

## Wpływ geometrii źródła promieniowania-roślina-detektor na wartość teledetekcyjnych wskaźników roślinności

### *Assessment of geometry of radiation source-plant-detector on value of the remote sensing indices*

Marlena KYCKO, Bogdan ZAGAJEWSKI,  
Katarzyna PODBIELSKA, Anna BIŃKOWSKA

**Słowa kluczowe:** dwukierunkowość odbicia promieniowania, BRDF, teledetekcyjne wskaźniki roślinne, geometria źródła promieniowania-roślina-detektor

**Key words:** bidirectional reflectance distribution, BRDF, remote sensing vegetation indices, geometry Sun-plant-detector,

**Otrzymano:** 27 sierpnia 2012; **Zaakceptowano:** 17 marca 2013

**Received:** 27 August 2012; **Accepted:** 17 March 2013

*The aim of this study is an analysis of an influence of geometry electromagnetic radiation (lamp or sun) - research target (leaves) - detector. The electromagnetic radiation was emitted by the lamp ASD ProLamp, which was installed at 30°, 45°, 90°, 135°, 150° angles. Reference measurements was a system in which the lamp and detector were set vertically. During the laboratory measurements spectral properties of *Rhoeo spathacea* were acquired. Based on the measured spectral curves of vegetation remote sensing indices were calculated and statis-*

*tical ANOVA tests were applied. The results confirmed the relationship between the geometry of the lamp - plant - detector. The higher the angle the incident radiation results were less diverse and close to optimum values were observed. Analysis of the indicators showed that the high variability characterized by the indicators measuring water, chlorophyll contents and overall vigor parameters of plants. While the tests can be used for measuring rates of nitrogen content, the absorption of carotenoids and photosynthetically active radiation.*

### Wstęp

Ilość odbijanego promieniowania zależy nie tylko od cech własnych obiektu, ale także od pozycji detektora i źródła promieniowania elektromagnetycznego. Oznacza to, że rejestrowana jasność badanego obiektu ulega zmianie wraz ze zmianą lokalizacji obserwatora (detektora) lub źródła światła (np. lampy halogenowej). Funkcja dwukierunkowości odbicia promieniowania BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) pozwala łączyć parametry zależności między źródłem światła i powierzchnią badanego obiektu. Definiowana jest jako funkcja luminancji energetycznej rejestrowanej w kierunku obserwatora do natężenia napromienienia pomierzonego z kierunku padania promieniowania (Nicodemus, 1970; Girolamo, 2003; Schaepman-Strub i in., 2005; Królewicz, 2010). BRDF jest określany także jako iloraz luminancji obiektu i luminancji wzorca powierzchni

lambertowskiej, która mierzona jest w tej samej jednostce bryłowego kąta i takich samych warunkach obserwacji i oświetlenia (Kelly i in., 1998; Cierniewski, 2001; Królewicz 2010).

Teledetekcyjne badania nad roślinnością bazują na analizie interferującego promieniowania elektromagnetycznego z baldachimem roślinności. Odbicie, absorpcja, transmisja i rozpraszanie zachodzi selektywnie dla każdej długości fali i zależy głównie od właściwości roślin, okresu fenologicznego, pory dnia, stanu atmosfery, ale także od położenia siedliska i długości analizowanej fali. Detektory hiperspektralne rejestrują promieniowanie w setkach bardzo wąskich kanałów widma, umożliwiając identyfikację specyficznych cech, np. barwników, nuczynów, wody, celulozy, ligniny, wosków. Na podstawie charakterystyk spektralnych obliczane są wskaźniki umożliwiające ilościową i jakościową analizę stanu roślinności.

Dla obszarów górskich jednym z kluczowych elementów (nie zawsze branych pod uwagę) jest zróżnicowanie topograficzne poszczególnych siedlisk. Te same gatunki roślin występując na obszarach o różnym nachyleniu i ekspozycji terenu odbijają promieniowanie w sposób zróżnicowany, co bez normalizacji topograficznej, czy modelowania dwukierunkowości odbicia, może świadczyć o zróżnicowanej kondycji, podczas gdy stan zbiorowisk może być w rzeczywistości identyczny.

Pomiary BRDF są wykonywane zarówno podczas badań terenowych jak również w warunkach laboratoryjnych. Wykorzystywane są do tego goniometry, np. Compact Laboratory Spectrogoniometer (CLabSpeG). Umożliwiają one dokładne pomiary odbicia promieniowania poprzez ustawienie detektora pod dowolnym kątem. W warunkach laboratoryjnych eliminowany jest wpływ wiatru (możliwy jest stały pomiar kąta liścia) oraz promieniowania rozproszonego dzięki zogniskowanemu źródłu światła. Pomiary należy wykonywać szybko i dokładnie, aby badana roślina nie traciła swoich właściwości np. wilgotności (Biliouris i in., 2006). Goniometryczne urządzenie do pomiaru kierunkowego odbicia spektralnego wykorzystano do obliczenia albedo gleb o różnej szorstkości, trudnych do uzyskania droga bezpośrednich pomiarów terenowych dla pełnego zakresu kąta zenitalnego Słońca. Ustalono, że albedo badanych gleb z ich sztucznie uformowanymi powierzchniami zwiększa się wraz ze wzrostem kąta zenitalnego źródła światła (Cierniewski, 1998; 2009).

Badania dwukierunkowości odbicia promieniowania (BRDF) prowadzone są już od lat i mają bardzo różne zastosowanie zarówno w modelowaniu gleb, jak i roślinności (Cierniewski, Verbrugge, 1993; Kelley i in., 1998; Schaepman-Strub i in., 2005; Cierniewski, 2009). Pomiary BRDF z powodzeniem wykorzystano do modelowania odbicia, rozpraszania i lustrzanego odbicia od poszczególnych części drzew liściastych (buk, leszczyna) w tym pokrytych warstwą wosku i silnie błyszczących wawrzynu szlachetnego (Bousquet i in., 2005). Cechy kierunkowe odbicia zależą od orientacji oświetlenia ze względu na szorstkość liści. Pozwala to modelować uprawy, np. pszenicy w celu eliminacji anizotropii (niejednorodności) połysku pól uprawnych w kierunkach odbicia i rozpraszania (Comar, 2012). Modelowano także kierunek odbicia od powierzchni gleby z uwzględnieniem kierunku ich uprawy (Cierniewski i in., 1999). Przeanalizowano kierunek odbicia od pól zaoranych i zabronowanych zwracając szczególną uwagę na wpływ zorientowania kierunku tych zabiegów względem promieni słonecznych. Przeprowadzone badania wykazały wpływ rodzaju powierzchni na rozkład odbicia w zakresie optycznym. Dla obu powierzchni zmienność wskaźnika znormalizowanego odbicia NR powiększa się i to najwyraźniej w kierunkach odsłonecznych (Cierniewski i in., 1999).

Cechy spektralne i strukturalne roślin mogą być analizowane na dużych powierzchniach bez konieczności długotrwałego zbierania pomiarów terenowych, np. bazując na danych satelitarnych pozyskiwanych pod różnymi kątami, np. MODIS lub hiperspektralnych da-

nych lotniczych poprzez zastosowanie kilku systemów skanujących, np. AISA (Gao i in., 2003).

