

Wpłynęło 28.10.2011 r.
Zrecenzowano 17.01.2012 r.
Zaakceptowano 12.02.2012 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

ZWIĄZEK MIĘDZY WSKAŹNIKIEM *LAI* A SPEKTRALNYMI WSKAŹNIKAMI ROŚLINNOŚCI NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH GATUNKÓW ROŚLIN UPRAWNYCH

Bogna UŹDZICKA^{ABCDEF}, **Radosław JUSZCZAK**^{DE},
Karolina SAKOWSKA^{BCD}, **Janusz OLEJNIK**^{DE}

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Meteorologii

Streszczenie

W pracy określono charakter i stopień wpływu wskaźnika powierzchni liści *LAI* na charakterystyki optyczne pokrywy roślinnej, opartych na promieniowaniu w przedziałach czerwieni i bliskiej podczerwieni dla obszaru rolniczego. Pomiaru wykonano dla pięciu gatunków roślin (tzn. żyta ozimego, pszenicy ozimej, pszenżyta ozimego, ziemniaków i jęczmienia jarego), uprawianych na stacji doświadczalnej w Brodach (województwo wielkopolskie). *LAI* jest istotnym parametrem ekofizjologicznym. Obecnie szybko rozwijającą się techniką, służącą do szacowania charakterystyk biofizycznych pokrywy roślinnej, jest stosowanie pomiarów jej charakterystyk optycznych. Porównując wartości współczynnika determinacji R^2 , a także statystyczne miary dopasowania modelu, uzyskane dla różnych typów zależności (liniowej, logarytmicznej, wykładniczej, wielomianowej i potęgowej) i różnych gatunków roślin zauważono, że zależność analizowanej grupy spektralnych wskaźników roślinności od *LAI* jest nieliniowa, przez co jego szacunki na ich podstawie są obciążone stosunkowo dużym błędem (średnio $0,48 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Najwcześniejszy efekt saturacji występował dla najczęściej stosowanych wskaźników *NDVI* i *SR*. Dane wskazują także, że podczas szacunków *LAI* na podstawie większości spektralnych wskaźników roślinności, opartych na ρ_{NIR} i ρ_{RED} , znaczący wpływ mają zaburzające efekty tła glebowego, które najsilniej oddziałują na wartości *NDVI*. Wpływ ten okazał się być najmniejszy w przypadku *SAVI*, dla którego uzyskiwane wartości R^2 w warunkach zależności od *LAI* były, w porównaniu z pozostałymi analizowanymi wskaźnikami, najczęściej największe. *SAVI* najlepiej sprawdzał się także jako wskaźnik, na podstawie którego można modelować oczekiwane wartości *LAI*.

Słowa kluczowe: spektralne wskaźniki roślinności, wskaźnik powierzchni liści, znormalizowany wskaźnik zieleni

Adres do korespondencji: mgr inż. B. Uździcka, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Meteorologii, ul. Piątkowska 94B, 60-649 Poznań; tel. +48 603 035 520; e-mail: bognaudzicka@gmail.com

WSTĘP

Wiele biofizycznych zmiennych opisujących parametry ilościowe i jakościowe pokrywy roślinnej, takich jak np. wskaźnik powierzchni liści *LAI* (ang. „Leaf Area Index”), żywa biomasa, zawartość wody i chlorofilu, *fAPAR* (ang. „fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation”) i faza fenologiczna cyklu życia roślin, jest kluczowymi danymi wejściowymi do wielu klimatycznych i ekologicznych modeli służących do obliczania intensywności zależnych od nich procesów życiowych roślin [PRINCE, GOWARD 1995; SPANNER i in. 1990; ZHENG, MOSKAL 2009]. Wiele z tych parametrów może także służyć do oceny reakcji ekosystemu na zmiany w otaczającym środowisku. Według „Resource Optimization Theory” rośliny w dłuższych okresach czasu dostosowują bowiem swoją gęstość do panujących warunków tak, aby możliwie jak najsilniej wspierały one procesy fotosyntezy [GLENN i in. 2008]. Ponieważ różne parametry powierzchni ziemi i pokrywy roślinnej w specyficzny sposób oddziałują na jej właściwości spektralne [BOSCHETTI i in. 2007; ELVIDGE, CHEN 1995], jednym z najszerzej stosowanych narzędzi, służącym do ich oceny, są obecnie techniki teledetekcyjne. Wszystkie algorytmy szacowania tych zmiennych można podzielić na trzy kategorie: metody statystyczne, fizyczne i mieszane. Metody fizyczne opierają się na próbach odwrócenia modeli odbicia od pokrywy roślinnej. Metody statystyczne, które zastosowano w niniejszej pracy, bazują głównie na szerokim zakresie spektralnych wskaźników roślinności, natomiast metody mieszane stanowią połączenie obu tych technik [LIANG 2004]. Celem publikacji jest analiza związków między wskaźnikiem powierzchni liści *LAI*, a wybranymi spektralnymi wskaźnikami roślinności (*NDVI*, *SR*, *MSR*, *SAVI*, *OSAVI*), opartymi na zakresie światła widzialnego (promieniowanie czerwone) i bliskiej podczerwieni. Analizę przeprowadzono na podstawie danych pozyskanych dla pięciu różnych gatunków roślin uprawnych na stacji doświadczalnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

SPEKTRALNE WSKAŹNIKI ROŚLINNOŚCI OPARTE NA ŚWIETLE W ZAKRESIE CZERWIENI I PROMIENIOWANIU PODCZERWONYM ORAZ ICH KORELACJE ZE WSKAŹNIKIEM *LAI*

Wskaźnik powierzchni liści *LAI* jest definiowany jako sumaryczna powierzchnia liści mierzona na jednostkę powierzchni terenu [JIANG i in. 2005; KAŁUŻA, STRZELIŃSKI 2009; ZHENG, MOSKAL 2009]. Wskaźnik ten określa właściwości strukturalne i biochemiczne roślin i jest jednym z ważniejszych parametrów determinujących intensywność powiązanych z *fAPAR* biofizycznych procesów wegetacyjnych roślin, takich jak: fotosynteza, transpiracja, ewapotranspiracja oraz produktywność roślin [GLENN i in. 2008; SPANNER i in. 1990; ZARCO-TEJADA i in. 2005]. Umożliwia on określenie dynamiki rozwoju szaty roślinnej, przewidywanie

wzrostu roślin i pokrycia terenu przez rośliny; wykorzystywany jest także do szacowania ilości biomasy, a tym samym prognozowania plonów [GLENN i in. 2008].

Spektralne wskaźniki roślinności wprowadzono, aby za pomocą algebraicznych zależności wartości współczynników odbicia przy poszczególnych długościach fali ułatwić przedstawianie pomiarów optycznych w więcej niż jednym zakresie spektralnym. Dzięki nim można je przedstawić w postaci jednej bezwymiarowej wartości, wrażliwej na konkretne cechy analizowanej powierzchni. Typowe funkcje parametrów analizowanej powierzchni (y), w zależności od spektralnych wskaźników roślinności (SVI), przybierają zazwyczaj postać [LIANG 2004]:

$$y = \sum_{i=0}^n a_i SVI^i \quad (1)$$

lub

$$y = a + bSVI^c \quad (2)$$

lub

$$y = a \ln(b - SVI) + c \quad (3)$$

gdzie

a , b i c – współczynniki modeli.

Z drugiej strony, na wartości uzyskiwanych współczynników odbicia, poza parametrami pokrywy roślinnej, ma wpływ także wiele innych czynników, np. właściwości spektralne pokrywy glebowej, topografia terenu, skala wykonywania pomiaru, warunki atmosferyczne, rodzaj, a także kąt ustawienia przyrządu pomiarowego i kąt padania promieni słonecznych [JACKSON, HUETE 1991; SPANNER i in. 1990]. Dobry indeks wegetacyjny powinien być możliwie niewrażliwy na te czynniki.

Związek między spektralnymi wskaźnikami roślinności opartymi na świetle w przedziale czerwieni i promieniowaniu w przedziale bliskiej podczerwieni a wskaźnikiem powierzchni liści LAI stanowi przedmiot sporego zainteresowania i był, jak dotąd, przedmiotem wielu badań [CARLSON, RIPLEY 1997; ELVIDGE, CHEN 1995; HABOUDANE i in. 2004; HUETE i in. 2002; JIANG i in. 2005; LEEUWEN VAN i in. 1997; SOUDANI i in. 2006; SPANNER i in. 1990; TURNER i in. 1999; ZHENG, MOSKAL 2009]. Wykazano, że wskaźniki te są miernikiem „zieloności” pokrywy roślinnej, to znaczy kompleksu takich właściwości, jak zawartość chlorofilu w liściach, powierzchnia liści, wielkość i struktura pokrywy roślinnej, a także stan fizjologiczny roślinności [JAROCIŃSKA, ZAGAJEWSKI 2008; ZHENG, MOSKAL 2009]. Mniej sprawdzają się one zatem podczas oceny jednej, konkretnej charakterystyki pokrywy roślinnej, takiej jak np. LAI [GLENN i in. 2008; HUETE i in. 2002], a bardziej jako pomiar całkowitej ilości i jakości materiału fotosyntetycznego w roślinach na danej powierzchni, a także frakcji akumulowanej energii fotosynte-

tycznie czynnej (fAPAR) i intensywności zależnych od niej procesów: fotosyntezy, fotooddychania i transpiracji [ELVIDGE, CHEN 1995; PANDA i in. 2010; ZARCO-TEJADA i in. 2005]. Procesy te determinują z kolei wielkość produkcji pierwotnej ekosystemu. Z prowadzonych dotychczas badań wynika, że spośród wszystkich spektralnych wskaźników roślinności, opartych na współczynnikach odbicia w przedziałach czerwieni i bliskiej podczerwieni (ρ_{RED} i ρ_{NIR}), największą precyzją w przewidywaniu parametrów pokrywy roślinnej charakteryzowały się wskaźniki uwzględniające i korygujące wpływ efektów tła glebowego [BORGE, LEBLANC 2001; ELVIDGE, CHEN 1995; MANDAL i in. 2007; SALTZ i in. 1999].

