

## **Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki**

*Correlations of ground- and airborne-level acquired vegetation indices of the Bystrzanka catchment*

Anna JAROCIŃSKA, Bogdan ZAGAJEWSKI

Remote sensing data can be used in variety of studies. Hyperspectral data, which are used in this study, give lots of possibilities; it is caused by high spectral, spatial and radiometric resolutions. Imagine Spectroscopy can be used to researches of vegetation, its condition, biomass production and also for land cover analyzing. Using vegetation indices many biophysical variables can be measured (for instance: plant pigments, leaf water content, soil moisture, plant surface temperature and internal structure of cells). This study presents an analysis of four vegetation indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), Leaf Area Index (LAI) and fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (fAPAR), which were acquired from ground and airborne levels during HySens campaign. Measurements were made in the Bystrzanka catchment in July/August 2002.

Goals of this paper are an analysis of an accuracy of two-level measurements and validation of airborne-acquired data, which base on spectrum characteristics derived from airborne

hyperspectral spectroradiometer DAIS 7915. Ground data were collected by facilities analyzing strictly stated intervals of spectrum using: field spectroradiometer ASD FieldSpec Pro (NDVI, SAVI), LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LAI) and AccuPAR 80 (fAPAR).

The indices derived from hyperspectral data (Level 3 of atmospheric correction using ATCOR software) were compared with ground measurements.

The results of this analysis were chart sets with regression equation for the relation between indices acquired from ground and airborne levels, between values of the same vegetation index measured from ground and airborne levels and between values of indices measured from the same level ground or airborne (NDVI-SAVI, NDVI-LAI, NDVI-fAPAR and LAI-fAPAR) as well. The results of study confirmed that ground measurements are more changeable than airborne one, and NDVI and SAVI indices have more comparable values on both levels than LAI and fAPAR.

### **Wstęp**

Dane pozyskiwane za pomocą technik teledetekcyjnych pozwalają analizować stan środowiska w wielu zakresach widma elektromagnetycznego. Jest to istotne w badaniach nad roślinnością, ponieważ poszczególne zakresy spektrum rejestrują skład i budowę roślin (np. zawartość celulozy, wody, nutrientów, barwników fotosyntetycznie czynne, rodzaj struktur komórkowych). Ponadto, wykorzystanie teledetekcji pozwala prowadzić badania na dużych powierzchniach, co znacząco skraca okres pozyskania danych i obiektywizuje uzyskane wyniki (są one pozyskiwane w krótkim interwale czasu wedle tej samej metody).

Problemem, który należy szczególnie przeanalizować, jest porównywalność wyników pozyskiwanych

z różnych pułapów, co wynika, np. z wpływu atmosfery, ruchu samolotu. W celu zobiektywizowania i możliwości porównywania danych stosuje się szereg wskaźników, które charakteryzują wybrane właściwości badanych obiektów. W modelach tworzonych dla hiperspektralnych danych lotniczych i satelitarnych głównym źródłem informacji są krzywe odbicia spektralnego. Wskaźniki oblicza się za pomocą matematycznych zależności wartości odbicia w poszczególnych kanałach. Muszą one zostać jednak poddane dokładnej weryfikacji bazującej na danych naziemnych oraz szczegółowej analizie statystycznej, która umożliwi określenie ich wiarygodności.

Problemem badawczym niniejszej publikacji jest analiza związków między teledetekcyjnymi wskaźnikami roślinnymi (NDVI, SAVI, LAI i fAPAR) pozyskanymi z poziomu naziemnego i pułapu lotniczego oraz za-

leżności, jakie występują pomiędzy wskaźnikami pomierzonymi na poziomie naziemnym, naziemnym i lotniczym oraz lotniczym.

Pomiary naziemne zostały wykonane w okresie 25.07.–05.08.2002 roku za pomocą spektrometru ASD FieldSpec Pro, LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, AccuPAR model 80. Badania zostały przeprowadzone na terenie zlewni Bystrzanki, która znajduje się w południowej Polsce w północno-zachodniej części Beskidu Niskiego. Ze względu na obecność na tym terenie stacji badawczej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, w tym Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego obszar ten jest stosunkowo dobrze zbadany i opisany w literaturze (Adamczyk i in., 1973; Bochenek, 2003 i 2005; Bochenek, Gil, 2006; Gil, 1979 i 1999; Kotarba, 1970; Niemirowska 1970; Starkel, 1973; Welc, 1985).

W trakcie badań terenowych Niemiecka Agencja Kosmiczna (DLR) wykonała w dniu 29.07.2002 zobrazenia hiperspektralnym spektrometrem DAIS 7915. Uzyskane dane obrazowe zostały skorygowane geometrycznie i atmosferycznie bazując na programach PARGE i ATCOR. Ostatnim etapem korekcji atmosferycznej było wygenerowanie obrazów rozkładu przestrzennego wskaźników SAVI, LAI oraz fAPAR. Produkty te stały się podstawą do analiz w ramach niniejszej publikacji.

Uzyskane wyniki pomiarów naziemnych i lotniczych zostały przeanalizowane za pomocą metod statystycznych (obliczono wartości średnie, odchylenia standardowe, współczynniki zmienności i determinacji).

## Wskaźniki roślinne w świetle badań literatury

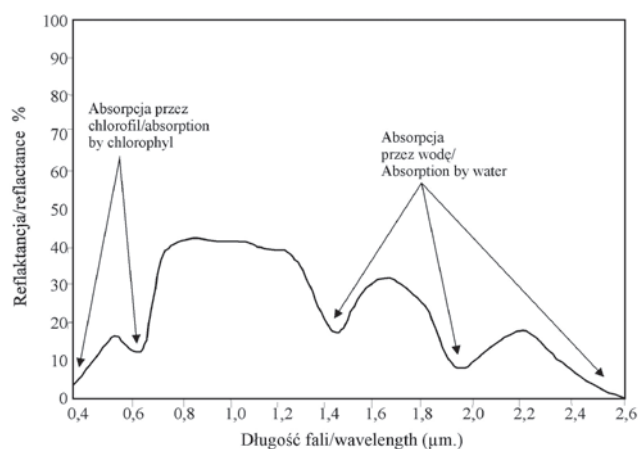
### Teledetekcyjne wskaźniki roślinności

Optyczne właściwości roślin charakteryzowane są przez emisyjność, absorpcję, odbicie i przepuszczalność promieniowania elektromagnetycznego. Cechy te zależą ściśle od długości fali (Jensen, 1983; Goward i in., 1994; Elvidge, Chen, 1995; Hall i in., 1995; Smith i in., 2002; Ustin i in., 2004). Wskaźniki łączą dane teledetekcyjne z biofizycznymi charakterystykami roślin, np. morfologia, anatomia i fizjologia roślin (Jensen, 1983; Hall i in., 1995; Li, Moreau, 1996; van Leeuwen i in., 1997; Zhang i in., 1997; Ustin i in., 2004; Wang i in., 2004). Ze względu na możliwość ich łatwego obliczenia, znalazły one zastosowanie do analiz produkcji biomasy i przewidywania produktywności oraz prognozy plonów (Goward i in., 1994; Turner i in., 1999; Smith i in., 2002; Dąbrowska-Zielińska i in., 2003; di Bella i in., 2004; Ustin i in., 2004; Wang i in., 2004).

Właściwości spektralne roślin zależą od: powierzchni liści, fazy rozwoju roślin, procentowego pokrycia terenu przez rośliny, własności optycznych liścia i ich położenia, praktyk agronomicznych, warunków stresowych, geometrii układu słońce-obiekt-detektor oraz zawartości wody (Friedl i in., 1994; Myneni, Williams, 1994; Hall i in., 1995; Rondeaux i in., 1996; Ciołkosz i in., 1999; Haboudane i in., 2004; Dorigo i in., 2006).

Do analiz roślinności najczęściej wykorzystuje się pasmo widzialne oraz bliską i średnią podczerwień, czyli zakres od około 350 do 2500 nm (Jensen, 1983; Hall i in., 1995; van Leeuwen i in., 1997; Ustin i in., 2004). W tym zakresie spektrum czynnikami roślinnymi decydującymi o wielkości odbicia są różnorodne barwniki w liściach, struktura komórkowa oraz zawartość wody i nutrientów w roślinie.

Na krzywej odbicia spektralnego wyraźnie widoczny jest spadek odbicia w paśmie niebieskim i czerwonym (ryc. 1). W tych zakresach absorbowany jest chlorofil *a* i *b*, czyli najważniejsze barwniki fotosyntetyczne roślin. Chlorofil *a* jest absorbowany przez pasmo 430 i 660 nm, a chlorofil *b* przez zakres 450 i 650 nm (Jensen, 1982; Hall i in., 1995; Ustin i in., 2004). W paśmie zielonym występuje stosunkowo duże odbicie (z maksimum w okolicach 540 nm). Najlepszymi pasmami do badania absorpcji chlorofilu są zakresy 450–520 nm (gdzie silnie absorbowane są karotenoidy i chlorofil) oraz 630–690 nm (duża absorpcja chlorofilu). Gdy pojawia się czynnik stresowy, maleje ilość chlorofilu *a* (Hall i in., 1995; Ustin i in., 2004). Tym samym odbicie w niebieskim, a szczególnie w czerwonym paśmie wzrasta, bo pochłaniana jest mniejsza ilość promieniowania. Zmniejsza się wtedy odbicie w paśmie zielonym, a rośliny żółkną, gdyż zwiększa się udział karotenoidów (Jensen, 1983; Ustin i in., 2004).



Ryc. 1. Krzywa odbicia spektralnego dla roślin (wg. Jensen'a, 1983, zmodyfikowane)

Fig. 1. Spectral characteristic of vegetation (source: Jensen, 1983; modified)

Odbicie w zakresie promieniowania między 740 a 1100 nm związane jest ze strukturą komórkową liści, szczególnie w paśmie 800–1000 nm (Jensen, 1983; Hall i in., 1995; Ustin i in., 2004). Na wysokość odbicia w tym paśmie wpływa zawartość wakuoli i arenchymy, w tym sposób ułożenia i ilość przestrzeni międzykomórkowych (Jensen, 1983). Odbicie jest większe, gdy komórki zawierają miękisz gąbczasty, a mniejsze dla komórek z miękiszem palisadowym. W zakresie podczerwonym zdrowe rośliny mają odbicie dochodzące do 50% i wyso-

ką przepuszczalność promieniowania. Wzrost odbicia zaczyna się w okolicy 700 nm. Optymalnym kanałem do badania ilości biomasy zawartej w roślinach jest zakres 740–900 nm (Jensen, 1983; Goward i in., 1994). Na wartość odbicia wpływa także stadium rozwoju rośliny. W zakresie podczerwonym jest również kanał absorpcji wody – od 920 do 980 nm. Bliska podczerwień (od 110 do 2500 nm) może być także wykorzystywana do badania innych elementów struktury roślin; celulozy, karotenoidów, ligniny, nitrogenu (Ustin i in.; 2004). Przykładowo celuloza absorbuje promieniowanie w paśmie 2104 nm.

W zakresie od 1300 do 2500 nm możliwe jest badanie zawartości wody w roślinach, gdzie absorbowane promieniowanie zależne jest od ilości wody (ryc. 1). Bardzo duża absorpcja przez wodę występuje w okolicach trzech wartości promieniowania: 1400, 1900 i 2700 nm (Jensen, 1983; Ustin i in., 2004). Największe odbicie w średniej podczerwieni występuje w dwóch miejscach około 1600 i 2200 nm, gdzie możliwe jest badanie warunków wilgotnościowych upraw, które wykorzystywane są do planowania nawadniania, analizy stresu wodnego i in. W środkowej podczerwieni występują ograniczenia w rejestracji promieniowania ze względu na jego pochłanianie przez obiekty niezwiązane z roślinami.

#### Metody tworzenia wskaźników

Teledetekcyjne wskaźniki roślinności wprowadzono, aby ułatwić pomiary odbicia promieniowania w więcej niż jednym zakresie spektralnym. Przedziały widma są wybierane z uwzględnieniem badanych cech. Większość z nich wykorzystuje przynajmniej jeden kanał z pasma podczerwonego (700–900 nm) i jeden kanał z czerwonego zakresu (600–700 nm) (Jensen, 1983; Elvidge, Chen, 1995; Rondeaux i in., 1996). Rezultatem jest kombinacja skorelowanych informacji z poszczególnych kanałów z cechami roślinności (Goward i in., 1994; Zhang i in., 1997; Ustin i in., 2004). Modyfikacja wskaźników umożliwia redukcję wpływu niepożądanego czynnika (np. odbicia gleby). Poniżej przedstawione zostały najczęściej spotykane wskaźniki.

*Simple Ratio Index – Vegetation Index* (Rouse i in., 1973) – wskaźnik bada kondycję roślin, mierzony jest za pomocą stosunku odbicia w dwóch kanałach – podczerwonym i czerwonym.

*Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse i in., 1973) – bada kondycję roślin, proces fotosyntezy, prognozuje plony itd. Obliczany jest za pomocą stosunku różnicy odbicia w kanale podczerwonym i czerwonym do sumy odbicia w tych kanałach.

*Atmospherically Resistant Vegetation Index* (Kaufman, Tanre, 1996) – wskaźnik jest modyfikacją NDVI, która bierze pod uwagę odbicie w paśmie niebieskim i częściowo redukuje wpływ atmosfery.

*Red Edge Position Index* (Curran i in., 1995) – wskaźnik jest wrażliwy na zmiany w zawartości chlorofilu, mierzy odbicie w zakresie promieniowania od 690 do 740 nm.

*Structure Insensitive Pigment Index* (Penualas i in., 1995a) – wskaźnik stworzony do maksymalizowania wrażliwości na karotenoidy i chlorofil, mały wpływ na jego wartość ma struktura komórkowa.

*Water Band Index* (Penualas i in., 1995b) – wskaźnik przeznaczony do analizowania zawartości wody w roślinach określany jest przez stosunek odbicia promieniowania w dwóch kanałach, których zakres jest w okolicach 900–1000 nm.

Jednym z większych problemów jest utworzenie wskaźnika, który precyzyjnie charakteryzowałby jedną właściwość rośliny, np. struktury komórkowe lub zawartość chlorofilu *a* lub *b* (Fennessy, Xue, 1997; Gilbert i in., 2002; Haboudane i in., 2004; Haboudane i in., 2004; Ustin i in., 2004).

#### Podziały teledetekcyjnych wskaźników roślinności

W teledetekcji istnieje kilka podziałów wskaźników. Coraz częściej spotykany podział wynika z metodyki pozyskania i rodzaju danych (wielospektralne i hiperspektralne). Roślinne wskaźniki wykorzystywane do analizy obrazów wielospektralnych można podzielić na trzy grupy w zależności od tego, czy biorą one pod uwagę odbicie od gleby (Adamczyk, Będkowski, 2005; Dorigo i in., 2006):

Wskaźniki typu *slope-based* bazują na odbiciu w paśmie czerwonym i bliskiej podczerwieni. Wyrażane są za pomocą linii łączącej początek układu współrzędnych z punktem o współrzędnych odpowiadających odbiciu w paśmie czerwonym i w bliskiej podczerwieni. Przykładem jest NDVI.

Wskaźniki typu *distance-based* wyrażane są za pomocą wartości odbicia w kanałach czerwonym i podczerwonym w stosunku do linii gleby, charakteryzowanej za pomocą odbicia od gleby o różnym stopniu uwilgotnienia. Redukują one odbicie od innych elementów np. gleby (Dorigo, i in., 2006). Przykładem jest *Perpendicular Vegetation Index*.

Wskaźniki określane jako hybrydowe łączą właściwości dwóch poprzednich grup. Przykładem jest *Soil Adjusted Vegetation Index*, który jest modyfikacją NDVI redukującą wpływ odbicia gleby.

Do analizowania roślinności na obrazach hiperspektralnych, gdzie operuje się większą ilością danych o węższych spektralnie kanałach, stwarzają nowe możliwości (Dorigo, i in., 2006). Mogą to być wskaźniki wykrywające specyficzne substancje, np. proteiny, ligniny. Wskaźniki hiperspektralne bazują na szczegółowym przebiegu i kształcie krzywej spektralnej roślin. Podzielono je na trzy grupy:

*Narrow Band Ratios* – używane są do badania ilości chlorofilu i zawartości wody w roślinach. Wykorzystują odbicie w trzech kanałach typowych dla roślin zielonych: wysokie odbicie w paśmie zielonym, maksymalna absorpcja w zakresie czerwonym i wzrost odbicia w paśmie podczerwonym. Przykładem jest *Chlorophyll Absorption Ratio Index* badający absorpcję chlorofilu w paśmie od 550 do 700 nm (Kim i in., 1994).



Wskaźniki bazujące na kształcie krzywej odbicia spektralnego oraz na obszarze tzw. *red edge*. Minimalizują wpływ gleby i atmosfery (Dorigo, i in., 2006). Analizowany jest kształt wzrastającego odbicia spektralnego pomiędzy pasmem czerwonym a podczerwonym, położonym w okolicach 720 nm. Brany jest także pod uwagę drugi wzrost odbicia między pasmem niebieskim a zielonym.

Wskaźniki wyróżnione na podstawie pomiarów krzywej spektralnej. Analizy bazują na głębokości i powierzchni spadku promieniowania mierzonego na krzywej odbicia spektralnego. Przykładem takiego wskaźnika jest *Chlorophyll Absorption Continuum Index* (Broge, Leblanc, 2000), który wykorzystuje zakres od zielonego do bliskiej podczerwieni.

Inny podział wskaźników został zastosowany w programie ENVI 4.3, gdzie wyróżniono grupy wskaźników pod względem rodzaju mierzonego parametru:

*Broadband Greenness* – wskaźniki najprostsze, które służą do pomiaru ogólnej wielkości roślinności i wigoru roślin. Do ich liczenia brane są pod uwagę kanały z zakresu światła widzialnego i bliskiej podczerwieni. Do tych wskaźników należy np. NDVI (Rouse, 1973);

*Narrowband Greenness* – wskaźniki są wrażliwe na koncentrację chlorofilu, powierzchnię liści, ich zwartość i strukturę. Przeznaczono je do szacowania łącznej ilości i jakości materiału fotosyntetycznego, który pozwala określać stadium roślinności. Do tworzenia tych wskaźników wykorzystywany jest zakres promieniowania między 690 a 740 nm. Przykładem jest: *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index*, zmodyfikowany wskaźnik NDVI, który bierze pod uwagę promieniowanie w okolicach 705 i 750 nm (Gitelson, Merzlyak, 1994)

*Light Use Efficiency* – wskaźniki, które są przeznaczone do mierzenia ilości światła wykorzystywanego w procesie fotosyntezy. Pozwala to na oszacowanie przyszłych plonów. Obliczane są za pomocą stosunku odbicia w zakresie promieniowania widzialnego w zależności od pigmentu, jaki pochłania światło. Przykładem takiego wskaźnika jest: *Photochemical Reflectance Index*, który jest wrażliwy na zmiany w zawartości karotenoidów (Gamon i in., 1992).

