

WSKAŹNIKI *NDVI* I *PRI* JAKO ODZWIERCIEDLENIE DOBOWEJ
ZMIENNOŚCI FRAKCJI AKUMULOWANEJ ENERGII
FOTOSYNTETYCZNIENIE CZYNNIEJ DLA ODŁOGU
ORAZ DLA WYBRANYCH GATUNKÓW ROŚLIN UPRAWNYCH^{1*}

*Bogna Uździcka¹, Radosław Juszcak¹, Karolina Sakowska^{1,2},
Bogdan H. Chojnicki¹, Marek Urbaniak¹, Janusz Olejnik¹*

¹Katedra Meteorologii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań

²Sustainable Agro-ecosystems and Bioresources Department,
IASMA, Research and Innovation Centre,
Fondazione Edmund Mach, San Michele all'Adige, TN, Italy
e-mail: bognaudzicka@gmail.com

Streszczenie. Frakcja akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej ($fAPAR_{canopy}$) jest ważnym parametrem ekofizjologicznym, stosowanym między innymi do szacowania produkcji pierwotnej brutto (GPP) ekosystemów. W pracy przedstawiono zależności pomiędzy dobową zmiennością frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej a dwoma spektralnymi wskaźnikami roślinności – znormalizowanym różnicowym wskaźnikiem wegetacji (ang. Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*) i wskaźnikiem odbicia fotochemicznego (ang. Photochemical Reflectance Index, *PRI*). Pomiary wykonano 28 maja 2012 r. na poletkach eksperymentalnych z uprawami jęczmienia jarego, żyta ozimego i pszenicy ozimej oraz na poletku wieloletniego odłogu. Pomiary padającego, przepuszczonego i odbitego promieniowania w zakresie PAR (potrzebne do obliczenia $fAPAR_{canopy}$) wykonano z wykorzystaniem systemu pomiarowego firmy Delta-T (Delta-T Devices, Cambridge, UK). Potrzebne do obliczenia *NDVI* i *PRI* pomiary promieniowania padającego i odbitego o długościach fali 530, 570, 670 i 849 nm wykonano używając dwóch czterokanałowych czujników SKR1850 (SKYE Instruments Ltd., Llandrindod Wells, UK), zamontowanych w pozycji zenit – nadir na przenośnym urządzeniu SpectroSense2+. Z zaprezentowanych danych wynika, że *NDVI* stanowi znacznie lepszy niż *PRI* spektralny wskaźnik dobowej zmienności $fAPAR_{canopy}$ roślin uprawnych. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że $fAPAR_{canopy}$ nie jest jedynym czynnikiem kształtującym zmienność wartości wskaźników *NDVI* i *PRI* w cyklu dobowym.

Słowa kluczowe: frakcja akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej, spektralne wskaźniki roślinności, *NDVI*, *PRI*

*Badania zrealizowano w ramach projektu Nr 752/I/N-COST-2 010-0 „Ocena czasowej i przestrzennej zmienności współczynników biofizycznych i spektralnych roślin (*NDVI*, *WBI*, *LAI*) na tle wymiany netto CO₂, CH₄, H₂O pomiędzy powierzchniami ekosystemów torfowiskowego, leśnego i rolniczego”.

WYKAZ OZNACZEŃ

- $fAPAR_{canopy}$ – Frakcja energii fotosyntetycznie czynnej absorbowanej przez pokrywę roślinną (ang. *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*), (-)
- $NDVI$ – Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*), (-)
- PRI – Wskaźnik odbicia fotochemicznego (ang. *Photochemical Reflectance Index*), (-)
- PAR – Promieniowanie fotosyntetycznie czynne (ang. *Photosynthetically Active Radiation*), ($W \cdot m^{-2}$)
- GPP – Produkcja pierwotna brutto (ang. *Gross Primary Production*), ($g \text{ CO}_2 \cdot C \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
- LAI – Indeks powierzchni liści (ang. *Leaf Area Index*), ($m^2 \cdot m^{-2}$)
- BF – Procent promieniowania bezpośredniego w całkowitym (ang. *Beam Fraction Parameter*), (-)

WSTĘP

Wiele modeli służących do oceny intensywności procesów życiowych roślin, i w konsekwencji wymiany masy i energii między ekosystemami a atmosferą, opiera się na różnych parametrach biofizycznych pokrywy roślinnej (Gobron i in. 2006, Knorr i in. 2005).

$APAR$ (ang. „*Absorbed Photosynthetically Active Radiation*”) definiowany jest dla pokrywy roślinnej jako ilość promieniowania w przedziale spektralnym PAR , która jest przez nią absorbowana. Frakcja akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej $fAPAR_{canopy}$ stanowi natomiast procent padającego promieniowania w przedziale PAR , który zostaje zaabsorbowany przez szatę roślinną (Zhang i in. 2005). Parametr $fAPAR_{canopy}$ przyjmuje wartości od 0 do 1. Zależy on przede wszystkim od stanu zdrowotnego roślin, budowy i optycznych właściwości szaty roślinnej oraz od indeksu powierzchni liści (LAI), ale także od odbicia tła glebowego (Jarocińska i Zagajewski 2008). Jest to bardzo istotny parametr biofizyczny stosowany między innymi do szacowania GPP różnych ekosystemów (Running i in. 2004).