Najstarszym i najbardziej popularnym wskaźnikiem spektralnym, opartym na pomiarach współczynników odbicia w przedziałach czerwieni i bliskiej podczerwieni, jest *NDVI* (ang. „Normalized Difference Vegetation Index”) (4).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (4)$$

gdzie:

ρ_{NIR} – współczynnik odbicia dla promieniowania w bliskiej podczerwieni;

ρ_{RED} – współczynnik odbicia dla światła w przedziale czerwieni.

NDVI przyjmuje wartości między -1 a 1 , i jest tym większy, im większa jest „zieloność” pokrywy roślinnej, co powoduje większe odbicie w podczerwieni i mniejsze w paśmie czerwonym – rośliny zawierają bowiem więcej chlorofilu, który absorbuje światło w paśmie czerwieni oraz miękiszu gąbczastego, odbijającego promieniowanie podczerwone [GLENN i in. 2008; HUETE i in. 2004; PANDA i in. 2010].

Zakładając, że zależność pomiędzy *NDVI* a *LAI* jest liniowa i że maksymalna wartość *NDVI* w ciągu sezonu odpowiada maksymalnemu *LAI* pokrywy roślinnej [JUSTICE 1986], wskaźnik *LAI* może być obliczony na podstawie *NDVI* za pomocą następującego wzoru:

$$LAI_i = LAI_{\max} \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} + NDVI_{\min}} \quad (5)$$

gdzie:

max, min, i – wartości maksymalne, minimalne i okresowe.

Założenie to jednak zazwyczaj nie jest spełnione, ponieważ wskaźniki wegetacyjne oparte na ρ_{RED} i ρ_{NIR} ulegają saturacji, gdy *LAI* zawiera się w granicach $2 \div 6$, w zależności od rodzaju pokrywy roślinnej i warunków środowiskowych [CARLSON, RIPLEY 1997]. W warunkach wysokich gęstości pokrywy roślinnej liniowe szacunki parametrów biofizycznych, określane na podstawie *NDVI*, są zatem problematyczne, powodują bowiem niedoszacowanie wartości *LAI*, a w zwią-

zku z tym także wartości strumieni wody i dwutlenku węgla oraz akumulacji biomasy [ZARCO-TEJADA i in. 2005]. Problematyką tą zajmował się m.in. CHEN [1996]. Indeks, mającym na celu umożliwienie szacunków wskaźnika powierzchni liści *LAI* na podstawie równań regresji liniowej, miał być zaproponowany przez niego wskaźnik *MSR* (ang. „Modified Simple Ratio”) (6):

$$MSR = \frac{\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} - 1}{\left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}\right)^{0,5} + 1} \quad (6)$$

Z kolei zakładając logarytmiczną zależność pomiędzy *NDVI* a *LAI*, szacunki *LAI* na podstawie *NDVI* stają się silnie zależne od takich czynników, jak geometria pokrywy roślinnej, właściwości optyczne gleby i liści, pozycja słońca i ilość chmur [LIANG 2004]. W związku z tym, mimo że *LAI* może być stosunkowo silnie skorelowany z *NDVI* na powierzchniach jednorodnych pod względem tych charakterystyk, na obszarach zróżnicowanych zależność ta okazuje się wyraźnie słabsza [GLENN i in. 2008]. Zmienność *NDVI*, jako logarytmicznej funkcji *LAI*, może być przedstawiona w postaci zmodyfikowanego prawa Beera [BARET, GUYOT 1991]:

$$NDVI = NDVI_{\infty} + (NDVI_s - NDVI_{\infty}) \exp(-K_{NDVI} LAI) \quad (7)$$

gdzie:

- $NDVI_s$ – indeks wegetacyjny odpowiadający wartości asymptotycznej, gdy *LAI* ma wartość 0 (co odpowiada wartościom ρ_{NIR} i ρ_{RED} dla czarnego ugoru);
- $NDVI_{\infty}$ – wartość asymptotyczna *NDVI* dla *LAI* zmierzającego w kierunku nieskończoności;
- K_{NDVI} – współczynnik określający nachylenie krzywej.

Przez oszacowanie $NDVI_s$, $NDVI_{\infty}$ i K_{NDVI} można oszacować *LAI* na podstawie jego nieliniowej zależności z *NDVI* [LIANG 2004].

Modyfikacją *NDVI*, zwiększającą wrażliwość wskaźnika na zmiany wskaźnika powierzchni liści w warunkach dużej gęstości pokrywy roślinnej jest *SR* (ang. „Simple Ratio”) (8).

$$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \quad (8)$$

Problemem ze stosowaniem *SR* jest jednak fakt, że wskaźnik ten jest jednocześnie znacznie mniej niż *NDVI* wrażliwy na zmiany w ilości wegetacji, gdy wielkość pokrywy roślinnej jest jeszcze niewielka [JACKSON, HUETE 1991].

Gdy pokrywa roślinna jest zbyt rzadka, wiarygodność uzyskiwanych wartości spektralnych wskaźników roślinności, opartych na ρ_{NIR} i ρ_{RED} , w znacznym stopniu zaburza także sygnał tła glebowego: zwilżenie lub wyschnięcie gleby powoduje jego zmienność [JACKSON, HUETE 1991]. HUETE [1988] odkrył sposób na zminimalizowanie tego efektu – sformułował wzór na *SAVI* (ang. „Soil Adjusted Vegetation Index”) (9):

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L}(1 + L) \quad (9)$$

gdzie L ma na celu zmniejszenie wrażliwości wskaźnika na odbicie promieniowania od gleby. Mnożnik $(1 + L)$ był z kolei potrzebny, aby zachować te same wartości graniczne co *NDVI* i zwiększyć dynamikę, którą wskaźnik utracił przez dodanie w mianowniku współczynnika L [JACKSON, HUETE 1991].

Wartość *SAVI* dla czarnego ugoru, tak samo jak w przypadku *NDVI*, przyjmuje wartości bliskie 0. Jego wartość wzrasta wraz ze zwiększaniem się stopnia pokrycia terenu przez rośliny. *SAVI* jest jednak mniej wrażliwy na zawartość chlorofilu niż *NDVI* i przez to ma ograniczoną dynamikę. Kolejnym ograniczeniem w stosowaniu *SAVI* jest fakt, że L to współczynnik, który powinien być zmienny w zależności od gęstości pokrywy roślinnej, wahając się od 0 dla bardzo gęstej pokrywy roślinnej do 1 dla niskich gęstości pokrywy roślinnej. Dla $L = 0$ wskaźnik *SAVI* jest równoważny wskaźnikowi *NDVI*. Ponieważ rzadko znana jest wartość gęstości pokrywy roślinnej, optymalizacja tego wskaźnika jest bardzo skomplikowana. HUETE [1988] zauważył jednak, że mimo że optymalne wartości L były różne dla różnych ilości vegetacji, L równe 0,5 było optymalne dla szerokiego spektrum warunków. Zatem przyjęcie takiej wartości L powoduje zmniejszenie zakłóceń glebowych w różnych typach pokrywy roślinnej [PANDA i in. 2010].

Inne badania wpływu efektów tła glebowego na uzyskiwane wartości danych spektralnych poskutkowały znaczącym poszerzeniem grupy wskaźników, mających na celu minimalizację tych zaburzeń. Zaproponowano m.in. takie wskaźniki, jak *TSVI* (ang. „Transformed Soil Adjusted Vegetation Index”) [BARET, GUYOT 1991], *MSAVI* (ang. „Modified Soil Adjusted Vegetation Index”) [QI i in. 1994], czy *OSAVI* (ang. „Optimised Soil Adjusted Vegetation Index”) [RONDEAUX i in. 1996]. Modyfikacje wskaźników z rodziny *SAVI* polegają przede wszystkim na dopasowywaniu współczynnika L w taki sposób, aby uzyskany wskaźnik możliwie jak najdokładniej odzwierciedlał zmienność ilości biomasy. *OSAVI* (10) został wybrany do analizy w niniejszej publikacji ze względu na wyniki dotychczasowych badań [RONDEAUX i in. 1996], które wskazują, że daje on najlepsze rezultaty na homogenicznych łąkach i polach uprawnych w umiarkowanych szerokościach geograficznych. Był on wykorzystywany m.in. przez DAUGHTRY’EGO i in. [2000], FLOWERSA i in. [2001], HABOUDANE’A i in. [2002] i ZARCO-TEJADĘ i in. [2005]. Wzór na obliczenie *OSAVI* przybiera następującą postać:

$$OSAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0,16} \quad (10)$$

TEREN BADAŃ

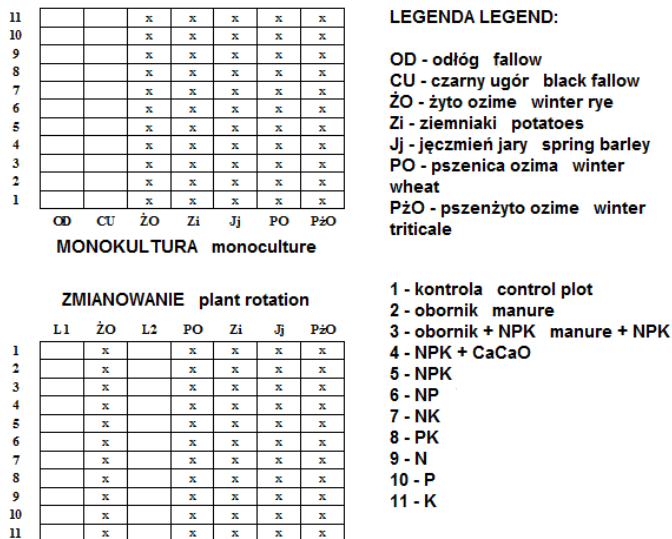
Badania przeprowadzono na terenie rolniczym w Brodach (52°26'18" N, 16°17'40" E), miejscowości położonej w środkowej Polsce, ok. 50 km na północny zachód od Poznania (województwo wielkopolskie, powiat nowotomyski, gmina Lwówek). Ze względu na obecność Rolniczego Gospodarstwa Doświadczalnego Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, na terenie którego od 1957 r. prowadzone jest doświadczenie statyczne, dotyczące wpływu nawożenia i reżimu uprawy na plonowanie roślin, obszar ten jest stosunkowo dobrze zbadany i opisany w literaturze [BLECHARCZYK 2002]. Na obszarze badawczym dominują gleby płowe, klasy bonitacyjnej IIIb–IVa, kompleksu żytniego dobrego i bardzo dobrego, o składzie granulometrycznym piasków gliniastych lekkich i mocnych, średnio głębokich, zalegających na glinach lekkich. Według klasyfikacji FAO klasyfikuje się je jako Albic Luvisols [BLECHARCZYK 2002]. Pod względem rolniczym obszar ten charakteryzuje się jednym z najdłuższych okresów wegetacyjnych w Polsce. Według danych zebranych w latach 1959–1999 na stacji meteorologicznej Zakładu Doświadczalnego Brody średnia roczna suma opadów wynosi tu 571,3 mm, a średnia roczna temperatura – 7,9°C [BLECHARCZYK 2002].