## Teledetekcyjne wskaźniki roślinności

Teledetekcyjne wskaźniki roślinności są kombinacjami odbicia spektralnego lub absorpcji promieniowania w dwóch lub większej liczbie przedziałów widma elektromagnetycznego. Do charakterystyk roślin wykorzystywane są ich optyczne właściwości takie, jak: absorpcja, emisyjność, przepuszczalność i odbicie promieniowania elektromagnetycznego. Wskaźniki łączą biofizyczne charakterystyki roślin z danymi teledetekcyjnymi, dzięki czemu znalazły szerokie zastosowanie w różnego rodzaju analizach, m.in. do prognozowania plonów, przewidywania suszy, badania stresu roślinnego oraz kondycji stanu roślin (Jarocińska, Zagajewski, 2008).

Teledetekcyjne wskaźniki pozwalają na szczegółową analizę stanu roślinności, np. efektywności wykorzystania promieniowania fotosyntetycznie czynnego (*Light Use Efficiency*), zawartości azotu (*Canopy Nitrogen*), suchej biomasy (*Dry or Senescent Carbon*), barwników roślinnych (*Leaf Pigments*), zawartości wody (*Canopy Water Content*). Dokładność analizy wynika z rodzaju użytego sensora rejestrującego szeroki zakres widma (techniki wielospektralne, *Broadband Greenness*) lub bardzo wąskich przedziałów promieniowania (techniki hiperspektralne, *Narrowband Greenness*, Tabela. 1).

## Metodyka

Hiperspektralne pomiary laboratoryjne wykonane zostały na liściach reo meksykańskiego (*Rhoeo spathacea*, Ryc. 1). Roślina preferuje warunki całkowicie zacienione i wykształca duże blaszki liściowe o jednorodnej powierzchni koloru ciemnozielonego (Heitz, Kögel 1995).

Pomiary wykonano za pomocą spektrometru ASD FieldSpec 3, rejestrującego promieniowanie w zakresie 350-2500 nm. Światłowód umieszczony był w statywie pod kątem 90° do stołu (Ryc. 1). Źródłem promieniowania była lampa ASD ProLamp, generująca światło zbliżone do spektrum słonecznego. Położenie lampy halogenowej zmieniało się w płaszczyźnie prostopadłej do stołu. Pomiary zostały wykonane w seriach przy oświetleniu pod kątami: 30°, 45°, 90°, 135°, 150°. Seria pomiarowa w której światłowód oraz lampa halogenowa umieszczone były pod kątem 90° pełnił rolę referencyjną do innych pomiarów (nie był rejestrowany cień liści).

Przed pomiarami wykonana została:

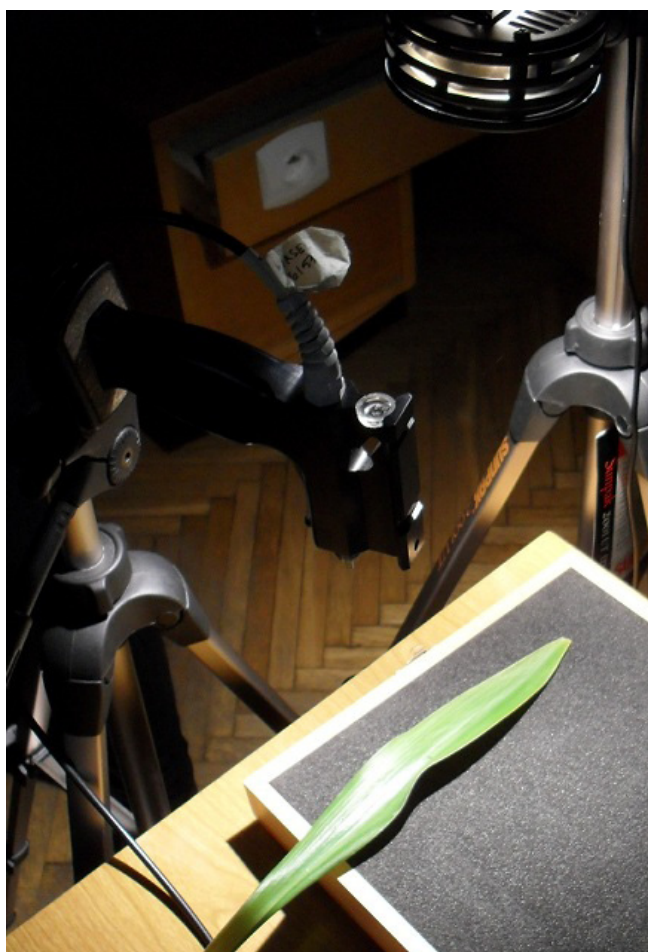
- optymalizacja spektrometru (dobór optymalnego czasu trwania pomiarów, zależnego od ilości fotonów docierających do detektora),
- kalibracja względem wzorca czerni (*Dark Current*), która pozwoliła wyeliminować szumy generowane przez elektronikę urządzenia,
- kalibracja względem wzorca bieli, którą pełniła płyta pokryta spektralnym.

Tabela 1. Teledetekcyjne wskaźniki roślinności.

Table 1. Remote sensing indices of vegetation.

<b>Grupa wskaźników</b> <i>Group of indicators</i>	<b>Zastosowanie</b> <i>Application of</i>	<b>Wskaźnik</b> <i>Indicator</i>	<b>Wzór</b> <i>Formula</i>	<b>Źródło informacji</b> <i>Source of information</i>
<b>Broadband Greenness</b>	Ocena ogólnego wigoru roślinności <i>Assessment of the general vigor of vegetation</i>	<b>NDVI</b>	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	Rouse i in., 1973
		<b>SR</b>	$SR = \frac{NIR}{RED}$	Rouse i in., 1973
		<b>EVI</b>	$EVI = 2.5 \left( \frac{NIR - RED}{NIR + 6RED - 7.5BLUE + 1} \right)$	Huete i in., 1997; Huete, 2002
		<b>ARVI</b>	$ARVI = \frac{NIR - (2RED - BLUE)}{NIR + (2RED - BLUE)}$	Kaufman i in., 1996; Kaufman, 1992
<b>Narrowband Greenness</b>	Ocena zawartości i struktury chlorofilu <i>Assessment of the content and structure of chlorophyll</i>	<b>NDVI 705</b>	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	Gitelson i in., 1994; Sims, 2002
		<b>mSR 705</b>	$mSR_{705} = \left( \frac{\rho_{750} - \rho_{445}}{\rho_{705} - \rho_{445}} \right)$	Sims i in., 2002; Datt, 1999
		<b>mNDVI 705</b>	$mNDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705} - 2\rho_{445}}$	Datt, 1999; Sims i in., 2002
		<b>VOG 1</b>	$VOG1 = \frac{\rho_{740}}{\rho_{720}}$	Vogelmann i in., 1993
		<b>VOG 2</b>	$VOG2 = \frac{\rho_{734} - \rho_{747}}{\rho_{715} + \rho_{726}}$	Vogelmann i in., 1993
		<b>VOG 3</b>	$VOG3 = \frac{\rho_{734} - \rho_{747}}{\rho_{715} + \rho_{720}}$	Vogelmann i in., 1993
<b>Light Use Efficiency</b>	Ocena ilości światła jakie wykorzystują rośliny w procesie fotosyntezy <i>Assessment the amount of light that plants use in photosynthesis</i>	<b>PRI</b>	$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$	Gamon i in., 1992; Gamon, i in., 1997
		<b>SIPI</b>	$SIPI = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} - \rho_{680}}$	Penuelas i in., 1995
<b>Canopy Nitrogen</b>	Ocena zawartości azotu <i>Assessment of the content nitrogen</i>	<b>NDNI</b>	$NDNI = \frac{\log(1/\rho_{1510}) - \log(1/\rho_{1680})}{\log(1/\rho_{1510}) + \log(1/\rho_{1680})}$	Fourty i in., 1996
<b>Dry or Senescent Carbon</b>	Ocena ilości węgla, zawartej w suchej masie celulozy i ligniny <i>Assessment the amount of carbon contained in the dry weight of the cellulose and lignin</i>	<b>NDLI</b>	$NDLI = \frac{\log(1/\rho_{1754}) - \log(1/\rho_{1680})}{\log(1/\rho_{1754}) + \log(1/\rho_{1680})}$	Fourty i in., 1996
		<b>CAI</b>	$CAI = 0.5(\rho_{2000} + \rho_{2200}) - \rho_{2100}$	Daughtry i in., 2004
		<b>PSRI</b>	$PSRI = \frac{\rho_{680} - \rho_{500}}{\rho_{750}}$	Merzlyak i in., 1999