*Canopy Nitrogen* – wskaźnik, który mierzy zawartość azotu – istotnego składnika chlorofilu. Ma on wysoką koncentrację, w przypadku, gdy roślinę cechuje szybki wzrost. Do takich pomiarów służy *Normalized Difference Nitrogen Index* (Fourty i in., 1996).

*Dry or Senescent Carbon* – wskaźniki, które pozwalają na szacowanie ilości węgla w suchej masie ligniny i celulozy, z których zbudowane są suche części roślin. Za ich pomocą analizuje się obecność materii łatwopalnej, a tym samym zagrożenie pożarowe.

Przykładem jest *Cellulose Absorption Index* – określa wielkość powierzchni zawierającej suchy materiał, wykorzystuje promieniowanie w okolicach 2000 i 2200 nm (Daughtry, 2001).

*Leaf Pigments* – przeznaczone są do pomiaru zawartości pigmentów, związanych ze stresem roślin, między innymi karotenoidów. W analizie nie jest uwzględniany chlorofil.

Przykładem jest *Carotenoid Reflectance Index*, który mierzy zawartość karotenoidów (Gitelson i in., 2002).

*Water Canopy Content* – wskaźniki określają zawartość wody w pokrywie roślinności, co ma związek z wegetacją i odpornością na ogień. Przykładem jest *Water Band Index*, mierzący zmiany zawartości wody w roślinie (Penuelas i in., 1995). Bierze on pod uwagę promieniowanie w zakresie 900 i 970 nm.

### Analizowane teledetekcyjne wskaźniki roślinności

Na potrzeby niniejszej pracy wybrane zostały następujące wskaźniki: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Leaf Area Index* (LAI), oraz fAPAR – frakcja *Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (APAR). Każdy z wymienionych wskaźników pozwala na szacowanie liści biomasy, a także ocenę kondycji i wigoru roślin.

#### Normalized Difference Vegetation Index i Soil Adjusted Vegetation Index

Wskaźnik NDVI został po raz pierwszy użyty przez J. W. Rouse'a w 1973 roku. Jest jednym z najstarszych, najlepiej poznanych i, ze względu na łatwość obliczeń, powszechnie używanych. Bada on wigor roślin i ich stan rozwojowy. Stosuje się go od zbierania informacji o fotosyntezie oraz strukturach komórkowych roślin (Rouse, 1973; Gamon i in., 1995; Griffith i in., 2002). Za jego pomocą można prognozować plony, ponieważ wykrywa zmiany w ilości biomasy (Dyer i in., 1973; Rouse, 1973; Paruelo i in., 1997; Williams i in., 2001; Guerschman i in., 2003; Wang i in., 2004).

NDVI bazuje na kontraście między największym odbiciem w paśmie bliskiej podczerwieni i największej absorpcji w paśmie czerwonym. Obliczany jest za pomocą wzoru (Rouse, 1973):

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

gdzie:  $R_{NIR}$  – odbicie w paśmie podczerwonym  
 $R_{RED}$  – odbicie w paśmie czerwonym

Wskaźnik przyjmuje wartości między -1 a 1. Im wyższe jest odbicie w podczerwieni i mniejsze w paśmie czerwonym, tym rośliny są bardziej zielone i większa jest wartość NDVI (Wang i in., 2004). Oznacza to, że rośliny zawierają więcej chlorofilu, który pochłania światło czerwone oraz miękiszu gąbczastego, odbijającego światło podczerwone. Wysokie wartości są powiązane z aktywnością fotosyntetyczną roślin (Rouse, 1973; Gamon i in., 1995; di Bella i in., 2004). Uznaje się, że roślina jest w dobrej kondycji i nie jest narażona na czynniki stresogenne, jeśli wskaźnik wynosi ponad 0,6. Średnie wartości dla roślinności wahają się od 0,4 do 0,8.

Wykorzystywany jest on między innymi do szacowania wielkości produkcji z łąk na terenie całej Polski (Dąbrowska-Zielińska, 2003, Ciołkosz, Dąbrowska-Zielińska, 1993). A. Gabban (2006) analizuje przydatność NDVI i jego pochodnych w badaniach zagrożenia pożarowego w lasach.

Wskaźnik NDVI nie zawsze jest odpowiedni do badania ilości biomasy. Na jego wartość ma wpływ wiele czynników: szum gleby, gdy prześwituje ona przez roślinność, faza fenologiczna roślinności (np. okrycie się okwiatem), ustawienie liści, struktura koron drzew, kąt padania Słońca oraz właściwości optyczne liści (Myneni, Williams, 1994; Epiphanio, Huete, 1995; Moreau, Li, 1996; Kammerud, 1996; Carlson, Ripley, 1997; Ridao i in., 1998; Turner i in., 1999; Soudani i in., 2006). Dlatego wprowadzono wiele modyfikacji tego wskaźnika, które usuwają wpływ innych elementów.

Wskaźnik *Soil Adjusted Vegetation Index* jest modyfikacją wskaźnika NDVI. Dzięki wprowadzonemu współczynnikowi zmniejszony jest wpływ właściwości optycznych gleby. Został po raz pierwszy wykorzystany przez Huete'a (1988; Huete, Tucker, 1991). Został opisany wzorem:

$$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED} + L} \times (1 + L)$$

gdzie:  $R_{NIR}$  – odbicie w paśmie podczerwonym

$R_{RED}$  – odbicie w paśmie czerwonym

$L$  – współczynnik korelacyjny

Wartość SAVI dla gleb, tak samo jak w przypadku NDVI, przyjmuje wartości w okolicach 0. Im jest wyższy, tym większą część terenu pokrywają rośliny. Współczynnik  $L$  (*soil-adjustment factor*) powoduje, że wskaźnik jest mniej wrażliwy na odbicie promieniowania od gleby. Sprawia on, że SAVI jest mniej wrażliwy na odbicie w paśmie czerwonym, a bardziej na odbicie w podczerwieni (Epiphanio, Huete, 1995). Jest on zależny od intensywności wegetacji i dobranie jego wartości wymaga znajomości informacji o wegetacji na badanym terenie (Haboudane i in., 2004). Autor wskaźnika przyjął wartość 0,5, co powoduje zmniejszenie obecności szumu gleby przy różnych typach roślinności i jej zwartości (Qi i in., 1994). Współczynnik  $(L + 1)$  ma za zadanie zwiększyć dynamikę, którą wskaźnik utracił przez dodanie w mianowniku współczynnika  $L$ . Wartość wskaźnika SAVI wzrasta prawie liniowo wraz ze zwiększaniem się stopnia pokrycia terenu przez rośliny.

Wskaźnik jest mniej wrażliwy na zawartość chlorofilu niż NDVI i przez to ma ograniczoną dynamikę (Haboudane i in., 2004). Utworzono także inne modyfikacje SAVI, np. *modified soil-adjusted vegetation index* – MSAVI, *transformed soil-adjusted vegetation index* – TSAVI (Rondeaux i in., 1996) oraz *generalized soil-adjusted vegetation index* (Gilabert i in., 2002).

### Akumulowana energia fotosyntetycznie czynna (APAR i fAPAR)

Wskaźnik akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej (APAR) mierzy promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie fotosyntezy, czyli 400–700 nm (Myneni, Williams, 1994; Moreau, Li, 1996). W tym przedziale promieniowanie pochłaniane jest przez chlorofil do wytworzenia masy zielonej. APAR jest to ilość energii, jaką rośliny wykorzystują do przeprowadzenia procesu fotosyntezy, a następnie do produkcji biomasy. Bilans strumienia energii zakumulowanej jest sumą promieniowania bezpośredniego dochodzącego do roślin i odbitego od gleby pomniejszoną o promieniowanie pośrednie przenikające przez rośliny i pośrednie odbite od nich. Oblicza się je za pomocą następującego wzoru (Daughtry, 1983 za: Epiphanio, Huete, 1995):

$$APAR = (PAR_o + PAR_s) - (PAR_c + PAR_t)$$

gdzie:  $PAR_o$  – gęstość strumienia promieniowania bezpośredniego dochodzącego do roślin

$PAR_t$  – gęstość strumienia promieniowania bezpośredniego przenikającego przez rośliny

$PAR_s$  – gęstość strumienia promieniowania odbitego od gleby

$PAR_c$  – gęstość strumienia promieniowania odbitego od roślin

Wskaźnik wykorzystywany jest do określania kondycji roślin, prognozowania ilości biomasy, a tym samym plonów (Law, Waring, 1994; Epiphanio, Huete, 1995). APAR może być szacowany na podstawie globalnego promieniowania słonecznego, biorąc pod uwagę także empiryczne związki, które bazują na średnich temperaturach maksymalnych i minimalnych (Coops i in., 2001).

Jednostką względną wskaźnika APAR jest frakcja APAR (fAPAR), nazywana także produktywnością. Jest to stosunek akumulowanego promieniowania w zakresie fotosyntezy do łącznego promieniowania bezpośredniego dochodzącego do roślin (Gallo, Daughtry, 1986 za: Epiphanio, Huete, 1995):

$$fAPAR = \frac{APAR}{PAR_o}$$

gdzie: APAR – akumulowana radiacja w zakresie fotosyntezy

$PAR_o$  – gęstość strumienia promieniowania dochodzącego do roślin

Taka konstrukcja wskaźnika pozwala wyeliminować zmiany nasłonecznienia, które wpływają na pomiary wskaźnika APAR. fAPAR może być stosowany do porównywania kondycji roślin i do obrazowania zmian wywołanych procesami fenologicznymi.

Wskaźnik fAPAR przyjmuje wartości od 0 do 1, a w procentach od 0 do 100%. Im jest wyższy, tym więcej energii słonecznej wykorzystują rośliny, a tym sa-

mym są zdrowsze i można prognozować większą produkcję biomasy. Wartość wskaźnika zależy także od przypadkowego odbicia, budowy i optycznych właściwości baldachimu roślinności i odbicia tła gleby (Myneni, Williams, 1994). Jego wartość wzrasta wraz ze zwiększaniem się powierzchni projekcyjnej liści, odbicia tła oraz kąta padania promieni słonecznych. Wskaźnik maleje razem ze zmniejszaniem się półkolistego odbicia, przepuszczalności liści, średniego kąta liści oraz optycznej atmosferycznej głębokości.

#### Wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści (Leaf Area Index)

Wskaźnik LAI zależy od właściwości strukturalnych i biochemicznych roślin (Surlock, 2001). Jest jednym z ważniejszych parametrów określających biofizyczne procesy wegetacyjne roślin – fotosyntezę, transpirację, ewapotranspirację, produktywność roślin oraz ich kondycję (Serrano i in., 2000). LAI charakteryzuje ilość liści na daną powierzchnię terenu. Definiowany jest jako sumaryczna powierzchnia liści, która bierze pod uwagę ich kształt, mierzona na jednostkę terenu, czyli na ogół metr kwadratowy (Surlock, 2001; Chen i in., 2005; Chaurasia i in., 2006). Opisywana jest wzorem (Surlock, 2001):

$$\text{LAI} = \frac{S}{G}$$

gdzie: S – powierzchnia baldachimu roślinnego  
G – powierzchnia jednostkowa terenu

Średnia wartość wskaźnika na podstawie analizowanych prac wynosi około 5, co oznacza, że na metr kwadratowy występuje 5m<sup>2</sup> liści. Dla lasów wartość ta waha się średnio od 6 do 8, natomiast dla upraw zbożowych od 2 do 4. Maksymalne notowane wskaźniki wyniosły około 19. W biometrii za optymalny zakres uznaje się przedział 3–5. Wartość wskaźnika zależy także od stopnia rozwoju rośliny – do pewnego momentu rozwoju wzrasta powierzchnia jej liści a tym samym wskaźnik LAI. Czynniki stresujące powodują spadek wartości wskaźnika.

LAI jest bardzo przydatny do zrozumienia biofizycznych procesów zachodzących w roślinach, pozwala określić dynamikę wegetacji, przewidywać wzrost roślin i pokrycie terenu przez rośliny (Spanner i in., 1994; Haboudane i in., 2004). LAI jest wykorzystywane do szacowania ilości biomasy, a tym samym prognozowania plonów (Spanner i in., 1994; Serrano i in., 2000; Williams i in., 2001). Wskaźnik także używany jest do określania kondycji roślin (Serrano i in., 2000). U organizmów narażonych na stres wartości wskaźnika spadają. LAI ma również związek z wieloma innymi parametrami opisującymi rośliny – produkcją pierwotną, produktywnością roślin (Ciołkosz, Dąbrowska-Zielińska, 1993; Lewiński, Gruszczynska, 1992; Bochenek, 1990; Spanner i in., 1994; Williams i in., 2001). Wpływa

na niego także wilgotność roślin. Stosowany jest bardzo często do szacowania plonów i ilości biomasy na obszarach użytków zielonych (Bochenek, 1990; Ciołkosz, Dąbrowska-Zielińska, 1993; Lewiński, Gruszczynska, 1992) oraz terenów leśnych (Davi i in., 2006).

#### Korelacje wskaźników

Przegląd literatury wykazał zaledwie kilka pozycji, które szczegółowo opisują korelacje między tym samym wskaźnikiem mierzonym z różnych poziomów pozyskania danych. Natomiast dużo badań było prowadzonych na temat związków między różnymi wskaźnikami mierzonymi na tym samym poziomie, np. satelitarnym lub lotniczym.

Zależności i korelacje między wskaźnikami mierzonymi z różnego poziomu analizowane były przez Z. Bochenka (1990). Autor korelował wskaźnik LAI z pomiarów naziemnych i NDVI wyliczony także z naziemnych pomiarów spektrometrycznych; LAI z pomiarów naziemnych i odbicie w zakresie podczerwonym z pułapu lotniczego oraz LAI z pomiarów naziemnych i NDVI wyliczone na podstawie kanału 1 i 2 radiometru AVHRR. Analiza korelacji wykazała, że istnieje ścisła zależność między wskaźnikiem LAI a korelowanymi wartościami z trzech różnych poziomów. W tym przypadku oceniono, że LAI może być używany do szacowania parametrów określających produktywność roślin.

NDVI koreluje się dobrze z innymi wartościami określającymi stan roślin, np. z biomasa, LAI, APAR, produkcją pierwotną (Carlson, Ripley, 1997). Zagadnienie to jest dość dobrze rozpoznane, np. w przypadku NDVI, produkcji pierwotnej i biomasy (Wang i in., 2004; Jakomulska i in., 2003). Inną zaletą wskaźnika jest jego duża wrażliwość na zmiany, co daje możliwość badania dynamiki środowiska. Między SAVI a innymi wskaźnikami występują podobne współzależności jak dla NDVI, ale ten wskaźnik jest bardziej zależny od odbicia w podczerwieni niż NDVI. SAVI wykazuje lepsze skorelowanie z LAI niż NDVI. Analizowaniem związków między LAI a NDVI z różnych skanerów zajmowali się Ch. D. Elvidge i Z. Chen (1995) oraz K. Soudani, Ch. François, G. le Maire, V. Le Dantec i E. Dufrêne (2006). Tą relację badano także w zależności od rodzaju korekcji atmosferycznej i geometrycznej wskaźników (Turner i in., 1999).

Można przytoczyć wiele publikacji analizujących związki między LAI a innymi wskaźnikami teledetekcyjnymi (Carlson, Ripley, 1997; Soudani i in., 2006; Elvidge, Chen, 1995; Lewiński, Gruszczynska, 1992; Turner i in., 1999; van Leeuwen i in., 1997; Haboudane i in., 2004). Zbadano, że istnieje związek między LAI a wskaźnikami, które są mało wrażliwe na zmiany zewnętrznych parametrów wpływających na odbicie od roślin, np. wpływ gleby i atmosfery oraz geometrii odbicia (Haboudane i in., 2004). Zależność między LAI a NDVI nie jest jednoznaczna, ze względu na wrażliwość NDVI na wahania zawartości chlorofilu w liściach.



Lepiej skorelowane z opisywanym wskaźnikiem jest SAVI, ale nadal widoczny jest znaczny wpływ barwnika. Zależność ta jest często analizowana na różnego rodzaju obszarach lub konkretnych roślinach i uprawach (Hoffmann, Blomberg, 2004).

Wskaźnik fAPAR jest często zestawiany z innymi parametrami opisującymi roślinność, a relacje są na ogół zbliżone do liniowych (Epiphanio, Huete, 1995). Takim przykładem jest relacja między wskaźnikiem fAPAR a NDVI, która określana jest jako prawie liniowa (Coops i in., 2001; di Bella i in., 2004, Ridao i in., 1998). Zależność między LAI a fAPAR jest także prawie liniowa, dopóki wskaźnik LAI ma wartość poniżej 3, a następnie fAPAR dąży do osiągnięcia wartości 0,95; na co mają wpływ parametry roślin, gleby i atmosfery (Myneni, Williams, 1994). Zależności między tymi wskaźnikami na poziomie terenowym także wykazały ścisłą zależność (Leeuwen i in., 1997). Relacja między tym wskaźnikiem a innymi może być modyfikowana przez wiele czynników, np. wartość fAPAR zależy od kąta widzenia sensora (Epiphanio, Huete, 1995). Może ją zaburzać także słabe poznanie tła pomiarów oraz udział części niezielonych roślin, które to czynniki wpływają na wartość fAPAR (Serrano i in., 2000).

Według J. Epiphanio i A. Huete'a (1995) informacje o fAPAR uzyskane z pułapu satelitarnego powinny być porównywane z wartościami łącznej energii docierającej do Ziemi w ciągu danego okresu czasu, np. jednego dnia. Ilość energii docierającej do powierzchni roślinnej w ciągu jednego dnia podlega zmianom zależnym od kąta padania promieni słonecznych. Oznacza to, że relacje między wskaźnikami roślinności a fAPAR są powiązane z kątem padania promieni słonecznych. Takie informacje należy brać pod uwagę, szczególnie dla dużych szerokości geograficznych i dla obszarów o LAI większym od 3.

Teledetekcyjne wskaźniki roślinności są stosowane i szeroko rozpowszechnione, co zostało stwierdzone na podstawie przedstawionego przeglądu literatury. Prawidłowe obliczenie wskaźników pozwala uzyskać dużo informacji o środowisku. Dane terenowe wykorzystywane są do kalibrowania danych mierzonych na pułapie lotniczym lub satelitarnym, jednak niewiele jest badań, które zajmowałyby się porównywaniem wartości tego samego wskaźnika z dwóch różnych poziomów. Dlatego ważne jest zagadnienie korelacji z dwóch poziomów poruszane w tej pracy. Ponadto brakuje literatury opisującej związek między wskaźnikami wyliczonymi ze zdjęć hiperspektralnych.