METODY BADAŃ

METODY BADAŃ TERENOWYCH

Dane wykorzystane w pracy uzyskano badając pięć gatunków roślin uprawnych (żyto ozime, pszenicę ozimą, pszenżyto ozime, ziemniaki i jęczmień jary), uprawianych w warunkach 11 rodzajów nawożenia, zarówno w reżimie zmianowania, jak i monokultury. W trakcie każdej kampanii pomiarowej zbierano dane dotyczące wskaźnika powierzchni liści LAI i charakterystyk spektralnych na 110 punktach pomiarowych o wymiarach 6 x 11 m, przy czym punktem pomiarowym jest stanowisko uprawy danego gatunku w warunkach konkretnego systemu nawożenia i reżimu uprawy (rys. 1). Punkty pomiarowe zlokalizowano daleko od dużych, rozpraszających światło obiektów, mogących w znaczący sposób zaburzać uzyskiwane wyniki pomiarów spektralnych.

Wykorzystane dane pochodzą z pięciu kampanii pomiarowych przeprowadzonych w okresie od 21.04.2011 r. do 28.06.2011 r. (21.04.2011, 06.05.2011, 26.05.2011, 04.06.2011 i 28.06.2011). Kryterium wyboru dni pomiarowych były panujące warunki atmosferyczne, a konkretnie minimalizacja niekorzystnego wpływu

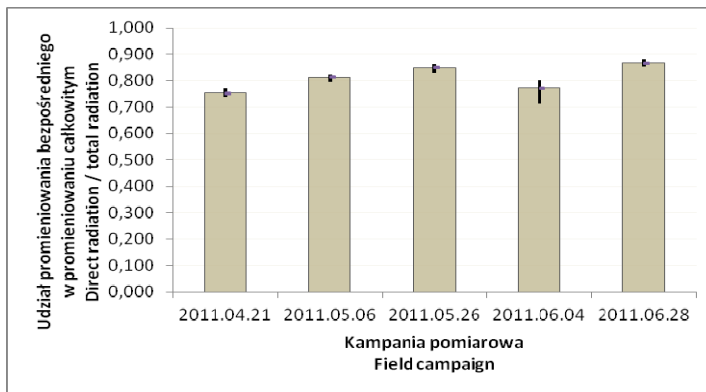


Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych (x) na terenie Rolniczego Gospodarstwa Doświadczalnego w Brodach; źródło: opracowanie własne na podstawie: BLECHARCZYK [2002]

Fig. 1. Location of measurement points (x) in Agricultural Experimental Farm in Brody; source: own elaboration based on BLECHARCZYK [2002]

wu promieniowania rozproszonego na mierzone wartości danych spektralnych. W trakcie pomiarów udział promieniowania bezpośredniego w promieniowaniu całkowitym (rys. 2) był duży (wahał się w granicach od 71 do 88%) i stabilny (współczynniki jego zmienności dla kampanii pomiarowej wynosiły od 0,94 do 4,08%, a współczynnik zmienności pomiędzy kampaniami pomiarowymi – 6,05%). Zgodnie z zaleceniami, by pomiary spektralne wykonywać możliwie jak najbliżej południa słonecznego [ELVIDGE, CHEN 1995], kampanie pomiarowe prowadzono w godzinach od 10:00 do 14:00.

Pomiar promieniowania w zakresie PAR (ang. „Photosynthetically Active Radiation”) przepuszczonego przez pokrywę roślinną, będący podstawą do obliczenia *LAI*, wykonano za pomocą przyrządu pomiarowego firmy Delta-T (Delta-T Devices, Cambridge, UK): sondy SunScan (pomiar PAR pod pokrywą roślinną) z czujnikiem odniesienia BF3 (pomiar całkowitego i rozproszonego PAR nad pokrywą roślinną). Zmierzona w ten sposób transmitancja PAR przez pokrywę roślinną z konkretnym udziałem promieniowania rozproszonego w całkowitym, wraz z parametrami *ELADP* (ang. „Ellipsoidal Leaf Angle Distribution Parameter”) i *a* (ang. „absorbance”), a także kątem zenitalnym Słońca, stanowią kluczowe dane wejściowe do uproszczonego odwróconego modelu Wooda [User Manual 2008]. Model ten jest stosowany do obliczeń wartości wskaźnika powierzchni liści *LAI* na potrzeby przyrządu pomiarowego SunScan. Model Wooda zawiera dwie składowe, funkcję dla promieniowania bezpośredniego i dla promieniowania rozproszonego.



Rys. 2. Udział promieniowania bezpośredniego w promieniowaniu całkowitym podczas prowadzonych kampanii pomiarowych; źródło: wyniki własne

Fig. 2. The share of direct radiation in total radiation during the performed measurements; source: own studies

Dzięki temu pomiar transmitancji jako funkcji wskaźnika powierzchni liści może być wykonywany z dużą dokładnością w pełnym spektrum warunków atmosferycznych.

Pomiar irradiancji i radiancji spektralnej dla długości światła czerwonego (670 nm) i bliskiej podczerwieni (850 nm) – będący podstawą do obliczenia *NDVI*, *SR*, *MSR*, *SAVI* i *OSAVI* – przeprowadzono za pomocą przyrządu SpectroSense2+, wyposażonego w dwa czterokanałowe czujniki SKR1850/SS2 firmy SKYE (SKYE Instruments, Llandrindod Wells, UK) ustawione w pozycji zenit–nadir. Czujnik skierowany w dół, mierzący radiancję spektralną, ma wąskie pole widzenia (kął pomiędzy wektorem prostopadłym do czujnika i granicą pola widzenia w wybranym kierunku $\theta = 12,5^\circ$), natomiast czujnik skierowany w górę służy do pomiaru spektralnej irradiancji hemisferycznej, wobec czego jest wyposażony w nakładkę (tzw. cosine difuser), dzięki której jego pole widzenia znacząco się powiększa ($\theta = 85^\circ$). Szerokość pasma widma, z którego zbierany jest sygnał, wynosi 10 nm, a dokładność pomiaru – 0,008% w temperaturze 20°C.

ANALIZA DANYCH POMIAROWYCH

Zarówno pomiar transmitancji w przedziale PAR, jak i irradiancji i radiancji spektralnej był wykonywany trzykrotnie na każdym punkcie pomiarowym. Następnie, na podstawie uzyskanych wartości, obliczano wskaźniki powierzchni liści i spektralne wskaźniki roślinności. Średnia arytmetyczna z tych wielkości obliczona na podstawie powtórzeń była traktowana jako wartość charakteryzująca dany punkt pomiarowy.

Drugi etap opracowania statystycznego rozpoczęło wykonanie wykresów, na których przedstawiono wartości poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności w zależności od zmiennej niezależnej – *LAI*. Analiza danych obejmowała porównanie współczynników determinacji R^2 , uzyskanych w różnych typach zależności (liniowej, logarytmicznej, wykładniczej, wielomianowej i potęgowej), w podziale na gatunki analizowane w pracy.

Aby dla każdego z analizowanych gatunków uzyskać najlepiej dopasowane modele, służące do szacowania *LAI* na podstawie danych spektralnych, sporządzono wykresy przedstawiające wartości *LAI*, zmierzone w warunkach różnych wartości zmiennej niezależnej, którą byłyby poszczególne spektralne wskaźniki roślinności. Na podstawie uzyskanych równań regresji liniowej, logarytmicznej, wykładniczej, wielomianowej i potęgowej obliczono wartości *LAI* oczekiwanych w konkretnej wartości spektralnego wskaźnika roślinności, których różnice z wartościami zmierzonymi posłużyły do obliczenia trzech miar statystycznych, charakteryzujących zdolności poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności do przewidywania odpowiadającej im wartości *LAI*:

$$ATPA = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_a - y_p|}{y_a} \right) 100\% \quad (11)$$

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(y_a - y_p) - d_m]^2}{n - 1}} \quad (12)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_a - y_p)^2}{n}} \quad (13)$$

gdzie:

- y_a – zmierzona wartość wskaźnika powierzchni liści;
- y_p – wartość wskaźnika powierzchni liści obliczona na podstawie równania regresji;
- d_m – średnia różnica pomiędzy y_a i y_p ;
- n – liczba obserwacji.