<b>Leaf Pigments</b>	Ocena karotenoidów (pigmentów) <i>Assessment the amount of carotenoids (pigments)</i>	<b>CRI 1</b>	$CRI1 = \left(\frac{1}{\rho_{510}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right)$	Gitelson i in., 2002
		<b>CRI 2</b>	$CRI2 = \left(\frac{1}{\rho_{510}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{700}}\right)$	Gitelson i in., 2002
		<b>ARI 1</b>	$ARI1 = \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{700}}\right)$	Gitelson i in., 2001
		<b>ARI 2</b>	$ARI2 = \rho_{800} \left[ \left(\frac{1}{\rho_{550}}\right) - \left(\frac{1}{\rho_{700}}\right) \right]$	Gitelson i in., 2001
<b>Canopy Water Content</b>	Ocena ilości wody w pokrywie roślinnej <i>Assessment the amount of water in the plant cover</i>	<b>WBI</b>	$WBI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{970}}$	Penuelas i in., 1995
		<b>NDWI</b>	$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1241}}{\rho_{857} + \rho_{1241}}$	Jackson i in., 2004
		<b>MSI</b>	$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}}$	Ceccato i in., 2001
		<b>NDII</b>	$NDII = \frac{\rho_{819} - \rho_{1649}}{\rho_{819} + \rho_{1649}}$	Hardisky i in., 1983



Ryc. 1. Układ pomiarowy, światłowód detektora i lampa ustawione pod kątem 90°.

Fig. 1. Measurement set, detector's fiber optic and lamp set at the 90°.

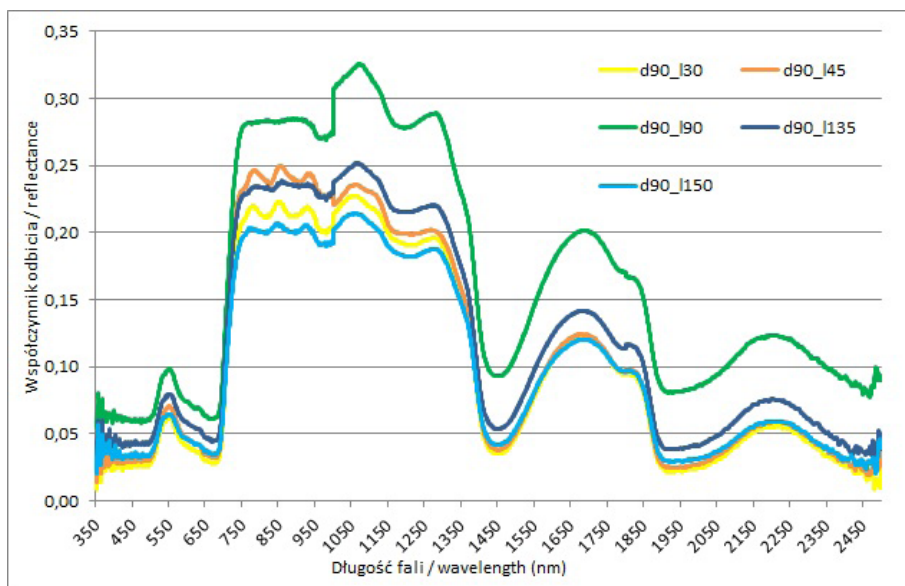
Wszystkie pomiary kalibracyjne, jak i właściwe obiektu powtarzane były 25 razy i z tych 25 rejestracji obliczana była wartość średnia. Każda seria pomiarowa składała się z 10 średnich, co stanowiło 250 niezależnych pomiarów.

Dane uzyskane ze spektrometru w formacie \*.asd zostały wyeksportowane do pliku tekstowego (ASCII), a następnie do MS Excela. Wyniki pomiarów spektrometrycznych liści zestawiono w zestawy (dla każdego położenia lampy) i obliczono wartości średnie spektralnych współczynników odbicia oraz teledetekcyjne wskaźniki roślinności (Verbrugge, 1995). Do opracowania statystycznego wyników użyto analizy wariancji Anova (*Analysis of variance*) utworzona przez R. Fishera (Fisher, 1918). Analiza pozwala na porównanie dwóch grup zdarzeń. Wyjaśnia z jakim prawdopodobieństwem wyodrębnione czynniki mogą być powodem różnic między obserwowanymi średnimi grupowymi. Dodatkowo analiza Anova umożliwia zmierzenie nie tylko istotności różnic, ale również jej siły (Luszniewicz i in., 2001). Ocenę istotności wariancji przeprowadzono na dwóch poziomach istotności 0,05 oraz 0,001.

### Wyniki pomiarów spektrometrycznych

Badania wykazały duże zróżnicowanie cech spektralnych w zależności od kąta padania promieniowania. Na uwagę zasługuje fakt, że dla poszczególnych zakresów widma (VIS, NIR, SWIR) wartości odbicia są różne, tj. nie obserwuje się stałej tendencji odbicia dla całego zakresu widma i danego kąta padania promieniowania elektromagnetycznego (Ryc. 2). Ponadto odchylenia standardowe poszczególnych pomiarów są niewielkie





