetation Index (EVI, Huete i in., 1997), Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI, Kaufman, Tanre 1992),
- zawartość i struktura chlorofilu – *Narrowband Greenness*: Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (NDVI<sub>705</sub>, Gitelson, Merzlyak, 1994), Modified Red Edge Simple Ratio Index (mSR<sub>705</sub>, Datt 1999), Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (mNDVI<sub>705</sub>, Datt 1999), Vogelmann Red Edge Index 1 (VOG1, Vogelmann i in., 1993), Vogelmann Red Edge Index 2 (VOG2, Vogelmann i in., 1993), Vogelmann Red Edge Index 3 (VOG3, Vogelmann i in., 1993),
- ilość światła, jakie wykorzystują rośliny w procesie fotosyntezy – *Light Use Efficiency*: Photochemical Reflectance Index (PRI, Gamon i in., 1992), Structure Insensitive Pigment Index (SIPI, Peñuelas i in., 1995),
- zawartość azotu – *Canopy Nitrogen*: Normalized Difference Nitrogen Index (NDNI, Fourty i in., 1996),
- zawartość węgla w suchej masie celulozy i ligniny – *Dry or Senescent Carbon*: Normalized Difference Lignin Index (NDLI, Fourty i in. 1996), Cellulose Absorption Index (CAI, Nagler i in., 2003), Plant Senescence Reflectance Index (PSRI, Merzlyak i in., 1999),
- karotenoidy (pigmenty) – *Leaf Pigments*: Carotenoid Reflectance Index 1 (CRI1, Gitelson i in. 2002), Carotenoid Reflectance Index 2 (CRI2, Gitelson i in. 2002), Anthocyanin Reflectance Index 1 (ARI1, Gitelson i in. 2001), Anthocyanin Reflectance Index 2 (ARI2, Gitelson i in. 2001),
- zawartość wody w pokrywie roślinnej – *Canopy Water Content*: Water Band Index (WBI, Penuelas i in. 1995), Normalized Difference Water Index (NDWI, Gao, 1996), Moisture Stress Index (MSI, Rock i in. 1985), Normalized Difference Infrared Index (NDII, Hardisky i in. 1983).

## Metodyka badań

Badano dominujące gatunki muraw alpejskich narażonych w różnym stopniu na wydeptywanie (wzdłuż wybranych szlaków turystycznych) Roślinność narażona na wydeptywanie cechuje się mniejszą ilością biomasy, gdyż jest ona niszczone przez turystów, co powoduje większe odsłonięcie gleby, wzrost odbicia promieniowania w widzialnym zakresie spektrum oraz obniżenie odbicia w podczerwieni (mieszanie sygnałów pochodzących od gleby i roślinności). Zjawiska tego nie obserwuje się natomiast w przypadku referencyjnych płatów roślinności, znajdujących się dalej niż 10 m od szlaku, gdzie prawdopodobieństwo wydeptywania jest niewielkie i struktura oraz morfologia badanych roślin jest niezaburzona.

By ograniczyć wpływ mozaiki różnych gatunków muraw alpejskich na rejestrowane krzywe odbicia spektralnego, skoncentrowano się na dużych, jednorodnych płatach roślinnych. Porównywanie mieszanych sygnałów, pochodzących z niejednorodnych płatów, utrudniłoby odróżnienie wpływu wydeptywania od wpływu sygnału pochodzącego od heterogenicznego obiektu.

Postępowanie metodyczne składało się z następujących etapów:

- wybór szlaków turystycznych charakteryzujących się zróżnicowanym natężeniem ruchu turystycznego,
- wybór jednorodnych płatów muraw alpejskich wzdłuż wytypowanych szlaków,
- wybór dominujących gatunków roślin o pokroju trawiastym, w założeniu przyjęto, że porównane zostaną charakterystyki spektralne dominujących gatunków, porastających duże powierzchnie, podlegające zróżnicowanej presji turystycznej.
- pomiarów charakterystyk spektralnych wybranych gatunków za pomocą spektrometru ASD FieldSpec 3 przy wykorzystaniu światłowodu rejestrującego promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie 350-2500 nm pod kątem 25°<sup>1</sup>.
- opracowanie statystyczne pomierzonych charakterystyk spektralnych (średnia, odchylenie standardowe),
- obliczenie teledetekcyjnych wskaźników odpowiedzialnych za ogólną kondycję roślinności, zawartość poszczególnych barwników fotosyntetycznie czynnych, zawartość wody oraz celulozy, lignin, które są materiałem budulcowym roślin.
- wykonanie analizy wariancji ANOVA- test ten został przeprowadzony na zestawach charakterystyk spektralnych roślinności pomierzonych w 3 buforach (0-5 m, 5-10 m oraz w roślinności referencyjnej znajdującej się powyżej 10 m od szlaku).
- analiza wartości teledetekcyjnych wskaźników pomierzonych dla poszczególnych buforów.

## Wybór szlaków

Obszar badań objął Dolinę Gąsienicową, gdzie znajduje się największy węzeł szlaków turystycznych w tej

<sup>1</sup> Dodatkowo wykonane zostały pomiary roślinności przy zastosowaniu sztucznego oświetlenia i sondy ASD Plant Probe

części Tatr Wysokich (Skrzydłowski, 2010). W 2011 r. Dolinę Gąsienicową odwiedziło ok. 1 mln turystów (około 30% turystów zwiedzających cały Tatrzański Park Narodowy)<sup>2</sup>. Jest to znaczne obciążenie zważywszy na stosunkowo niewielką powierzchnię Doliny oraz wielkość infrastruktury turystycznej. Ponad 50% ruchu turystycznego koncentruje się w okresie od czerwca do września (Czochański, 2000), co pokrywa się z okresem wegetacyjnym. Liczba turystów wjeżdżających kolejką linową na Kasprowy Wierch jest ponad dwukrotnie większa niż liczba wejść turystów w Kuźnicach w punkcie sprzedaży w dolinie Jaworzynka, w Brzezinach i na Cyrhli.

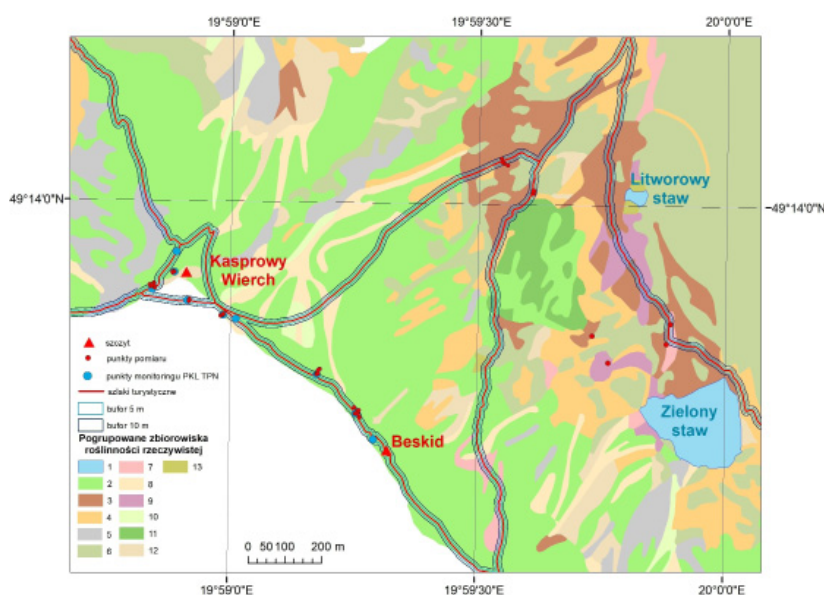
Najbardziej obciążone przez ruch turystyczny są odcinki zlokalizowane w okolicach Kasprowego Wierchu, wynika to głównie z obecności kolejki linowej, która w okresie letnim przewozi do 180 os./h. Odcinek Kasprowy Wierch – Beskid jest odcinkiem o największym natężeniu ruchu turystycznego (Czochański, 1992, 1996; Mirek, 1996; Skawiński, Krzan, 2002). Zlokalizowane tam powierzchnie monitoringowe (Rączkowska, Kozłowska 2010) uwzględniono także w niniejszych badaniach.