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

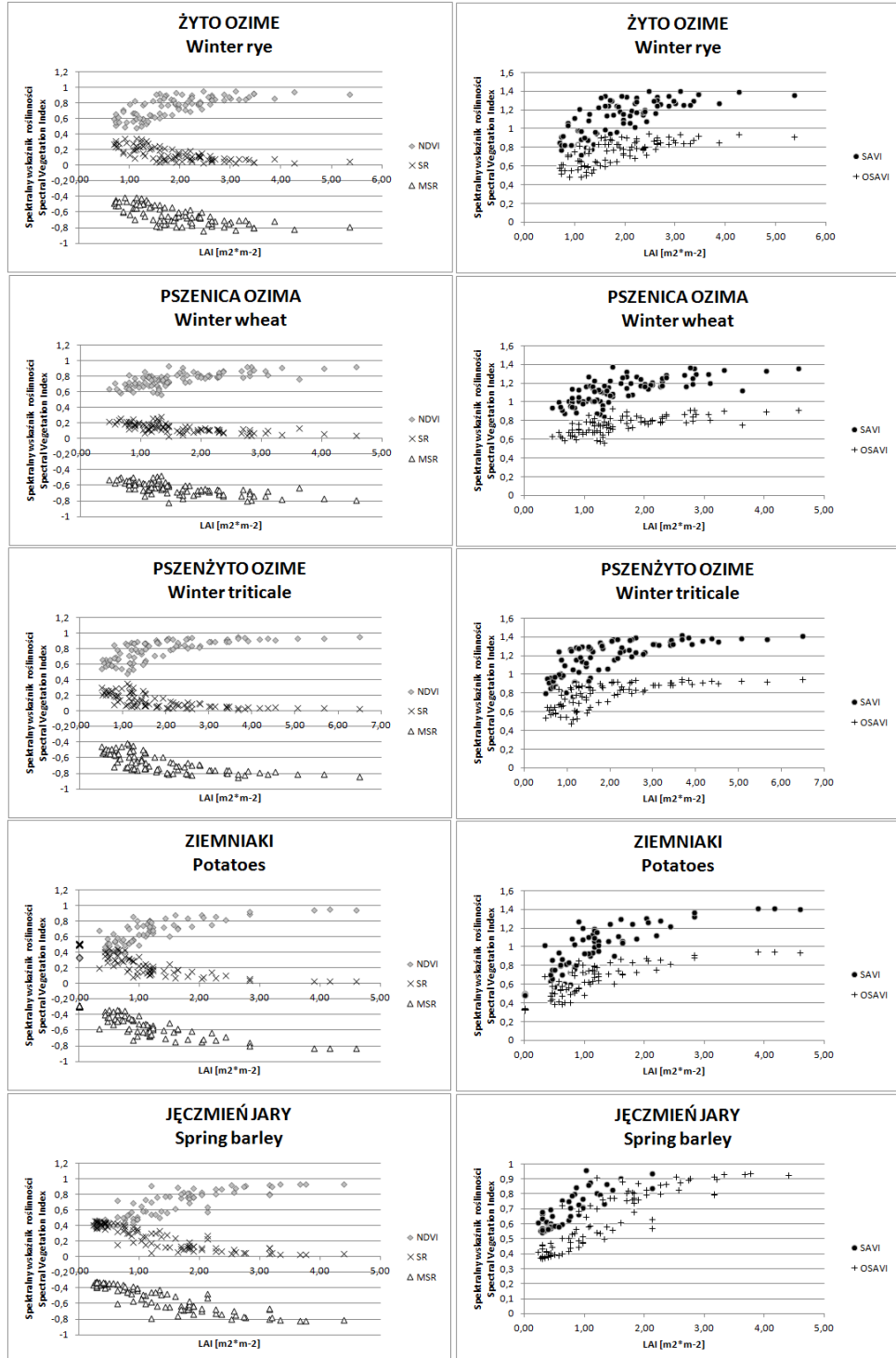
Analizując uzyskane wyniki (tab. 1, rys. 3) można zauważyć, że – zgodnie z wynikami innych badań [CARLSON, RIPLEY 1997; ELVIDGE, CHEN 1995; HABOUDANE i in. 2004; JIANG i in. 2005; LEEUWEN VAN i in. 1997; SOUDANI i in.

Tabela 1. Współczynniki determinacji R^2 dla spektralnych wskaźników roślinności w zależności od LAI dla żyta, pszenicy ozimej, pszenżyta ozimego, ziemniaków i jęczmienia jarego

Table 1. Coefficients of determination R^2 for spectral plant indices related to LAI for rye, winter wheat, winter triticale, potatoes and spring barley

Spektralny wskaźnik roślinności Spectral plant index	R^2 w zależności R^2 for the relationship				
	liniowej linear	logarytmicznej logarithm	wykładniczej exponential	wielomianowej polynomial	potęgowej power
Żyto ozime Winter rye					
NDVI	0,488	0,554	0,472	0,563	0,546
SR	0,489	0,565	0,510	0,576	0,541
MSR	0,510	0,567	–	0,574	–
SAVI	0,518	0,586	0,498	0,595	0,575
OSAVI	0,507	0,575	0,489	0,584	0,566
Pszenica ozima Winter wheat					
NDVI	0,448	0,486	0,428	0,487	0,474
SR	0,447	0,497	0,478	0,497	0,491
MSR	0,473	0,507	–	0,507	–
SAVI	0,480	0,526	0,460	0,526	0,514
OSAVI	0,468	0,513	0,450	0,513	0,501
Pszenżyto ozime Winter triticale					
NDVI	0,458	0,566	0,425	0,566	0,536
SR	0,431	0,542	0,560	0,544	0,626
MSR	0,497	0,592	–	0,590	–
SAVI	0,470	0,579	0,435	0,579	0,547
OSAVI	0,462	0,570	0,428	0,570	0,540
Ziemniaki Potatoes					
NDVI	0,712	0,711	0,656	0,844	0,798
SR	0,673	0,770	0,827	0,852	0,561
MSR	0,746	0,688	–	0,845	–
SAVI	0,714	0,713	0,657	0,845	0,801
OSAVI	0,713	0,711	0,656	0,844	0,799
Jęczmień jary Spring barley					
NDVI	0,759	0,801	0,733	0,825	0,821
SR	0,739	0,816	0,792	0,833	0,734
MSR	0,777	0,792	–	0,823	–
SAVI	0,760	0,803	0,733	0,826	0,824
OSAVI	0,760	0,801	0,733	0,826	0,822

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.



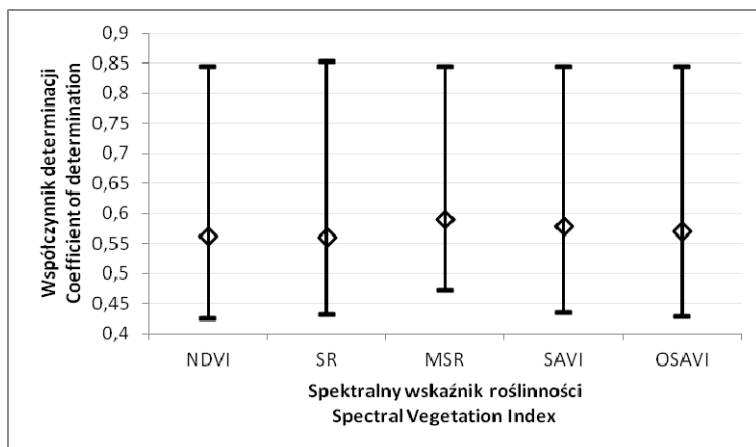
2006; TURNER i in. 1999; ZHENG, MOSKAL 2009] – wartości spektralnych wskaźników roślinności, opartych na ρ_{NIR} i ρ_{RED} , analizowane w zależności od wskaźnika powierzchni liści są w charakterystyczny sposób rozproszone, a stopień tej zależności jest umiarkowany. Wartość R^2 waha się w granicach od 0,43 ($NDVI$ przy zależności wykładniczej na pszenżycie) do 0,85 (SR przy zależności wielomianowej na ziemniakach), a mediana wynosi 0,57. Spowodowane może to być faktem, że $NDVI$, SR , MSR , $SAVI$ i $OSAVI$ służą do badania ilości i jakości aparatu fotosyntetycznego roślin na danym terenie – parametru, na który wpływ ma także wiele innych, poza wskaźnikiem powierzchni liści LAI , czynników, takich jak np. zawartość chlorofilu w liściach, stan i kondycja roślinności, a także wartość wskaźnika fractional vegetation cover (charakteryzującego procentowe pokrycie terenu przez rośliny), biomasy czy green ratio (stosunku biomasy żywej do całkowitej) [HABOUDANE i in. 2004].

ZALEŻNOŚĆ OD WSKAŹNIKA POWIERZCHNI LIŚCI LAI : PORÓWNANIE POSZCZEGÓLNYCH SPEKTRALNYCH WSKAŹNIKÓW ROŚLINNOŚCI

Współczynniki determinacji uzyskane dla poszczególnych analizowanych spektralnych wskaźników roślinności były do siebie zbliżone (rys. 4, tab. 2). Mediana mieściła się w granicach od 0,56 (dla SR) do 0,59 (dla MSR), natomiast współczynnik zmienności między wartościami R^2 uzyskanymi dla poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności (na tym samym gatunku i z zastosowaniem tego samego typu zależności) wahał się w granicach od 0,5 do 16,1%, nie przekraczając najczęściej 5%. Analizując spektralne wskaźniki roślinności, dla których w poszczególnych przypadkach uzyskano maksymalne i minimalne wartości współczynnika determinacji (tab. 3) można zauważyć, że najczęściej najsłabszą zależność od wskaźnika powierzchni liści odnotowano dla najprostszego, szeroko stosowanego wskaźnika $NDVI$. Największe wartości R^2 z kolei uzyskiwano najczęściej dla $SAVI$ (tab. 3). Oprócz $SAVI$ często maksymalne wartości współczynnika determinacji uzyskiwano także z zastosowaniem SR i MSR . Wszystkie te wskaźniki łączy fakt, że dają one najdokładniejsze rezultaty w warunkach małej gęstości pokrywy roślinnej, przy czym $SAVI$ redukuje dodatkowo wpływ prześwitów glebowych, występujących na większości upraw analizowanych gatunków (życie ozimym, ziemniakach, pszenżycie ozimym), nawet w optimum ich rozwoju. Najwyższe współczynniki determinacji uzyskiwane najczęściej dla $SAVI$ potwierdzają wy-

Rys. 3. Zależność spektralnych wskaźników roślinności ($NDVI$, SR , MSR , $SAVI$, $OSAVI$) od wskaźnika powierzchni liści LAI na życie ozimym, pszenicy ozimej, pszenżycie ozimym, ziemniakach i jęczmieniu jarym; źródło: wyniki własne

Fig. 3. The relationship between spectral plant indices ($NDVI$, SR , MSR , $SAVI$, $OSAVI$) and leaf area index for winter rye, winter wheat, winter triticale, potatoes and spring barley; source: own studies



Rys. 4. Przedział wartości i mediana dla współczynników determinacji R^2 uzyskanych w warunkach zależności od LAI dla poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności; źródło: wyniki własne

Fig. 4. Range and median of the coefficients of determination R^2 obtained for the relationships between LAI and particular spectral plant indices; source: own studies

Tabela 2. Współczynniki zmienności (%) dla wartości R^2 uzyskanych w warunkach zależności od LAI dla różnych spektralnych wskaźników roślinności na tym samym gatunku i z zastosowaniem tego samego typu zależności

Table 2. Variability coefficients (%) of the R^2 values for the relationship between LAI and various spectral plant indices of the same species and the same type of relationship

Zależność Relationship	Żyto ozime Winter rye	Pszenica ozima Winter wheat	Pszenżyto ozime Winter triticale	Ziemniaki Potatoes	Jęczmień jary Spring barley
Liniowa Linear	2,7	3,2	5,1	3,6	1,8
Logarymiczna Logarithmic	2,1	3,0	3,2	4,3	1,1
Wykładnicza Exponential	3,3	4,6	14,2	12,2	4,0
Wielomianowa Polynomial	2,1	3,0	3,0	0,4	0,5
Potęgowa Power	2,9	3,4	7,6	16,1	5,5

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

niki innych badań prowadzonych nad zależnością poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności od wskaźnika powierzchni liści LAI [BORGE, LEBLANC 2001; GLENN i in. 2008; MANDAL i in. 2007; SALTZ i in. 1999].