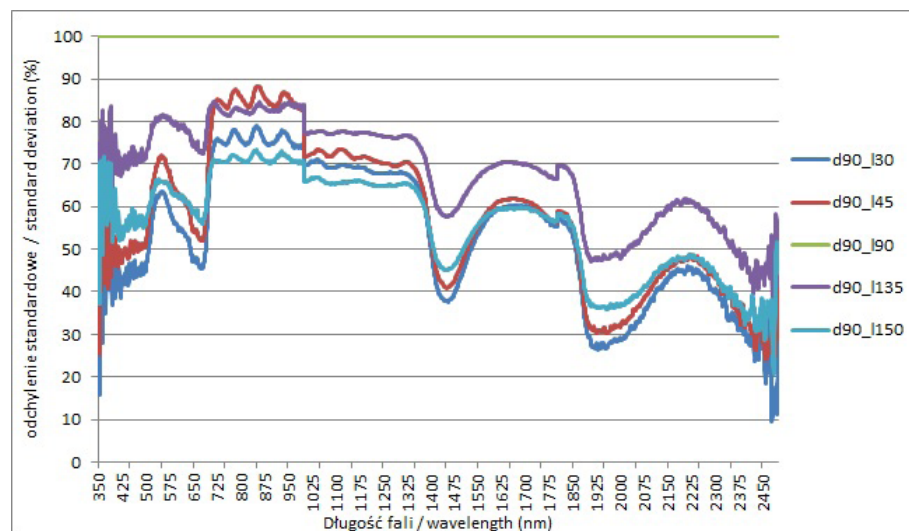
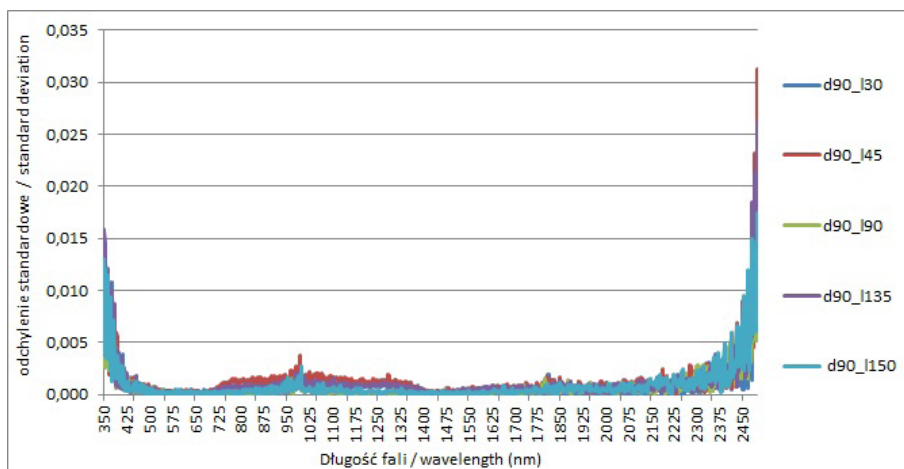
Ryc. 2. Charakterystyki spektralne reo meksykańskiego pozyskane przy zróżnicowanym położeniu lampy i stałym kącie detektora (90° d-detektor, l-lampa).

Fig. 2. Spectral characteristics of *Rhoeospathacea* acquired from different positions of the lamp and stable location of the detector (90°, d-detector, l-lamp).

rzędu 0,001 (Ryc. 3). Pomiar referencyjny (90°) wyraźnie posiada większe wartości współczynnika odbicia w stosunku do krzywych odbicia pozostałych położenia lampy (Ryc. 2). Zmienność odbicia promieniowania wyrażona w % dla poszczególnych kątów padania promieniowania względem odbicia referencyjnego (d90\_l90; oznaczonego jako 100%) przedstawiono na rycinie 4. Im kąt padania

jest niższy, tym rejestrowana jest niższa wartość odbicia promieniowania; średnio dla kąta padania promieni wynoszących 30° uzyskane wyniki były niższe o 68,58 % niż dla wyników pozyskanych dla pomiaru referencyjnego, a dla kąta 150° - 52,65 % (Ryc. 4). Natomiast dla układu z lampą ustawioną pod kątem 135° i 45° różnica wyniosła odpowiednio 58,64 % i 65,92 % (Ryc. 4).

Ryc. 3. Odchylenia standardowe poszczególnych serii pomiarowych.  
Fig. 3 Standard deviations of measurement series.



Ryc. 4. Zmienność odbicia promieniowania dla poszczególnych kątów padania promieniowania względem odbicia referencyjnego (d90\_l90).

Fig. 4. Variability of reflectance for different measurement sets according to the reference set (detector:90\_lamp90 degree).

Teledetekcyjne wskaźniki roślinności cechują się znacznym zróżnicowaniem wartości (Tabela 2). Znacząco utrudnia to prawidłowe oszacowanie właściwego stanu roślinności. Analizy statystyczne wykazały, że najbardziej czułymi wskaźnikami na zmiany oświetlenia są *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Simple Ratio Index* (SR), *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI), *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI705), *Modified Red Edge Simple Ratio Index* (mSR705), *Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (mNDVI705), *Vogelmann Red Edge Index 2* (VOG2), *Vogelmann Red Edge Index 3* (VOG3), *Normalized Difference Lignin Index* (NDLI), *Normalized Difference Nitrogen Index* (NDNI), *Carotenoid Reflectance Index 1* (CRI1), *Carotenoid Reflectance Index 2* (CRI2), *Anthocyanin Reflectance Index 1* (ARI1), *Anthocyanin Reflectance Index 2* (ARI2), *Normalized*

*Difference Water Index* (NDWI), *Moisture Stress Index* (MSI), *Normalized Difference Infrared Index* (NDII). Wymienione teledetekcyjne wskaźniki roślinności wykazały 100 % przypadków wystąpienia istotności statystycznej dla położenia detektor 90 i zmiennym położeniu lampy. Stosowanie ich utrudnia właściwą analizę różnic roślinności wynikających ze różnej kondycji lub zmiennego oświetlenia bądź lokalizacji siedlisk.

Wskaźniki *Structure Insensitive Pigment Index* (SIPI), *Photochemical Reflectance Index* (PRI), *Cellulose Absorption Index* (CAI), *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI), *Water Band Index* (WBI) oraz *Vogelmann Red Edge Index 1* (VOG1) pozwalają na stosowanie ich do oceny stanu roślinności niezależnie od kątów padania promieniowania elektromagnetycznego, czyli także różnej ekspozycji stoków (Tabela 3). Wskaźniki te nie wykazują podatności na zmiany w zależności od położenia źródła promieniowania (lampy halogenowej) względem detektora przy najbardziej zaostrowym kryterium istotności ( $p < 0,001$ ).

Istotne statystycznie różnice w wartościach teledetekcyjnych wskaźników roślinności przedstawiono na poniższych wykresach (Ryc. 5). Wartości wskaźników *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Atmospherically Resistant Vegetation Index* (ARVI) z grupy *Broadband Greenness* odpowiadające ogólnemu wigorowi rośliny różnią się od wartości wskaźników w położeniu referencyjnym o ok 0,01 (Ryc. 5).

Wartość wskaźnika *Normalized Difference Nitrogen Index* (NDNI) z grupy *Canopy Nitrogen* przy zmiennym położeniu źródła światła (lampy halogenowej) jest ponad dwukrotnie przewyższona w stosunku do położenia referencyjnego (źródło światła i detektor pod kątem 90°; Ryc. 6).

Różnice istotne statystycznie zaobserwowano także dla teledetekcyjnych wskaźników roślinności z grupy *Narrowband Greenness* która opisuje zawartość i struktury chlorofilu tj. *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI705) oraz *Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (mNDVI705). Wartości dla wskaźnika NDVI705 są przewyższone w odniesieniu do wartości położenia referencyjnego gdzie kąt ustawienia detektor-lampa wynosi 90-90 natomiast wartości wskaźników mNDVI705 są pomniejszone w stosunku do wartości referencyjnej tego wskaźnika (Ryc. 7). Ponad trzykrotnie przewyższone wartości uzyskano dla wskaźnika *Normalized Difference Lignin Index* (NDLI) z grupy *Light use efficiency* opisującej ilość światła wykorzystanego przez roślinę w procesie fotosyntezy (Ryc. 8).