## Wybór obiektów badań

Podstawą wyboru typu roślinności, w którym przeprowadzono badania wzdłuż szlaków Doliny Gąsienicowej, była mapa roślinności rzeczywistej w skali 1:10 000 (Kozłowska, 2006). Legenda tej mapy zawiera 41 zbiorowisk roślinnych, na potrzeby niniejszej pracy zgrupowane one zostały do 9 jednostek.

Na podstawie analizy zdjęcia satelitarnego Ikonos, gdzie widoczny jest maksymalny zasięg szlaku turystycznego o zmiennej szerokości zależnie od położenia i natężenia ruchu turystycznego a także na podstawie obserwacji terenowych wyznaczono jako obszar potencjalnego wydeptywania roślinności przez turystów bufor 10 m od szlaku. Zaznaczono go także na tle uproszczonej mapy roślinności (Ryc. 2.). W obszarze tym największy udział (ok. 48%) zajmują murawy alpejskie, dlatego w obrębie tego typu zbiorowiska były lokalizowane powierzchnie badawcze.

Do szczegółowych pomiarów spektrometrycznych wybrano płyty roślinności z dominacją następujących gatunków typowych dla wysokogórskiej roślinności murawowej: 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*).



Ryc. 2. Rozmieszczenie powierzchni badawczych na tle uproszczonej mapy roślinności.

1-Wody; 2-Murawy alpejskie; 3-Murawy wypasowe; 4-Wysokogórskie Borówczyska; 5-Zbiorowiska porostów naskalnych; 6-Zarośla kosodrzewiny na podłożu bezwęglanowym; 7-Ziołorośla; 8-Wilgotne traworośla kosmatkowe; 9-Wilgotne psiary; 10-Pionierskie zbiorowiska roślin zarodnikowych; 11-Zarośla kosodrzewiny na podłożu węglanowym; 12-Traworośla trzcinnikowe; 13-Torfowisko przejściowe

Fig. 2. Distribution of study plots.

1-Lakes; 2-Alpine swards; 3-Subalpine grassland communities after grazing; 4-Subalpine dwarf scrub communities; 5-Epilitic lichen communities; 6-Mountain-pine shrubs on siliceous substrate; 7-Tall herbs; 8-Snow-bed communities; 9-Wet subalpine grassland; 10-Cryptogamic plant communities on scree - initial phase; 11-Mountain-pine shrubs on calcareous substrate; 12-Avalanche meadows; 13-Transition mires.

## Wybór powierzchni badawczych

Większość powierzchni badawczych zlokalizowano w punktach odpowiadających poligonom monitoringu odcinka Kasprowy Wierch – Beskid. Obszar ten został wybrany ze względu na wyjątkowo duże natężenie ruchu turystycznego. Pozostałe powierzchnie zlokalizowane zostały w okolicach mniej uczęszczanych, czyli w rejonie Zielonego Stawu Gąsienicowego a także przy rozwidleniu szlaków prowadzących z Hali Gąsienicowej na Kasprowy Wierch oraz Przełęcz Liliowe.

Na wszystkich powierzchniach pomiary były dokonywane w 3 buforach od szlaku (0–5 metrów w bezpośrednim sąsiedztwie ścieżki w terenie najbardziej narażonym na wydeptywanie, następnie w odległości 5–10 m od szlaku, gdzie możliwa jest ingerencja turystów, jednak występuje ona zdecydowanie rzadziej i z mniejszą intensywnością oraz w oddaleniu ponad 10 m od szlaku – prawdopodobieństwo ruchu turystycznego w tej strefie jest niewielkie. W pierwszym buforze wykonano 210 pomiarów, w drugim 191, natomiast w strefie powyżej 10 m – 171.

<sup>2</sup> www.tpn.pl/pl/zwiedzaj/turystyka/news/179/Statystyka

Pomiary wykonane w trzecim buforze traktowane były jako referencyjne w stosunku do pozostałych pomiarów (z pierwszego i drugiego buforu).

### Badania terenowe

W okresie od 17 do 21 sierpnia 2011 roku podczas bardzo dobrych warunków pogodowych (bezchmurne niebo) przeprowadzono badania teledetekcyjne roślinności. Wykonano pomiary spektrometryczne spektrometrem ASD FieldSpec 3, który rejestruje dane w zakresie 350-2500 nm. Uzyskano krzywe odbicia spektralnego dla każdego badanego gatunku w każdym z punktów pomiarowych. Następnie informacja spektralna zapisana w kanałach od 350 – 2500 nm posłużyła do wyrysowania charakterystyki spektralnej i obliczenia teledetekcyjnych wskaźników roślinności.

Zgodnie z założeniami pomiarowymi, co jeden metr wykonywanych było 25 pomiarów spektrometrem ASD FieldSpec, z których obliczana była wartość średnia i w dalszych analizach traktowana była jako jeden uśredniony pomiar. Dla każdego poligonu badawczego wykonano od 10 do 57 takich uśrednionych pomiarów spektrometrycznych w każdym z buforów.

### Opracowanie statystyczne danych

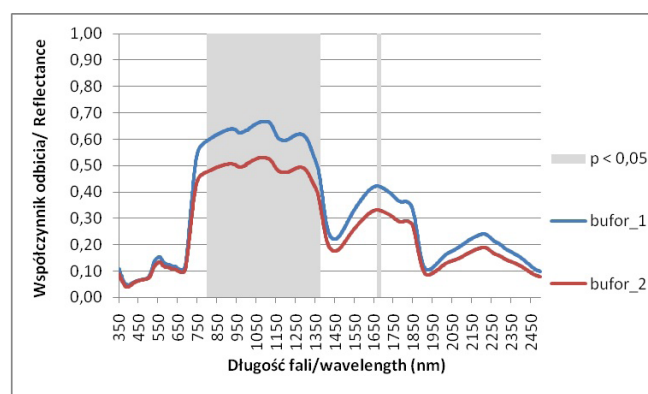
Ze wszystkich pomiarów spektrometrycznych dla danego bufora i gatunku obliczono wartości średnie. Następnie przeprowadzono ocenę istotności na trzech poziomach istotności 0,05, 0,01 oraz 0,001. Pozwoliło to przeanalizować zróżnicowanie statystyczne charakterystyk spektralnych dla każdego gatunku w badanych buforach. Dla lepszej percepcji wyników analiz krzywych odbicia spektralnego, na uzyskanych wykresach zaznaczono przedziały spektrum istotne statystycznie przy danym poziomie istotności dla roślin najbardziej narażonych na wydeptywanie (bufor 1) i referencyjnych (porastająca bufor 3). Istotność statystyczna charakterystyk spektralnych roślinności obliczana była za pomocą analizy wariancji Anova w programie Statistica. Obliczenie istotności statystycznej spektrum roślinności polegało na porównaniu wartości, jakie przyjmuje dany gatunek dla odpowiedniego zakresu spektralnego od 350 nm do 2500 nm, a następnie wyznaczeniu istotnych statystycznie różnic między tymi wartościami dla każdego z przyjętych poziomów istotności.