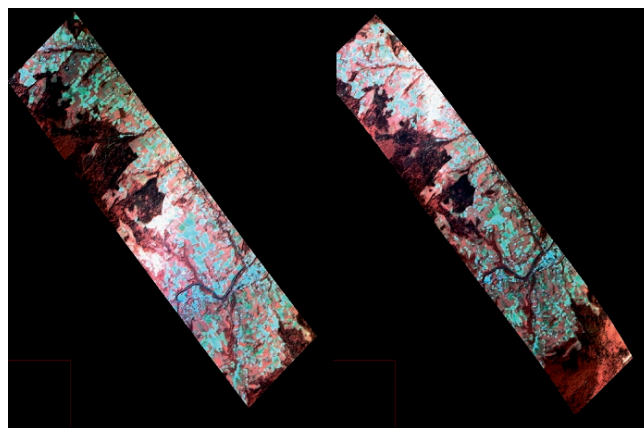
Teledetekcyjne wskaźniki roślinności, stosowane w pracy, obiektywizują pozyskiwane informacje i określają ilościowe i jakościowe właściwości badanych roślin (stan rozwojowy, wigor oraz cechy biofizyczne). Dane pozyskiwane ze zdjęć hiperspektralnych pozwalają na prowadzenie złożonych analiz, w tym także inne podejście do obliczania wskaźników. W tym przypadku analizowana jest cała krzywa odbicia spektralnego, a nie jedynie wybrane kanały. Dlatego wskaźniki roślinności pozyskiwane z tych obrazów są bardziej precyzyjne.

Badany obszar jest pokryty różnego rodzaju roślinnością rolniczą oraz lasem, co pozwala na przeanalizowanie wartości wskaźników zmierzonych w zróżnicowanym terenie. Istotnym zagadnieniem, poruszonym w publikacji, jest porównywalność wartości wskaźników pozyskanych z poziomu terenowego (dane pochodzące z pomiarów naziemnych) i pułapu lotniczego (obrazy wskaźników obliczone ze zbadania hiperspektralnego).

## Metody badań

### Charakterystyka materiałów i algorytm postępowania

Dane wykorzystane w pracy pochodzą z lotniczego nalotu wykonanego dnia 29.07.2002 roku skanerem DAIS 7915<sup>1</sup>. Obraz hiperspektralny składał się z 79 kanałów w zakresie spektralnym od 450–12300 nm (*DLR's DAIS 7915 Home Page*). Skaner wykonał zbadania z rozdzielczością terenową 3 m i radiometryczną 15-bitową. W trakcie nalotu wykonano zbadanie w postaci trzech przelotów przedstawiających środkową część zlewni Bystrzanki (ryc. 2). Na północno-wschodniej części pierwszego obrazu widoczny jest cień chmury, który w znacznym stopniu utrudnia interpretację oraz odczytywanie wskaźników. Dlatego ten fragment został wykluczony z dalszych analiz.



Ryc. 2 Linia 2 i 3 obrazu hiperspektralnego w kompozycji RGB: 19, 11, 1.

Fig. 2. Line 2 and 3 of hyperspectral imagery, RGB 19, 11, 1 composition.

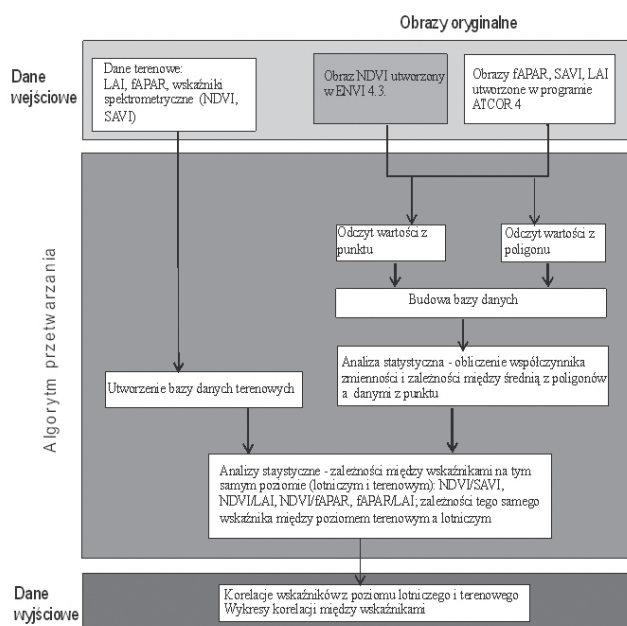
Wstępne przetworzenie danych (stopień pierwszy przetworzeń obrazu hiperspektralnego) oraz korekcję geometryczną wykonano w programie PARGE, a korekcję atmosferyczną w programie ATCOR 4<sup>2</sup>. Ostatnim etapem korekcji atmosferycznej (stopień trzeci przetworzeń) było obliczenie wartości dodanych, czyli utworze-

<sup>1</sup> Zbadanie pozyskane w ramach projektu HySens PL02\_05 we współpracy z DLR Niemcy.

<sup>2</sup> Wstępne przetworzenie wykonane zostało w DLR Oberpfaffenhofen przez B. Zagajewskiego pod opieką dr R. Richtera.

nie obrazów rozkładu przestrzennego wskaźników SAVI, fAPAR oraz LAI. Standardowy obraz wskaźnika cechuje się wartościami w zakresie od 0 do ponad 1000. Są to liczby nieodpowiadające rzeczywistym wartościom wskaźnika (zakresy charakterystyczne dla poszczególnych wskaźników podano w części teoretycznej dotyczącej wskaźników). Dlatego jednym z celów pracy jest ich weryfikacja, poprzez określenie korelacji tych wskaźników z pomiarami naziemnymi.

Wstępnie przygotowane dane zostały następnie przetworzone według algorytmu, który został zamieszczony na ryc. 3. Z obrazów poszczególnych wskaźników SAVI, LAI i fAPAR pobrano wartości wskaźników na dwa sposoby. Najpierw odczytano je z punktów odpowiadających pomiarom terenowym oraz wykonano odczyt według profilu z całego poligonu danego użytku, na którym znajdował się dany punkt pomiarowy (miało to na celu określenie stopnia reprezentatywności wyboru danego punktu do pomiaru terenowego). Na podstawie zebranych danych (z pomiarów naziemnych i odczytów wartości wskaźników pozyskanych z obrazu) zbudowano bazę danych w programie MS Excel.



Ryc. 3 Schemat postępowania przy obliczaniu korelacji między wskaźnikami

Fig. 3. The analysis algorithm of correlations between vegetation indices

Przeprowadzono wstępną analizę statystyczną (obliczono średnią, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności poszczególnych pomiarów) dotyczącą zróżnicowania wartości w obrębie poligonów na obrazie.

#### Metodyka pozyskania wskaźników z pomiarów terenowych

Dane pomiarowe z 20 poligonów testowych, zlokalizowanych na terenie poligonów kluczowych Wiatrów-

ki i Bieśnik S (położonych na terenie zlewni Bystrzanki) zostały zebrane na przełomie lipca i sierpnia 2002<sup>3</sup>. Charakteryzują one dominujące formy pokrycia terenu (uprawy zbożowe, ścierniska, łąki, pola koniczyny i ziemniaków). W trakcie badań terenowych wykorzystano do pomiarów: spektrometr ASD FieldSpec Pro, LAI-2000 Plant Canopy Analyzer oraz ceptometr liniowy AccuPAR model 80. Wykorzystując te instrumenty obliczone zostały wskaźniki NDVI, SAVI, LAI, fAPAR. Wszystkie pomierzone dane zostały wprowadzone do wspomnianej powyżej bazy danych MS Excel, gdzie obliczono wartości średnie, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności. Dane te zostały zestawione z pomiarami lotniczymi w celu przeprowadzenia analizy zależności między pomiarami terenowymi i lotniczymi.

#### Charakterystyki spektralne

Pomiary odbywały się przy użyciu spektrometru ASD FieldSpec Pro o zakresie spektralnym od 325 do 2500 nm i rozdzielczości spektralnej od 3 do 10 nm (*FieldSpec UV/VNIR HandHeld Spectroradiometer. User's Guide*, 2000). Urządzenie mierzy luminancję energetyczną, natężenie promieniowania a następnie przekształca wartości w spektralny współczynnik odbicia. Umożliwia pomiary zarówno w terenie otwartym, jak i w warunkach laboratoryjnych. Ma wbudowany wzorec czerni (*Dark Current Correction* – 25 pomiarów na każdym poligonie badawczym). Do kalibracji użyty został zewnętrzny wzorec bieli (spektralon – 25 pomiarów na każdym poligonie badawczym). Dzięki wykorzystaniu obu wzorców, wszystkie pomierzone charakterystyki obiektów były automatycznie korygowane i uśredniane (każdy pojedynczy pomiar składa się z 50 jednostkowych rejestracji), tak więc każdy poligon był charakteryzowany przez 10 pomiarów (uśrednionych z 500 rejestracji trwających 14–54 milisekundy).

Pomiary spektrometryczne wykonane były przy naturalnym oświetleniu. Na potrzeby rozbudowy lokalnej biblioteki spektralnej wykorzystano także sondę kontaktową, która umożliwia pomiary w świetle wbudowanej lampy kalibracyjnej. Dla każdego poligonu pozyskane zostały charakterystyki spektralne (Zagajewski, 2006).

#### Wskaźniki NDVI i SAVI

Na podstawie pobranych krzywych spektralnych obliczono wartości dwóch spektrometrycznych wskaźników roślinności: *Normalized Difference Vegetation Index* oraz *Soil Adjusted Vegetation Index*. Przy obliczeniach wykorzystano wartość odbicia dla tych samych długości fali: pasmo światła czerwonego – 650 nm oraz podczerwonego – 900 nm.

Przy obliczaniu wskaźnika SAVI przyjęto, że wskaźnik korelacyjny – *soil-adjustment factor* oznaczany sym-

<sup>3</sup> Dane pobrane zostały przez grupę kierowaną przez dr B. Zagajewskiego w trakcie badań terenowych towarzyszących zobrazowaniu lotniczemu.



bolem L wynosi 0,5, ponieważ badane obiekty są zróżnicowane i dokładniejsze różnicowanie wartości L uniemożliwia dalsze porównywanie wartości SAVI dla różnych obiektów (Huete, 1988, za: Huete, Tucker, 1991).

Następnie wartości wskaźników zgromadzono w bazie danych w programie MS Excel. Podobny sposób pobierania krzywych spektralnych, a następnie wyliczania z nich wskaźników został zastosowany w innych badaniach (Rucker i in., 2008).

### Wskaźniki LAI, APAR i fAPAR

Do zebrania wartości wskaźnika LAI użyto laiometru LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Urządzenie ma czujnik, który umieszczony jest nad oraz pod rośliną i odczytuje wartość transmitancji w paśmie światła niebieskiego (400–490 nm) w tych dwóch miejscach (*LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual*, 1992). Następnie porównywana jest ilość światła dochodzącego do rośliny i zmierzona pod rośliną. Z takich obliczeń wynika, jaka jest pokrywa roślinna, która zasłania padające promienie słoneczne. Pomiaru uwzględniają jedynie zielone części rośliny, nie biorąc pod uwagę zdrewniałych części rośliny, które nie mogą przeprowadzać fotosyntezy (Serrano i in., 2000). Korekcja odbywa się na bieżąco, dzięki czemu automatycznie pomijany jest błąd. Na tej podstawie obliczana jest powierzchnia projekcyjna liści. Pobieranie danych odbywało się między godziną 10 a 14. Pomiaru wykonywane były w cieniu, przy bezchmurnym niebie, bez bezpośredniego promieniowania słonecznego, przy dopływie promieniowania rozproszonego. Przy pomiarze każdego punktu wykonywane były 3 pomiary nad rośliną i 15 pod nią, a następnie były z nich obliczane średnie arytmetyczne. Dane zostały zapisane, a następnie przeniesione do bazy danych. Takie pomiary wykonywane były przy użyciu tego samego urządzenia także na terenie Tatr w Polsce (Jakomulska i in., 2003), w lasach Syberii (Chen, 2005) i na terenie USA (Serrano i in., 2000).

Pomiary wskaźnika fAPAR zostały wykonane za pomocą urządzenia AccuPAR 80 (*AccuPAR Model PAR-80. Operator's Manual. Version 3.1*, 1999). Najpierw była mierzona wartość APAR, czyli akumulowanego promieniowania w zakresie fotosyntezy. Wykonywane były w tych samych godzinach, co pozostałe. Odbywały się przy bezchmurnym niebie, przy bezpośrednim promieniowaniu słonecznym. Przy każdym pomiarze liniowo usytuowane czujniki, które umieszczone pod oraz nad rośliną mierzą dopływającą do nich energię. Każdorazowo były wykonywane 4 rodzaje pomiarów, każdy powtarzany był co najmniej 5 razy. Najpierw nad rośliną mierzone były promieniowanie słoneczne docierające do rośliny (PAR<sub>o</sub>) oraz, po odwróceniu urządzenia, promieniowanie odbite od rośliny (PAR<sub>c</sub>). Następnie zestaw czujników był umieszczony pod rośliną i mierzono tam promieniowanie, które przeszło przez pokrywę roślinną (PART) oraz, po odwróceniu sprzętu, promieniowanie

odbite od gleby (PAR<sub>s</sub>). Następnie obliczano APAR ze wzoru.

$$\text{APAR} = (\text{PAR}_o + \text{PAR}_s) - (\text{PAR}_c + \text{PART})$$

Ostatnim etapem było przeniesienie danych do programu Excel i obliczenie frakcji wskaźnika APAR – fAPAR według wzoru:

$$f\text{APAR} = \frac{\text{APAR}}{\text{PAR}_o}$$

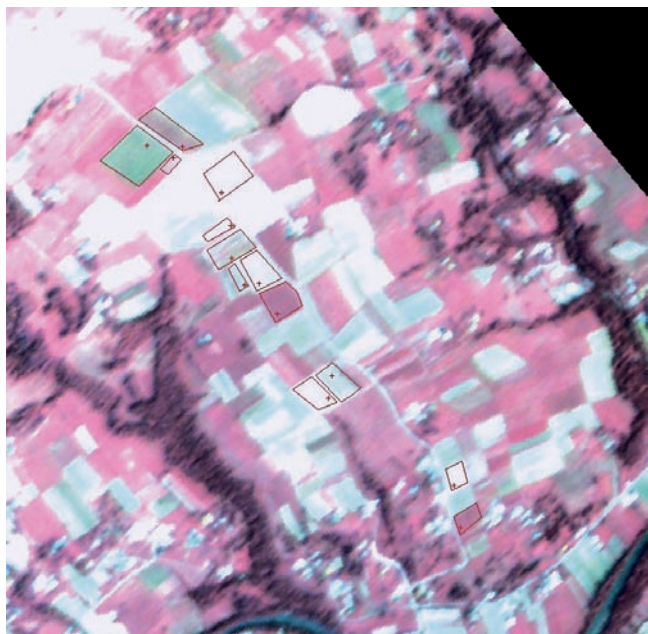
### Metodyka pozyskiwania wskaźników z danych lotniczych

Pierwszym etapem prac było uzyskanie wskaźnika NDVI. Został on obliczony w programie ENVI 4.3., który zawiera funkcję do tworzenia tego wskaźnika ze zdjęć hiperspektralnych. Wykorzystany został kanał 12 (czerwony – 693 nm) i 32 (podeczerwony – 869 nm). Dla każdego z dwóch obrazów generowany był oddzielnie i cechował się zakresem wartości od -1 do 1.

Pozostałe wskaźniki, które zostały wykorzystane w pracy pochodzą ze wspomnianych przetworzeń danych w programie ATCOR 4, z którego otrzymano obrazy w zakresach wartości od 0 do 1000.

Proces odczytu danych z obrazu składał się z czterech etapów. Pierwszy etap to identyfikacja punktów z pomiarów terenowych na obrazie DAIS 7915, w tym poligonów, na których znajdowały się punkty pomiarowe. Na potrzeby pracy wykorzystano 20 stanowisk pomiarowych znajdujących się na obszarze Wiatrówek i Bieśnika S (z 47 pomierzonych w terenie). Drugi etap to utworzenie warstwy wektorowej z punktami i poligonami pomiarowymi. Trzecim było pobranie wartości wskaźników dla każdego punktu pomiarowego oraz całego poligonu. Czwarty etap to utworzenie bazy danych.

Identyfikacja punktów odbywała się przez zlokalizowanie wizualnie stanowisk pomiarowych na obrazach wskaźników NDVI, SAVI, LAI i fAPAR. Następnie została utworzona warstwa wektorowa (ryc. 4). Składała się ona z punktów, które reprezentują dokładną lokalizację miejsca, gdzie zmierzono wartości wskaźników, oraz z poligonów obejmujących pola, na których znajdują się punkty pomiarowe. Poligony obejmowały grunty orne z różnymi uprawami, łąki i pastwiska, więc wykreślenie poligonów obejmowało wyznaczenie granic za pomocą wektora. Następnie wartości wszystkich wskaźników zostały odczytane w dwojaki sposób. Najpierw odczytano wartości z punktu, gdzie wykonywano pomiary terenowe. W związku z brakiem dokładnej lokalizacji (współrzędnych geograficznych) nie było możliwe precyzyjne określenie położenia punktów. Dlatego następnie dla każdego poligonu pobrano po 10 wartości wskaźnika równomiernie rozłożonych na terenie całego poligonu. Dziesięć wartości zostało określone jako minimalna wartość, która pozwala na oznaczenie zróżnicowania. Następnie obliczono z nich średnią arytmetyczną. Skorelowano wartości średnie oraz pojedyncze



Ryc. 4 Fragment obrazu hiperspektralnego z naniesioną warstwą dokumentacyjną

Fig. 4. Fragment of hyperspectral image with a documentation vector layer

pobrane z punktu, aby je porównać i sprawdzić, czy miejsca, gdzie były punkty pomiarowe są reprezentatywne dla poligonów.

Ostatnim etapem pozyskiwania wskaźników z danych lotniczych było utworzenie bazy danych. Zawierała ona wartości wskaźników NDVI, SAVI, LAI i fAPAR z punktu oraz średnią arytmetyczną z poligonu.

### Opracowanie statystyczne pomiarów naziemnych i lotniczych

Opracowanie statystyczne przeprowadzone zostało w dwóch etapach. Pierwszy dotyczył danych z obrazu hiperspektralnego i objął analizę zmienności wartości poszczególnych wskaźników w obrębie poligonów testowych, czyli określenie, jak bardzo zróżnicowany jest wskaźnik w obrębie danego pola. Użyto do tego współczynnik zmienności, który ma następujący wzór:

$$\text{Współczynnik zmienności} = \frac{\text{Odchylenie standardowe}}{\text{Średnia z pomiarów z poligonu}} \times 100\%$$

Przyjmuje on wartości w procentach od 0 do 100%. Im wyższa wartość, tym pole charakteryzuje się większą heterogenicznością analizowanego wskaźnika.