Tabela 3. Spektralne wskaźniki roślinności, dla których uzyskano maksymalne i minimalne współczynniki determinacji w warunkach zależności od LAI na tym samym gatunku i z zastosowaniem tego samego typu zależności

Table 3. Spectral plant indices, for which the relationship with LAI for the same species and the same type of relationship gave maximum and minimum coefficients of determination

Zależność Relationship	Współczynnik determinacji Coefficient of determination									
	maksymalny maximum					minimalny minimum				
	żyto ozime winter rye	pszenica ozima winter wheat	pszenżyto ozime triticale	ziemniaki potatoes	jęczmień jary spring barley	żyto ozime winter rye	pszenica ozima winter wheat	pszenżyto ozime triticale	ziemniaki potatoes	jęczmień jary spring barley
Liniowa Linear	SAVI	SAVI	MSR	SAVI	MSR	NDVI	NDVI	SR	SR	SR
Logarytmiczna Logarithm	SAVI	SAVI	MSR	SR	SR	NDVI	NDVI	SR	MSR	MSR
Wykładnicza Exponential	SR	SR	SR	SR	SR	NDVI	NDVI	NDVI	NDVI, OSAVI	NDVI, SAVI, OSAVI
Wielomianowa Polynomial	SAVI	SAVI	MSR	SR	SR	NDVI	NDVI	SR	NDVI, OSAVI	NDVI
Potęgowa Power	SAVI	SAVI	SR	SAVI	SAVI	SR	NDVI	NDVI	NDVI	SR

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

ZALEŻNOŚĆ OD WSKAŹNIKA POWIERZCHNI LIŚCI LAI: PORÓWNANIE POSZCZEGÓLNYCH TYPÓW ZALEŻNOŚCI

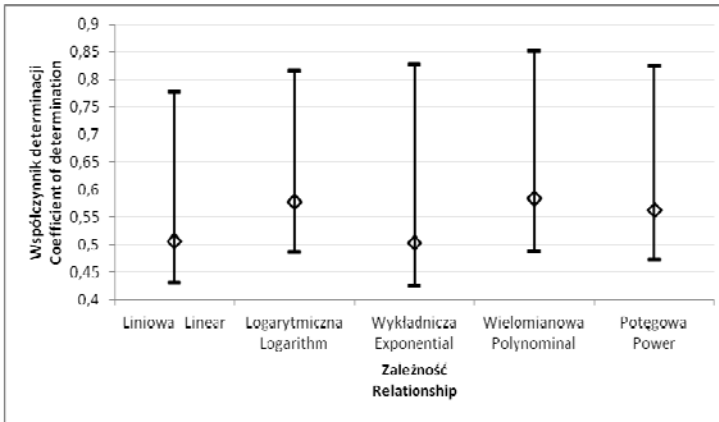
Współczynniki zmienności dla wartości R^2 , uzyskanych z zastosowaniem poszczególnych typów zależności od LAI (na tym samym gatunku i z zastosowaniem tego samego spektralnego wskaźnika roślinności), są wyższe niż te charakteryzujące zmienność między wskaźnikami i w zdecydowanej większości mieszczą się w granicach od 5 do 15% (tab. 4). Wskazuje to, że stopień zależności danych spektralnych od LAI silniej zależy od zastosowanego typu zależności aniżeli od zastosowanego spektralnego wskaźnika roślinności. Analizując wartości R^2 uzyskane z zastosowaniem poszczególnych typów zależności (rys. 5) można zauważyć, że zależność spektralnych wskaźników roślinności od wskaźnika powierzchni liści LAI jest lepiej opisywana równaniami regresji wielomianowej, logarytmicznej i potęgowej (mediana od 0,56 do 0,58), niż wykładniczej i liniowej (wartości mediany odpowiednio 0,50 i 0,51). Obserwacja ta potwierdza się także podczas analizy współczynników determinacji w rozbięciu na poszczególne gatunki i spektralne wskaźniki roślinności; najczęściej maksymalne współczynniki determinacji uży-

Tabela 4. Współczynniki zmienności (%) dla wartości R^2 uzyskanych w warunkach zależności od LAI dla różnych typów zależności na tym samym gatunku i z zastosowaniem tego samego spektralnego wskaźnika roślinności

Table 4. Variability coefficients (%) of the R^2 obtained for various types of relationships between LAI and the same species and the same spectral plant index

Spektralny wskaźnik roślinności Spectral vegetation index	Żyto ozime Winter rye	Pszenica ozima Winter wheat	Pszenżyto ozime Winter triticale	Ziemniaki Potatoes	Jęczmień jary Spring barley
<i>NDVI</i>	7,9	5,6	12,7	10,1	5,1
<i>SR</i>	6,8	4,4	13,0	16,3	5,7
<i>MSR</i>	6,4	4,0	9,7	10,5	2,9
<i>SAVI</i>	7,9	5,9	12,6	10,1	5,2
<i>OSAVI</i>	7,9	5,8	12,7	10,1	5,1

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.



Rys. 5. Przedział wartości i mediana dla współczynników determinacji R^2 uzyskanych w warunkach zależności od LAI dla poszczególnych typów zależności; źródło: wyniki własne

Fig. 5. Range and median of the coefficients of determination R^2 obtained for various types of relationship with LAI ; source: own studies

skano z zastosowaniem zależności wykładniczej oraz logarytmicznej. Najmniejsze wartości R^2 występowały natomiast najczęściej po zastosowaniu zależności wielomianowej, często także – po zastosowaniu zależności liniowej (tab. 5).

Fakt, że liniowa zależność od LAI z reguły okazywała się – oprócz wykładniczej – najslabsza, osiągając niższe współczynniki determinacji niż zależności logarytmiczna, wielomianowa i potęgowa, jest interesującą obserwacją. Okazuje się, że nawet wskaźnik *MSR*, z założenia mający poprawić wartości tej właśnie zależności, mimo że w większości przypadków istotnie charakteryzuje się największą zależnością liniową od LAI spośród wszystkich analizowanych wskaźników (rys. 6),

Tabela 5. Typy zależności, dla których uzyskano maksymalne i minimalne współczynniki determinacji w warunkach zależności od LAI na tym samym gatunku i z zastosowaniem tego samego spektralnego wskaźnika roślinności

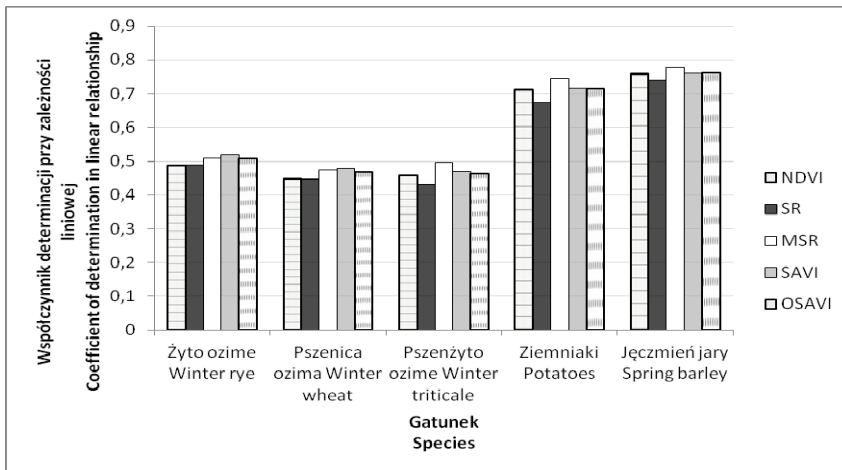
Table 5. Types of relationships, for which maximum and minimum coefficients of determination were obtained for the relationship between LAI and the same species and the same spectral plant index

Spektralny wskaźnik roślinności Spectral vegetation index	Współczynnik determinacji Coefficients of determination									
	maksymalny maximum					minimalny minimum				
	żyto ozime winter rye	pszenica ozima winter wheat	pszenżyto ozime triticale	ziemniaki potatoes	jęczmień jary spring barley	żyto ozime winter rye	pszenica ozima winter wheat	pszenżyto ozime triticale	ziemniaki potatoes	jęczmień jary spring barley
NDVI	WI	WI	WI, LG	WI	WI	WY	WY	WY	WY	WY
SR	WI	WI, LG	PO	WI	WI	LI	LI	LI	PO	PO
MSR	WI	WI, LG	LG	WI	WI	LI	LI	LI	WI	LI
SAVI	WI	WI, LG	WI, LG	WI	WI	WY	WY	WY	WY	WY
OSAVI	WI	WI, LG	WI, LG	WI	WI	WY	WY	WY	WY	WY

Objaśnienia: zależność od LAI: LI – liniowa, LG – logarytmiczna, WY – wykładnicza, WI – wielomianowa, PO – potęgowa.

Explanations: relationship on LAI: LI – linear, LG – logarithm WY – exponential, WI – polynomial, PO –power.

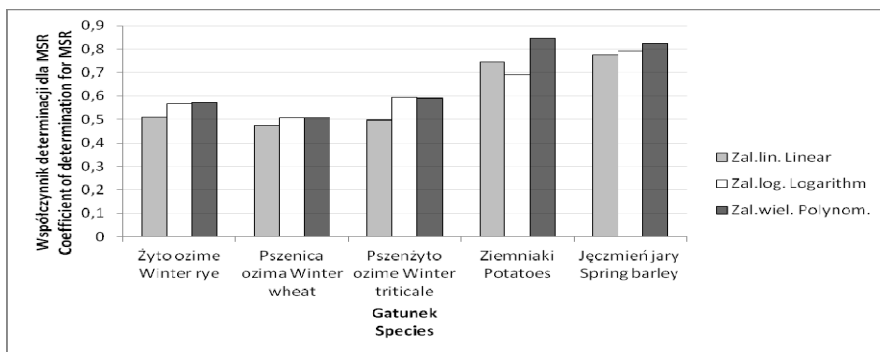
Źródło: wyniki własne. Source: own studies.