## Wyniki

### Zróżnicowanie spektralne roślin

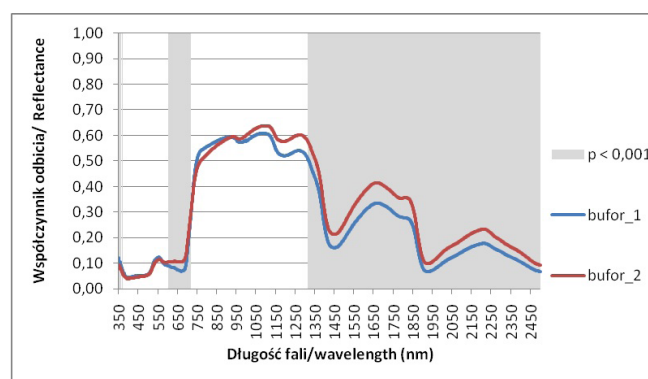
Na podstawie wykonanych analiz wybrano gatunki najbardziej odporne (psia trawka) oraz najbardziej wrażliwe na wydeptywanie (śmiałek pogięty oraz boimka dwurzędowa). Charakterystyki spektralne gatunku bliźniczki psiej trawki oraz śmiałka pogiętego pozyskane z buforu 1, w porównaniu do buforu referencyjnego nie różnią się istotnie statystycznie na żadnym z przyjętych poziomów istotności ( $p < 0,05$ ;  $p < 0,01$ ;  $p < 0,001$ ). Oznacza to wysoką odporność gatunków na wydeptywanie

(Kycko, 2012). Jedyne różnice można zaobserwować podczas porównania buforu 1 z buforem 2. Różnice te dla bliźniczki psiej trawki dotyczą zakresu spektrum od 801 nm do 1375 nm, a także od 1665 nm do 1683 nm (Ryc. 3.). Pierwszy z istotnych zakresów opisuje zmiany w strukturach komórkowych (turgor i absorpcja wody), natomiast drugi opisuje zmiany dotyczące zawartości wody. Natomiast dla śmiałka pogiętego różnice te dotyczą przeważnie zawartości wody w badanych kępach. Obrazuje to zakres spektrum od 1315 nm do 2500 nm przy poziomie istotności 0,001 (Ryc. 4). Dodatkowo obserwowana jest istotna różnica absorpcji chlorofilu, utrzymująca się na każdym z poziomów istotności. Dla poziomu istotności 0,001 jest to zakres od 602 nm do 714 nm (Ryc. 4).



Ryc. 3. Krzywe odbicia spektralnego bliźniczki psiej trawki (*Nardus stricta*) w buforze najbardziej narażonym na wydeptywanie (bufor\_1) oraz buforze w odległości 5-10m (bufor\_2), przy poziomie istotności  $p < 0,05$ .

Fig. 3 Spectral reflectance curves of the *Nardus stricta* in the buffer most vulnerable trodden (bufor\_1) and buffer in a 5-10m (bufor\_2), with a significance level of  $p < 0.05$ .



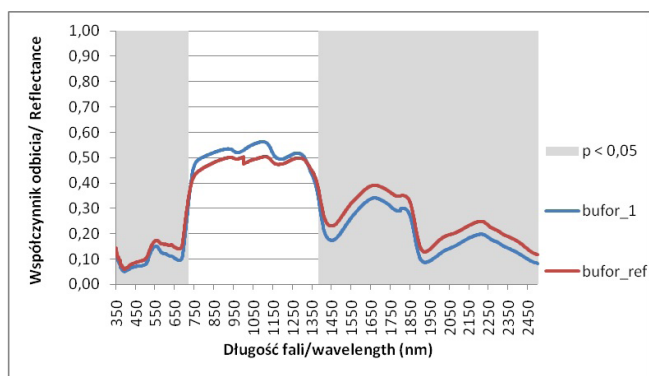
Ryc. 4. Krzywe odbicia spektralnego śmiałka pogiętego (*Deschampsia flexuosa*) w buforze najbardziej narażonym na wydeptywanie (bufor\_1) oraz buforze od 5-10 m (bufor\_2), przy poziomie istotności  $p < 0,001$ .

Fig. 4. Spectral reflectance curves of the *Deschampsia flexuosa* in the buffer most vulnerable trodden (bufor\_1) and buffer in a 5-10m (bufor\_2), with a significance level of  $p < 0.001$ .

Badania Kycko (2012) wykazały, że następujące gatunki: mietlica skalna, sit skucina oraz kosmatka

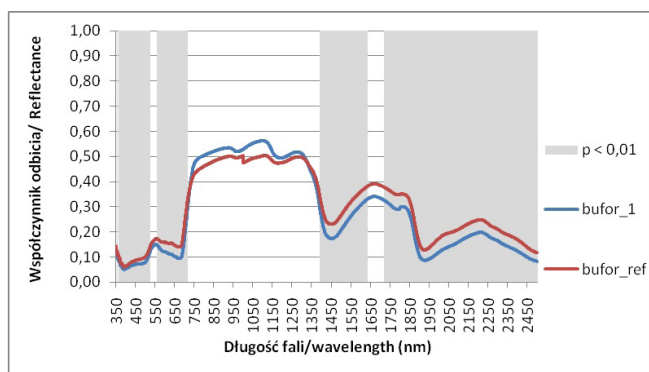


brunatna charakteryzują się mniejszą odpornością. Gatunkiem wrażliwym na wydeptywanie jest boimka dwurzędowa. Świadczą o tym charakterystyki spektralne pozyskane z buforu 1, w porównaniu do roślin referencyjnych (bufor ref) wystąpiły zmiany istotne niemalże dla całego zakresu spektrum przy poziomie istotności 0,05 (Ryc. 5.). Zmiany te dotyczą zakresów spektrum, które charakteryzują rośliny zarówno pod względem zawartości pigmentów, budowy struktur komórkowych a także zawartości wody. Natomiast poziom istotności 0,01 (Ryc. 6.) a także poziom 0,001 (Ryc. 7.) pozwalają zawężyć zakresy spektrum, gdzie różnice są istotne statystycznie. Różnice te dotyczą głównie zakresu spektrum opisującego zawartości pigmentów oraz chlorofilu w roślinie a także zawartości wody, co oznacza wysoką wrażliwość gatunku na wydeptywanie. Jednakże gatunek ten nie wykazuje, na żadnym z badanych statystycznych poziomów istotności, różnic w zakresie spektrum charakteryzującym struktury komórkowe (Ryc. 5.-7.).