Wskaźniki opisujące pomiar pigmentów, karotenoidów w roślinie (grupa *Leaf pigments*) odpowiednio wskaźnik *Carotenoid Reflectance Index 1* (CRI1) oraz jego modyfikacja *Carotenoid Reflectance Index 2* (CRI2) przy zmiennym położeniu lampy uzyskują ponad trzykrotnie większe wartości od tych otrzymanych dla położenia referencyjnego (Ryc. 9). Natomiast wskaźnik *Moisture Stress Index* (MSI) przy zmiennym położeniu źródła promieniowania uzyskuje pomniejszone wartości wskaźnika względem tych wartości wskaźnika otrzyma-

Tabela 2. Średnia wartość teledetekcyjnego wskaźnika roślinności dla układu d90-130, d90-145, d90-190, d90-1135, d90-1150.

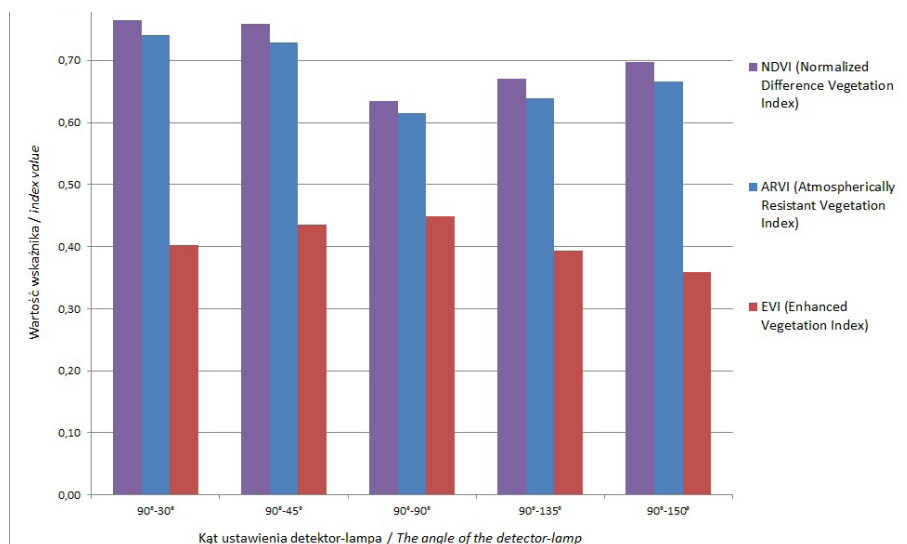
Table 2. The average value of remote sensing of vegetation index for the d90-130, d90-145, d90-190, d90-1135, d90-1150.

Średnia wartość wskaźnika Average value of index	d90-130	d90-145	d90-190	d90-1135	d90-1150
NDVI	0,77	0,76	<b>0,63</b>	0,67	0,70
SR	7,52	7,30	<b>4,48</b>	5,06	5,61
EVI	0,40	0,44	<b>0,45</b>	0,39	0,36
ARVI	0,74	0,73	<b>0,61</b>	0,64	0,67
NDVI 705	0,40	0,40	<b>0,36</b>	0,36	0,37
mSR 705	2,86	2,86	<b>3,13</b>	2,78	2,87
mNDVI 705	0,48	0,48	<b>0,52</b>	0,47	0,48
VOG 1	1,33	1,33	<b>1,33</b>	1,30	1,33
VOG 2	-0,05	-0,05	<b>-0,06</b>	-0,05	-0,06
VOG 3	-0,06	-0,05	<b>-0,06</b>	-0,05	-0,06
PRI	0,03	0,02	<b>0,02</b>	0,02	0,02
SIPI	1,02	1,02	<b>1,01</b>	1,02	1,01
NDNI	0,85	0,83	<b>0,51</b>	0,72	0,81
NDLI	0,49	0,48	<b>0,25</b>	0,42	0,48
CAI	-0,001	-0,001	<b>-0,002</b>	-0,001	0,000
PSRI	0,003	0,003	<b>0,005</b>	0,007	0,003
CRI 1	14,23	12,99	<b>5,04</b>	7,74	10,22
CRI 2	15,14	13,74	<b>5,59</b>	8,61	11,25
ARI 1	0,91	0,75	<b>0,55</b>	0,87	1,02
ARI 2	0,19	0,18	<b>0,16</b>	0,20	0,21
WBI	1,06	1,05	<b>1,06</b>	1,04	1,05
NDWI	0,07	0,11	<b>-0,002</b>	0,04	0,05
MSI	0,49	0,45	<b>0,62</b>	0,52	0,52
NDII	0,29	0,33	<b>0,18</b>	0,26	0,26

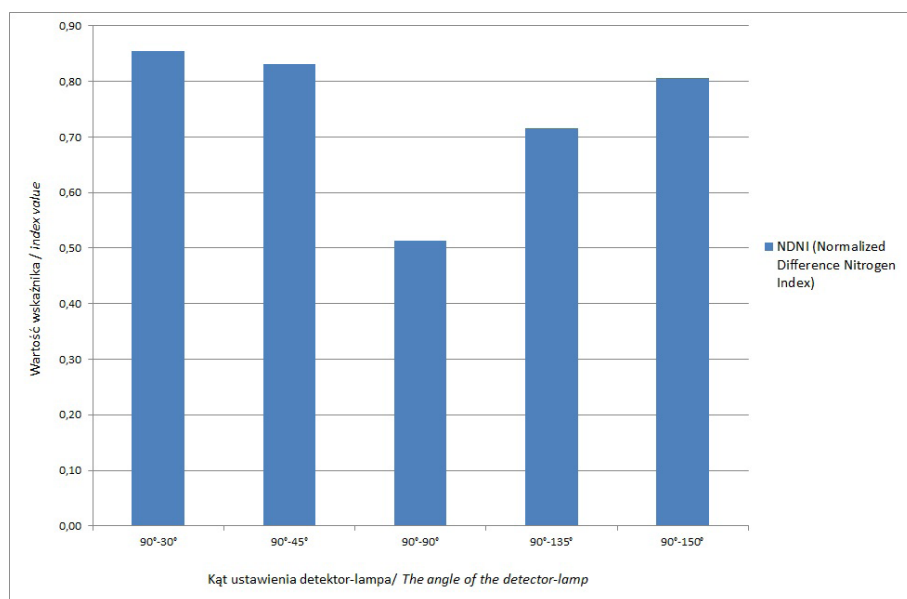
Tabela 3. Procent różnic istotnych statystycznie teledetekcyjnych wskaźników roślinności (położenie detektora - 90°, p – poziom istotności).