Rys. 6. Współczynniki determinacji w warunkach zależności liniowej od LAI dla poszczególnych gatunków i spektralnych wskaźników roślinności; źródło: wyniki własne

Fig. 6. Coefficients of determination of the linear relationship between LAI and particular plant species and plant spectral indices; source: own studies

to jednak nadal jego zależność od wskaźnika powierzchni liści jest lepiej opisywana współczynnikami determinacji logarytmicznej i wielomianowej (rys. 7). Nieliniowość zaobserwowanych relacji potwierdza wyniki MOREIRY [2000], który zauważył, że w pewnym momencie wzrostu roślin wartości spektralnych wskaźników roślinności, opartych na świetle w przedziale czerwieni i promieniowaniu w przedziale bliskiej podczerwieni, dotychczas rosnące wraz z charakterystykami ilościowymi pokrywy roślinnej w sposób niemal liniowy, stają się niewrażliwe na dalszy ich wzrost, a charakter zależności ulega zmianie. Efekt saturacji występujący dla większości spektralnych wskaźników roślinności, opartych na ρNIR i ρRED , zaobserwowali też inni badacze, m.in. BARET, GUYOT [1991], BRANTLEY i in. [2011], HABOUDANE i in. [2004], HUETE i in. [2002], SHIHAO i in. [2003], WANG i in. [2005]. Dla gatunków analizowanych w pracy saturacja wskaźników $NDVI$ i SR wystąpiła, gdy wskaźnik powierzchni liści LAI kształtował się w granicach od 2,5 do 4 $m^2 \cdot m^{-2}$, a saturacja MSR , $SAVI$ i $OSAVI$ – gdy LAI kształtował się w granicach od 3,5 do 5 $m^2 \cdot m^{-2}$ (rys. 3).

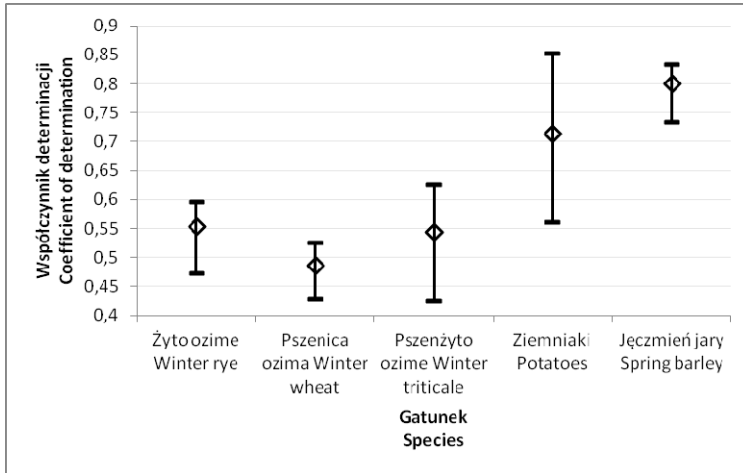


Rys. 7. Współczynniki determinacji uzyskane dla wskaźnika MSR na różnych gatunkach i w różnych typach zależności; źródło: wyniki własne

Fig. 7. Coefficients of determination obtained for the MSR index with various species and various types of relationships; source: own studies

ZALEŻNOŚĆ OD WSKAŹNIKA POWIERZCHNI LIŚCI LAI : PORÓWNANIE POSZCZEGÓLNYCH GATUNKÓW

Podobnie jak w innych badaniach, prowadzonych m.in. przez HABOUDANE i in. [2004], między poszczególnymi gatunkami występowały spore różnice, jeżeli chodzi o stopień zależności spektralnych wskaźników roślinności od LAI (rys. 8). Współczynniki zmienności dla wartości R^2 uzyskanych na różnych gatunkach (z zastosowaniem tego samego spektralnego wskaźnika roślinności i typu zależności) są wyższe niż te charakteryzujące zmienność między wskaźnikami i typami zależności i w zdecydowanej większości przekraczają 20% (tab. 6). Najsilniejszą



Rys. 8. Przedział wartości i mediana dla współczynników determinacji R^2 uzyskanych w warunkach zależności od LAI dla poszczególnych gatunków; źródło: wyniki własne

Fig. 8. Range and median of the coefficients of determination R^2 obtained for the relationship of LAI for particular plant species; source: own studies

Tabela 6. Współczynniki zmienności (%) dla wartości R^2 uzyskanych w warunkach zależności od LAI dla różnych gatunków na przy zastosowaniu tego samego spektralnego wskaźnika roślinności i typu zależności

Table 6. Variability coefficients (%) of the R^2 values obtained for the relationship of LAI with various plant species using the same spectral plant index and type of relationship

Spektralny wskaźnik roślinności Spectral vegetation index	Zależność / Relationship				
	liniowa linear	logarytmiczna logarithm	wykładniczej exponential	wielomianowej polynomial	potęgowej power
NDVI	26,2	20,6	26,2	25,2	25,5
SR	25,3	22,7	25,9	25,6	15,9
MSR	24,6	17,8	–	23,2	–
SAVI	23,4	17,7	23,6	22,2	22,7
OSAVI	24,6	18,7	24,6	23,3	23,6

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

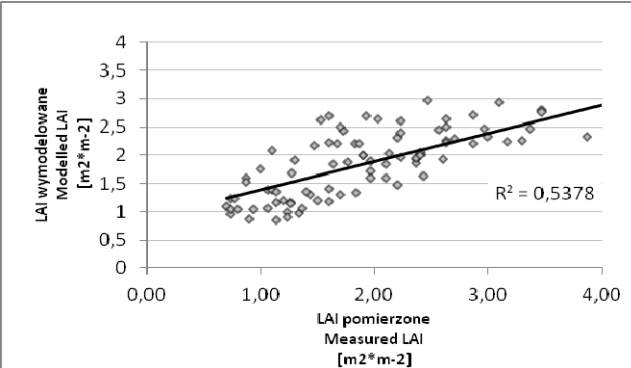
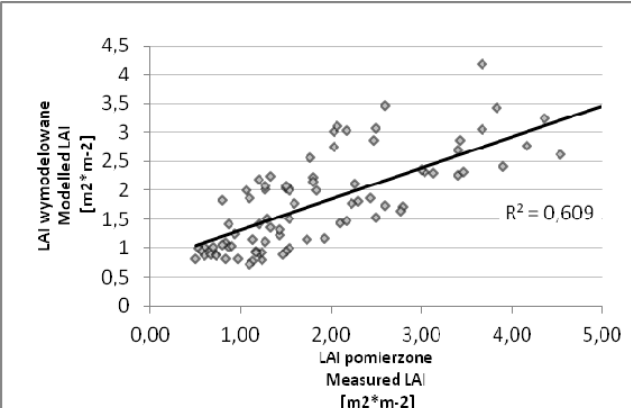
zależnością charakterystyk spektralnych od LAI charakteryzowały się jęczmień jary i ziemniaki (mediana dla uzyskanych wartości R^2 odpowiednio 0,80 i 0,71). Najmniejsze wartości współczynnika determinacji stwierdzono natomiast dla danych dotyczących pszenicy ozimej (mediana 0,49). Niemniej jednak, proporcje między współczynnikami determinacji liczonymi dla poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności w poszczególnych rodzajach zależności (tab. 1) okazały się być zbliżone na niemal wszystkich analizowanych gatunkach. Jedynym wyjątkiem okazały się ziemniaki, na których przykładzie widoczne są istotne odstępstwa od

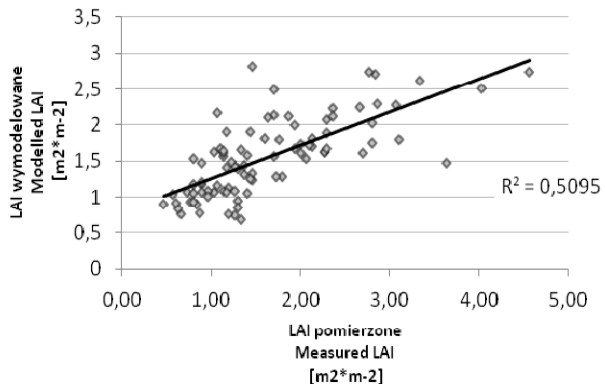
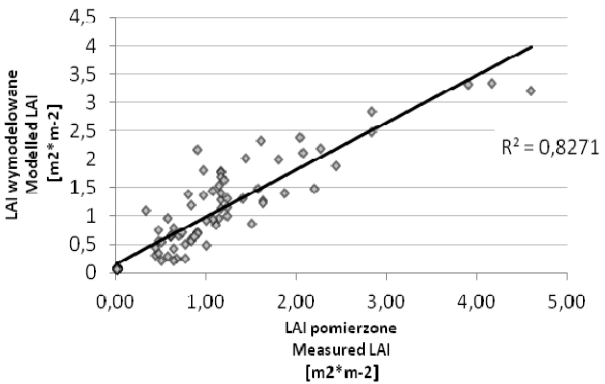
Tabela 7. Wartości root mean square error (RMSE), average test prediction accuracy (ATPA) i standard error of prediction (SEP) dla różnych modeli szacowania wskaźnika powierzchni liści *LAI* na podstawie spektralnych wskaźników roślinności**Table 7.** Root of the mean square error (RMSE), average test of prediction accuracy (ATPA) and standard error of prediction (SEP) for various models of estimating the leaf area index based on spectral plant indices