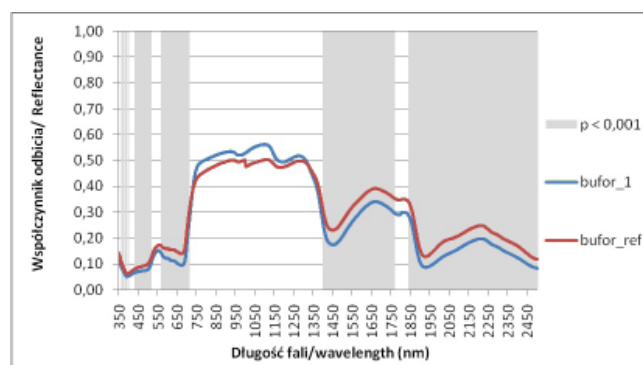
Ryc. 5. Krzywe odbicia spektralnego boimki dwurzędowej (*Oreochloa disticha*) w buforze najbardziej narażonym na wydeptywanie (bufor\_1) oraz buforze referencyjnym (bufor\_3), przy poziomie istotności  $p < 0,05$ .

Fig. 5. Spectral reflectance curves of the *Oreochloa disticha* in the buffer most vulnerable trodden (bufor\_1) and buffer in a 5-10m (bufor\_3), with a significance level of  $p < 0,05$ .



Ryc. 6. Krzywe odbicia spektralnego boimki dwurzędowej (*Oreochloa disticha*) w buforze najbardziej narażonym na wydeptywanie (bufor\_1) oraz buforze referencyjnym (bufor\_3), przy poziomie istotności  $p < 0,01$ .

Fig. 6. Spectral reflectance curves of the *Oreochloa disticha*, in the buffer most vulnerable trodden (bufor\_1) and buffer in a 5-10m (bufor\_3), with a significance level of  $p < 0,01$ .



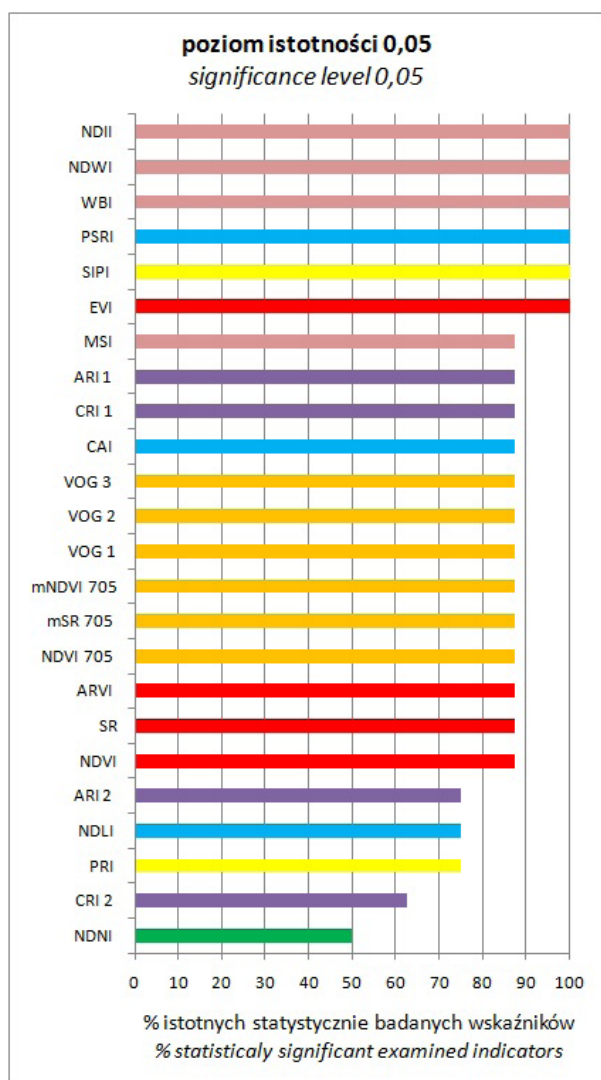
Ryc. 7. Krzywe odbicia spektralnego boimki dwurzędowej (*Oreochloa disticha*) w buforze najbardziej narażonym na wydeptywanie (bufor\_1) oraz buforze referencyjnym (bufor\_3), przy poziomie istotności  $p < 0,001$ .

Fig. 7. Spectral reflectance curves of the *Oreochloa disticha* in the buffer most vulnerable trodden (bufor\_1) and buffer in a 5-10m (bufor\_3), with a significance level of  $p < 0,001$ .

### Przydatność teledetekcyjnych wskaźników roślinności do oceny stopnia wydeptywania

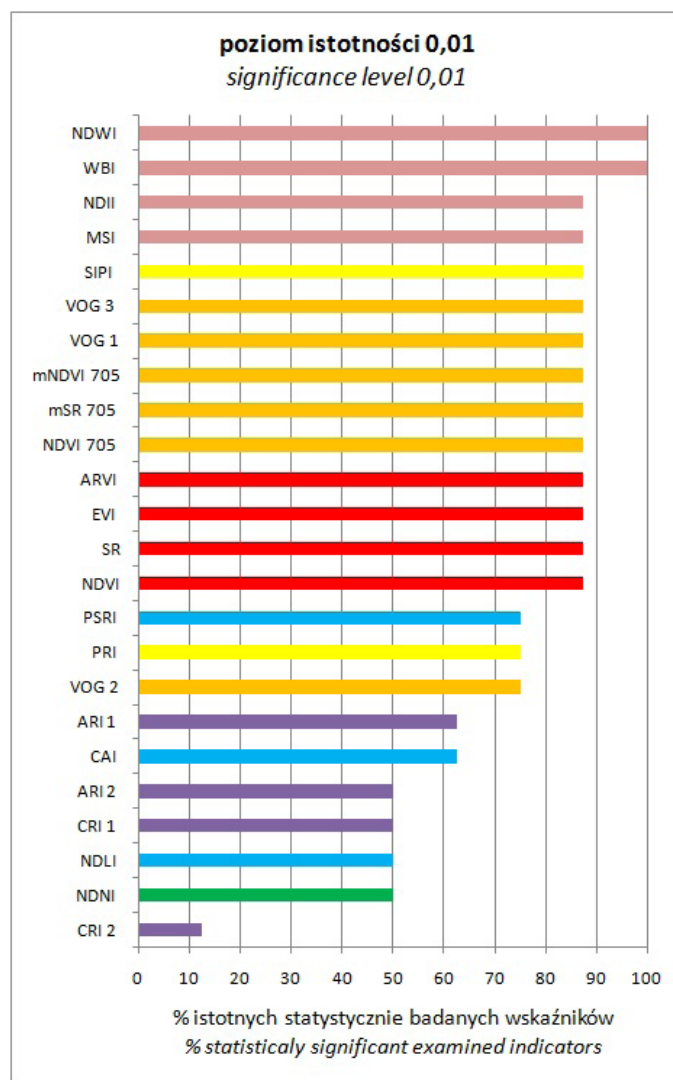
Analiza rycin 8-10 wykazała zróżnicowaną przydatność teledetekcyjnych wskaźników roślinności do oceny stopnia wydeptywania. Dla najbardziej surowego kryterium oceny, czyli poziomu istotności  $p < 0,001$ , następujące wskaźniki w ponad 75% przypadków wykazały różnice między gatunkami narażonymi na wydeptywanie, a ich referencyjnymi odpowiednikami: NDVI, EVI, ARVI, mNDVI 705, mSR 705, WBI, NDWI, NDII. Najczęściej różnice w strukturach komórkowych wynikały ze zmniejszonej zawartości chlorofilu i wody w roślinach położonych bliżej ścieżki turystycznej. Analizując procent przypadków wystąpienia istotności statystycznej każdego teledetekcyjnego wskaźnika roślinnego przy danym poziomie istotności widoczne są różnice – malejący procent wraz z zawężeniem poziomu istotności. Przykładowo dla wskaźnika SIPI (*Structure Insensitive Pigment Index*) procent istotności odpowiednio dla poziomów  $p < 0,05$ ;  $p < 0,01$ ;  $p < 0,001$  wynosi 100%; 87,5%; 50%. Natomiast dla wskaźników ARVI i mSR<sub>705</sub> procent przypadków wystąpienia istotności statystycznej teledetekcyjnego wskaźnika roślinnego dla każdego z poziomów istotności ( $p < 0,05$ ;  $p < 0,01$ ;  $p < 0,001$ ) jest równy 87,5%; oznacza to, że procent istotnych statystycznie różnic nie zmienia się wraz z zawężaniem poziomu istotności statystycznej.