Table 3. Percentage of statistically significant differences of remote sensing vegetation indices (detector position - 90°, p – significance level)

Wskaźnik Index	położenie lampy 30° i 90° lamp position 30° and 90°		położenie lampy 45° i 90° lamp position 45° and 90°		położenie lampy 135° i 90° lamp position 135° and 90°		położenie lampy 150° i 90° lamp position 150° and 90°	
	p < 0,05	p < 0,001	p < 0,05	p < 0,001	p < 0,05	p < 0,001	p < 0,05	p < 0,001
NDVI	100	100	100	100	100	100	100	100
SR	100	100	100	100	100	100	100	100
EVI	100	100	100	100	100	100	100	100
ARVI	100	100	100	100	100	100	100	100
NDVI 705	100	100	100	100	100	100	100	100
mSR 705	100	100	100	100	100	100	100	100
mNDVI 705	100	100	100	100	100	100	100	100
VOG 1	100	100	0	0	100	100	100	0
VOG 2	100	100	100	100	100	100	100	0
VOG 3	100	100	100	100	100	100	100	0
PRI	100	0	0	0	0	0	0	0
SIPI	100	0	0	0	0	0	0	0
NDNI	100	100	100	100	100	100	100	100
NDLI	100	100	100	100	100	100	100	100
CAI	100	0	0	0	0	0	100	0
PSRI	0	0	0	0	0	0	100	0
CRI 1	100	100	100	100	100	100	100	100
CRI 2	100	100	100	100	100	100	100	100
ARI 1	100	100	100	100	100	100	100	100
ARI 2	100	100	100	0	100	100	100	100
WBI	0	0	0	0	100	0	0	0
NDWI	100	100	100	100	100	100	100	100
MSI	100	100	100	100	100	100	100	100
NDII	100	100	100	100	100	100	100	100

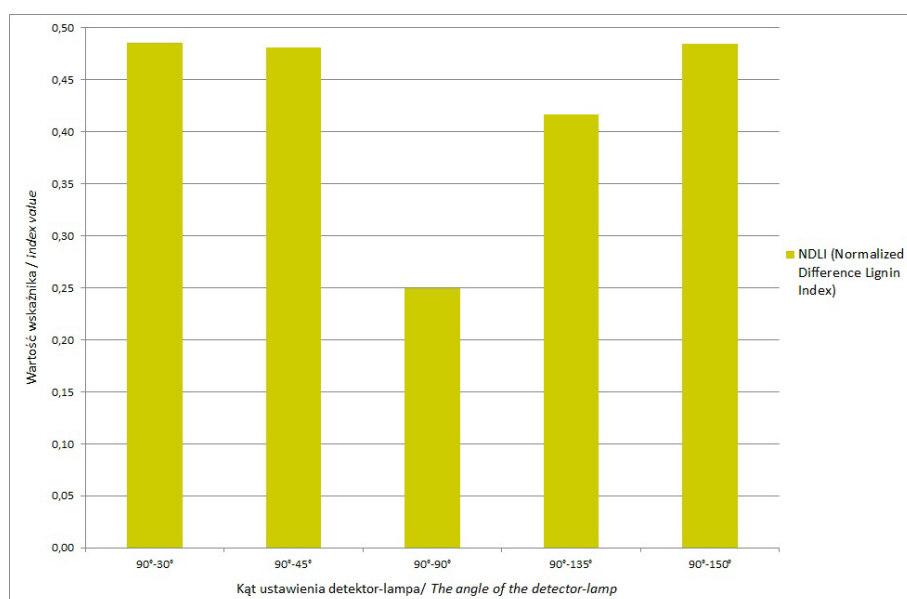
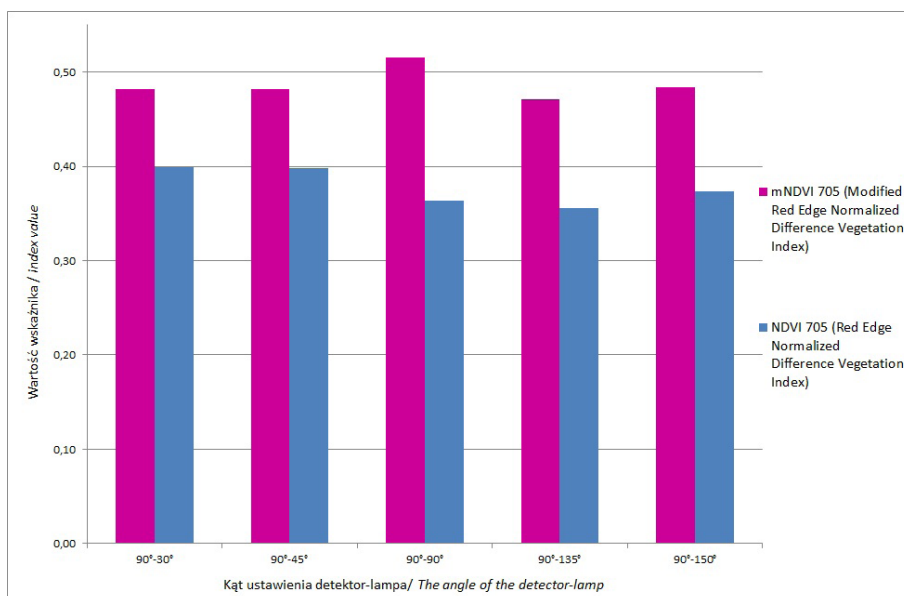


Ryc. 5. Wartości wskaźników wykazujących istotne statystycznie różnice (grupa Broadband Greenness).  
Fig. 5. The values of the indicators showing statistically significant differences (Broadband Greenness group).



Ryc. 6. Wartości wskaźników wykazujących istotne statystycznie różnice (grupa *CanopyNitrogen*).  
Fig. 6. The values of the indicators showing statistically significant differences (*Canopy Nitrogen* group).

Ryc. 7. Wartości wskaźników wykazujących istotne statystycznie różnice (grupa *NarrowbandGreenness*).  
Fig. 7. The values of the indicators showing statistically significant differences (*Narrowband Greenness* group).