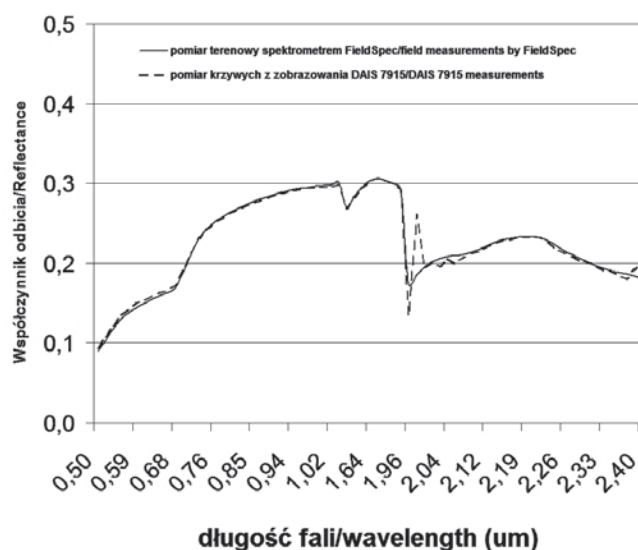
Kolejnym etapem tej części opracowania było skorelowanie wyniku pozyskanego z piksela odpowiadającego punktowi pomiarowemu w terenie ze średnią z pomiarów odczytanych z całego badanego poligonu (sprawdzenie reprezentatywności wybranego miejsca pomiarowego).

Drugim, właściwym etapem opracowania statystycznego było wykonanie wykresów, na których przedstawiono korelacje między wskaźnikami. Pierwsza część obejmowała przedstawienie zależności między różnymi wskaźnikami z tego samego poziomu. Zarówno dla wskaźników z poziomu lotniczego, jak i danych z poziomu naziemnego utworzono wykresy przedstawiające zależności między: NDVI i SAVI, NDVI i LAI, NDVI i fAPAR oraz fAPAR i LAI. Regresje dla tych zależności wykreślono w podziale na formy użytkowania terenu. Następnie umieszczono na wykresie równania do wykreślonych regresji oraz współczynniki determinacji. Korelację określano jako bardzo silną, jeśli współczynnik determinacji wynosił między 0,85 a 1, silną 0,7–0,85, dobrą 0,7–0,6, natomiast poniżej wartości 0,5 określono korelację jako słabą.

Ostatnim etapem opracowania statystycznego było porównanie wartości tego samego wskaźnika z poziomu lotniczego oraz naziemnego. Stworzono cztery wykresy z regresjami, równaniami i współczynnikami determinacji. Regresje były wykreślone łącznie dla wszystkich 20 punktów bez podziału na użytkowanie oraz dla każdej z form użytkowania terenu.

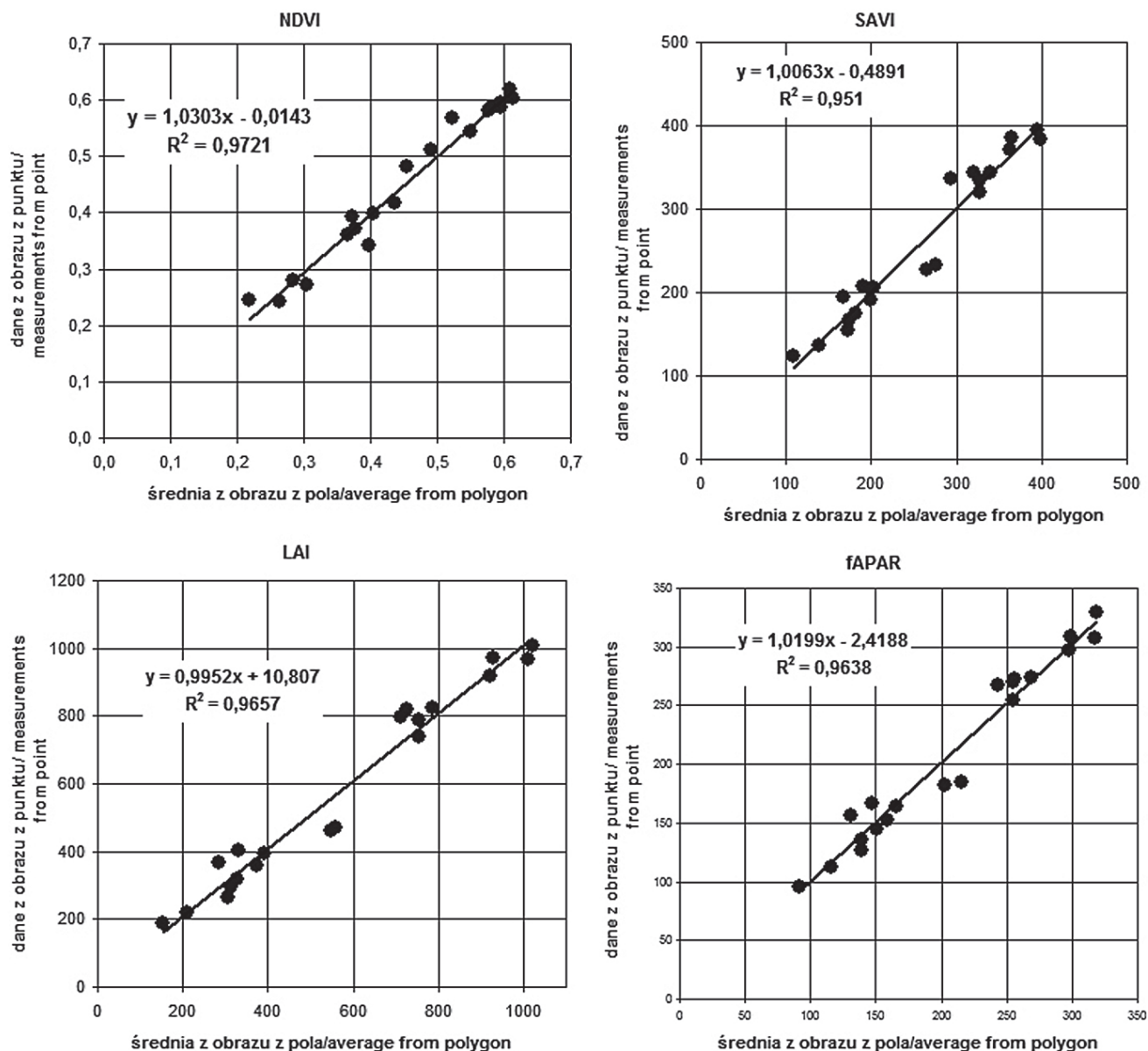
### Analiza dokładności pomiarów

Pierwszym etapem określenia wiarygodności danych jest analiza błędów pomiarów. Naziemne pomiary teledetekcyjne były wykonane instrumentami, których dokładność jest kontrolowana algorytmami operacyjnymi urządzenia (przy zachowaniu prawidłowości wykonania pomiaru zawartej w instrukcji obsługi). Przy wykonaniu ściśle określonej liczby powtórzeń uzyskiwana jest okre-



Ryc. 5 Porównanie charakterystyk spektralnych ścierniska pozyskanych z pomiaru naziemnego i lotniczego (Zagajewski i in., 2006)

Fig. 5. The comparison of stubbles' spectral characteristics from ground and airborne measurements (Zagajewski et al, 2006)



Ryc. 6 Zależność między wartościami wskaźników NDVI, SAVI, LAI i fAPAR pomierzonym na obrazie z punktu odpowiadającego pomiarowi terenowemu oraz średniej z badanego poligonu

Fig. 6 Relationship between vegetation indices NDVI, SAVI, LAI and fAPAR acquired from image point (responding to the terrain measurements) and mean of analyzed polygon

ślonego poziomu dokładność. Liczbę wykonanych powtórzeń i gwarantowaną dokładność można kontrolować na wyświetlaczu LAI-2000 Plant Canopy Analyzer oraz pomiaru spektromatycznego ASD FieldSpec Pro (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual, 1992, ASD FieldSpec® tour guide, 2007). Dodatkowym elementem ograniczającym błędy było wykonanie większej, niż wymagana, liczby pomiarów.

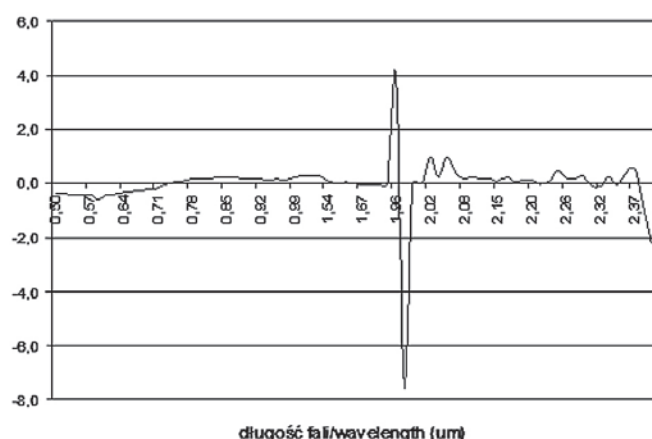
Przebieg krzywych spektralnych pobieranych z poziomu naziemnego i lotniczego różni się, jest to wynik wpływu atmosfery, który jest niwelowany procedurą korekcji atmosferycznej. Przykładem takiego dopasowania jest ryc. 5, gdzie porównano charakterystyki spektralne ścierniska z dwóch poziomów pomiarowych.

Kolejnym elementem było wspomniane powyżej określenie reprezentatywności wyboru punktu do pozyskania danych. Jest to związane z wyborem odpowiedniego transektu do pomiarów, który reprezentowałby cały poligon. Wykonano pomiary w kilku transektach, a następnie uśredniono wartości, aby ograniczyć powstające błędy. Rycina 6. przedstawia wykresy z zależnościami dla czterech wskaźników roślinności. Na osi pionowej zostały zamieszczone dane z obrazu pobrane z punktu na obrazie lotniczym, gdzie pobierano dane terenowe. Są to miejsca, jakie w terenie uznano na najbardziej reprezentatywne. Na osi poziomej zaznaczono wartość średnią z 10 pomiarów z poligonu pobranych z obrazu lotniczego.



Wartości analizowanych wskaźników dla poszczególnych poligonów nie są takie same, co oznacza, że punkty nie były do końca reprezentatywne dla pól. Dla wskaźnika NDVI wartości średniej z pola i z punktu są najbardziej zgodne ( $R^2$  wyniósł 0,972), natomiast najmniej zgodne są wartości dla wskaźnika SAVI, gdzie  $R^2$  równe jest 0,951 (ryc. 6). Dla pozostałych wskaźników współczynnik zbliżony jest do 0,96. Tendencja regresji jest raczej przypadkowa i dla jednego wskaźnika (LAI) jest dodatnia, w pozostałych przypadkach ujemna.

Rycina 7 potwierdza wysoką jakość wykonanej korekcji atmosferycznej obrazu hiperspektralnego, gdyż współczynnik zmienności spektralnych współczynników odbicia z pomiaru terenowego i obrazu nie wykazują



Ryc. 7 Współczynnik zmienności spektralnych współczynników odbicia (%) z pomiaru terenowego i zobrazowania DAIS 7915 (Zagajewski i in., 2006)

Fig. 7. Variability index of reflectance derived from terrain and airborne DAIS 7915 measurement (Zagajewski et al, 2006)

większych różnic niż 1% (poza kanałami absorpcji pary wodnej).

Żadna z analizowanych form użytkowania terenu nie jest jednorodna i wybór reprezentatywnego miejsca jest trudny. Badanie zróżnicowania wartości w obrębie poligonów odbywało się przez analizowanie 10 wartości w obrębie poligonu i wartości średniej. W obrębie poligonów badano odchylenie standartowe od średniej (Tabela 1).

Brak jednolitości pomiarów, która wynika także z dokładności, jest jedną z przyczyn różnic w wartościach wskaźników. Dlatego należy zwrócić uwagę na to zagadnienie. W przypadku danych terenowych wykorzystane urządzenia pobierają dane z określonej wielkości powierzchni.

Na pułapie lotniczym wartości wskaźników zostały pobierane z obrazów, gdzie dokładność jest wyznaczona przez wielkość piksela, czyli 3 m. Z takiej powierzchni uśredniana jest wartość odbicia, a tym samym z tego obszaru wyliczona jest wartość wskaźnika. Na dokładność pomiarów na tym poziomie wpływa także korekcja

Tabela 1 Wartości odchylenia standartowego dla NDVI oraz współczynnika zmienności dla SAVI, LAI, fAPAR  
Table 1 Standard deviation of NDVI index and variability indices of SAVI, LAI, fAPAR

Użytkowanie terenu / Land use	Oznaczenie poligonu / Label	Odchyl. Stand. / St. Dev.	Współczynnik zmienności Variability index			
			NDVI	SAVI	LAI	fAPAR
Łąka Meadow	W1	0,01	10,51	51,40	12,10	12,68
	W4	0,01	12,93	53,74	12,10	12,10
	W5	0,01	22,66	42,04	12,10	12,10
	W8	0,02	35,96	59,38	10,42	10,42
	W11	0,02	21,14	105,25	18,68	18,68
	W15	0,03	39,13	50,33	16,88	16,88
	W18	0,02	32,88	76,24	27,09	27,09
	B3	0,04	61,00	126,83	28,90	28,90
Zboża Corn crops	W3	0,00	9,71	15,95	4,06	4,06
	W10	0,02	18,03	43,26	12,62	12,62
	W14	0,03	18,98	40,53	13,55	13,55
	W17	0,04	27,55	71,09	18,55	18,55
Ściernisko Stubble	W2	0,01	10,04	23,02	12,10	12,10
	W6	0,01	7,46	59,38	8,50	8,50
	W7	0,02	11,81	34,66	8,50	8,50
	W16	0,02	22,66	31,75	7,84	7,84
	B4	0,04	17,21	55,35	15,37	15,37
Koniczyna Clover crops	W12	0,02	14,27	36,59	11,83	11,83
	W13	0,03	42,61	173,83	44,06	44,06
Ziemniaki Potato crops	W9	0,03	15,06	61,30	16,16	16,16
Średnia / average		0,02	22,58	60,60	15,52	15,52

atmosferyczna. Jej celem było usunięcie zakłóceń, jakie wprowadza atmosfera. Poza tym pomiary może także zaburzać korekcja geometryczna. Zaburzenia wynikają także z błędnej lokalizacji pikseli w stosunku do rzeczywistego położenia w terenie.

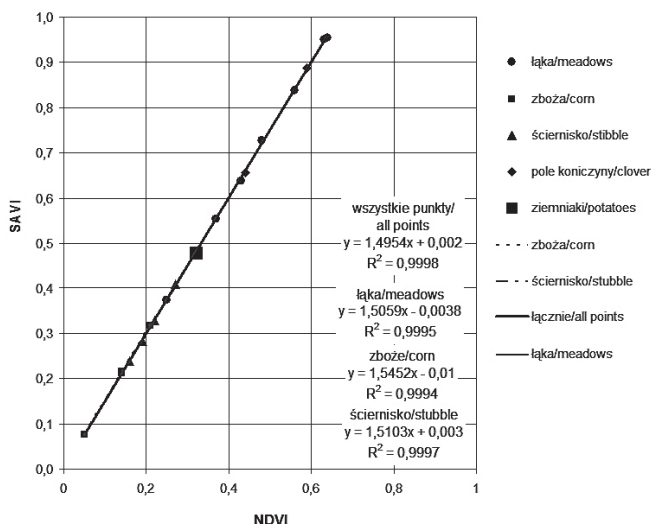
### Korelacje wskaźników uzyskanych z pomiarów naziemnych z pomiarami z pułapu lotniczego oraz dyskusja uzyskanych wyników w świetle literatury

#### Korelacje wskaźników z pomiarów naziemnych

W tej części pracy przedstawione zostały zależności między wskaźnikami obliczonymi na podstawie pomiarów terenowych wraz z omówieniem wyników w oparciu o literaturę. Analizy obejmowały: zależność między NDVI a jego modyfikacją SAVI; między NDVI a LAI oraz NDVI a fAPAR i LAI a fAPAR.

### Zależność między NDVI a SAVI na poziomie terenowym

Zależność między wskaźnikami: NDVI i SAVI na poziomie terenowym była analizowana po usunięciu dwóch punktów (skoszona łąka) odbiegających od innych pomiarów. Zaburzenia występują gdyż biomasa została zebrana, a stan kondycyjny był bardzo dobry. Zależność między wskaźnikami została opisana równaniem:  $y = 1,4954 \times x + 0,0002$  przy współczynniku determinacji wynoszącym  $R^2 = 0,99$  (ryc. 8). Wskazuje to na bardzo silną korelację. Korelacje są prawie jednakowo silne dla wszystkich form użytkowania terenu. Najściślejszy związek występuje dla ścierniska, przy równaniu regresji wynoszącym:  $y = 1,5103 \times x + 0,003$ , gdzie  $R^2$  wyniósł 0,9997. W przypadku łąki  $R^2$  wyniósł 0,9995, równanie regresji:  $y = 1,5059 \times x + 0,0038$ ; natomiast dla zboża współczynnik determinacji był najmniejszy i wyniósł 0,9995 przy równaniu regresji  $y = 1,5452 \times x + 0,01$ .



Ryc. 8 Zależność między NDVI i SAVI obliczona na podstawie pomiarów naziemnych

Fig. 8 Relationship between NDVI and SAVI from ground measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).

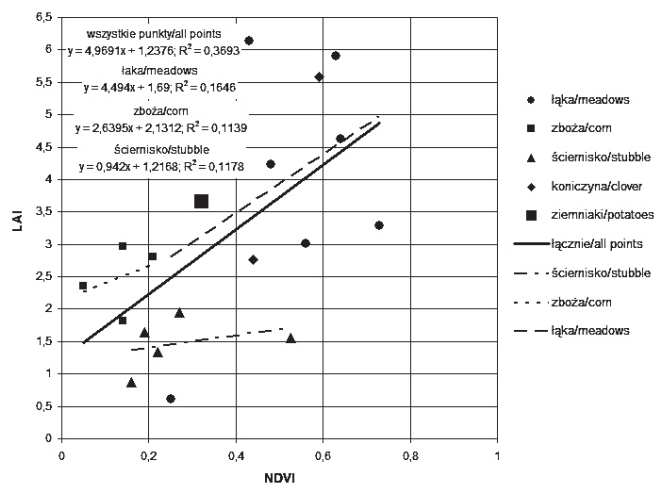
Duża siła związku wynika z tego, że SAVI jest modyfikacją NDVI. Relację potwierdzają badania różnych autorów (Haboudane i in., 2004; Epiphanyo, Huete, 1995; Chehbouni i in., 1994; Huete, Tucker, 1991). Dla większości badanych form pokrycia można było odczytać z wykresów, że wskaźnik SAVI rośnie 1,5 razy szybciej niż NDVI, czyli wartości wskaźnika są bardziej wrażliwe na zmiany pokrycia terenu przez rośliny w porównaniu z NDVI. Oznacza to, że uwzględnia on wpływ prześwitów glebowych na kondycję roślin, co zostało podkreślone w wielu opracowaniach. Istotne jest także, że wartości były pobierane za pomocą tego samego urządzenia, co sprawia, że wartości nie są zakłócone przez

przeliczenia wykonywane przez oprogramowanie różnych urządzeń.

### Zależność między NDVI a LAI na poziomie terenowym

Korelacja między NDVI a LAI na poziomie terenowym jest słaba (ryc. 9). Dla wszystkich form użytkowania terenu łącznie równanie regresji ma następującą postać:  $y = 4,969x + 1,238$  przy współczynniku determinacji równym 0,37. Dla form użytkowania terenu związki są zdecydowanie słabsze, nigdzie współczynnik determinacji nie przekroczył wartości 0,2, co oznacza, że korelacje można uznać za bardzo mało istotne.