	ogólny wigor roślin – <i>Broadband Greenness</i>
	zawartość i struktura chlorofilu – <i>Narrowband Greenness</i>
	ilość światła wykorzystanego w procesie fotosyntezy – <i>Light Use Efficiency</i>
	zawartość azotu – <i>Canopy Nitrogen</i>
	zawartość węgla w suchej masie celulozy i ligniny – <i>Dry or Senescent Carbon</i>
	zawartość karotenoidów (pigmentów) – <i>Leaf Pigments</i>
	zawartość wody w pokrywio roślinnej – <i>Canopy Water Content</i>



Ryc. 8. Istotność teledetekcyjnych wskaźników roślinności na poziomie 0,05.

Fig. 8. The importance of remote sensing vegetation indices of 0.05.



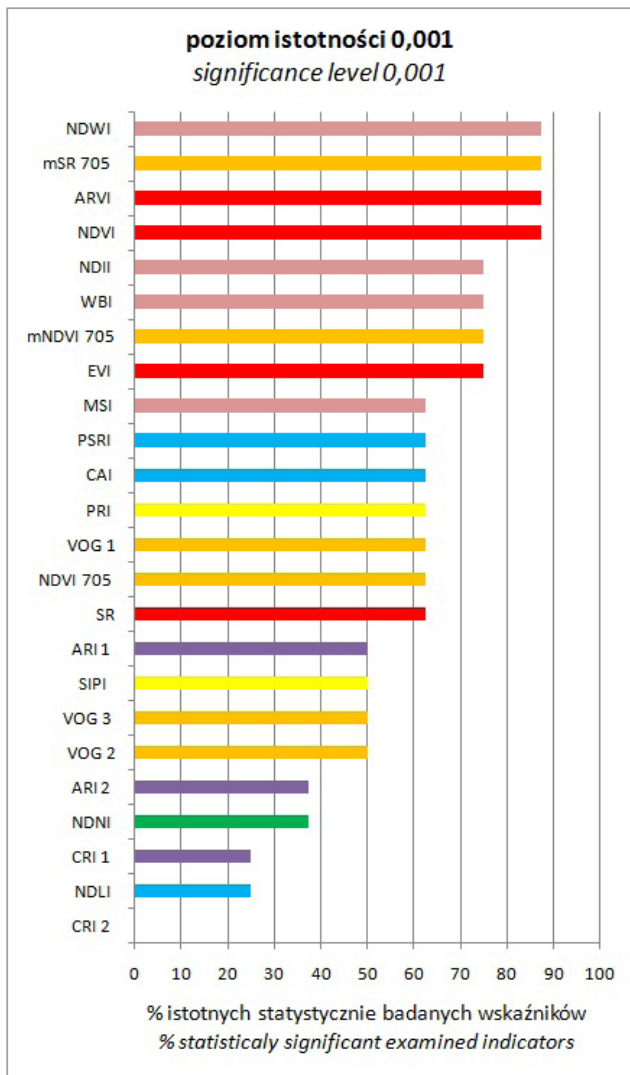
Ryc. 9. Istotność teledetekcyjnych wskaźników roślinności na poziomie 0,01

Fig. 9. The importance of remote sensing vegetation indices of 0.01.

Statystyczną istotność na poziomie 0,05 teledetekcyjnych wskaźników, użytych przy badaniu roślinności wydeptanej, ilustruje rycina 8. Do tych wskaźników, które wykazywały 100% istotności możemy zaliczyć NDII, NDWI, WBI. Z ryciny 9 wynika, że na poziomie istotności 0,01 wskaźnikami, pokazującymi podatność na zmiany spowodowane wydeptaniem są te z grupy określającej ilość wody w pokrywie roślinnej, a więc WBI, NDWI, MSI, NDII. Rycina 10 ilustruje procent istotności wskaźników przy najbardziej zaostrzonym kryterium istotności, jakim jest istotność 0,001. Wskaźniki NDWI, NDII, WBI wykazały istnienie największych różnic w roślinności wydeptanej w stosunku do referencyjnej. Dodatkowo istotne zmiany w roślinności wydeptanej obrazują wskaźniki mSR705 oraz mNDVI705 z grupy Narrowband Greenness, mierzącej chlorofil i wskaźniki ARVI, EVI oraz NDVI z grupy Broadband Greenness, służącej do pomiaru wigoru roślin.

Do podobnych wniosków doszli inni badacze roślinności tatrzańskiej metodami teledetekcyjnymi (Jakomulska, 1999a; Sobczak, 2010). A. Jakomulska (1999a, b) zbadała, iż największą zawartością karotenoidów (28% udział barwnika w liściach badanego gatunku) charakteryzował się sit skucina (*Juncus trifidus*), a kosmatka brunatna (*Luzula alpino-pilosa*) charakteryzowała się 18% udziałem tego barwnika. Sit skucina (*Juncus trifidus*) uzyskał w niniejszych badaniach wysokie wartości wskaźników z grupy charakteryzującej zawartość karotenoidów (*Leaf Pigments*), które przewyższają zakres optymalny, np. CRI2 przyjmuje wartości ponad 12,75 przy zakresie optymalnym 1-12. Zawartość chlorofilu dla situ skuciny (*Juncus trifidus*) wynosi od 0,5 do 0,9 mg na 1 g suchej masy. W późnym stadium wartość chlorofilu maleje na rzecz karotenoidów, stosunek chlorofilu do karotenoidów w stadium środkowego rozwoju wynosi 3,9, natomiast na etapie późnego rozwoju wartość ta wynosi





Ryc. 10. Istotność teledetekcyjnych wskaźników roślinności na poziomie 0,001

Fig. 10. The importance of remote sensing vegetation indices of 0.001.