Według wyników wielu badań (Asner 1998, Boschetti i in. 2007) różne parametry biofizyczne pokrywy roślinnej mają specyficzny wpływ na jej właściwości spektralne. W konsekwencji, pomiary oparte na promieniowaniu w różnych przedziałach spektralnych zaczynają coraz powszechniej stanowić uzupełnienie dla tradycyjnych metod pomiaru charakterystyk biofizycznych. Dzięki takiemu połączeniu możliwe stają się coraz to dokładniejsze, a zarazem nieinwazyjne, szacunki charakterystyk biofizycznych pokrywy roślinnej za pomocą danych spektralnych (Huete i in. 2002, Soudani i in. 2006, Zheng i Moskal 2009).

$NDVI$ jest jednym z najszerzej stosowanych spektralnych wskaźników roślinności. Dotychczasowe badania wykazały, że wskaźnik ten stosunkowo dobrze koreluje

z wieloma parametrami biofizycznymi pokrywy roślinnej – biomasą, *LAI*, *APAR*_{canopy}, czy *fAPAR*_{canopy} (Zhang i in. 2005). *NDVI* nie sprawdza się jednak zbyt dobrze przy odzwierciedlaniu zmian w aktywności fotosyntetycznej i efektywności wykorzystania światła w fotosyntezie, które następują bez widocznych zmian w biomasie roślin i strukturze ładu (Gamon i in. 1992). Procesy te opisują ilość promieniowania PAR wykorzystywanego podczas fotosyntezy. Oszacowano, że w procesie fotosyntezy może być wykorzystywane od 20 do 50% promieniowania PAR zaabsorbowanego przez pokrywę roślinną (w zależności od gatunku oraz od morfologii i wieku liści) (Hanan i in. 1998, 2002, Lambers i in. 1998). Z tego względu nie można za pomocą wskaźnika *NDVI* ocenić krótkoterminowych zmian w intensywności tych procesów życiowych roślin – np. spadku aktywności i efektywności procesu fotosyntezy, który często następuje około południa słonecznego u roślin będących w stresie (Gamon i in. 1992, Tenhunen i in. 1987). Aby efektywniej badać te krótkoterminowe zmiany, Gamon i in. (1992) zaproponowali wskaźnik *PRI*, który jest dobrym spektralnym wskaźnikiem parametru EPS (ang. „epoxidation state”). EPS jest obliczany na podstawie stężeń barwników cyklu ksantofilowego (wiołaksantyny, zeaksantyny i anteraksantyny), a jego wartość może być traktowana jako wskaźnik zmian w aktywności fotosyntetycznej roślin (Gamon i in. 1992).

Związek między spektralnymi wskaźnikami roślinności a *fAPAR*_{canopy} stanowi przedmiot sporego zainteresowania i był, jak dotąd, przedmiotem wielu badań (Gobron i in. 2006, Knorr i in. 2005, Nakaji i in. 2007). Najczęściej *fAPAR*_{canopy} szacowany jest na podstawie liniowej bądź nieliniowej zależności z *NDVI* (Sims i in. 2006). Zależność między *NDVI* a *fAPAR*_{canopy} stanowi podstawę do szacowania między innymi *GPP* ekosystemów (Zhang i in. 2005). Zależności te sprawdzają się dla różnych ekosystemów i dla pomiarów wykonywanych w różnych skalach (Running i in. 2004). Ponieważ zależność między *NDVI* a *fAPAR*_{canopy} jest niezależna od kąta padania promieni słonecznych, *NDVI* może być stosowany jako spektralny wskaźnik frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej zarówno w cyklu sezonowym, jak i dobowym (Goward i Huemmrich 1992, Sims i in. 2006).

Celem publikacji było określenie i analiza związków między *fAPAR*_{canopy} a wskaźnikami *NDVI* i *PRI* w przebiegu dobowym. Zagadnienia analizowane w publikacji dotyczą dziedziny będącej w ostatnich latach przedmiotem rosnącego zainteresowania międzynarodowych społeczności naukowców zrzeszonych między innymi w sieciach SpecNet i EuroSpec – COST Action ES0903. Ocena charakteru i stopnia takich zależności, dla powszechnie spotykanych w Polsce roślin uprawnych, posłużyć może dokładniejszemu i lepiej dopasowanemu do gatunkowej specyfiki szacowaniu wskaźnika *fAPAR*_{canopy} różnych gatunków roślin.

MATERIAŁ I METODY

Badania przeprowadzone zostały na terenie Rolniczego Gospodarstwa Doświadczalnego Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Gospodarstwo zlokalizowane jest w Brodach (52°26'18'' N, 16°17'40'' E), miejscowości położonej w województwie wielkopolskim, około 50 km na zachód od Poznania. Począwszy od 1957 roku na jego terenie prowadzone jest doświadczenie statyczne, mające na celu zbadanie wpływu reżimu uprawy i nawożenia na zmienność plonowania roślin uprawnych w wieloleciu (Blecharczyk 2002). Średnia roczna suma opadów atmosferycznych dla tego obszaru wynosi 571,3 mm, a średnia roczna temperatura powietrza 7,9°C (dane ze stacji meteorologicznej Zakładu Brody dla lat 1959-1999). Na przeważającym obszarze badawczym występują przede wszystkim gleby płowe, klasy bonitacyjnej IIIa-IIIb, kompleksu żytznego dobrego i bardzo dobrego, o składzie granulometrycznym piaski gliniaste lekkie i mocne, średnio głębokie, zalegające na glebach lekkich (Blecharczyk 2002).