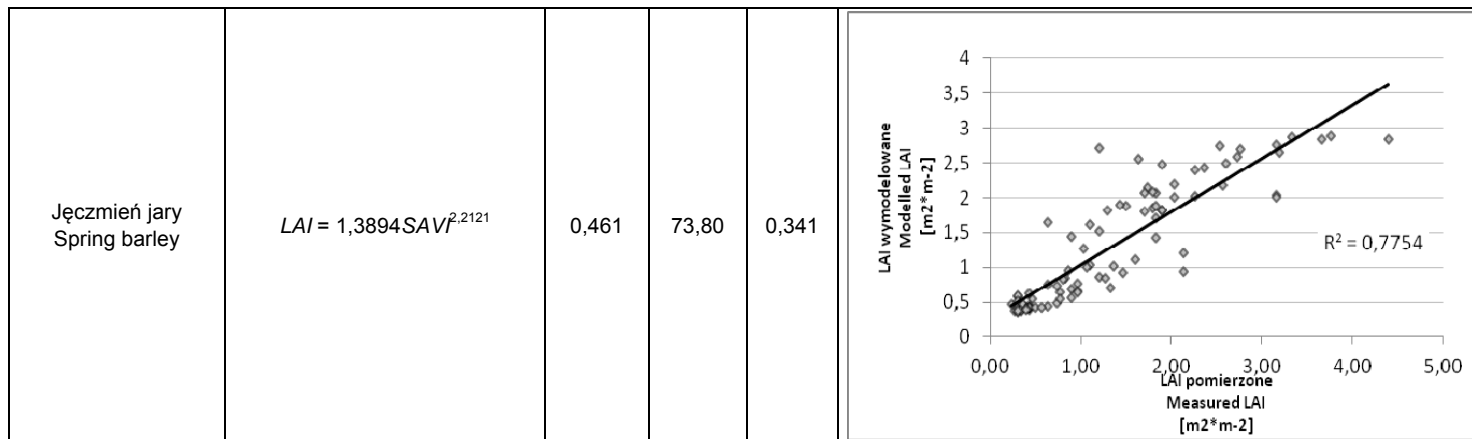
Spektralny wskaźnik roślinności Spectral vegetation index	Zależność Relationship														
	liniowa linear			logarytmiczna logarithm			wykładnicza exponential			wielomianowa polynomial			potęgowa power		
	RMSE	ATPA	SEP	RMSE	ATPA	SEP	RMSE	ATPA	SEP	RMSE	ATPA	SEP	RMSE	ATPA	SEP
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Żyto ozime Winter rye														
<i>NDVI</i>	0,621	72,47	0,413	0,631	71,87	0,423	0,622	73,72	0,407	0,614	73,08	0,406	0,626	73,6	0,414
<i>SR</i>	0,621	72,5	0,415	0,608	73,15	0,396	0,615	74,09	0,405	0,603	73,73	0,398	0,638	73,11	0,412
<i>MSR</i>	0,608	73,12	0,401	–	–	–	0,614	74,05	0,400	0,606	73,39	0,398	–	–	–
<i>SAVI</i>	0,603	73,27	0,398	0,616	72,70	0,412	0,598	74,62	0,389	0,59	74,06	0,385	0,605	74,41	0,398
<i>OSAVI</i>	0,61	73,01	0,404	0,621	72,45	0,416	0,607	74,33	0,396	0,599	73,76	0,394	0,613	74,15	0,404
	Pszenica ozima Winter wheat														
<i>NDVI</i>	0,606	67,72	0,399	0,617	66,72	0,401	0,602	70,68	0,405	0,587	69,50	0,395	0,608	70,37	0,408
<i>SR</i>	0,607	67,87	0,397	0,590	69,38	0,393	0,599	71,05	0,402	0,580	70,46	0,393	0,618	70,69	0,425
<i>MSR</i>	0,593	69,25	0,396	–	–	–	0,597	71,33	0,407	0,586	69,77	0,394	–	–	–
<i>SAVI</i>	0,588	69,45	0,391	0,599	68,47	0,394	0,581	72,03	0,393	0,568	70,92	0,381	0,588	71,68	0,395
<i>OSAVI</i>	0,595	68,91	0,395	0,606	67,95	0,397	0,591	71,55	0,399	0,578	70,43	0,389	0,596	71,22	0,400
	Pszenżyto ozime Winter triticale														
<i>NDVI</i>	0,900	57,38	0,573	0,927	55,52	0,594	0,878	64,22	0,596	0,805	63,80	0,511	0,909	63,44	0,629
<i>SR</i>	0,923	55,88	0,590	0,811	62,03	0,500	0,904	63,60	0,624	0,821	63,62	0,528	0,784	66,28	0,491
<i>MSR</i>	0,867	58,97	0,545	–	–	–	0,839	65,02	0,554	0,780	64,29	0,482	–	–	–
<i>SAVI</i>	0,890	57,89	0,566	0,919	56,00	0,588	0,864	64,72	0,584	0,787	64,40	0,495	0,897	63,90	0,619
<i>OSAVI</i>	0,897	57,54	0,570	0,925	55,68	0,592	0,874	64,39	0,592	0,799	63,98	0,505	0,905	63,59	0,626

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ziemniaki Potatoes															
<i>NDVI</i>	0,494	71,60	0,387	0,541	70,03	0,420	1,184	46,65	0,960	0,444	72,21	0,299	0,750	53,91	0,550
<i>SR</i>	0,527	70,79	0,411	0,383	75,27	0,275	0,847	51,72	0,635	0,469	71,45	0,333	4,096	33,65	3,899
<i>MSR</i>	0,464	72,27	0,360	–	–	–	1,610	44,90	1,404	0,410	73,41	0,265	–	–	–
<i>SAVI</i>	0,493	71,69	0,386	0,540	70,07	0,419	1,180	47,05	0,958	0,441	72,26	0,296	0,753	53,90	0,553
<i>OSAVI</i>	0,494	71,63	0,387	0,540	70,05	0,419	1,183	46,78	0,959	0,443	72,22	0,298	0,751	53,90	0,551
Jęczmień jary Spring barley															
<i>NDVI</i>	0,473	71,01	0,339	0,499	66,01	0,348	0,459	72,06	0,338	0,458	70,31	0,331	0,461	73,49	0,341
<i>SR</i>	0,492	67,66	0,346	0,440	70,18	0,323	0,460	73,32	0,340	0,467	70,43	0,336	0,549	66,37	0,407
<i>MSR</i>	0,456	72,21	0,331	–	–	–	0,463	71,36	0,345	0,446	70,91	0,325	–	–	–
<i>SAVI</i>	0,472	71,45	0,339	0,498	66,39	0,348	0,459	72,32	0,339	0,457	70,63	0,332	0,461	73,80	0,341
<i>OSAVI</i>	0,473	71,16	0,339	0,498	66,13	0,348	0,459	72,13	0,338	0,458	70,40	0,331	0,461	73,59	0,341

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

Gatunek Species	Najlepiej dopasowany model szacowania LAI Best fitted model of estimating LAI	RMSE	ATPA	SEP	LAI: wartość wymodelowana a wartość pomierzona LAI: modelled and measured value
Żyto ozime Winter rye	$LAI = 0,2342e^{1,8082} SAVI$	0,598	74,62	0,389	
Pszenica ozima Winter wheat	$LAI = 0,0755e^{2,6341} SAVI$	0,581	72,03	0,393	

<p>Pszenżyto ozime Winter triticale</p>	$LAI = 0,3659SR^{-0,648}$	<p>0,784</p>	<p>66,28</p>	<p>0,491</p>	
<p>Ziemniaki Potatoes</p>	$LAI = -1,115 \ln(SR) - 0,6983$	<p>0,383</p>	<p>75,27</p>	<p>0,275</p>	



Rys. 9. Najlepiej dopasowane modele szacowania wskaźnika powierzchni liści *LAI* na podstawie danych spektralnych dla żyta, pszenicy, pszenżyta, ziemniaków i jęczmienia; źródło: wyniki własne

Fig. 9. Best fitted models of estimating *LAI* based on spectral data for rye, wheat, triticale, potatoes and barley; source own studies

żyta, pszenicy, pszenżyta i jęczmienia. Może to być spowodowane odmienną geometrią zarówno terenu, jak i pokrywy roślinnej – w odróżnieniu od wszystkich pozostałych gatunków, ziemniak jest rośliną okopową, a jego liście są duże i zorientowane w pozycji horyzontalnej.

ZALEŻNOŚĆ WSKAŹNIKA POWIERZCHNI LIŚCI *LAI* OD SPEKTRALNYCH WSKAŹNIKÓW ROŚLINNOŚCI: ZESTAWIENIE WYNIKÓW MODELOWANIA

Wyniki modelowania wskaźnika powierzchni liści *LAI* na podstawie wartości poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności z zastosowaniem różnych typów zależności przedstawiono w tabeli 7, natomiast modele dające maksymalną zbieżność z wartościami rzeczywistymi zaprezentowano na rysunku 9. Podobnie jak w innych badaniach [CHEN i in. 2002; GILABERT i in. 1996; JIANG i in. 2005; MATSUSHITA, TAMURA 2002; QI i in. 2000], dokładność modeli różni się w zależności od rodzaju zastosowanej funkcji, wskaźnika i gatunku. Spośród analizowanych spektralnych wskaźników roślinności największą dokładnością przy szacowaniu wskaźnika powierzchni liści *LAI* charakteryzowały się modele oparte na wartościach *SAVI* i *MSR*, natomiast najmniejszą – na *NDVI*. Podobne wyniki uzyskali w swojej pracy m.in. JIANG i in. [2005]. Zdecydowanie najbardziej zbliżone do zmierzonych wartości wskaźnika powierzchni liści uzyskiwano, stosując funkcje o charakterze wykładniczym: $LAI = a + b SVI^2 + c SVI$.

PODSUMOWANIE

Na podstawie danych dotyczących radiancji i irradiancji spektralnej punktów pomiarowych o znanym wskaźniku powierzchni liści *LAI* przetestowano stopień i charakter jego związku z pięcioma najbardziej popularnymi spektralnymi wskaźnikami roślinności, opartymi na świetle w przedziale czerwieni i promieniowaniu w zakresie bliskiej podczerwieni. Stopień tej zależności okazał się być najbardziej zależny od gatunku, na którym prowadzone były badania, a słabiej od zastosowanego typu zależności i spektralnego wskaźnika roślinności. Charakter tej zależności natomiast okazał się być niemal niezależny od gatunku i stały dla poszczególnych spektralnych wskaźników roślinności. Uzyskane wyniki wskazują, że zależność tej grupy spektralnych wskaźników roślinności od wskaźnika powierzchni liści *LAI* jest nieliniowa, przez co jego szacunki na ich podstawie obarczone są stosunkowo dużym błędem (wynoszącym średnio $0,48 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). Najwcześniej efekt saturacji występował dla najprostszych, najczęściej stosowanych wskaźników: *NDVI* i *SR*, mniej wrażliwe okazały się na ten efekt *MSR*, *SAVI* i *OSAVI*. Przeprowadzone analizy wskazują także, że podczas szacunków *LAI* na podstawie większości spektralnych wskaźników roślinności opartych na ρ_{NIR} i ρ_{RED} znaczący wpływ mają za-

burzające efekty tła glebowego, które najsilniej oddziałują na wartości *NDVI*. Wpływ ten eliminują wskaźniki poprawiające dokładność szacunków *LAI* w warunkach małej gęstości wegetacji: *SR*, *MSR*, a szczególnie – *SAVI*, dla którego uzyskiwane wartości współczynników determinacji w zależności od *LAI* były w większości przypadków największe. *SAVI* najlepiej sprawdzał się także jako wskaźnik, na podstawie którego można modelować oczekiwane wartości wskaźnika *LAI*.