2,6. Największą zawartością chlorofilu (1,6-2,5 mg na 1 g suchej masy) charakteryzowała się kosmatka brunatna (*Luzula alpino-pilosa*). Dla przykładu wartości wskaźników charakteryzujących zawartość chlorofilu są zbliżone dla obu gatunków i wynoszą: dla wskaźnika mNDVI<sub>705</sub> 0,5-0,6, a dla wskaźnika mSR<sub>705</sub> 3,03-4,19. W badaniach laboratoryjnych A. Jakomulskiej (1999) wykazano, że uwodnienie tkanek kosmatki brunatnej (78,9% wody w tkankach) jest wyższe niż situ skuciny (71,3% wody w tkankach). Podobną zależność między sitem skuciny (*Juncus trifidus*) a kosmatką brunatną (*Luzula alpino-pilosa*) zaobserwowano podczas naszych badań, porównując charakterystyki spektralne tych dwóch gatunków. Współczynnik odbicia dla gatunku situ skuciny (*Juncus trifidus*) wynosi 0,3 a dla kosmatki brunatnej (*Luzula alpino-pilosa*) wynosi 0,4. A. Jakomulska uzyskała wartość średnią NDVI dla gatunku situ skuciny (*Juncus trifidus*) równą 0,61 a dla kosmatki brunatnej (*Luzula*

*alpino-pilosa*) 0,7, podczas gdy w niniejszej pracy zakres wartości NDVI dla tych gatunków wynosi odpowiednio 0,65-0,8 oraz 0,67-0,81.

Sobczak (2010) otrzymał charakterystyki spektralne gatunków: kosmatka brunatna (*Luzula alpino-pilosa*), sit skucina (*Juncus trifidus*), śmiełek pogięty (*Deschampsia flexuosa*) oraz bliźniczka psia trawka (*Nardus stricta*). Porównanie zakresu charakteryzującego zawartość wody dla gatunku situ skucina (*Juncus trifidus*) wykazało różnice w pracy M. Sobczaka współczynnik odbicia wynosi 0,1-0,2 zaś uzyskane przez nas wyniki mieszczą się od 0,1 do 0,3. Współczynnik odbicia gatunku śmiełek pogięty (*Deschampsia flexuosa*) w zakresie spektrum opisującym strukturę komórkową w niniejszej pracy wynosi 0,5-0,64, zaś w pracy M. Sobczaka 0,35-0,44.

Krzywe odbicia spektralnego gatunków wysokogórskich, tj. kosmatki brunatnej (*Luzula alpino-pilosa*), situ skuciny (*Juncus trifidus*) oraz bliźniczki psiej trawki (*Nardus stricta*), przedstawiono w artykule „Zintegrowane pomiary roślinności wysokogórskiej” (Zagajewski i in., 2005). Wartości wskaźnika NDVI są bardzo wysokie i zmieniają się w zależności od gatunku. Najwyższą wartość zarejestrowano dla kosmatki brunatnej (*Luzula alpino-pilosa*) – 0,92; w badaniach do niniejszej pracy wartość ta wynosi dla buforu 1: 0,81, natomiast dla buforu referencyjnego wynosi 0,74. Najniższą wartość uzyskano dla situ skuciny (*Juncus trifidus*) – 0,73 (Zagajewski i in., 2005). Jest to wartość niewiele niższa odzyskanej w niniejszej pracy dla buforu 1: 0,78, a dla buforu referencyjnego 0,80.

Mimo różnic między szczegółowymi wartościami liczbowymi, otrzymanymi przez różnych autorów, pomiary spektrometryczne wykazały różnice istotne statystycznie między roślinami porastającymi najbliższe sąsiedztwo szlaków a oddalonymi powyżej 10 m od szlaku, gdzie prawdopodobieństwo wydeptywania jest niewielkie. Różnice te można było zaobserwować poprzez analizę wartości wybranych teledetekcyjnych wskaźników.

## Podsumowanie i wnioski

Roślinność wysokogórska cechuje się unikatowymi właściwościami, które wpływają na jej cechy spektralne. Uwarunkowane jest to głównie wysokością n.p.m., na jakiej ona występuje. Przeprowadzone badania wykazały, że dane hiperspektralne mogą być użyte w analizach kondycji roślin poddanych stresowi spowodowanemu przez wydeptywanie, gdyż wykazują one nawet niewielkie zmiany zachodzące w pokrywie roślinnej. Uzyskane dane hiperspektralne a także wykorzystana w niniejszej pracy metodyka stanowią bazę do dalszych badań, dotyczących analizy i monitorowania kondycji roślinności wysokogórskiej poddanej wydeptywaniu.

Badania wyraźnie pokazały, że większość gatunków znajdujących się w pobliżu szlaków turystycznych cechuje się zmienionymi charakterystykami spektralnymi w stosunku do wzorców tych gatunków – roślin odległych od ścieżki. Oznacza to, że udało się zrealizować główny

cel, jakim było określenie wpływu wydeptywania na cechy spektralne roślinności położonej w bezpośrednim sąsiedztwie szlaków turystycznych Doliny Gąsienicowej oraz części grzbietowej otoczenia Kasprowego Wierchu. Dodatkowo otrzymano informacje, które teledetekcyjne wskaźniki roślinności obrazują zmiany stanu roślinności, co pozwoli na użycie ich do celów monitoringu zmian środowiska wysokogórskiego pod wpływem turystyki.

Badania terenowe potwierdzają także hipotezę, że ogólny stan roślinności poza ścieżkami turystycznymi w Dolinie Gąsienicowej oraz okolicach Kasprowego Wierchu jest dobry, większość zbiorowisk charakteryzuje się optymalnym zakresem mierzonych wskaźników.

Gatunkiem najbardziej odpornym na wydeptanie spośród analizowanych w pracy jest bliźniczka psia trawka (*Nardus stricta*). Natomiast gatunkiem, który wykazuje największą wrażliwość na deptanie jest boimka dwurzędowa (*Oreochloa disticha*). Na podstawie przeprowadzonych badań wyróżniono grupy wskaźników teledetekcyjnych przydatnych do analizy roślinności narażonej na wydeptywanie. Należą do nich: NDVI, ARVI, EVI z grupy wskaźników opisujących ogólny wigor roślin a także stan roślinności. Kolejną grupą przydatną w analizie roślinności są wskaźniki opisujące strukturę i powierzchnię liści a także zawartość chlorofilu, np. mSR<sub>705</sub> i mNDVI. Jednym z kluczowych aspektów badań może być analiza zawartości wody, gdyż wskaźniki WBI, NDWI, NDII wykazały różnice między roślin referencyjnymi i poddanymi deptaniu.

Efekty wydeptywania są rejestrowane w postaci zmian struktur komórkowych i mniejszego uwodnienia roślin. Niedobór wody, który ogranicza prawidłowy wzrost rośliny został uznany za czynnik najbardziej wpływający na kondycję badanych roślin. Pod jego wpływem zmienia się niemalże każdy proces zachodzący w komórkach roślinnych, ograniczona jest intensywność procesu fotosyntezy.