Pomiary charakterystyk spektralnych i biofizycznych pokrywy roślinnej wykonywano na poletkach z jęczmieniem jarym (odmiana Nadek), żytem ozimym (odmiana Dańkowskie Złote), pszenicą ozimą (odmiana Turkis) oraz na jednym poletku wieloletniego odłogu. Rośliny uprawiane były w reżimie monokultury i nawożone obornikiem z dodatkiem NPK. Poletka pomiarowe (o wymiarach 6 m x 11 m) zlokalizowane były na otwartym terenie – daleko od dużych obiektów, mogących rozpraszać promieniowanie i w konsekwencji zaburzać uzyskiwane wyniki.

Parametr $fAPAR_{canopy}$ obliczono (równanie 1) na podstawie pomierzonych wartości promieniowania padającego, przepuszczonego i odbitego od pokrywy roślinnej w zakresie spektralnym PAR (400-700 nm). Pomiary wykonano za pomocą systemu pomiarowego firmy Delta-T (Delta-T Devices, Cambridge, UK). System pomiarowy składał się z: 1) czujnika typu BF3 służącego do pomiaru padającego promieniowania PAR (całkowitego i rozproszonego) oraz 2) sondy liniowej o długości jednego metra, wyposażonej w 64 równomiernie rozłożone fotodiody, pozwalającej na pomiar promieniowania PAR przepuszczonego i odbitego przez/od szaty roślinnej (SunScan User Manual 2008).

$$fAPAR_{canopy} = \frac{PAR_i - (PAR_t + PAR_r)}{PAR_i} (-) \quad (1)$$

gdzie: PAR_i – natężenie promieniowania całkowitego PAR ($W \cdot m^{-2}$), PAR_t – natężenie promieniowania PAR transmitowanego przez pokrywę roślinną ($W \cdot m^{-2}$), PAR_r – natężenie promieniowania PAR odbitego przez pokrywę roślinną ($W \cdot m^{-2}$).

Spektralne wskaźniki $NDVI$ i PRI obliczono według wzorów podanych w tabeli 1. Pomiary promieniowania padającego i odbitego przy długościach fali 530,

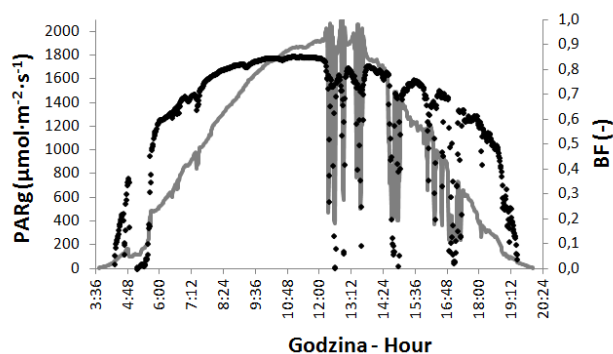
570, 670 i 849 nm wykonano dwoma czujnikami SKR1850 (SKYE Instruments Ltd., Llandrindod Wells, UK) zamontowanymi w pozycji zenit-nadir na przenośnym urządzeniu Spectrosense 2+.

Tabela 1. Spektralne wskaźniki wegetacji *NDVI* i *PRI*
Table 1. Spectral Vegetation Indices – *NDVI* and *PRI*

Wskaźnik spektralny wegetacji Spectral Vegetation Index	Wzór – Equation	Źródło – Source
<i>NDVI</i>	$NDVI = \frac{\rho_{849} - \rho_{670}}{\rho_{849} + \rho_{670}}$ <p>gdzie: ρ_{849} – współczynnik odbicia przy długości fali 849 nm, ρ_{670} – współczynnik odbicia przy długości fali 670 nm.</p>	(Rouse i in. 1973)
<i>PRI</i>	$PRI = \frac{\rho_{530} - \rho_{570}}{\rho_{530} + \rho_{570}}$ <p>gdzie: ρ_{530} – współczynnik odbicia przy długości fali 530 nm, ρ_{570} – współczynnik odbicia przy długości fali 570 nm.</p>	(Gamon i in. 1992)

WYNIKI I DYSKUSJA

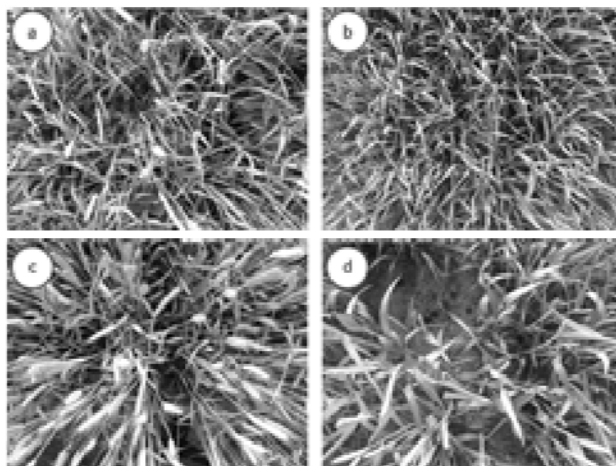
Analizowane dane pochodzą z pomiarów przeprowadzonych w dniu 28 maja 2012 roku. Dzień ten został wybrany ze względu na panujące wówczas warunki meteorologiczne, jak i ze względu na stan i fazę fenologiczną roślinności. Warunki radiacyjne w dniu pomiarowym były pod względem wymogów metodycznych (Hall i in. 2008, Nakaji i in. 2007) wyjątkowo korzystne. Parametr Beam Fraction, określający procent promieniowania *PAR* bezpośredniego w *PAR* całkowitym, utrzymywał się powyżej 0,5 praktycznie przez cały dzień (od 05:44 do 18:31). Wyjątek stanowiły widoczne na rysunku 1 momenty, podczas których słońce zasłonięte było przez pojedyncze przepływające w godzinach popołudniowych chmury. Pomiarów nie były wówczas wykonywane. Temperatura powietrza wahała się w dniu pomiarów w zakresie 8,0-24,5°C, a wilgotność względna – pomiędzy 28,2 a 84,3%.