Słaby związek wskaźników został zanotowany także przez Z. Bocheneka (1990). Według autora może to być spowodowane heterogenicznością badanych obiektów oraz wpływem człowieka (zbiór części biomasy podczas koszenia) lub zabiegów agrotechnicznych (utrzymywa-



Ryc. 9 Zależność między LAI i NDVI obliczona na podstawie pomiarów naziemnych

Fig. 9 Relationship between LAI and NDVI from ground measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).

nia wolnych przestrzeni pomiędzy redlinami ziemniaków). Dla danych terenowych pozyskanych w taki sam sposób, jak w tym opracowaniu, na terenie Tatr uzyskano wyższą wartość współczynnika determinacji –  $R^2 = 0,84$  (Jakomulska i in., 2003). Jednak w tym przypadku brane były pod uwagę naturalne formy pokrycia terenu.

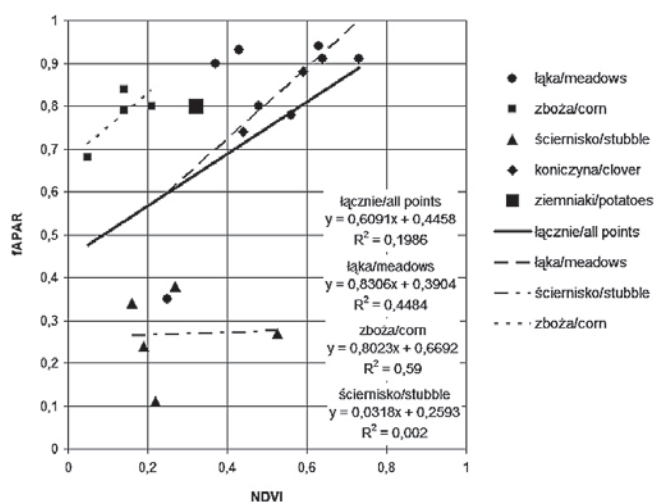
Według J. C. N. Epiphanyo i A. R. Huete (1995) z wskaźnikiem LAI lepiej koreluje się SAVI niż NDVI i na podstawie tego wskaźnika można z większym przybliżeniem obliczyć wartość LAI. Te same wnioski przedstawiono we wcześniejszej pracy polskiego autora Z. Bochenka (1990). Takie zależności są spowodowane sil-

nym związkiem LAI z odbiciem w podczerwieni, dlatego też wskaźnik ten lepiej koreluje się z SAVI niż NDVI.

#### Zależność między NDVI a fAPAR na poziomie terenowym

Biorąc pod uwagę wszystkie poligony pomiarowe, występuje słaba zależność między NDVI a fAPAR. Korelacja opisana jest równaniem regresji o wzorze:  $y = 0,6091 \times x + 0,4458$  i współczynniku determinacji równym 0,2 (ryc. 10). Najsilniejszy związek jest między wskaźnikami dla zbóż (gdzie  $R^2 = 0,59$ , a równanie regresji ma wzór  $y = 0,8023 \times x + 0,6692$ ), ponieważ gdy są one w dobrej kondycji, wysokie jest także zużycie promieniowania przez rośliny. Raczej słabą korelację zanotowano dla łąki ( $y = 0,8306 \times x + 0,3904$  a  $R^2 = 0,4484$ ).

Na niską wartość korelacji wpływa użycie innych sprzętów pomiarowych do pomiarów wskaźników (war-



Ryc. 10 Zależność między NDVI i fAPAR obliczona na podstawie pomiarów naziemnych

Fig. 10 Relationship between NDVI and fAPAR from ground measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).

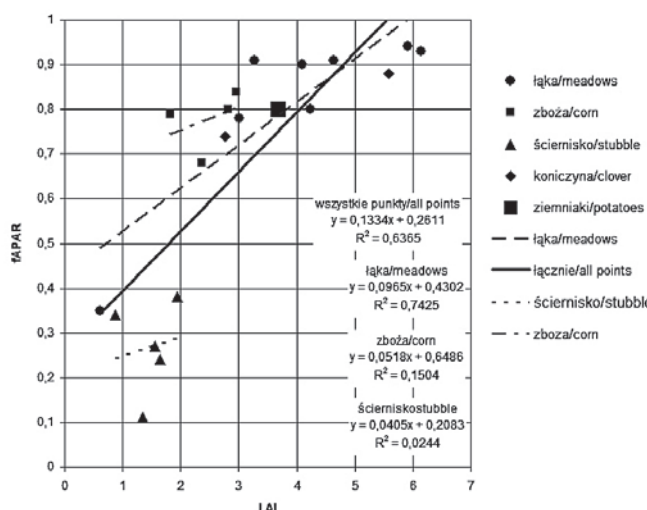
tości wskaźników są zakłócane przez konieczność przeliczeń wykonywanych przez oprogramowanie sprzętów). Związek na poziomie terenowym jest rzadko analizowany przez naukowców.

#### Zależność między fAPAR a LAI na poziomie terenowym

Siła zależności między wskaźnikami fAPAR i LAI jest zróżnicowana (ryc. 11). Dla wszystkich form użytkowania terenu łącznie zależność jest średnio silna,  $R^2$  wyniósł 0,64 przy równaniu regresji:  $y = 0,1334 \times x + 0,2611$ . Silny związek został zanotowany dla łąki, gdzie

współczynnik determinacji jest równy  $R^2 = 0,74$  przy równaniu regresji  $y = 0,0965 \times x + 0,4302$ . W tym przypadku łąki nie były koszone. Jeśli są one w dobrym stanie, wysoka jest wartość fAPAR, bo rośliny są w stanie wykorzystywać dużą ilość energii słonecznej na produkcję biomasy. Wysoka jest także wartość wskaźnika LAI, który mierzy ilość liści i zielonych części rośliny.

Dla pozostałych dwóch form użytkowania terenu (zbóż i ścierniska) nie zanotowano zależności między fAPAR a LAI. Ma na to wpływ wykorzystywanie różnej aparatury do pomiaru (koniczność innego rodzaju przeliczeń przy dwóch różnych urządzeniach). Drugim elementem zakłócającym relację jest ingerencja człowieka w produkcję biomasy. Gdy rośliny są koszone, tak jak w przypadku ścierniska, notowana jest dla nich bardzo niska wartość LAI, ponieważ biomasa jest likwidowana. Natomiast wartości fAPAR są nadal bardzo wysokie, ponieważ rośliny są w dobrej kondycji i efektywnie wykorzystują światło do procesu fotosyntezy.



Ryc. 11 Zależność między LAI i fAPAR obliczona na podstawie pomiarów naziemnych

Fig. 11 Relationship between LAI and fAPAR from ground measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).

W literaturze stwierdzono ścisły związek między analizowanymi wskaźnikami (di Belle i in., 2004; Myneni, Williams, 1994; van Leeuwen i in., 1997). Zależność między wskaźnikami pobranymi z terenu była analizowana przez W. J. D. van Leeuwen'a, A. R. Huete'a, C. L. Walthall'a, S. D. Prince'a, A. Bégué oraz J. L. Roujean'a (1997). Relacja była podobnie istotna, jak w przypadku danych analizowanych w tej pracy. Wykryto, że wskaźnik fAPAR jest bardziej wrażliwy na odbicie od gleby niż LAI, natomiast obydwa wskaźniki różnie reagują na zmiany w stadium wegetacji.



### Korelacje wskaźników obliczone w oparciu o pomiary dla pałapu lotniczego

Opisano tu zależności między wskaźnikami w kontekście literatury: NDVI a SAVI, NDVI a LAI, NDVI a fAPAR oraz LAI a fAPAR. Na podstawie równomierne rozmieszczonych wartości na terenie poligonów opisano zróżnicowanie wartości wskaźników w ich obrębie. Następnie za pomocą jednej wartości średniej porównano wzajemnie wartości tych wskaźników.

### Zmienność wartości wskaźników w obrębie badanych poligonów

Zróżnicowanie w obrębie analizowanych poligonów zostało opisane za pomocą współczynnika zmienności. Jego wartości wahają się, co wskazuje na różny stopień zróżnicowania w obrębie pól. Średnia zmienność dla wszystkich poligonów wyniosła 8,46%, co oznacza, że wartości na poligonach odbiegają od średniej o wartości poniżej 10%. Ogólnie można stwierdzić, że bardziej zmienne wskaźniki roślinne są dla zbóż, natomiast raczej jednorodnie dla łąki, co jest związane z dość homo-

Tabela 2 Współczynnik zmienności (%) w zależności od użytkowania terenu

Table 2 Variability index (%) values according to land use types

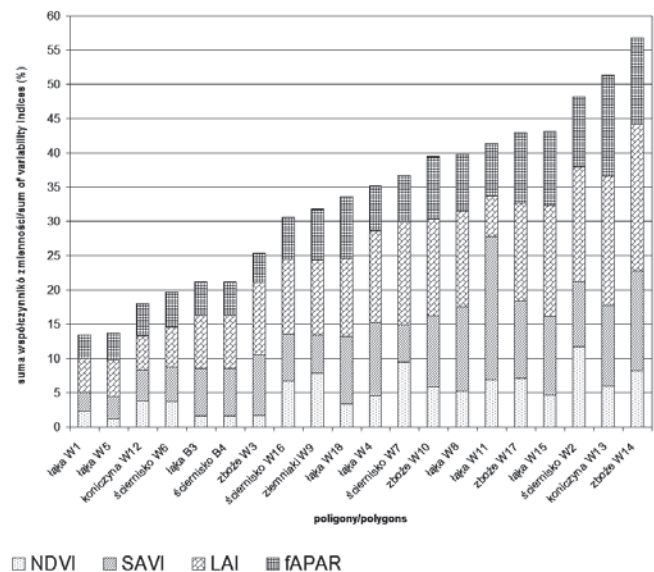
Użytkowanie terenu / Land use type	Oznaczenie poligonu / Label	Współczynnik zmienności / Variability index			
		NDVI	SAVI	LAI	fAPAR
Łąka / Meadow	W1	2,35	2,66	5,03	3,32
	W4	4,54	10,62	13,47	6,56
	W5	1,22	3,25	5,32	3,99
	W8	5,20	12,40	13,87	8,30
	W11	6,94	20,82	5,92	7,69
	W15	4,65	11,52	16,13	10,76
	W18	3,37	9,85	11,32	9,06
	B3	1,57	6,93	7,88	4,74
Zboża / Corn crops	W3	1,65	8,93	10,47	4,42
	W10	5,86	10,41	14,10	9,11
	W14	8,20	14,53	21,48	12,65
	W17	7,08	11,34	14,24	10,34
Ściernisko / Stubble	W2	11,71	9,44	16,84	10,16
	W6	3,77	4,94	5,86	5,14
	W7	9,48	5,36	15,13	6,77
	W16	6,69	6,78	11,03	6,10
	B4	1,57	6,93	7,88	4,74
Koniczyna / Clover crops	W12	3,82	4,47	5,04	4,62
	W13	5,99	11,76	18,86	14,81
Ziemniaki / Potato crops	W9	7,92	5,47	10,96	7,51
Średnia / average		5,18	8,92	11,54	7,54

geniczną powierzchnią, jaką stanowi ta forma użytkowania terenu.

Współczynniki zmienności dla poligonów mają inne wartości w zależności od obliczonego wskaźnika, użytkowania terenu oraz wielkości pola (Tabela 2). Im wyższa wartość współczynnika, tym większe zróżnicowanie w obrębie poligonów. Nie można stwierdzić, czy któryś z poligonów ma najbardziej zróżnicowane wartości.

Na ryc. 12 zsumowane zostały współczynniki zmienności dla wszystkich badanych poligonów. Najbardziej zmienne były: niewielkie pole owsa niezachwaszczonego (W14) i koniczyny różowej (W13), gdzie suma współczynników w obu przypadkach przekroczyła 50%. Powyżej 40% osiągnęły współczynniki dla ścierniska po pszenicy ze snopkami (W2), owsa niezachwaszczonego (W17), dużego zmiennego pola, użytkowanego jako niekoszona łąka (W11) i łąki skoszonej, z koniczyną i mleczem (W15). Najmniejsze zróżnicowanie (poniżej 15%) wykazują poligony reprezentujące łąkę (W1 i W5). Niewielką zmiennością cechują się także poligony ścierniska po pszenicy (W6) oraz koniczyny czerwonej (W12).

W porównaniu z pozostałymi wskaźnikami, NDVI cechuje się najmniej zróżnicowanymi wartościami – wa-



Ryc. 12 Suma współczynników zmienności badanych poligonów

Fig. 12 The sum of variability indices of analyzed polygons (łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble, koniczyna – clover and ziemniaki – potato crops).

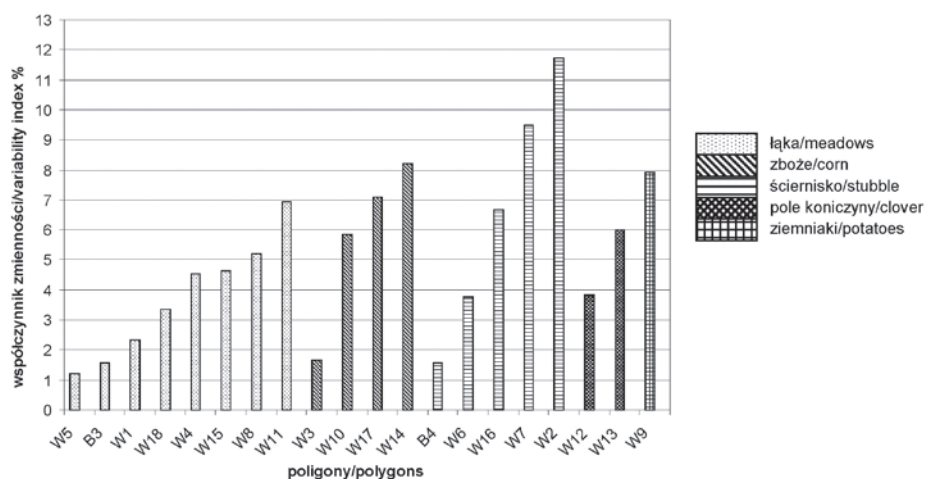
hają się one od 1,2% do 11,7% (ryc. 13). Najbardziej zróżnicowane są pola ziemniaków oraz ścierniska – średnio 6,6%. Wysokie zróżnicowanie NDVI dla ziemniaków może być związane z niejednorodną powierzchnią uprawy. Skaner rejestrując odbicie promieniowania z powierzchni 3 m<sup>2</sup>, pomimo występującego w terenie zróżnicowania pokrywy roślinnej, ujednotolica współczynnik odbicia. Wśród tych form użytkowania terenu wartości NDVI mają także największe rozproszenie (od 1,5 do 11,7%). Najbardziej zróżnicowane wartości NDVI ma

poligon ścierniska po pszenicy, czyli W2, na którym znajdują się chwasty i snopki zboża. Najmniej zmienny jest poligon łąki nieskoszonej, czyli W5.

Wartości wskaźnika SAVI są bardziej zróżnicowane niż ma to miejsce dla NDVI. Wartości współczynnika zmienności wahają się od 2,7% do 20,8% i występują dla tego samego typu użytkowania terenu – łąki (ryc. 14). W tej grupie są też najbardziej zróżnicowane wartości – średnio 9,7%. Maksymalna wartość występuje dla poligonu W11, czyli dla niekoszonej łąki, która cechuje się zróżnicowaną roślinnością (co do wielkości, zawartości suchych i zielonych źdźbeł oraz okwiatu). Najmniejszy współczynnik zmienności występuje dla łąki (poligon W1), jednak to pole zostało skoszone, ma równą wysokość i znacznie mniej zróżnicowany skład gatunkowy.

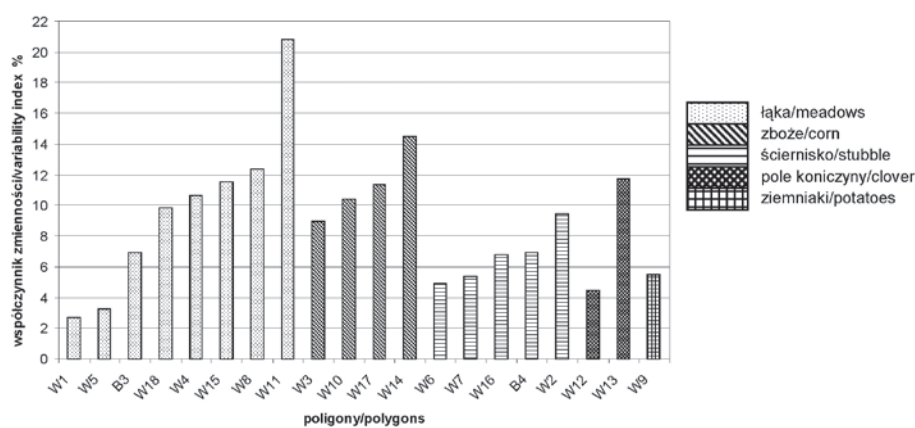
Wartości wskaźnika roślinności LAI cechują się podobnymi fluktuacjami dla poszczególnych upraw (ryc. 15). Wartości współczynnika zmienności wahają się od 5% do 21,5%. Średnio najbardziej zróżnicowane są poligony reprezentujące zboża (15%), a najmniej łąki (9,8%). Największe zróżnicowanie dotyczy owsa niezachwaszczonego – punktu W14, natomiast najmniejszy współczynnik zmienności obliczony został dla pola koniczyny czerwonej – punktu W12. Wskaźnik LAI cechuje się najwyższą zmiennością, ponieważ wykrywa w obrębie jednego poligonu zmiany w ilości liści, które nie są jednorodne, np. na polu ziemniaków, gdzie rośliny rosną w rzędach.

Wartości współczynnika zmienności dla wskaźnika fAPAR są najmniejsze i wahają się od 3,3% do 14,8% (ryc. 16). Najbardziej zmienne wartości fAPAR mają pola koniczyny (od 4,2% do 14,8%), natomiast najmniej ściernisko (od 4,7% do 10,1%). Poligon o najniższym współczynniku zmienności to pole koniczyny różowej – W13, najmniejszą wartość ma odróżniona łąka – W1.