Problemy zaobserwowane podczas szacunków wskaźnika powierzchni liści na podstawie spektralnych wskaźników roślinności, opartych na świetle w przedziale czerwieni i promieniowaniu w przedziale bliskiej podczerwieni wskazują, że mimo wielu lat badań nad tą tematyką, wciąż jeszcze nie udało się opracować wskaźnika, który:

- byłby wrażliwy na wartości wskaźnika powierzchni liści *LAI*, nie będąc przy tym wrażliwy na pozostałe parametry biofizyczne pokrywy roślinnej (zawartość chlorofilu, fractional vegetation cover, green ratio, leaf angle distribution);
- byłby wrażliwy na wartości wskaźnika powierzchni liści *LAI*, nie będąc przy tym wrażliwy na efekty wpływające zaburzająco na uzyskiwane wyniki pomiarów spektralnych (efekty tła glebowego, saturacja).

Istnieje zatem potrzeba zwiększenia liczby różnych analiz i porównań, by ocenić, które spektralne wskaźniki sprawdzają się lepiej w jakich warunkach, a także opracować możliwie jak najbardziej uniwersalny spektralny wskaźnik wskaźnika powierzchni liści *LAI*.

LITERATURA

- BARET F., GUYOT G. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for *LAI* and *APAR* assessment. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 35. ISSN 1731-0261 s. 161–173.
- BLECHARCZYK A. 2002. Reakcja żyta ozimego i jęczmienia jarego na system następstwa roślin i nawożenie w doświadczeniu wieloletnim. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*. Z. 326 ss. 126.
- BORGE N.H., LEBLANC E. 2001. 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*. Vol. 76 s. 156–172.
- BOSCHETTI T., CORTECCI G., BARBIERI M., MUSSI M. 2007. New and past geochemical data on fresh to brine waters of the Salar de Atacama and Andean Altiplano, northern Chile. *Geofluids*. Vol. 7 s. 33–50.
- BRANTLEY S., ZINNERT J.C., YOUNG D.R. 2011. Application of hyperspectral vegetation indices to detect variations in high leaf area index temperate shrub thicket canopies. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 115 s. 514–523.
- CARLSON T.N., RIPLEY D.A. 1997. On the relation between *NDVI*, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 62 s. 241–252.
- CHEN J.M. 1996. Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 22 s. 229–242.
- CHEN J.M., PAVLIC G., BROWN L., CIHLAR J., LEBLANC S.G., WHITE H.P., HALL R.J., PEDDLE D.R., KING D.J., TROFYMOW J.A., SWIFT E., SANDEN VAN DER J., PELLIKKA P.K.E. 2002. Derivation and

- validation of Canada-wide coarse-resolution leaf area index maps using high-resolution satellite imagery and ground measurements. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 80 s. 165–184.
- DAUGHTRY C. S. T., WALTHALL C.L., KIM M.S., BROWN DE COLSTOUN E., McMOURTNEY III J.E. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 74 s. 229–239.
- ELVIDGE C.D., CHEN Z. 1995. Comparison of Broad-Band and Narrow-Band Red and Near-Infrared Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 54 s. 38–48.
- FLOWERS M., WEISZ R., HEINIGER R. 2001. Remote sensing of winter wheat tiller density for early nitrogen application decisions. *Agronomy Journal*. Vol. 93 s. 783–789.
- GILABERT M.A., GANDIA S., MELIA J. 1996. Analyses of spectral – biophysical relationships for a corn canopy. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 55 s. 11–20.
- GLENN E. P., HUETE A.R., NAGLER P.L., NELSON S.G. 2008. Relationship between Remotely-sensed Vegetation Indices, canopy attributes and plant physiological processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. *Sensors*. Vol. 8 s. 2136–2160.
- HABOUDANE D., MILLER J.R., TREMBLAY N., ZARCO-TEJADA P.J., DEXTRAZE L. 2002. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 81 s. 416–426.
- HABOUDANE D., MILLER J.R., PATTEY E., ZARCO-TEJADA 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*. Vol. 90 s. 337–352.
- HUETE A. R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. Vol. 25 s. 295–309.
- HUETE A. R., 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*. Vol. 83 s. 195–213.
- JACKSON R. D., HUETE A. R. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*. Vol. 11 s. 185–200.
- JAROCIŃSKA A., ZAGAJEWSKI B. 2008. Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki. *Teledetekcja środowiska*. Vol. 40 s. 100–124.
- JIANG J., CHEN S., CAO S., WU H., ZHANG L., ZHANG H. 2005. Leaf area index retrieval based on canopy reflectance and vegetation index in Eastern China. *Journal of Geographical Sciences*. Vol. 2 s. 247–254.
- JUSTICE C.O. 1986. Monitoring east African vegetation using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 6 s. 1335–1372.
- KALUŻA T., STRZELIŃSKI P. 2009. Teledetekcyjne narzędzia w badaniach roślinności wysokopiennej do oceny warunków przepływu na terenach zalewowych. *Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej*. Vol. 2 s. 169–178.
- LEEUWEN VAN W. J. D., HUETE A.R., WALTHALL C.L., PRINCE S.D., BEGUE A., ROUJEAN J.L. 1997. Deconvolution of remotely sensed spectral mixtures for retrieval of LAI, fAPAR and soil brightness. *Journal of Hydrology*. Vol. 188–189 s. 697–724.
- LIANG S. 2004. *Quantitative remote sensing of land surfaces*. Wyd. 1. New Jersey. Wiley-Interscience. ISBN 0-471-28166-2 ss. 534.
- MANDAL U.K., VICTOR U.S., SRIVASTAVA N.N., SHARMA K.L., RAMESH V., VANAJA M., KORWAR G.R., RAMAKRISHNA Y.S. 2007. Estimating yield of Sorghum using root zone water balance model and spectral characteristics of crop in dryland Alfisol. *Agricultural Water Management*. Vol. 87 s. 315–327.
- MATSUSHITA B., TAMURA M. 2002. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 81 s. 58–66.

- MOREIRA R.C. 2002. Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosféricos na determinação de índices de vegetação. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP s. 1–3.
- PANDA S.S., AMES D.P., PANIGRAHI S. 2010. Application of Vegetation Indices for agricultural crop yield prediction using neural network techniques. *Remote Sensing*. Vol. 2 s. 673–696.
- PRINCE S., GOWARD S. 1995. Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*. vol. 22 s. 815–835.
- QI J., KERR Y.H., MORAN M.S., WELTZ M., HUETE A.R., SOROOSHIAN S., BRYANT R. 2000. Leaf Area Index estimates using remotely sensed data and BRDF Models in a semiarid region. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 73 s. 18–30.
- RONDEAUX G., STEVEN M., BARET F. 1996. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 55 s. 95–107.
- SALTZ D., SCHMIDT H., ROWEN M., KARNIELI A., WARD D., SCHMIDT I. 1999. Assessing grazing impacts by Remote Sensing in hyper-arid environments. *Journal of Range Management*. Vol. 52 s. 500–507.
- SHIHAO T., QIANG Z., WANG J., ZHOU Y., ZHAO F. 2003. Principle and application of three-band gradient difference vegetation index. *Science in China*. Vol. 2 s. 241–249.
- SOUDANI K., FRANCOIS C., MAIRE LE G., DANTEC LE V., DUFRENE 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*. Vol. 102 s. 161–175.
- SPANNER M., PIERCE L.L., PETERSON D.L., RUNNING S.W. 1990. Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 1 s. 95–111.
- TURNER D.P., COHEN W.B., KENNEDY R.E., FASSNACHT K.S., BRIGGS J.M. 1999. Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across Three Temperate Zone Sites. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 70 s. 52–68.
- User Manual for the SunScan Canopy Analysis System type SS1. 2008. Delta-T Devices Ltd.
- WANG Q., ADIKU S., TENHUNEN J., GRANIER A. 2005. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 94 s. 244–255.
- ZARCO-TEJADA P.J., USTIN S.L., WHITING M.L. 2005. Temporal and spatial relationships between within-field yield variability in cotton and high spatial hyperspectral remote sensing imagery. *Agronomy Journal*. Vol. 97 s. 641–653.
- ZHENG G., MOSKAL M. 2009. Retrieving Leaf Area Index (LAI) using remote sensing: Theories, methods and sensors. *Sensors*. Vol. 9 s. 2719–2745.

Bogna UŹDZICKA, Radosław JUSZCZAK, Karolina SAKOWSKA, Janusz OLEJNIK

THE RELATIONSHIP BETWEEN LAI AND SPECTRAL INDICES OF VEGETATION BASED ON SOME SPECIES OF CROP PLANTS

Key words: leaf area index, spectral plant indices, standardised index of green

S u m m a r y

The paper presents the character and effect of the leaf area index (*LAI*) on optical characteristics of plant cover based on radiation in the red and near infrared region for an agricultural area. Measurements were made for 5 plant species (winter rye, winter wheat, winter triticale, potatoes and spring barley) grown in experimental station in Brody (Wielkopolska Province). *LAI* is an important ecophysiological parameter. Measurement of optical characteristics is now a rapidly developing tech-

nique used to estimate bio-physical characteristics of plant cover. Comparison of determination coefficient R^2 and statistical measures of model fitness for various types of relationships (linear, logarithm, exponential, polynomial, power) and for various plant species showed that the relationship between the analysed group of spectral plant indices and LAI was non-linear and hence burdened with relatively large error (mean $0.48 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$). The effect of saturation appeared earliest for most commonly used indices – $NDVI$ and SR . Disturbing effects of soil background, which most strongly affect the $NDVI$ values, expressed themselves when estimating LAI from most spectral plant indices based on ρ_{NIR} and ρ_{RED} . This effect was smallest for $SAVI$, for which R^2 was highest as compared with other analysed indices. $SAVI$ worked best as an index, based on which one may model the expected values of LAI .