Rys. 1. Charakterystyka warunków radiacyjnych podczas pomiarów w dniu 28 maja 2012 r. Linia szara odpowiada całkowitemu PAR padającemu na powierzchnię ($PARg$); czarne kropki odnoszą się do wartości Beam Fraction (BF)

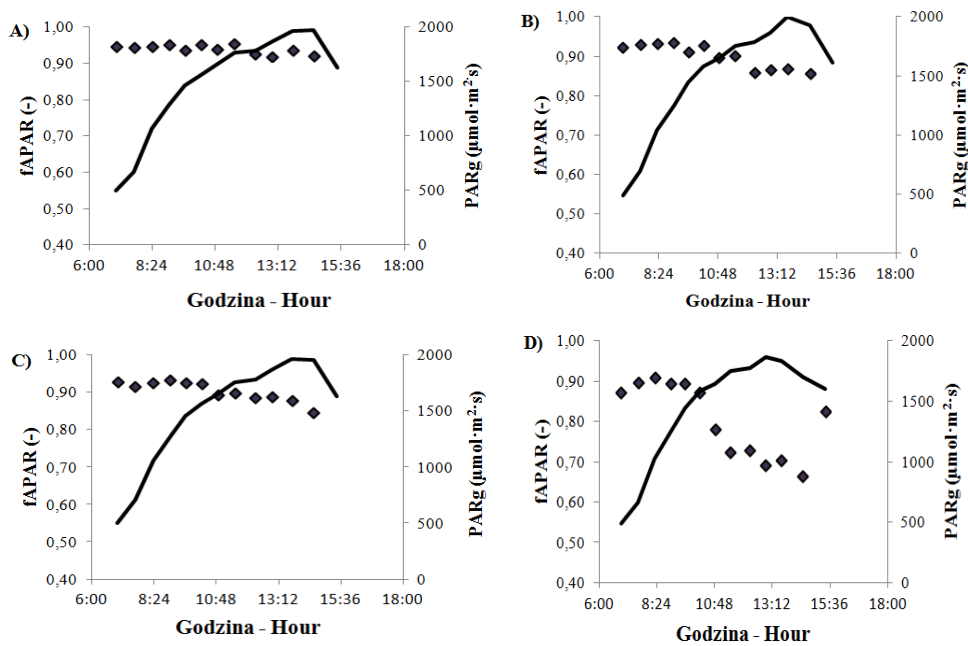
Fig. 1. Radiation conditions on the measurement day, 28th of May 2012. Grey line corresponds to incident PAR ($PARg$); black dots correspond to Beam Fraction (BF) values

Roślinność w dniu pomiarów była bujna i w dobrej kondycji (fot. 1). Jęczmień jary znajdował się w fazie grubienia pochwy liściowej liścia flagowego, żyto ozime było w fazie kwitnienia, natomiast pszenica ozima znajdowała się w fazie kłoszenia. Wysokość roślin w łanie dla odłogu, jęczmienia jarego, żyta ozimego i pszenicy ozimej wynosiła odpowiednio: 121; 54; 124 i 71 cm, a indeks powierzchni liści LAI wynosił odpowiednio: 7,93; 4,97; 5,03; 3,10 $m^2 \cdot m^{-2}$.



Fot. 1. Odłóg (a), jęczmień jary (b), żyto ozime (c) i pszenica ozima (d) w dniu pomiarowym
Photo 1. Fallow (a), spring barley (b), winter rye (c) and winter wheat (d) on the measurement day

Dobowy przebieg $fAPAR_{canopy}$ zmierzony w dniu pomiaru dla czterech analizowanych stanowisk przedstawiono na rysunku 2. W tabeli 2. natomiast przedstawiono warunki, w których osiągnięte zostały minimalne i maksymalne wartości tego parametru.



Rys. 2. Dobowy przebieg $fAPAR_{canopy}$ dla odłogu (A), jęczmienia jarego (B), żyta ozimego (C) i pszenicy ozimej (D) na tle panujących warunków radiacyjnych. Kwadraty odpowiadają wartościom $fAPAR_{canopy}$, linia ciągła – całkowitemu PAR padającemu na powierzchnię ($PARg$)

Fig. 2. Diurnal courses of $fAPAR_{canopy}$ for fallow (A), spring barley (B), winter rye (C) and winter wheat (D) with corresponding radiation conditions. The squares correspond to $fAPAR_{canopy}$, the solid line – to incident global PAR ($PARg$)

Przedstawione wyniki wskazują, że dla każdego analizowanego stanowiska frakcja akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej zmieniała się w cyklu dobowym. Znajduje to potwierdzenie także w wynikach innych badań (Walter i in. 1992, Sims i in. 2006). $fAPAR_{canopy}$ maksymalne wartości osiąga w godzinach porannych, natomiast minimalne – wczesnym popołudniem. Największą zmiennością tego parametru charakteryzowała się uprawa pszenicy ozimej (współczynnik zmienności dla $fAPAR_{canopy}$ 0,11. Na pozostałych poletkach dobową zmienność $fAPAR_{canopy}$ była niższa (współczynniki zmienności $fAPAR_{canopy}$ dla odłogu, jęczmienia jarego i żyta ozimego wyniosły odpowiednio 0,013; 0,033

i 0,031). Pomędzy pszenicą ozimą a pozostałymi stanowiskami pomiarowymi widać znaczące różnice również w osiąganych wartościach frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej. Dla poletka z odłogiem oraz dla upraw jęczmienia jarego i żyta ozimego $fAPAR_{canopy}$ wynosiło maksymalnie około 0,93, a wartości przez cały dzień pomiaru nie obniżały się poniżej 0,84. Dla porównania, minimalne wartości $fAPAR_{canopy}$ zmierzone na poletku z pszenicą ozimą wynosiły 0,66 (tab. 2).