## Literatura

- Aldakheel Y.Y., Danson F.M., 1997, Spectral reflectance of dehydrating leaves: measurements and modeling. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.18, s. 3683-3690.
- Asner G.P., 1998, Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, Vol.64, s. 234-253.
- Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A. R., 1995, A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, t. 13, nr. 1-2, ss. 95-120.
- Clevers J. G. P. W., Kooistra L., Schaepman M. E., 2008, Using spectral information from the NIR water absorption features for the retrieval of canopy water content, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, t. 10, nr. 3, ss.388-397.
- 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*, Vol. 12, s. 119-125.
- Czochański J., 1992, Badania ruchu turystycznego w Tatrach Zachodnich i jego wpływu na środowisko przyrodnicze Tatrzańskiego Parku Narodowego. *Geografia i aktualne problemy miasta Krakowa i regionu*. Materiały 41 Ogólnopolskiego Zjazdu PTG, Kraków.
- Czochański J., 1996, Turystyka piesza i jej wpływ na środowisko przyrodnicze Tatrzańskiego Parku Narodowego. *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a człowiek*, T.3 Wpływ człowieka, PTPNoZ, TPN, Kraków – Zakopane.
- Czochański J. T., 2000, Wpływ użytkowania turystycznego na rozwój procesów i form erozyjno-denudacyjnych w otoczeniu szlaków. *Z badań geograficznych w Tatrach Polskich*. Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Czochański J., Szydarowski W., 2000, Diagnoza stanu i zróżnicowanie przestrzenno- czasowe użytkowania szlaków turystycznych w TPN. *Z badań geograficznych w Tatrach Polskich*, Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, s.207-231.
- Datt B., 1999, A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves. *Journal of Plant Physiology*, Vol.154, ss.30-36.
- Datt B., 2000, Red edge shifts for detecting phenologic change stress symptoms in evergreen eucalyptus forests. *Proceedings of 10<sup>th</sup> Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*, Australia, Adelaide, s.863-874.
- Daughtry, C.S.T., E.R. Hunt Jr., and J.E. McMurtrey, 2004, Assessing Crop Residue Cover Using Shortwave Infrared Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, Vol.90, ss.126-134.
- Dawson T.P., Curran P.J., Plummer S.E., 1998, The biochemical decomposition of slash pine needles from reflectance spectra using neutral networks. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.19, s. 1433-1438.
- Degórski M., 2002, Ocena wpływu antropopresji na wybrane właściwości pokrywy glebowej piętra subalpejskiego i alpejskiego w rejonie Kasprowego Wierchu. *Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr*, Instytut Botaniki PAN, Krakow-Zakopane, s. 395–402.
- ENVI 4.5 User's Guide, 2005, Research Systems A Kodak Company.
- Fourty, T., F. Baret, S. Jacquemoud, G. Schmuck, and J. Verdebout, 1996, Leaf Optical Properties with Explicit Description of Its Biochemical Composition: Direct and Inverse Problems. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 56, ss. 104-117.
- Fourty T., Baret S., 1998, On spectral estimates of fresh leaf biochemistry. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, s. 1283-1297.
- Gamon, J.A., J. Penuelas, and C.B. Field, 1992, A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 41, ss. 35-44.
- Gamon J.A., Surfus J.S., 1999, Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer, *New Phytosociology*, Vol. 143, ss. 105-117.
- Gao, B.C., 1995, Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Proceedings of SPIE*, Vol. 2480, ss. 225- 236.
- Gao B.C., 1996, NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58, ss. 257-266.
- Gitelson, A. 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*, t. 143, ss. 286-292.
- Gitelson A.A., Merzlyak M. N., 1997, Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote sensing*, Vol. 18, s.2691-2697.