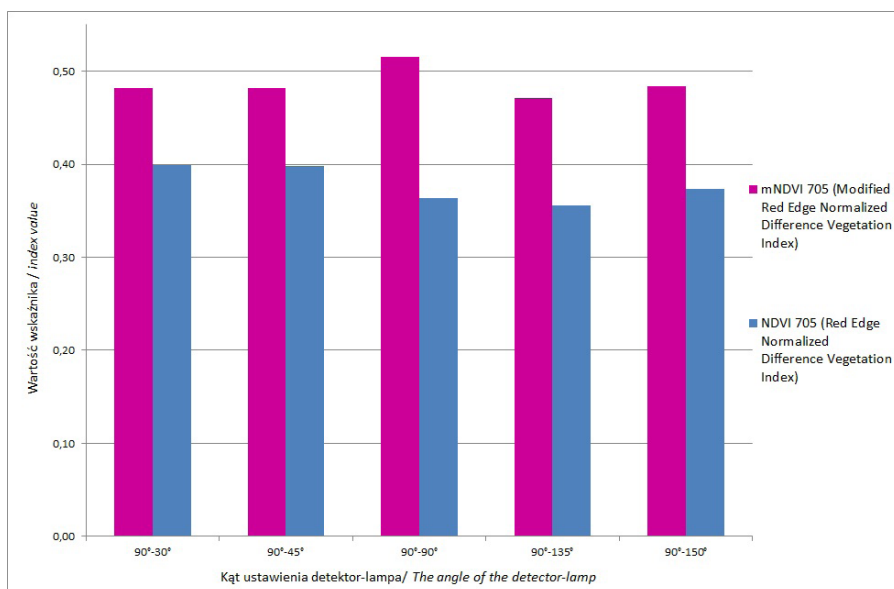
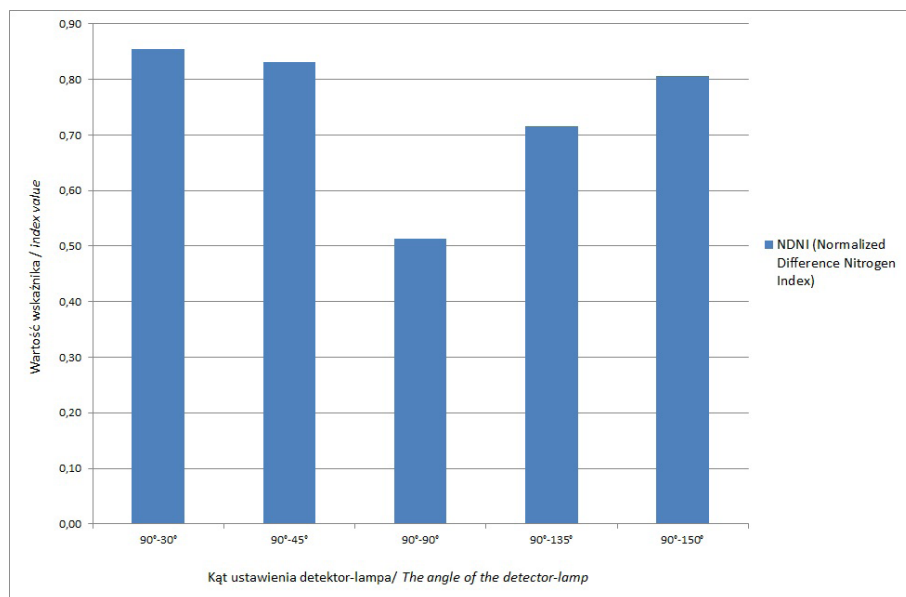


Ryc. 8. Wartości wskaźników wykazujących istotne statystycznie różnice (grupa *Light use efficiency*).  
Fig. 8. The values of the indicators showing statistically significant differences (*Light use efficiency* group).



Ryc. 9. Wartości wskaźników wykazujących istotne statystycznie różnice (grupa *Leaf pigments*).

Fig. 9. The values of the indicators showing statistically significant differences (*Leaf pigments* group).



Ryc. 10. Wartości wskaźników wykazujących istotne statystycznie różnice (grupa *Canopy Water Content*).

Fig. 10. The values of the indicators showing statistically significant differences (*Canopy Water Content* group).

nych dla położenia referencyjnego. Odwrotna sytuację mamy dla wskaźnika *Normalized Difference Infrared Index* (NDII) którego wartości są zwiększone względem wartości referencyjnych (Ryc. 10). Oba wskaźniki te należą do grupy *Canopy Water Content*) określają zawartość wody znajdującej się w pokrywie roślinności.

Zmienne położenie źródła promieniowania (lampa halogenowej) podczas badań wpływa wartości wskaźników opisujących wigor rośliny, jej struktury komórkowe, zawartość barwników (szczególnie chlorofilu), a także uwodnienie rośliny.

## Wnioski

Ze względu na fakt, że pionowe położenie źródła promieniowania (lampa) oraz detektora w pionie (nadirze) ogranicza powierzchnię zacienioną minimum, układ taki jest optymalny z badawczego punktu widzenia, jednakże nieosiągalny w naturalnych warunkach dla

naszej szerokości geograficznej. Wszelkie odchylenia od tego układu powodują, że zmienia się wartość odbicia od badanych obiektów, a tym samym różnicują się wartości teledetekcyjnych wskaźników roślinności. W warunkach laboratoryjnych możliwy jest stały pomiar kąta liścia oraz promieniowania rozproszonego dzięki zogniskowanemu źródłu światła (Biliouris i in., 2006). Rahman i in. (1999) stwierdzili na podstawie pomiarów dwukierunkowego odbicia spektralnego w głównej płaszczyźnie słonecznej, iż powierzchnia pszenicy obja dwukrotnie więcej promieniowania jeżeli jest obserwowana odsłonecznie pod kątem 50° niż pod stałym kątem w kierunku słońca. Laboratoryjne pomiary kierunkowego odbicia spektralnego od powierzchni gleby przy zmiennym oświetleniu i zmieniającej się szorstkości również wykazały, że wartość odbicia spektralnego od badanych powierzchni zmienia się przy różnych kątach zenitalnych źródła światła (Cierniewski, 1998; 2009).

Wyniki wartości odbicia, najbardziej odbiegające od referencyjnych, otrzymywane są w przypadku gdy

lampa położona jest pod kątem 30° i 135°. Optymalny układ źródła promieniowania-roślina-detektor występuje wtedy, gdy źródło promieniowania (lampa halogenowa) i detektor są ustawione pod kątem zbliżonym maksymalnie do pionu względem rośliny. W zależności od zmian w układzie źródła promieniowania (lampa halogenowa)-roślina-detektor uzyskane wyniki teledetekcyjnych wskaźników roślinności mogą sugerować zmienny stan kondycyjny, co nie jest zgodne z rzeczywistością.

Przy wszystkich zastosowanych w badaniach poziomach istotności ( $p < 0,05$ ;  $p < 0,001$ ) wskaźniki SIPI (*Structure Insensitive Pigment Index*), PRI (*Photochemical Reflectance Index*), CAI (*Cellulose Absorption Index*), PSRI (*Plant Senescence Reflectance Index*), WBI (*Water Band Index*) nie wykazują różnic istotnych statystycznie, co świadczy o braku wrażliwości na zmiany kątów położenia źródła promieniowania (lampa halogenowa). Wskaźniki takie można stosować do oceny stanu roślinności występujących na zróżnicowanych topograficznie obszarach.

Podsumowując należy stwierdzić, że podczas wykonywania badań hiperspektralnych, należy zwracać szczególną uwagę na to, pod jakim kątem jest położony detektor oraz pod jakim kątem pada źródło promieniowania (lampa bądź Słońce) w momencie wykonywania pomiarów.