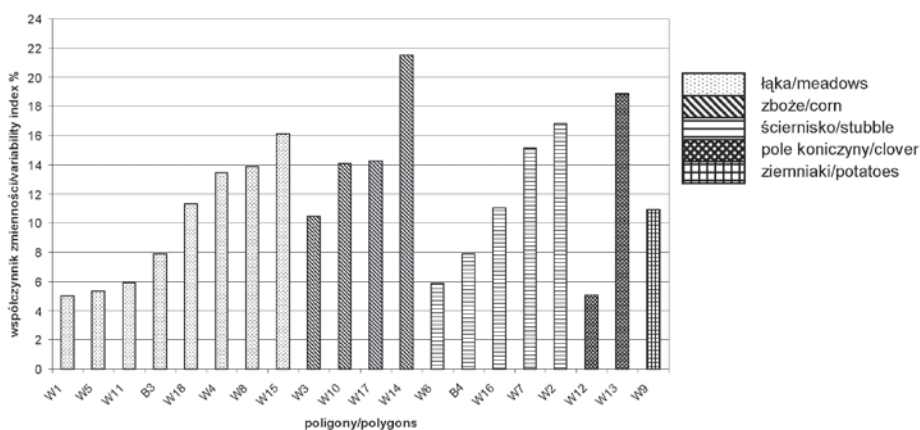
Ryc. 13 Wartości współczynnika zmienności dla NDVI w zależności od użytkowania

Fig. 13 Variability indices for NDVI depended on land use



Ryc. 14 Wartości współczynnika zmienności dla SAVI w zależności od użytkowania

Fig. 14 SAVI's variability indices measured according to land use types



Ryc. 15 Wartości współczynnika zmienności dla LAI w zależności od użytkowania

Fig. 15 LAI's variability indices measured according to land use types

nisko (od 4,7% do 10,1%). Poligon o najniższym współczynniku zmienności to pole koniczyny różowej – W13, najmniejszą wartość ma odróżniona łąka – W1.

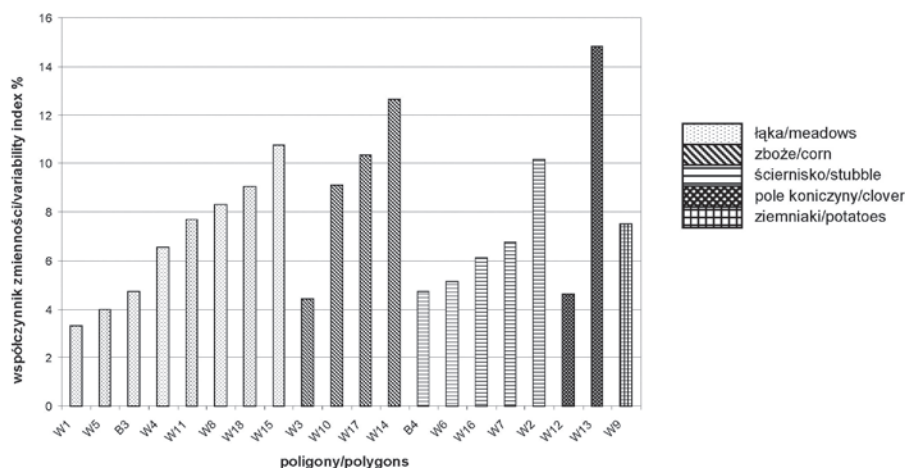
## Analiza zależności między wskaźnikami mierzonymi z poziomu lotniczego

Drugim etapem badań statystycznych było opracowanie zależności między wskaźnikami NDVI a SAVI, NDVI a LAI, NDVI a fAPAR oraz LAI a fAPAR mierzonymi z pułapu lotniczego oraz omówienie wyników w oparciu o literaturę.

### Zależność między NDVI a SAVI dla pułapu lotniczego

Rycina 17 ilustruje zależność wskaźników pobranych z obrazu jako średnia z 10 pomiarów w obrębie każdego poligonu. Wyliczone zostały korelacje dla wszystkich poligonów badawczych łącznie oraz dla wybranych form użytkowania terenu. Zgodnie z oczekiwaniami, zależności między wskaźnikami są bardzo silne, co obrazuje wysoki współczynnik determinacji. Wynika to z faktu, iż SAVI jest modyfikacją NDVI, która uwzględnia wpływ sygnału gleby na kondycję roślinności. Łącznie dla wszystkich poligonów wyniósł on 0,88, równanie regresji przyjęło natomiast postać:  $y = 675,52 \times x - 44,158$ . Przy analizie zależności między wskaźnikami według klas użytkowania ziemi wyraźnie widoczna jest silna zależność w przypadku łąki ( $y = 811,04 \times x - 114,08$ ), gdzie współczynnik determinacji wyniósł 0,89. Dość silny związek jest także dla zboża ( $y = 284,45 \times x + 65,293$ ;  $R^2 = 0,69$ ). Brak istotnych zależności został odnotowany dla ścierniska, gdzie współczynnik równa się  $R^2 = 0,06$ . Dla danych lotniczych wyraziste są związki dla form, gdzie wpływ gleby jest zmniejszony, czyli dla łąk i zbóż. W przypadku ścierniska NDVI nie uwzględnia wpływu gleby, natomiast SAVI tak.

Związek między tymi wskaźnikami był badany przez niewielu autorów. W badaniach tych udokumentowana została siła związku między NDVI a SAVI, a wskaźnik SAVI często jest używany zamiast NDVI, zwłaszcza tam, gdzie wpływ gleby jest bardzo znaczący (Giannico, 2007). SAVI jest bardziej wrażliwy na zmiany w odbiciu w bliskiej podczerwieni niż NDVI, natomiast NDVI jest bardziej czuły na zawartość chlorofilu (Haboudane i in., 2004). J. C. N. Epiphany i A. R. Huete (1995) potwierdzają, że zależność między dwoma wskaźnikami jest liniowa. Jednak wartości NDVI nie wykazują różnic w przypadku tych samych roślin występujących na różnych glebach, natomiast SAVI znacząco uwidocznia te różnice (Huete, Tucker, 1991). Z badań J. Q. A. Chehbouni'ego, A. R. Huete'a, Y. H. Kerr'a oraz S. Sorooshian'a (1994) wynika, że SAVI jest bardziej liniowo skorelowany z procentowym pokryciem terenu roślinnością niż NDVI, co oznacza, że NDVI jest bardziej zmienne. Dlatego zależność między wskaźnikami nie jest do końca ścisła.

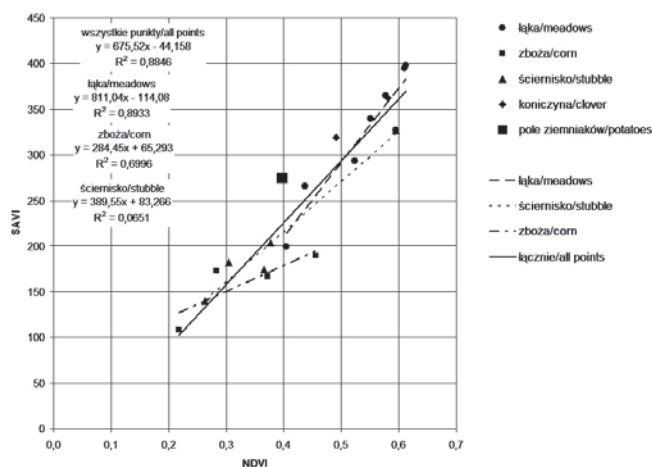


Ryc. 16 Wartości współczynnika zmienności dla fAPAR w zależności od użytkowania  
Fig. 16 fAPAR's variability indices measured according to land use types

### Zależność między NDVI a LAI dla pułapu lotniczego

Następnie analizowana była zależność między NDVI a LAI. Dla wszystkich poligonów łącznie wyliczone zostało następujące równanie regresji:  $y = 2078,8 \times x - 365,54$ , współczynnik determinacji natomiast wyniósł 0,87, co oznacza dużą siłę związku (ryc. 18). Dla poszczególnych form użytkowania terenu związki są bardziej zróżnicowane. W przypadku ścierniska, gdzie zanotowano najsilniejszy związek ( $R^2 = 0,96$ ), równanie regresji przyjmuje postać:  $y = 1595,7 \times x - 207,89$ . Zaobserwowano także silną zależność dla łąki, współczynnik determinacji wyniósł tu 0,88, a równanie przybrało postać:  $y = 2677 \times x - 674,55$ . W przypadku zbóż związek jest nieco słabszy opisany równaniem:  $y = 612,15 \times x + 65,446$ , przy współczynniku determinacji wynoszącym  $R^2 = 0,63$ .

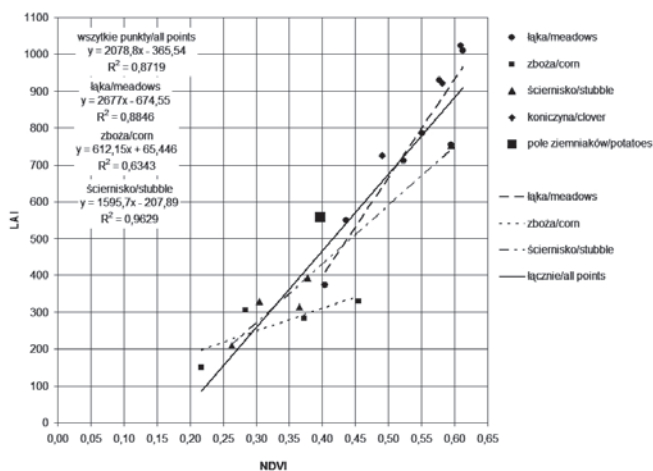
Wskaźnik NDVI analizuje struktury komórkowe i zawartość chlorofilu w liściach. Wraz ze zwiększaniem



Ryc. 17 Zależność między NDVI i SAVI według pomiarów z pułapu lotniczego

Fig. 17 Relationship between NDVI and SAVI according to airborne measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).





Ryc. 18 Zależność między LAI i NDVI według pomiarów z pułapu lotniczego

Fig. 18 Relationship between LAI and NDVI according to airborne measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).

się jego wartości, co wskazuje na dobrą kondycję roślin, wzrasta także intensywność fotosyntezy, a tym samym ilość biomasy. Badanie tego komponentu odbywa się za pomocą wskaźnika LAI, dlatego kolejną analizowaną zależnością jest relacja między NDVI a LAI.

Analizowaniem związku między tymi wskaźnikami zajmowało się wielu badaczy zagranicznych i polskich (Haboudane i in., 2004; di Belle i in. 2004; Dąbrowska-Zielińska, 2003; Bochenek, 1990; Ciołkosz, Dąbrowska-Zielińska, 1993; Turner i in., 1999; Elvidge, Chen, 1995; Soudani i in., 2006). Potwierdzono, że zależność między wskaźnikami zmienia się w zależności od pokrycia terenu przez rośliny. Relacja uznana została za liniową jedynie do wartości LAI = 3, powyżej którego LAI nadal rośnie, a NDVI jest ograniczane przez asymptotę (Carlson, Ripley, 1997; Epiphanio, Huete, 1995). Punkt ten może zmieniać się w zależności od rodzaju upraw i znajduje się między wartością LAI 2 a 4 oraz dla NDVI między 0,5 a 0,8 (Carlson, Ripley, 1997). Wskaźnik NDVI jest wrażliwy na zmiany w pokryciu, dopóki nie jest ono całkowite. Potem jego wzrost jest mniej dynamiczny (Dąbrowska-Zielińska, 2003).

Na podstawie analiz wykonanych przez innych autorów przy pomocy zdjęć hiperspektralnych dla obszaru Tatr stwierdzono także ścisłą zależność dla wszystkich form użytkowania terenu łącznie z wyjątkiem łąk i pól ziemniaków, z współczynnikiem determinacji równym 0,846 (Jakomulska i in. 2003; Wrzesień i in., 2005). W przypadku innych badań prowadzonych m.in. przez Bochenka (1990) w Polsce związek między wskaźnikami mierzonymi z poziomu satelitarnego określono jako ścisły, przy współczynniku korelacji równym 0,82. Ścisła relacja wynika z zależności między zawartością chlorofilu, jego aktywnością, która jest mierzona za pomocą NDVI oraz ilością liści, którą reprezentuje LAI.

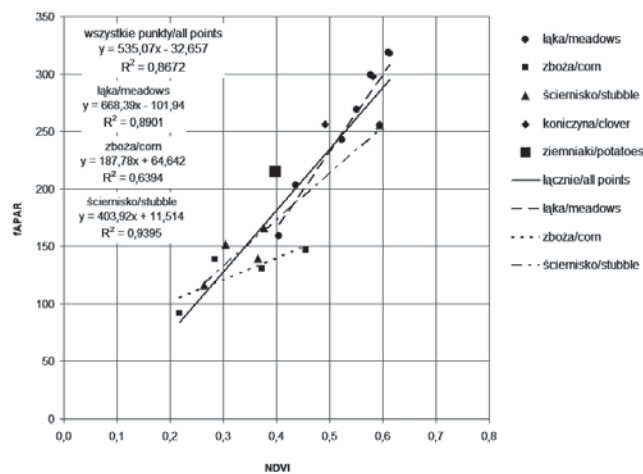
K. Dąbrowska-Zielińska (2005) zwraca uwagę, że rejestrowane wartości wskaźników zależą także od ro-

dzaju użytego sensora. W Polsce na terenie Tatr analizowane były także zmiany w wartościach w zależności od użytego sensora hiperspektralnego i zastosowanych przekształceń obrazu (Sobczak i in., 2005). Przeprowadzono badania relacji w zależności od innych czynników. Przykładowo, w zależności od rodzaju korekcji, jaka została wykonana na NDVI, siła związku nieco się zmienia w granicach  $R^2$  od 0,51 do 0,74 (Turner i in., 1999).

#### Zależność między NDVI a fAPAR dla pułapu lotniczego

Zależność między wskaźnikiem fAPAR a NDVI dla wszystkich poligonów opisana jest równaniem:  $y = 545,07 \times x - 32,657$  (ryc. 19), przy współczynniku determinacji wynoszącym  $R^2 = 0,87$ , co wskazuje na wysoką istotność korelacji. W przypadku poszczególnych form użytkowania terenu, najsilniejszy związek występuje dla ścierniska ( $y = 403,92 \times x + 11,514$ ,  $R^2 = 0,94$ ). Także dla łąki zależność między wskaźnikami jest silna. Równanie regresji dla tej formy wyrażone jest następująco:  $y = 668,39 \times x - 101,94$ , współczynnik determinacji wynosi  $R^2 = 0,89$ . Najmniej istotna zależność wystąpiła w przypadku zbóż ( $y = 187,78 \times x + 64,642$ ;  $R^2 = 0,64$ ). Pomiedzy wskaźnikami występuje ścisły związek, ponieważ w zależności od kondycji i stanu rozwojowego rośliny wykorzystują różną ilość światła. Jednak na NDVI wpływa także między innymi odbicie od gleby, natomiast fAPAR dość precyzyjnie mierzy ilość wykorzystywanego promieniowania.

Związek między NDVI a fAPAR analizowany był w wielu pracach (Epiphanio, Huete, 1995; di Belle i in., 2004; Myneni, Williams 1994; Ridao i in., 1998). Stwierdzono w nich, że między wskaźnikami istnieje zależność prawie liniowa (Epiphanio, Huete, 1995; Myneni Williams, 1994). Jest ona bardzo silna, w pracy Myneni i Williams zanotowano współczynnik determinacji rów-



Ryc. 19 Zależność między NDVI i fAPAR według pomiarów z pułapu lotniczego

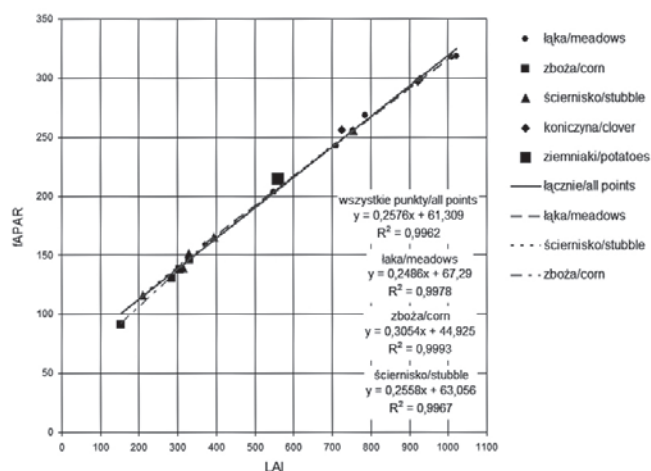
Fig. 19 Relationship between NDVI and fAPAR according to airborne measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).

ny 0,919, a w pracy C. M. di Bella, J. M. Paruelos, J. E. Becerra, C. Bacour i F. Baret (2004) – 0,78. Relacja jest zaburzona przez różne czynniki: wartość kąta, pod jakim sensor analizuje powierzchnię, kąta padania promieni słonecznych, co jest szczególnie widoczne w wyższych szerokościach geograficznych. Ponadto relacja jest zależna od homogeniczności pikseli, powierzchni liści, ich orientacji i optycznych właściwości (Myneni, Williams, 1994). Stwierdzili oni również, że wskaźnik NDVI jest zależny od homogeniczności piksela, natomiast na fAPAR nie wpływa jednorodność.

W pracy E. Ridao, J. R. Conde i I. Mínguez (1998) analizowano tę relację w zależności od wartości LAI, stanu rozwojowego roślin, stopnia pokrycia roślinnością, a tym samym wpływu gleby na wskaźniki. Zależność jest silniejsza dopóki LAI nie osiągnie wartości maksymalnej, potem jest ona nieco słabsza. Zmniejsza się wtedy ilość wykorzystywanego światła przez rośliny do produkcji biomasy, bo jej maksymalna wartość została już osiągnięta. Związek jest także wrażliwy na odbicie od atmosfery i gleby. Dlatego J. C. N. Epiphanyo i A. R. Huete (1995) stwierdzili, że z fAPAR lepiej koreluje się SAVI, czyli zmodyfikowany NDVI.

#### Zależność między fAPAR a LAI dla pałapu lotniczego

Zależność między LAI a fAPAR jest liniowa ze względu na równomierny wzrost obu wskaźników. Korelacja ta jest najsilniejsza spośród badanych zależności między wskaźnikami roślinności obliczonymi z obrazu hiperspektralnego (ryc. 20). Dla wszystkich poligonów obliczone równanie regresji opisane jest jako:  $y = 0,2576 \times x + 61,309$ , a współczynnik determinacji wynosi  $R^2 = 0,99$ , co oznacza wyjątkowo silny związek między badanymi wskaźnikami. Dla poszczególnych grup użytkowania terenu równania regresji wraz ze współczynnikami determinacji kształtują się następująco: dla łąki



Ryc. 20 Zależność między LAI i fAPAR według pomiarów z pałapu lotniczego

Fig. 20 Relationship between LAI and fAPAR according to airborne measurements (Wszystkie punkty means all points, łąka – meadows, zboże – corn, and ściernisko – stubble).

$y = 0,2486 \times x + 67,29$  przy  $R^2 = 0,9978$ ; dla zbóż  $y = 0,3054 \times x + 44,925$  przy  $R^2 = 0,9993$  oraz dla ścierniska  $y = 0,2558 \times x + 63,056$  przy  $R^2 = 0,9967$ .