- Gitelson A.A., Merzlyak M.N., Chivkunova O.B., 2001, Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and photobiology*, Vol. 71, s. 38-45.
- Gitelson, A.A., Y. Zur, O.B. Chivkunova, and M.N. Merzlyak, 2002. Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology* Vol. 75, ss. 272-281.
- Grabherr G., 1982, The impact of trampling by tourists on a high altitudinal grassland in the Tyrolean Alps, Austria, *Vegetatio*, Vol. 48, ss. 209-219.
- Guzik M., 2001, *Analiza zmian szaty roślinnej Tatr przy wykorzystaniu technik geomatycznych na przykładzie Doliny Bystrej i Suchej Stawiańskiej*. Praca magisterska wykonana w Wydziale Leśnym Akademii Rolniczej im. Hugona Kollątaja, Krakow.
- Haboudane D., Miller J. R., Tremblay N., Zarco-Tejada P. J., Dextraze L., 2002, Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 81, ss. 416-426.
- Hardisky, M.A., V. Klemas, and R.M. Smart, 1983. The Influences of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of Spartina Alterniflora Canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 49, ss.77-83.
- Huete, A.R., H. Liu, K. Batchily, and W. van Leeuwen, 1997, A Comparison of Vegetation Indices Over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 59(3), ss. 440-451.
- Jakomulska A., 1999a, *Zróżnicowanie wysokogórskiej roślinności Tatr w świetle badań teledetekcyjnych.*, WGiSR UW, Warszawa, praca doktorska – maszynopis.
- Jakomulska A., 1999b, *Przystosowania a spektralna charakterystyka gatunków wysokogórskich: Juncus trifidus, Luzula spadicea i Calamagrostis villosa. Oszacowanie możliwości zdalnej identyfikacji roślinności wysokogórskiej* [Physiology and Spectral Signatures of the Alpine Species: *Juncus trifidus, Luzula spadicea* and *Calamagrostis villosa*. Assessment of Potential for Remote Identification of Vegetation in High-Mountain Environments], [in:] A. Kotarba, A. Kozłowska (eds), *Badania Geoekologiczne w otoczeniu Kasprowego Wierchu* [Geoecological research in the Kasprowy Wierch Area], *Prace Geograficzne*, Vol. 174, Wrocław.
- Jarocińska A., Zagajewski B., 2008, Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki. *Teledetekcja Środowiska*, T. 40, Warszawa.
- Jensen J. R., 1983, Biophysical Remote sensing – Review Article. *Annals of the Associations of American Geographers*, t. 73, nr 1, ss.111-132.
- Kaufman Y. J., Tanre D., 1992. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *Geoscience and Remote Sensing*, Vol.30(2), ss. 261-270.
- Kiszka K., 2010, *Antropologiczne i naturalne uszkodzenia szlaków turystycznych w Pieninach polskich i słowackich*. Pieniny-Przyroda i człowiek, nr. 11, str. 157-169.
- Klug B., Scharfetter-Lehr G., Scharfetter E., 2002, Effects of trampling on vegetation above the timberline in the eastern Alps, Austria. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol.34, no.4, str. 377-388.
- Kopcewicz J., Lewak S., 2002, *Fizjologia roślin*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s.192-194, 613-617, 626-631.
- Kozłowska A., 2006, Detailed mapping of high vegetation in the Tatra Mts.. *Polish Botanical Studies*, Vol. 22, ss. 333 – 341.
- Kycko M., 2012, *Wpływ turystyki na kondycję roślinności wzdłuż wybranych szlaków Doliny Gąsienicowej na podstawie danych teledetekcyjnych*. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Warszawa (maszynopis pracy magisterskiej)
- Merzlyak, J.R., A.A. Gitelson, O.B. Chivkunova, and V.Y. Rakin, 1999. Non-destructive Optical Detection of Pigment Changes During Leaf Senescence and Fruit Ripening. *Physiologia Plantarum*, Vol. 106, ss. 135-141.
- Mirek Z., 1996, Zagrożenia i przekształcenia szaty roślinnej. *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego. Tatry i Podtatrze 3*, Wyd. Tatrzański Park Narodowy; Zakopane-Kraków.
- 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*, Vol. 87, ss. 310-325.
- Peñuelas J., Baret F., Filella I., 1995, Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance. *Photosynthetica*, t. 31, ss. 221-230.
- Peñuelas J., Filella I., 1998, Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, t. 4, nr. 3, ss. 151-156.
- Piscová V., Kanka R., Krajčí J., Barančok P., 2011, Short-term trampling experiments in the Juncetum trifidi Kr a j i n a 1933 association, *Ekológia*, Vol. 30, No. 3, Bratislava, ss.322-333.
- Pociask-Karteczka J., Baścik M., Czubernat S., 2007, Ruch turystyczny w tatrzańskim Parku Narodowym w latach 1993-2005. *Studia nad turystyką. Tradycje, stan obecny i perspektywy badawcze*, IGI GP UJ, Kraków, s.271-279.
- Rączkowska Z., Kozłowska A., 2010, Wpływ turystyki na rzeźbę i roślinność przy ścieżkach w otoczeniu Kasprowego Wierchu. *Nauka a zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem. T. 3. Człowiek i środowisko, Materiały IV Konferencji Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek, Zakopane*, 14-16 Października 2010, TPN-PTPNoZ, s. 21-28.
- 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. *Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station*, nr E73-106393, s. 93.
- Ruban A. V., Horton P., Young A.J., 1993, Aggregation of higher plant xanthophylls: Differences in absorption spectra and in the dependency on solvent polarity. *Journal of Photochemistry and photobiology*, Vol. 21, nr. 2-3, s. 229-234.
- Scheapman-Strub G., Scheapman M.E., Painter T.H., Dangel S., Martonchik J.V., 2006, Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote sensing of Environments*, nr. 103, ss. 27-42.
- Skawiński P., Krzan Z., 2000, Postęp w restytucji terenów erozyjnych Kasprowego wierchu w latach 1993-2000. *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek, Współczesne Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr*, Tatrzański Park Narodowy Polskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi Oddział krakowski, Zakopane, s.105.
- Skawiński P., Krzan Z., 2002, Restytucja szaty roślinnej Kopuły Kasprowego Wierchu w latach 1993-2001. *Przemiany środowiska przyrodniczego Tatr.*, Kraków – Zakopane, s. 407-411.
- Skrzydłowski T., 2010, *Zwierzęta i rośliny. Przewodnik po Tatrach Polskich*. Wydawnictwo Tatrzańskiego Parku Narodowego, Zakopane, s. 17-35, 135-138, 149-152.
- Sobczak M., 2009, Hiperspektralna metoda badania i kartowania roślinności wysokogórskiej, *Teledetekcja środowiska*, Tom 41, Warszawa, s. 79-103.
- Somsák, L., Kubíek, F., Háberová, L., Majzlánová, E., 1979: The influence of tourism upon the vegetation of the High Tatras. *Biologia*, Vol. 34, nr. 7, Bratislava, ss.571-582.



- Swain P.H., Davis S.M., 1987, *Remote sensing: The Quantitative Approach*. McGraw-Hill Inc, s. 396.
- Vogelmann, J. E., B. N. Rock, and D.M. Moss, 1993, Red Edge Spectral Measurements from Sugar Maple Leaves, *International Journal of Remote Sensing*, t. 14, ss.1563-1575.
- Whinam J., Chilcott N. M., 1999, Impact of trampling on alpine environments in central Tasmania. *Journal of Environmental Management*, nr. 57, s. 205-220.
- Whinam J., Chilcott N. M., 2003, Impact after four years of experimental trampling on alpine/sub-alpine environments in western Tasmania. *Journal of Environmental Management*, nr. 67, s. 339-351.
- Zagajewski B., 2010a. Metodyka terenowych pomiarów radiometrycznych i bioradiometrycznych. *Zintegrowane techniki pomiarowe środowiska. Teledetekcja*. Uniwersytet Warszawski, Warszawa, ss. 98-114.
- Zagajewski B., 2010b, Ocena przydatności sieci neuronowych i danych hiperspektralnych do klasyfikacji roślinności Tatr Wysokich. *Teledetekcja Środowiska*, T. 43., Warszawa.
- Zagajewski B., Folbrier A., Kozłowska A., Sobczak M., Wrzesień M., 2005. Zintegrowane pomiary roślinności wysokogórskiej. *Teledetekcja Środowiska*, t. 36, Warszawa, s. 61-68.
- Zagajewski B., Lechnio J., Sobczak M., 2007, Wykorzystanie teledetekcji hiperspektralnej w analizie roślinności zanieczyszczonej metalami ciężkimi. *Teledetekcja Środowiska*, t. 37, Warszawa.
- Zagajewski B., Jarocińska A., Olesiuk D., 2009, *Metody i techniki badań geoinformatycznych*, skrypt dla studentów, wersja 2, Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW
- Zhang M., Ustin S. L., Rejmankova E., Sanderson E. W., 1997, Monitoring Pacific coast salt marshes using remote sensing, *Ecological Applications*, t. 7, nr 3, ss.1019-1053.



**Mgr Marlena KYCKO** ukończyła w roku 2012 studia wyższe na Wydziale Geografii i Studiów regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, na kierunku geografia w zakresie geoinformatyki w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW. e-mail: marlenakycko@gmail.com



**Dr hab. Bogdan Zagajewski** absolwent Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska UW. Od 15.11.1995 r. zatrudniony w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół teledetekcji i SIG i ich zastosowań w badaniach środowiska. Od roku 2002 zajmuje się technikami hiperspektralnymi w badaniach nad roślinnością. Dane kontaktowe: e-mail: bogdan@uw.edu.pl, tel. 22 552 15 07, fax 22 552 15 21, [http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/bz\\_pl.html](http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/bz_pl.html)



**Dr hab. Anna Kozłowska, prof. IGiPZ PAN**, absolwentka Wydziału Biologii UW, profesor w Zakładzie Geoekologii i Klimatologii Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN w Warszawie, specjalizuje się w geoobotanice i kartografii roślinności, ze szczególnym uwzględnieniem Tatr. Dane kontaktowe: e-mail: a.kozl@twarda.pan.pl, tel. +48 22 697 89 11, fax: +48 22 697 89 03



**Mgr Magdalena Oprządek**, doktorantka w Zakładzie Geoekologii i Klimatologii Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN. Zajmuje się wpływem turystyki na szatę roślinną gór. Adres: IGiPZ PAN, ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa, [moprzadek@twarda.pan.pl](mailto:moprzadek@twarda.pan.pl)