Tabela 2. Maksymalne i minimalne wartości frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej $fAPAR_{canopy}$ dla odłogu, jęczmienia jarego, żyta ozimego i pszenicy ozimej

Table 2. Maximum and minimum values of fraction of absorbed photosynthetically active radiation $fAPAR_{canopy}$ for fallow, spring barley, winter rye and winter wheat

Rodzaj roślinności Type of vegetation	Minimalna wartość $fAPAR_{canopy}$ Minimum rates of $fAPAR_{canopy}$				Maksymalna wartość $fAPAR_{canopy}$ Maximum rates of $fAPAR_{canopy}$			
	Godz – Hour	$fAPAR_{canopy}$ (–)	BF (–)	PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Godz – Hour	$fAPAR_{canopy}$ (–)	BF (–)	PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Odłóg Fallow	14:32	0,92	0,73	1969	9:02	0,95	0,74	1279
Jęczmień jary Spring barley	14:30	0,86	0,73	1928	9:00	0,94	0,81	1251
Żyto ozime Winter rye	14:32	0,84	0,73	1928	9:01	0,93	0,81	1271
Pszenica ozima Winter wheat	14:27	0,66	0,75	1700	8:18	0,91	0,74	1024

Średnie dobowe wartości $fAPAR_{canopy}$ były najwyższe na odłogu (0,94), charakteryzującym się najwyższym LAI ($7,93 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$), a najniższe na pszenicy ozimej (0,79), w przypadku której LAI nie przekroczył wartości $3,1 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$ (tab. 3). Na uprawach jęczmienia jarego i żyta ozimego, których LAI był bliski $5 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-2}$, średnie wartości $fAPAR_{canopy}$ wynosiły około 0,9. Wysokie wartości $fAPAR_{canopy}$ na odłogu oraz na uprawach jęczmienia jarego i żyta ozimego świadczyć mogą o większej sumarycznej dobowej absorpcji promieniowania PAR. Biorąc pod uwagę tylko gatunki uprawne, uzyskane wyniki mogą wskazywać na większą intensywność procesu fotosyntezy u roślin zbożowych znajdujących się we wcześniejszych fa-

zach fenologicznych. Znajduje to potwierdzenie również w stosunkowo wysokich (na tle innych gatunków) wartościach wskaźnika *PRI* – jednego z najlepszych spektralnych indyktorów intensywności procesu fotosyntezy (Gamon i in. 1992).

Tabela 3. Wartości *LAI* i średnie dobowe wartości wskaźników $fAPAR_{canopy}$, *NDVI* i *PRI* w dniu pomiarowym dla odłogu, jęczmienia jarego, żyta ozimego i pszenicy ozimej

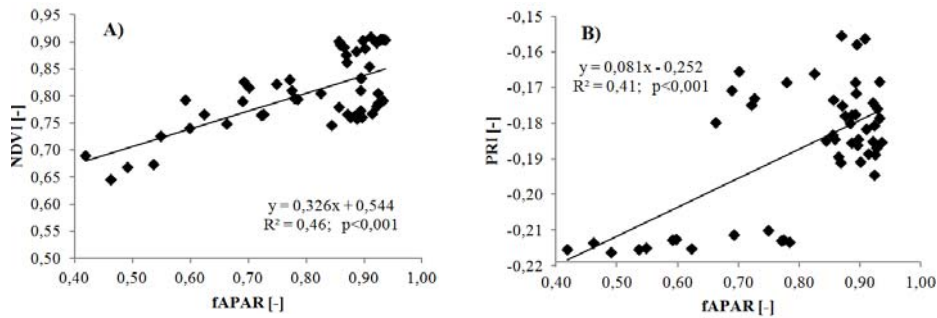
Table 3. *LAI* and diurnal averages of $fAPAR_{canopy}$, *NDVI* and *PRI* values for fallow, spring barley, winter rye and winter wheat on the measurement day

Rodzaj roślinności Type of vegetation	<i>LAI</i> (m ² ·m ⁻²)	Średnia wartość $fAPAR_{canopy}$ Average value of $fAPAR_{canopy}$ (-)	Średnia wartość <i>NDVI</i> Average value of <i>NDVI</i> (-)	Średnia wartość <i>PRI</i> Average value of <i>PRI</i> (-)
Odlóg Fallow	7,93	0,94	0,89	-0,19
Jęczmień jary Spring barley	4,97	0,90	0,90	-0,18
Żyto ozime Winter rye	5,03	0,89	0,77	-0,18
Pszenica ozima Winter wheat	3,10	0,79	0,80	-0,17

Stopień zależności *NDVI* i *PRI* od $fAPAR_{canopy}$ dla dnia pomiarowego – bez rozbicia na poszczególne stanowiska badawcze – przedstawiono na rysunku 3. Na rysunkach 4 i 5 pokazano dobowe przebiegi *PRI* i *NDVI* na tle dobowych przebiegów frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej, natomiast na rysunkach 6 i 7 – stopień zależności tych dwóch wskaźników od $fAPAR_{canopy}$ w dniu pomiarowym na poszczególnych analizowanych gatunkach.