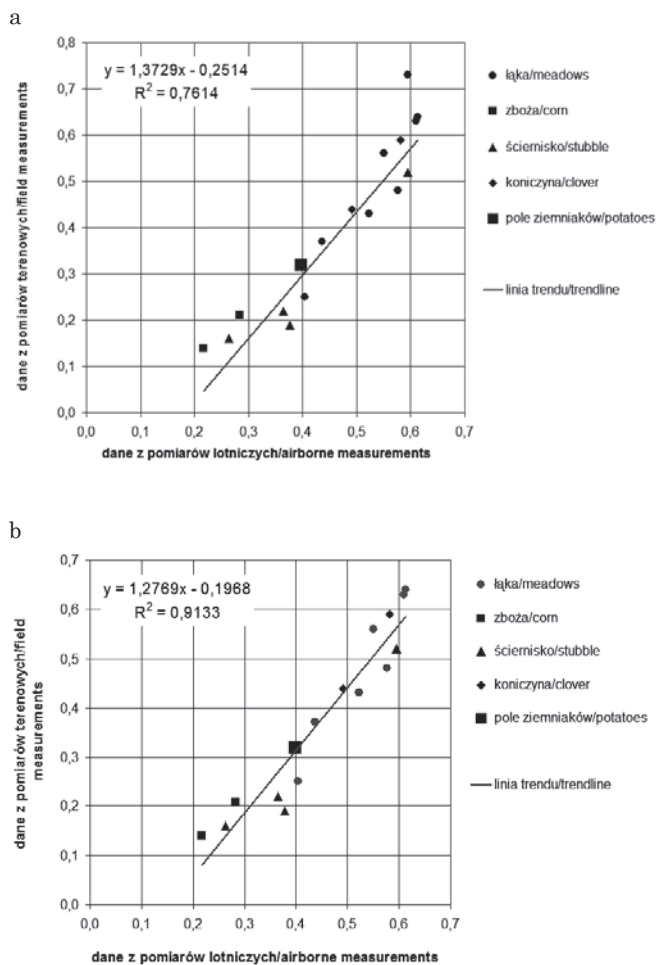
Korelacja jest bardzo silna, ponieważ wraz ze zwiększaniem się ilości pokrywy roślinnej mierzonej przez wskaźnik LAI, rośnie także ilość światła, jaką wykorzystują rośliny do procesu fotosyntezy (wartość reprezentowana przez wskaźnik fAPAR).

W polskich badaniach prowadzonych na podstawie zdjęć hiperspektralnych ze skanera DAIS 7915 stwierdzono ścisły związek między wskaźnikami przy współczynniku determinacji równym  $R^2 = 0,822$  (Jakomulska i in., 2003). R. B. Myneni i D. L. Williams stwierdzili, że, tak samo jak w przypadku relacji NDVI-LAI, zależność jest prawie liniowa dopóki LAI nie osiągnie wartości 3. Potem LAI rośnie, natomiast fAPAR dąży do asymptoty 95%. Relację zaburzają właściwości pokrywy roślinnej, gleby oraz atmosfery.

#### Korelacje wskaźników z poziomu naziemnego i pałapu lotniczego

Ostatnimi analizowanymi zależnościami są korelacje między danymi z obrazu hiperspektralnego, czyli średnimi z poligonów, i danymi z pomiarów naziemnych dla czterech wskaźników. Dane z pomiarów terenowych są w jednostkach właściwych dla danego wskaźnika, natomiast dane z pomiarów hiperspektralnych, poza NDVI, są w jednostkach wygenerowanych przez program ATCOR. W żadnej z analizowanych zależności korelacja nie jest bardzo ścisła, mimo iż analizowane są te same wskaźniki i ich wartości w tych samych miejscach i dla tych samych poligonów powinny być bardzo zbliżone do siebie. W przypadku NDVI równanie regresji dla wszystkich analizowanych punktów, opisane jest wzorem  $y = 1,3729 \times x - 0,2514$  (ryc. 21a). Korelacja jest dość silna, ponieważ współczynnik determinacji wyniósł 0,76. Dla SAVI korelacja jest silniejsza, współczynnik determinacji wynosi  $R^2 = 0,83$ , a równanie regresji  $y = 0,0027 \times x - 0,183$  (ryc. 22a). W przypadku wskaźnika LAI korelację opisuje równanie  $y = 0,0049x + 0,1632$ , a współczynnik determinacji osiąga  $R^2 = 0,52$  (ryc. 23a). Ostatnia z analizowanych korelacji dotyczy wskaźnika fAPAR (ryc. 24a). W porównaniu z pozostałymi zależnościami jest ona najsłabsza. Współczynnik determinacji osiąga jedynie wartość  $R^2 = 0,24$ . Opisuje je równanie  $y = 0,0018x + 0,2909$ .

Brak silnych korelacji jest spowodowany kilkoma przyczynami. Najważniejsza z nich to sposób przeprowadzenia pomiaru naziemnego. Jest on wykonywany na zróżnicowanych obiektach, a nie uśrednionych, jak jest to widoczne na obrazach lotniczych. Na poziomie naziemnym na niewielkim obszarze występuje obok siebie wiele zróżnicowanych obiektów (np. na terenie łąki: trawa w dobrej lub złej kondycji, odkryta gleba i inne rośliny), które pomiar lotniczy ujednocila. Na wartości wskaźników ma także wpływ termin ich pobierania. W przypadku danych lotniczych wszystkie wartości wskaźników z całego terenu pochodzą z krótkiego prze-



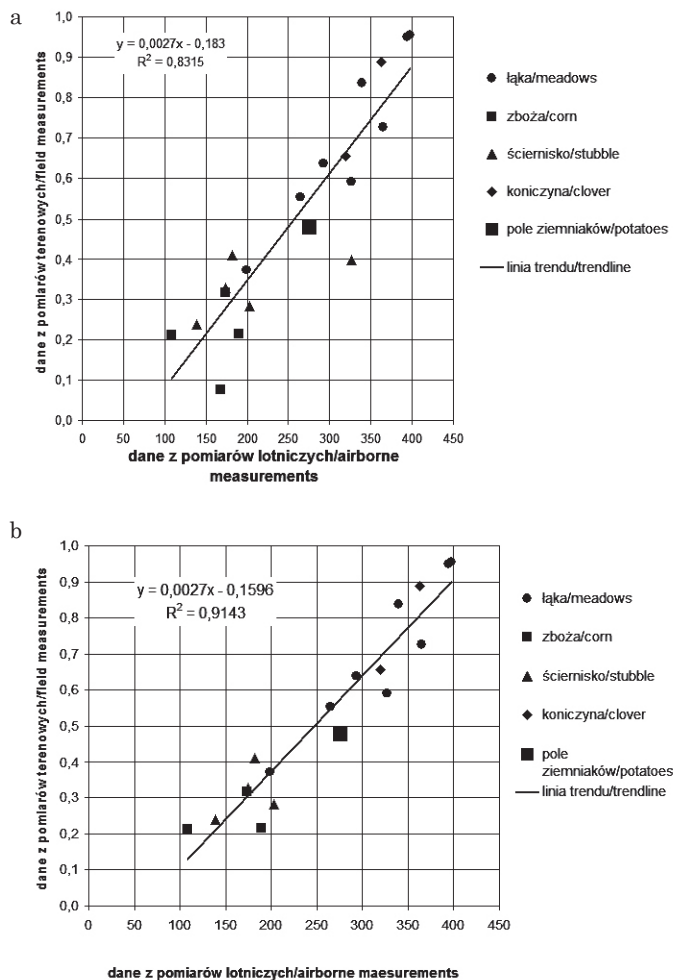
Ryc. 21 Zależność między wskaźnikiem NDVI pomierzonym z poziomu naziemnego i pułapu lotniczego dla: (a) wszystkich punktów pomiarowych oraz (b) po eliminacji punktów z dużym odchyleniem standardowym.

Fig. 21 Relationships between NDVI indices acquired from ground and airborne level of: (a) each test polygon and (b) after elimination points characterized by high value of standard deviation

działu czasu, który trwał kilka godzin, czyli tyle, ile sam nalot. Pomiarzy naziemne były wykonywane w przeciągu kilkunastu dni. Dlatego wartości wskaźników na części terenu, na której pomiary były wykonywane w innym czasie niż nalot, mogły ulec istotnym zmianom.

Silniejsza wartość korelacji wystąpiła dla wskaźników spektrometrycznych (NDVI i SAVI). Oznacza to, że wykorzystanie urządzeń AccuPAR oraz LAI-2000 Plant Canopy Analyzer może sprzyjać słabszym korelacjom ze względu na inny sposób tworzenia wskaźników.

Niskie wartości korelacji wystąpiły przy analizie związków dla wszystkich punktów pomiarowych. W związku z tym, że niektóre z pomiarów naziemnych dawały zakłócony wynik, zdecydowano się na wykluczenie kilku punktów, które są najbardziej wątpliwe. Dotyczy to np. zachwaszczonego pola czy koszonej łąki. Po takich modyfikacjach korelacje są zdecydowanie bardziej ściśle i nastąpił wyraźny wzrost współczynników determinacji. Dla wszystkich wskaźników wartości na

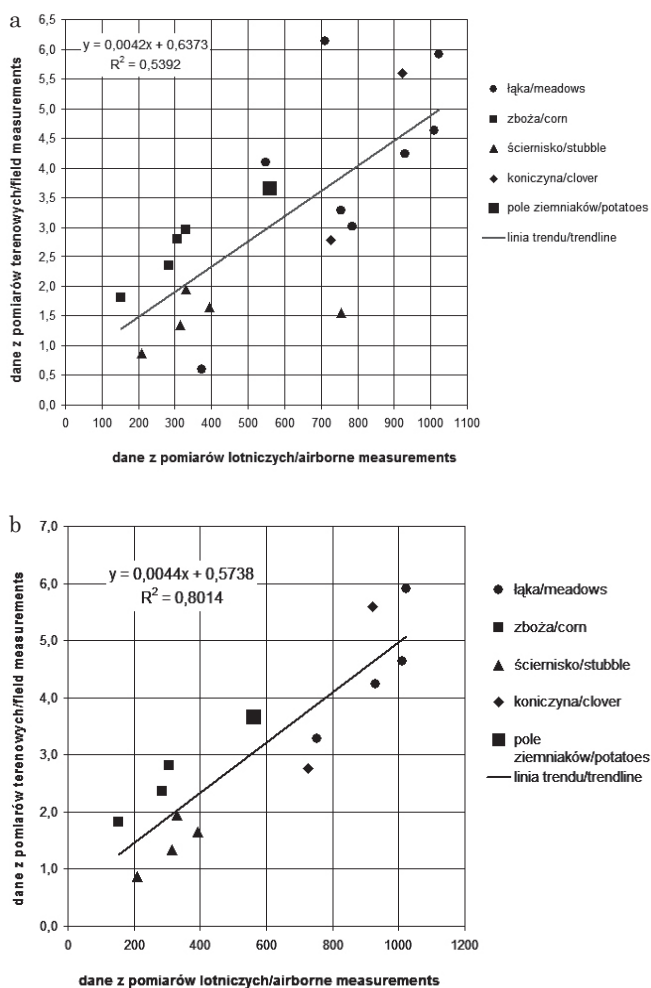


Ryc. 22 Zależność między wskaźnikiem SAVI pomierzonym z poziomu naziemnego i pułapu lotniczego dla: (a) wszystkich punktów pomiarowych oraz (b) po eliminacji punktów z dużym odchyleniem standardowym.

Fig. 22 Relationships between SAVI indices acquired from ground and airborne level of: (a) each test polygon and (b) after elimination points characterized by high value of standard deviation

wykresach zgromadzone są w jednej chmurze punktów, przez którą przebiegają proste regresji. Na kolejnych wykresach zamieszczone są poprawione korelacje z równaniami regresji. Dla NDVI równanie regresji opisane jest wzorem  $y = 1,2769 \times x - 0,1968$  przy współczynniku determinacji równym 0,913 (ryc. 21b). Korelacja jest bardzo silna, a wartość współczynnika determinacji wzrosła o 0,15. Dla wskaźnika SAVI korelacja jest także bardzo silna i ma wzór:  $y = 0,0027 \times x - 0,1596$ , przy  $R^2$  równym 0,9143 (ryc. 22b). Prosta regresji została jedynie nieznacznie przesunięta. W tych dwóch przypadkach równania regresji nie zmieniły się bardzo. Niewiele słabsze korelacje wystąpiły dla wskaźników, które nie były mierzone za pomocą spektrometru: LAI oraz fAPAR. W przypadku wskaźnika LAI równanie regresji ma wzór:  $y = 0,0044 \times x + 0,5738$  przy  $R^2 = 0,8014$  (ryc. 23b). Dla fAPAR współczynnik determinacji także wyniósł 0,8017, co oznacza jego wzrost aż o 0,57. Prosta regresji opisana jest wzorem:  $y = 0,0038 \times x - 0,2018$





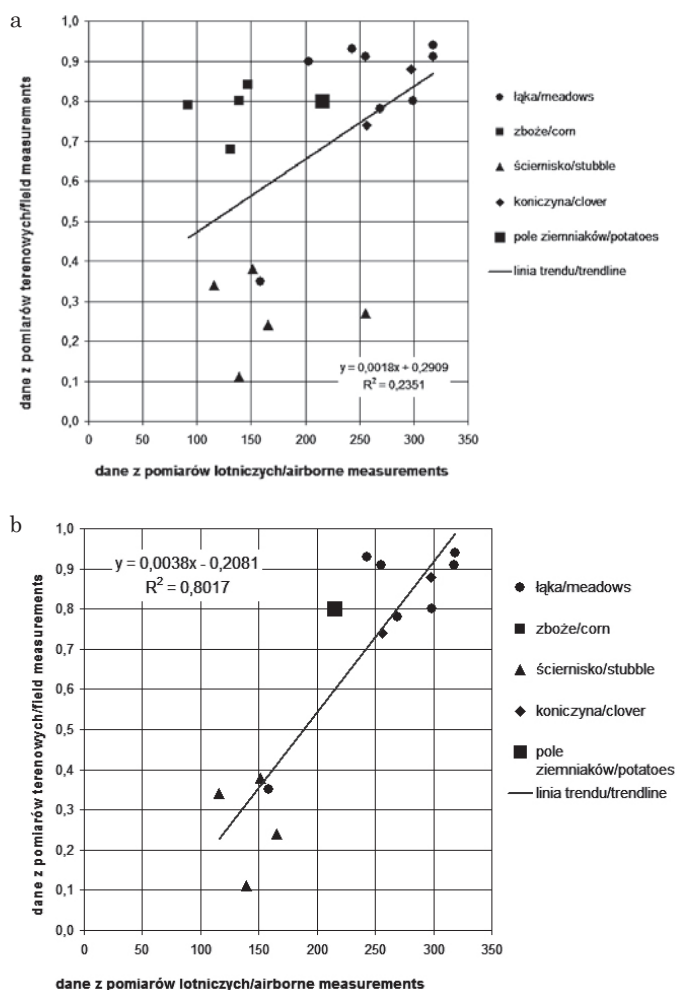
Ryc. 23 Zależność między wskaźnikiem LAI pomierzonym z poziomu naziemnego i pułapu lotniczego dla: (a) wszystkich punktów pomiarowych oraz (b) po eliminacji punktów z dużym odchyleniem standardowym.

Fig. 23 Relationships between LAI indices acquired from ground and airborne level of: (a) each test polygon and (b) after elimination points characterized by high value of standard deviation

(ryc. 24b). Jedynie w tym przypadku równanie regresji zostało wyraźnie zmodyfikowane, dlatego ta zależność jest najmniej wiarygodna. Na podstawie zmodyfikowanych relacji można stwierdzić, że wartości tego samego wskaźnika z pułapu lotniczego oraz poziomu naziemnego ściśle się ze sobą korelują. Dane z pomiarów naziemnych mogą służyć jako dane referencyjne dla danych lotniczych.

## Wnioski

Dane hiperspektralne są bardzo przydatne do analizy i wskaźniki obliczane na ich podstawie są precyzyjne i wiarygodne. Teledetekcyjne wskaźniki roślinności pozwalają na wszechstronną analizę kondycji i stanu pokrywy roślinnej, dlatego należy rozwijać badania związane z nimi. Zastosowana metodyka analizowania



Ryc. 24 Zależność między wskaźnikiem fAPAR pomierzonym z poziomu naziemnego i pułapu lotniczego dla: (a) wszystkich punktów pomiarowych oraz (b) po eliminacji punktów z dużym odchyleniem standardowym.

Fig. 24 Relationships between fAPAR indices acquired from ground and airborne level of: (a) each test polygon and (b) after elimination points characterized by high value of standard deviation

korelacji okazała się właściwa. Istotnym elementem pracy było przeanalizowanie związków przy podziale na formy użytkowania terenu. Pozwala to dokładniej wyjaśnić zależności między wskaźnikami w zależności od pokrycia terenu.

Zagadnienia poruszone w pracy wymagają dalszych badań. Należałoby zwiększyć ilość pomiarów terenowych przy odpowiednio dobranych transektach pomiarowych. Jest to istotne przy otrzymywaniu równań regresji, które służą do przekształcania map. Należy także przeprowadzić inne analizy statystyczne zależności między wskaźnikami.

## Podsumowanie

Dane hiperspektralne w porównaniu z wielospektralnymi technikami rejestrują widmo elektromagne-

tyczne w wąskich zakresach, dając większe możliwości tworzenia specjalistycznych wskaźników roślinności, które pozwalają na bardzo szczegółowe analizy oceny kondycji roślin, stanu rozwojowego oraz prognozowania plonów. Przeanalizowane zależności między następującymi wskaźnikami: *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Leaf Area Index* (LAI) oraz frakcją wskaźnika *Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (fAPAR), potwierdziły, że zróżnicowanie stanu roślinności w obrębie poligonów jest niewielkie, są one raczej homogeniczne i charakteryzują się wartościami wskazującymi na optymalny rozwój roślinności.

W większości przypadków daje się potwierdzić korelacjami prawidłowość, że im lepszy stan aparatu fotosyntetycznego (mierzonego NDVI oraz SAVI), tym jest większa akumulacja energii przez rośliny (fAPAR), co przekłada się na produkcję biomasy (LAI). Element ten pozwala na podstawie jednego wskaźnika wnioskować o drugim i tworzyć modele prognostyczne. Tym bardziej, że dane terenowe umożliwiają w sposób statystycznie sprawdzalny weryfikować poprawność danych lotniczych. Pozwala to ekstrapolować analizy na duże powierzchnie terenu.

Szczegółowe analizy wykazały, iż wskaźnik SAVI bardziej różnicuje badane obiekty, a jego zależność między NDVI jest liniowa o ścisłym związku, szczególnie w przypadku łąk i zbóż. Bardzo silną korelację zanotowano dla zależności mierzonej z poziomu terenowego.

Najsilniejsza relacja zanotowana dla fAPAR i LAI, potwierdza to, iż większość energii z zakresu fotosyntezy jest wykorzystywana na produkcję biomasy. Szczególnie to widać dla bardziej naturalnych form pokrycia terenu, np. łąk.

Bardzo istotnym elementem badań jest fakt, iż na relacje między wskaźnikami ma wpływ wiele czynników, np. sposób użytkowania terenu, parametry sensora, właściwości pokrywy roślinnej. Często spotykanym zaburzeniem mierzonych korelacji były zabiegi agrotechniczne, np. łąka w optymalnym okresie swojego rozwoju jest koszona, co znacząco ogranicza biomasę, mimo, iż pozostałe parametry mierzonej kondycji są dobre (fAPAR, NDVI, SAVI). Innym przykładem mogą być ziemniaki, które w optimum swojego rozwoju charakteryzują się dużymi prześwitami gleby, co wyraźnie jest obserwowalne w pomiarze NDVI, element tego zaburzenia może być ograniczony wykonaniem pomiaru SAVI.