## Literatura:

- Biliouris D., Berge K., Aardt A., Muys B., Coppin P., 2006, Hyperspectral bidirectional reflectance measurements of *Fagus Sylvatica* leaves. *New Quality in Environmental Studies*, s. 573-583.
- Bousquet L., Lacherade S., Jacquemoud S., Moya I., 2005, Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. *Remote sensing for environment*, t. 98, s. 201-211
- Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemoud S., Gregoire J.M., 2001, Detecting Vegetation Leaf Water Content Using Reflectance in the Optical Domain. *Remote Sensing of Environment* 77, s. 22-33.
- Cierniewski J., Verbrugge M., 1993, Geometryczny model dwukierunkowego odbicia spektralnego od gleby w zakresie widma widzialnego i bliskiej podczerwieni. *Teledetekcja środowiska*, t. 23, s. 37-51.
- Cierniewski J., 1998, Wirtualne powierzchnie symulujące jasność gleb w zmieniających się warunkach ich oświetlenia i obserwacji. *Fotointerpretacja w Geografii*, t. 27, s. 34-47.
- Cierniewski J., Piekarczyk J., Marlewski A., 1999, Modelowanie kierunkowego odbicia od powierzchni gleby w zakresie optycznym z uwzględnieniem kierunku ich uprawy. *Fotointerpretacja w Geografii*, t.30, s. 62-74.
- Cierniewski J., 2001, *Model kierunkowego odbicia od gleb uprawnych uwzględniający obecność agregatów glebowych oraz mikroreliefu powierzchni gleby*. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- Cierniewski J., 2009, Laboratoryjne pomiary kierunkowego odbicia spektralnego od powierzchni gleby przy zmieniającej się ich szorstkości i oświetleniu. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 19, s.71-80.
- Comar A., Baret F., Vienot F., Yan L., Solan B., 2012, Wheat leaf bidirectional reflectance measurements: Description and quantification of the volume, specular and hot-spot scattering features. *Remote sensing for environment* 121, s. 26-35.
- Datt B., 1999, A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests Using Eucalyptus Leaves. *Journal of Plant Physiology* 154, s. 30-36.
- Daughtry C.S.T., Hunt E.R., McMurtrey J.E., 2004, Assessing Crop Residue Cover Using Shortwave Infrared Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 90, s. 126-134.
- Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., Schmuck G., Verdebout J., 1996, Leaf Optical Properties with Explicit Description of Its Biochemical Composition: Direct and Inverse Problems. *Remote Sensing of Environment* 56, s. 104-117.
- Fisher R., 1918, Studies in Crop Variation. I. An examination of the yield of dressed grain from Broadbalk. *Journal of Agricultural Science* 11, s. 107-135.
- Gamon J.A., Penuelas J., Field C.B., 1992, A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. *Remote Sensing of Environment*, nr. 41, s. 35-44.
- Gamon J.A., Serrano L., Surfus J.S., 1997, The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency Across Species, Functional Types and Nutrient Levels. *Oecologia*, nr. 112, s. 492-501.
- Gao F., Schaaf C.B., Strahler A.H., Jin Y., Li X., 2003, Detecting vegetation structure using a kernel-based BRDF model. *Remote Sensing of Environment*, nr. 86, s. 198-205.
- Girolamo L., 2003, Generalizing the definition of the bi-directional reflectance distribution function. *Remote Sensing of Environment*, nr. 88, s. 479-482.
- 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, s. 286-292.
- Gitelson A.A., Zur Y., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N., 2002, Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. *Photochemistry and Photobiology* 75, s. 272-281.
- Hardisky M.A., Klemas V., Smart R.M., 1983, The Influences of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of *Spartina Alterniflora* Canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, nr. 49, s. 77-83.
- Heitz H., Kögel A., 1995, 200 najpiękniejszych roślin doniczkowych, *Oficyna Wydawnicza „Delta W-Z”*, Warszawa, s. 184.
- Huete A.R., Liu H., Batchily K., Leeuwen W., 1997, A Comparison of Vegetation Indices Over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS, *Remote Sensing of Environment*, nr. 59(3), s. 440-451.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G., 2002, Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, nr. 83, s. 195-213.
- Jackson T.J., Chen D., Cosh M., Li F., Anderson M., Walthall C., Doriaswamy P., Hunt E.R., 2004, Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, nr. 92, s. 475-482.
- Jarocińska A., Zagajewski B., 2008, Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki. *Teledetekcja Środowiska*, t. 40, s. 100-124.
- Kaufman Y.J., 1992, Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *Geoscience and Remote Sensing*, nr 30, s. 261-270.
- Kaufman Y.J. Tanre D., 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, s. 65-79.
- Kelley E., Jones G. R., Germer T. A., 1998, Display reflectance model based on the BRDF, *Elsevier*, No. 19, s. 27-34.
- Królewicz S., 2010, Analiza wpływu zjawiska BRDF na jasność obiektów w obrębie bloku zdjęć lotniczych. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 21, s. 201-210.
- Luszniewicz A., Słaby T., 2001, *Statystyka z pakietem komputerowym Statistica™ PL. Teoria i zastosowani*, Wydawnictwo C.H. Beck, Warszawa, s. 222-225.
- Merzlyak J.R., Gitelson A.A., Chivkunova O.B., Rakitin V.Y., 1999. Non-destructive Optical Detection of Pigment Changes During Leaf Senescence and Fruit Ripening. *Physiologia Plantarum*, nr 106, s. 135-141.
- Nicodemus F.E., 1970, Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity. *Applied Optics*, vol. 9(6), s. 1474-1475.
- Peñuelas J., Baret F., Filella I., 1995, Semi-Empirical Indices to Assess Carotenoids/Chlorophyll-a Ratio from Leaf Spectral Reflectance. *Photosynthetica*, t. 31, s. 221-230.
- Rahman H., Quadir D.A., Zahedul Islam A.Z.M., Dutta S., 1999, Viewing effectson remote sensing monitoring of Wheat and Rice crops. *GeoCarto International*, vol.14, No. 1, s.74-78.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 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).
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W., 1973, *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, s. 309-317.
- Schaepman-Strub G., Schaepman M., Dangel S., Painter T., Martonchik J., 2005, The importance of reflectance terminology in imaging spectroscopy. *Proceedings of 4th EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy. New quality in environmental studies*. EARSeL and Warsaw University, Warsaw, s.18-28.
- Sims D.A., Gamon J.A., 2002, Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages. *Remote Sensing of Environment*, nr 81, s. 337-354.
- Verbrugge M., Cierniewski J., 1995, Effect of Sun and view geometries on cotton bidirectional reflectance. Test of a geometrical model. *Remote Sensing of Environment*, nr 54, s.189-197.
- Vogelmann J.E., Rock B.N., Moss D.M., 1993, Red Edge Spectral Measurements from Sugar Maple Leaves, *International Journal of Remote Sensing*, T. 14, s. 1563-1575
- Zagajewski B., 2010, *Wyniki klasyfikacji roślinności Tatr Wysokich*, Teledetekcja Środowiska, T. 43, s. 38-44.
- Zagajewski B., Jarocińska A., Olesiuk D., 2009, *Metody i techniki badań geoinformatycznych*, WGiSR UW, Warszawa, ss. 118.

#### Źródła internetowe

- <http://kwiaty-doniczkowe.wieszjak.pl/kwiaty-na-stanowiskopolcieniste/220874,Reo-meksykanskie-Rhoeo-spathacea.html> (stan na 15.12.2011)
- <http://naradka.wordpress.com/2011/02/18/reo-meksykanskie/> (stan na 15.12.2011)



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



**Dr hab. Bogdan Zagajewski**, adiunkt 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, 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)



**Mgr Katarzyna Podbielska** ukończyła w roku 2012 studia wyższe na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, na kierunku geografia w zakresie geoinformatyki w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW.



**Mgr Anna Bińkowska** ukończyła w roku 2012 studia wyższe na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, na kierunku geografia w zakresie geoinformatyki w Katedrze Geoinformatyki i Teledetekcji WGiSR UW.