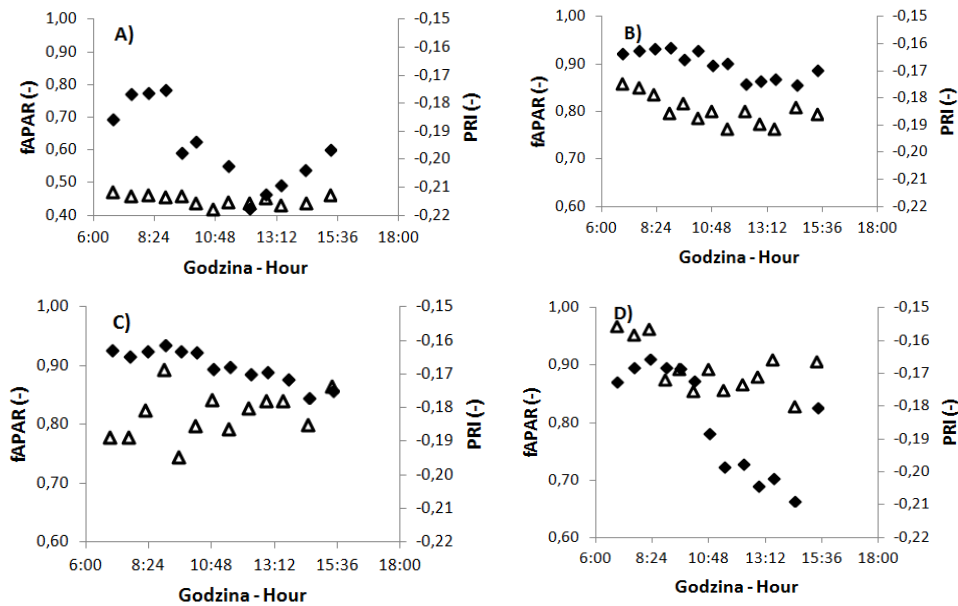
Na wszystkich analizowanych poletkach – podobnie jak w przypadku innych badań (Sims i in. 2006) – wartości wskaźników *PRI* i *NDVI* zmieniają się w cyklu dobowym. Korelacja pomiędzy obydwoma analizowanymi spektralnymi wskaźnikami roślinności a $fAPAR_{canopy}$ jest dodatnia. Choć dla wszystkich analizowanych stanowisk pomiarowych wartości $fAPAR_{canopy}$ zwiększają się wraz ze wzrostem wartości wskaźników *NDVI* i *PRI*, to jednak tylko w przypadku *NDVI* zależności te są istotne statystycznie ($p < 0,05$) (rys. 7). Biorąc jednak pod uwagę całą serię danych pomiarowych łącznie dla wszystkich analizowanych poletek, stwierdzić można, że zarówno *NDVI*, jak i *PRI* istotnie zależą od $fAPAR_{canopy}$ ($p < 0,001$). Zależność ta jest lepsza w przypadku wskaźnika *NDVI* ($R^2 = 0,46$) aniżeli dla *PRI* ($R^2 = 0,41$). Wartości *NDVI* rosną wraz z wartościami $fAPAR_{canopy}$ w sposób niemal liniowy. Potwierdzają to wyniki innych badań nad zależnością spek-

tralnych wskaźników roślinności od $fAPAR_{\text{canopy}}$ (Asrar i in. 1989, Running i in. 2000, Veroustraete i in. 2002).



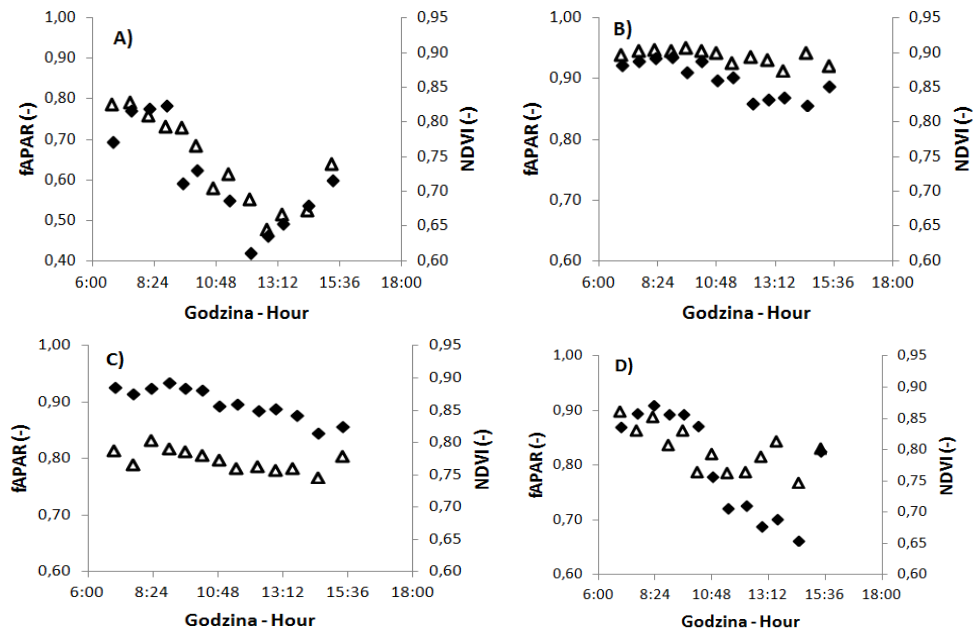
Rys. 3. Zależności między dobowymi wartościami spektralnych wskaźników roślinności $NDVI$ (A) i PRI (B) a $fAPAR_{\text{canopy}}$ w dniu pomiarowym (w analizie uwzględniono wszystkie dane pomierzone na różnych uprawach i odługu)