Przeprowadzono analizy wartości tego samego teledetekcyjnego wskaźnika roślinności pozyskanego z dwóch poziomów. Wykazano, iż zależności między wartościami z różnych poziomów nie są takie ścisłe, jak można by się spodziewać (gdyż pomiar wykonywany jest na tym samym obszarze i mierzy ten sam element). Wynika to z kilku faktów, pierwszym jest stosowanie innych metod badawczych, które uśredniają wpływy poszczególnych elementów środowiska (obecność kamieni, wody, prześwitów gleby). Poza tym sygnał lotniczy jest zbierany z relatywnie dużych powierzchni

(9 m<sup>2</sup>), a w przypadku pomiarów naziemnych co najwyżej 1 m<sup>2</sup> (pomiar AccuPAR). Bardziej ścisłą zależność zanotowano dla wskaźników spektrometrycznych – NDVI i SAVI. Najsłabsza korelacja wystąpiła dla wskaźnika fAPAR.

## Literatura

- AccuPAR. Model PAR-80. *Operator's Manual Version 3.1*, 1999. Decagon Devices, Inc., Pullman.
- Adamczyk B., Maciaszek W., Januszek K., 1973, Gleby gromady Szymbark i jej wartość użytkowa. [w:] Gleby i zbiorowiska leśne okolic Szymbarku. L. Starkel [red.], *Dokumentacja Geograficzna*, nr 1, s. 15–66.
- Adamczyk J., Będkowski K., 2005, *Metody cyfrowe w teledetekcji*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Bochenek W., 2003, Zmiany w strukturze opadów atmosferycznych na Stacji Naukowej IGiPZ PAN (Stacji Bazowej ZMŚP) w Szymbarku w latach 1968–2001. *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie i monitoring geosystemów ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk ekstremalnych*. W. Bochenek, E. Gil (red.), 2003, Biblioteka Monitoringu Środowiska, s. 114–122.
- Bochenek W., 2004, Mechanizm krążenia wody na pogórskim stoku fliszowym. [w:] *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Funkcjonowanie i monitoring geosystemów w warunkach narastającej antropopresji*, M. Kejna, J. Uscka (red.). Biblioteka Monitoringu Środowiska, s. 199–207.
- Bochenek W., 2005, Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na przewodność elektrolityczną roztworów wody opadowej w zlewni Bystrzanki w latach 1995–2004. M. Józwiak, A. Kowalkowski [red.], *Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, z.6/05. Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce, s. 49–58.
- Bochenek W., 2006, Stacja Bazowa ZMŚP w Szymbarku. [w:] *Stan, przemiany i funkcjonowanie geosystemów Polski w latach 1994–2004 na podstawie Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego*, Inspekcja Ochrony Środowiska, Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa.
- Bochenek W., Gil E. 2005, Wpływ warunków meteorologicznych i hydrologicznych na wielkość substancji biogennej odprowadzanych ze zlewni Bystrzanki w latach 1995–2003. [w:] A. Kostrzewski & R. Kolander [red.], *Funkcjonowanie geosystemów Polski w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropopresji*, s. 85–97. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Poznań, 2005. UAM Poznań, GIOŚ Warszawa.
- Bochenek Z., 1990, Wykorzystanie zdjęć satelitarnych AVHRR NOAA do określania stanu użytków rolnych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, t. 37, nr 1–2(84–85), 49–61.
- Broge, N.H., Leblanc, E., 2000, Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, t. 76, nr 2, 156–172.
- Carlson T. N., Ripley D. A., 1997, On the Relation between NDVI, Fractional Vegetation Cover and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, nr 46, 241–252.
- Chaurasia S., Bhattacharya B. K., Dadhwal V. K., Parihar J. S., 2006, Field-scale Leaf Area Index estimation using IRS-1D LISS-III data. *International Journal of Remote Sensing*, t. 27, nr 3–4, 637–644.
- Chen X., Vierling L., Deering D., Conley A., 2005, Monitoring boreal forest leaf index across a Siberian burn chronose-

- quence: a MODIS validation study. *International Journal of Remote Sensing*, t. 26, nr 24, 5433–5451.
- Ciołkosz A., Dąbrowska-Zielińska, 1993, Zastosowanie zdjęć satelitarnych do szacowania wielkości produkcji z trwałych użytków zielonych w Polsce. *Fotointerpretacja w Geografii*, nr 23, 53–67.
- Ciołkosz A., Miszalski J., Olędzki J. R., 1999, *Interpretacja zdjęć lotniczych*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Coops N. C., Waring R. H., Landsberg J. J., 2001, Estimation of potential forest productivity across the Oregon transect using satellite data and monthly weather records. *International Journal of Remote Sensing*, t. 22, nr 18, 3797–3812.
- Curran, P.J., Windham, W.R., H.L. Gholz, 1995, Exploring the Relationship Between Reflectance Red Edge and Chlorophyll Concentration in Slash Pine Leaves. *Tree Physiology*, nr 15, 203–206.
- Daughtry, C.S.T., 2001, Discriminating Crop Residues from Soil by Short-Wave Infrared Reflectance, *Agronomy Journal*, 93:125–131.
- Davi H., Soudani K., Deckx T., Dufrene E., Le Dantec V., FranCois C., 2006, Estimation of forest leaf area from SPOT imaginary using NDVI distribution over forest stands. *International Journal of Remote Sensing*, t. 27, nr 5, 885–902.
- Dąbrowska-Zielińska K., Kowalik W., Gruszczynska M., Hościło A., 2003, Wskaźniki roślinne dla obszaru bagien Biebrzańskich wyprowadzone ze zdjęć satelitarnych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, nr 13B, 349–359.
- Di Bella C. M., Paruelos J. M., Becerra J. E., Bacour C., Baret F., 2004, Effect of senescent leaves on NDVI-based estimates of fAPAR: experimental and modelling evidences. *International Journal of Remote Sensing*, t. 25, nr 23, 5415–5427.
- DLR's DAIS 7915 Home Page, dokument elektroniczny w formacie HTML, <http://www.op.dlr.de/DAIS/>, 20.04.2008.
- Dorigo W. A., Zurita-Milla R., de Wit A. J. W., Brazile J., Singh R., Schaepman M. E., 2006, A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.
- Dyer M. I., Turner C. L., Seastedt T. R., 1991, Mowing and fertilization effects on productivity and spectral reflectance in Bromus Inermis plots. *Ecological Applications*, t. 1, nr 4, 443–452.
- Elvidge Ch. D., Chen Z., 1995, Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, nr 54, 38–48.
- Epiphanio J. C. N., Huete A. R., 1995, Dependence of NDVI and SAVI on Sun/Sensor Geometry and Its Effect on fAPAR Relationships in Alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, nr 51, 351–360.
- Fennessy M. J., Xue Y., 1997, Impact of USGS vegetation map on GCM simulations over the United States. *Ecological Applications*, t. 7, nr 1, 22–33.
- FieldSpec UV/VNIR HandHeld Spectroradiometer*. User's Guide, 2002, Analytical Spectral Devices, Inc., Boulder.
- 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*, 56: 104–117.
- Friedl M. A., Michaelson J., Davis F. W., Walker H., Schimel D. S., 1994, Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, t. 15, nr 7, 1401–1420.
- Gabban A., San-Miguel-Ayanz J., Viegas D. X., 2006, On the suitability of use normalized difference vegetation index for forest fire risk assessment. *International Journal of Remote Sensing*, t. 27, nr 22, 5095–5102.
- Gamon J. A., Filed Ch. B., Goulden M. L., Griffin K. L., Hartely A. E., Joel G., Peñuelas J., Valentini R., 1995, Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, t. 5, nr 1, 28–41.
- Gamon, J. A., Peñuelas J., Field C. B., 1992, A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency, *Remote Sensing of Environment*, nr 41, 35–44.
- Giannico C., 2007, Remote sensing of vegetation in the calibration region. *Acta Astronautica*, nr 60, s. 119–131.
- Gil E., 1979, Typologia i ocena środowiska naturalnego okolic Szymbarku. *Dokumentacja Geograficzna*, nr 5, s.84.
- Gil E., 1999, Obieg wody i splukiwanie na fliszowych stokach użytkowanych rolniczo w latach 1980–1990 (wyniki badań przeprowadzonych na poletkach doświadczalnych na Stacji Naukowej IGiPZ PAN w Szymbarku). *Zeszyty IGiPZ PAN*, nr 60, s. 78.
- Gil E., Bochenek W., 1998, Raport Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk w Szymbarku za lata hydrologiczne 1994–1997. W: *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stan geosystemów Polski w latach 1994–1997*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 1998, s. 183–222.
- Gilbert M. A., Gonzáles-Piqueras J., Garcia-Haro F. J., Meilá J., 2002, A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, nr 82, 303–310.
- 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*, nr 143, 286–292.
- 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* 75: 272–281.
- Goward S. N., Waring R. H., Dye D. G., Yang J., 1994, Ecological remote sensing at OTTER: satellite macroscale observations. *Ecological Applications*, t. 4, nr 2, 322–343.
- Griffith J. A., Martinko E. A., Whistler J. L., Price K. P., 2002, Interrelationships among landscapes, NDVI, and stream water quality in the U.S. Central Plains. *Ecological Applications*, t. 12, nr 6, 1702–1718.
- Guerschman J. P., Paruelo J. M., Burke I. C., 2003, Land use impact on the Normalized Difference Vegetation Index in Temperate Argentina. *Ecological Applications*, t. 13, nr 3, 616–628.
- Haboudane D., Miller J. R., Pattey E., Zarco-Tajeda P. J., Strachan I. B., 2004, Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, nr 90, 337–352.
- Hall F. G., Shimabukuro Y. E., Huemmrich K. F., 1995, Remote sensing of forest biophysical structure using mixture decomposition and geometric reflectance models. *Ecological Applications*, t. 5, nr 4, 993–1013.
- Hoffmann C. M., Blomberg M., 2004, Estimation of Leaf Area Index of Beta vulgaris L. Based on Optical Remote Sensing Data. *Journal Agronomy and Crop Science*, nr 190, 197–204.



- Huete A. R., 1988, A soil vegetation adjusted index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, nr 25, 295–309.
- Huete A. R., Tucker C. J., 1991, Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, t. 12, nr 6, 1223–1242.
- Jakomulska A., Zagajewski B., Sobczak M., 2003, Field Remote Sensing techniques for mountains vegetation investigation. *3<sup>rd</sup> EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Herrsching.
- Jensen J. R., 1983, Biophysical Remote sensing – Review Article. *Annals of the Association of American Geographers*, t. 73, nr 1, 111–132.
- Kammerer T. A., 1996, Soil impact on satellite based vegetation monitoring in Sahelian Mali. *Geogr. Ann.*, t 78 (A), nr 4, 247–259.
- Kaufman, Y.J., D. Tanre, 1996, Strategy for Direct and Indirect Methods for Correcting the Aerosol Effect on Remote Sensing: from AVHRR to EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, nr 55, 65–79.
- Kim, M.S., Daughtry, C.S.T., Chapelle, E.W., McMurtrey, J.E., 1994, The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (APAR). W: *Proceedings of ISPRS'94*, Val d'Isere, France, 299–306.
- Kotarba A., 1970, Charakterystyka rzeźby okolic Szymbarku. W: *Badania fizyczno-geograficzne otoczenia Stacji Naukowo-Badawczej Instytutu Geografii PAN w Szymbarku*. Pr. zb. pod red. L. Starkla. *Dokumentacja Geogr.*, z.3.
- Kozłowska T., Dąbrowska-Zielińska K., Ostrowski J., Ciołkosz A., Stankiewicz K., Bochenek Z., 2000, *Szacowanie plonów z użytków zielonych w skali regionalnej z zastosowaniem teledetekcji satelitarnej*. Wyd. IMUZ, Falenty.
- LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual*, 1992. LI-COR, Inc., Lincoln.
- Law B. E., Waring R. H., 1994, Combining remote sensing and climatic data to estimate net primary production across Oregon. *Ecological Applications*, t. 4, nr 4, 717–728.
- Lewiński S., Gruszczynska M., 1992, Badanie zależności między temperaturą radiacyjną mierzoną z pułapu lotniczego i satelitarnego a LAI, biomasa i wilgotnością użytków zielonych. *Prace Instytutu Geodezji i Kartografii*, t. 39, nr 1(87), 127–133.
- Morrow N., Friedl M. A., 1998, Modeling biophysical controls on land surface temperature and reflectance in grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology*, nr 92, 147–161.
- Myniemi R. B., Williams L. D., 1994, On the Relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, nr 49, 200–211.
- Niemirowska J., 1970, Charakterystyka hydrograficzna zlewni Bystrzanki i Bielanki. *Dokumentacja Geogr.* Z.3.
- Nowa Encyklopedia Powszechna*, 2001, tom 6, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Ołędzki J. R., 2007, Regiony geograficzne Polski. *Teledetekcja środowiska*, T.38, Klub Teledetekcji Środowiska PTG, Warszawa.
- Paruelo J. M., Epstein H. E., Lauenroth W. K., Burke I. C., 1997, ANPP estimates from NDVI for Central Grassland Region of the United States. *Ecology*, t. 78, nr 3, 953–958.
- Peñuelas J., Baret F., Filella I., 1995a, Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance. *Photosynthetica*, nr 31, 221–230.
- Peñuelas J., Filella I., Biel C., Serrano R., Save R., 1995, The Reflectance at the 950–970 Region as an Indicator of Plant Water Status. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1887–1905.
- Peñuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L., Save R., 1995b, The Reflectance at the 950–970 Region as an Indicator of Plant Water Status. *International Journal of Remote Sensing*, nr 14, 1887–1905.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshain S., 1994, A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, nr 48, 119–126.
- Ridao E., Conde J. R., Mínguez M. I., 1998, Estimating fAPAR from Nine Vegetation Indices for Irrigated and Nonirrigated Faba Bean and Semileafless Pea Canopies. *Remote Sensing of Environment*, nr 66, 87–100.
- Rondeaux G., Steven M., Baret F., 1996, Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, nr 55, 95–107.
- Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering. 1973, *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. Prog. Rep. RSC 1978-1, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, nr E73-106393, 93 (NTIS No. E73-106393).
- Ruecker G. R., Dorigo W. A., Lamers J., Ibragimov N., Kienzler K., Strunz G., Mueller A., Vlek P. L. G., 2008 (w druku), *Regional estimation of leaf chlorophyll in cotton in Uzbekistan by upscaling a vegetation index from plant scale to proba-1/Chris hyperspectral satellite data*.
- Sari M., Sonmez N. K., Kurklu A., 2005, Determination of seasonal variations in solar energy utilization by the leaves of Washington navel orange trees (*Citrus sinensis* L. Osbeck). *International Journal of Remote Sensing*, t. 26, nr 15, 3295–3307.
- Scurlock J. M. O., Asner G. P., Gower S T., 2001, *Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932–2000*. Oak Ridge National Laboratory, UT-BATTELLE.
- Serrano L., Gamon J. A., Peñuelas J., 2000, Estimation of canopy photosynthetic and nonphotosynthetic components from spectral transmittance. *Ecology*, t. 81, nr 11, 3149–3162.
- Smith M. L., Ollinger S. V., Martin M. E., Aber J. D., Hallett R. A., Goodale C. L., 2002, Direct estimation of above-ground forest productivity through hyperspectral remote sensing of canopy nitrogen. *Ecological Applications*, t. 12, nr 5, 1286–1302.
- 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. *New quality of Environmental Studies*, EARSeL Imaging Spectroscopy and Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- Soudani K., François Ch., la Maire G., Le Dantec V., Dufrêne E., 2006, Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM + data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands. *Remote Sensing of Environment*, nr 102, 161–175.
- Spanner M., Johnson L., Miller J., McCreight R., Freemantle J., Runyon J., Gong P., 1994, Remote sensing of seasonal Leaf Area Index across the Oregon transect. *Ecological Applications*, t. 4, nr 2, 258–271.
- Starkel L., 1973, Cel i zakres studiów nad środowiskiem geograficznym okolic Szymbarku. *Dokumentacja Geogr.*, z.1, s. 7–14.
- Turner D. P., Cohen W. B., Kennedy R. E., Fassnecht K S., Beriggs J. M., 1999, Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across Three Temperate Zone Sites. *Remote Sensing of Environment*, nr 70, 52–68.
- Ustin S. L., Roberts D. A., Gamon J. A., Asner G. P., Green R. O., 2004, Using Imaging Spectroscopy to Study Ecosys-

- tem Processes and Properties. *Bioscience*, t. 54, nr 6, 523–534.
- van Leeuwen W. J. D., Huete A. R., Walthall C. L., Prince S. D., Bégué A., Roujean J. L., 1997, Deconvolution of remotely sensed spectral mixtures for retrieval of LAI, fAPAR and soil brightness. *Journal of Hydrology*, nr 188–189, 697–724.
- Wang J., Rich P. M., Price K. P., Kettle W. D., 2004, Relations between NDVI and tree productivity in the central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, t. 25, nr 16, 3127–3138.
- Welc A., 1985, Zmienność denudacji chemicznej w Karpatach fliszowych (na przykładzie zlewni potoku Bystrzanka). *Dokumentacja Geogr.*, Z. 5.
- Williams M., Rastetter E. B., Shaver G. R., Hobbie J. E., Carpino E., Kwiatkowski B. L., 2001, Primary productin of an Arctic Watershed: an uncertainty analysis. *Ecological Applications*, t. 11, nr 6, 1800–1816.
- Wrzesień M., Zagajewski B., Sobczak M., Zwijacz-Kozica T., 2005, Estimation of Leaf Area Index in dwarf mountaine pine (*Pinus Mugo Turra*) using hyperspectral data. *Imaging Stereoscopy. New Quality in Environmental Studies*, EARSeL and Warsaw University, Warsaw.
- Zagajewski B., Sobczak M., Wrzesień M., Kozłowska A., 2006, Badania górskich zbiorowisk roślinnych z użyciem technik hiperspektralnych. *Tarzański Park Narodowy na tle innych górskich terenów chronionych*, tom II, Zakopane–Kraków.
- 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, s. 1019–1053.



Anna Jarocińska, pracę magisterską wykonała w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytetu Warszawskiego. Od października 2008 roku jest doktorantką SD WGiSR UW. Zainteresowania naukowe obejmują teledetekcję, szczególnie techniki hiperspektralne i teledetekcyjne wskaźniki roślinności. E-mail: [ajarocin@student.uw.edu.pl](mailto:ajarocin@student.uw.edu.pl).



Bogdan Zagajewski, absolwent Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska UW. Od 15.11.1995 roku zatrudniony w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji (wcześniej Zakład Teledetekcji Środowiska) 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](mailto:bogdan@uw.edu.pl), tel. 022 5521507, fax 022 5521521, [http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/bz\\_pl.html](http://telegeo.wgsr.uw.edu.pl/bz/bz_pl.html)