Fig. 3. Relationship between diurnal values of spectral vegetation indices $NDVI$ (A) and PRI (B) and $fAPAR_{\text{canopy}}$ on the measurement day (all data measured for all types of crops and fallow were included in the analyses)



Rys. 4. Dobowy przebieg wskaźnika PRI (trójkąty) na tle dobowych przebiegów $fAPAR_{\text{canopy}}$ (kwadraty) dla odługu (A), jęczmienia jarego (B), żyta ozimego (C) i pszenicy ozimej (D)

Fig. 4. Diurnal courses of PRI (triangles) and $fAPAR_{\text{canopy}}$ (squares) for fallow (A), spring barley (B), winter rye (C) and winter wheat (D)

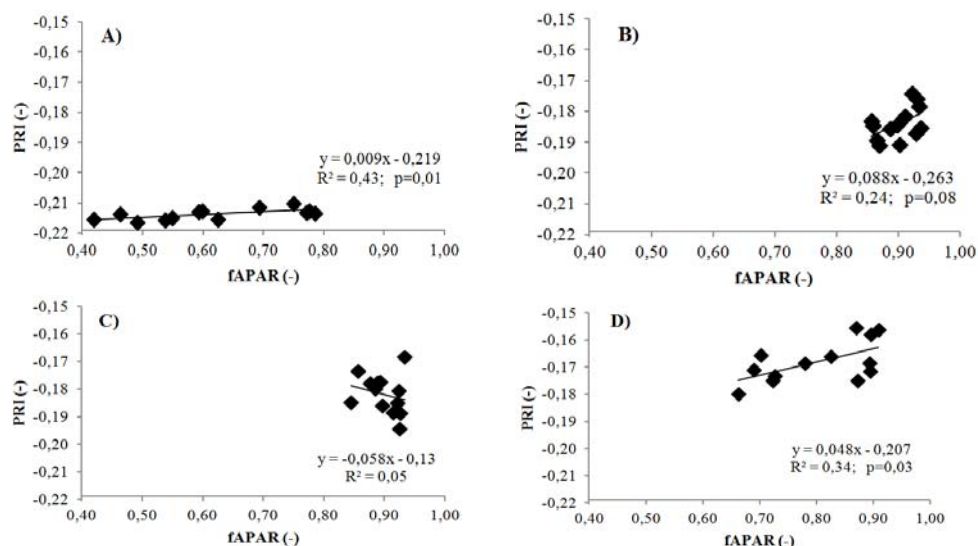


Rys. 5. Dobowy przebieg wskaźnika $NDVI$ (trójkąty) na tle dobowych przebiegów $fAPAR_{canopy}$ (kwadraty) dla odłogu (A), jęczmienia jarego (B), żyta ozimego (C) i pszenicy ozimej (D)
Fig. 5. Diurnal courses of $NDVI$ (triangles) and $fAPAR_{canopy}$ (squares) for fallow (A), spring barley (B), winter rye (C) and winter wheat (D)

Liniowa zależność pomiędzy $fAPAR_{canopy}$ a $NDVI$ znajduje potwierdzenie w wynikach innych badań (Running i in. 2004). W związku z tym przy szacunkach frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej na podstawie $NDVI$ wyeliminowane zostają błędy wynikające z efektu saturacji tego wskaźnika. Efekt ten występuje przy jego zależności od innych parametrów biofizycznych pokrywy roślinnej, m.in. indeksu powierzchni liści LAI (Uździcka i in. 2012, Zarco-Tejada i in. 2005).

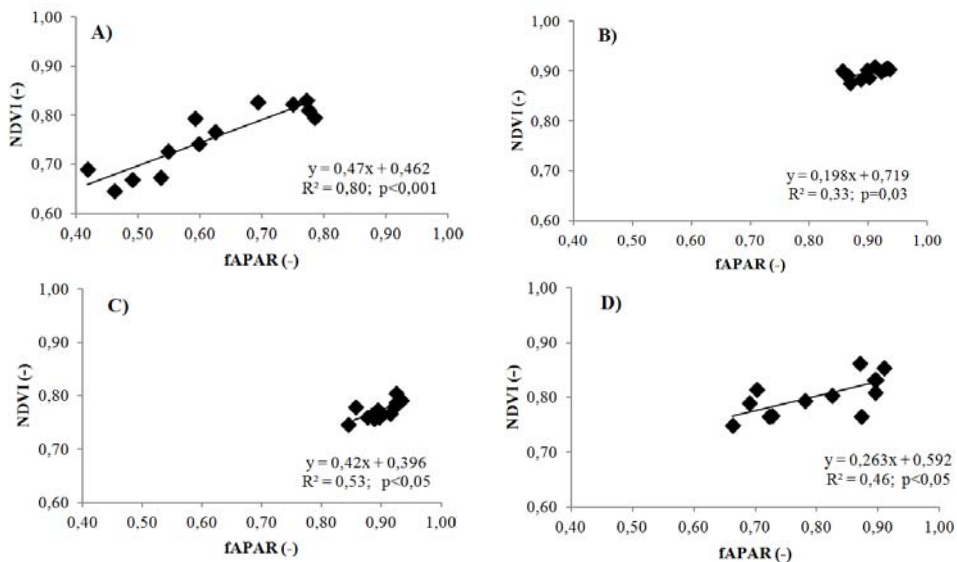
PRI natomiast (co widać szczególnie wyraźnie na rysunku 3) przyjmuje stosunkowo stałe, niskie wartości ($-0,21 \div -0,22$) przy $fAPAR_{canopy} < 0,7$. Po czym, wraz ze zwiększeniem wartości $fAPAR_{canopy}$ do $0,7 \div 0,8$, wartości tego wskaźnika wzrastają gwałtownie do poziomu $-0,15 \div -0,19$.

Obserwowany w przypadku obu wskaźników dość silny rozrzut wartości oraz stosunkowo niskie wartości współczynników determinacji świadczą, że frakcja akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej, choć jej wpływ jest zauważalny, nie jest jedynym czynnikiem kształtującym zmienne wartości spektralnych wskaźników roślinności w cyklu dobowym. Znajduje to potwierdzenie również w wynikach innych badań (np. Asner 1998). Proporcjonalny wkład poszczególnych parametrów biofizycznych w wartości charakterystyk spektralnych pokrywy roślinnej nie został jednak, jak dotąd, dokładnie rozpoznany (Asner 1998).



Rys. 6. Zależność wskaźnika PRI od $fAPAR_{canopy}$ dla odłogu (A), jęczmienia jarego (B), żyta ozimego (C) i pszenicy ozimej (D)

Fig. 6. Relationship between PRI and $fAPAR_{canopy}$ for fallow (A), spring barley (B), winter rye (C) and winter wheat (D)



Rys. 7. Zależność wskaźnika $NDVI$ od $fAPAR_{canopy}$ dla odłogu (A), jęczmienia jarego (B), żyta ozimego (C) i pszenicy ozimej (D)

Fig. 7. Relationship between $NDVI$ and $fAPAR_{canopy}$ for fallow (A), spring barley (B), winter rye (C) and winter wheat (D)

Wyniki modelowania dobowego przebiegu $fAPAR_{canopy}$ w dniu 28 maja 2012 roku na podstawie uzyskanych wartości wskaźnika *NDVI* (dla poszczególnych gatunków osobno oraz dla wszystkich poletek jako całości) przedstawiono w tabeli 4. Zestawione są w niej wartości R^2 i RMSE uzyskane przy zastosowaniu przedstawionych równań regresji liniowej.

Tabela 4. Parametry modeli szacowania $fAPAR_{canopy}$ w dniu pomiarowym dla analizowanych poletek pomiarowych: odłogu, jęczmienia jarego, żyta ozimego i pszenicy ozimej

Table 4. $fAPAR_{canopy}$ estimation models parameters for fallow, spring barley, winter rye and winter wheat on the measurement day

Wskaźnik Spectral Vegetation Index	Równanie regresji Regression equation	Parametry modelu szacowania $fAPAR_{canopy}$ $fAPAR_{canopy}$ estimation model parameters	
		R^2	RMSE
Odłóg – Fallow			
<i>NDVI</i>	$fAPAR_{canopy} = 1,705 \cdot NDVI - 0,664$	0,80	0,05
Jęczmień jary – Spring barley			
<i>NDVI</i>	$fAPAR_{canopy} = 1,692 \cdot NDVI - 0,617$	0,33	0,02
Żyto ozime – Winter rye			
<i>NDVI</i>	$fAPAR_{canopy} = 1,259 \cdot NDVI - 0,075$	0,53	0,02
Pszenica ozima – Winter wheat			
<i>NDVI</i>	$fAPAR_{canopy} = 1,749 \cdot NDVI - 0,601$	0,46	0,07
Wszystkie stanowiska – All plots			
<i>NDVI</i>	$fAPAR_{canopy} = 0,326 \cdot NDVI + 0,544$	0,46	0,12

W przypadku wszystkich analizowanych gatunków roślin oraz odłogu wskaźnik *NDVI* znacznie lepiej niż *PRI* sprawdzał się jako spektralny wskaźnik dziennego przebiegu $fAPAR_{canopy}$. Związane to może być z faktem, że na jego dobową zmienność znacznie mniejszy wpływ, niż w przypadku *PRI*, mają kąt padania promieni słonecznych i obecne warunki radiacyjne w atmosferze (Hall i in. 2008, Sims i in. 2006). Uzyskane wyniki znajdują potwierdzenie również w innych badaniach, wskazujących na *NDVI* jako jeden z najlepszych wskaźników spektralnych służących do szacowania frakcji akumulowanej przez pokrywę roślinną energii fotosyntetycznej czynnej (Nakaji i in. 2007, Running i in. 2000, 2004, Veroustraete i in. 2002).

WNIOSKI

Na podstawie spektralnych wskaźników roślinności *NDVI* i *PRI* zmierzonych na wybranych stanowiskach badawczych o znanej frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej określono siłę ich zależności od $fAPAR_{canopy}$, a także możliwości oszacowania parametru $fAPAR_{canopy}$ na podstawie wskaźników spektralnych. Przedstawione dane wskazują, że:

1. dla analizowanych stanowisk badawczych *NDVI* sprawdza się jako spektralny wskaźnik frakcji akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej znacznie lepiej aniżeli *PRI* (przy analizie $fAPAR_{canopy}$ w jej przebiegu dobowym, gdy gęstość pokrywy roślinnej jest wysoka);

2. frakcja akumulowanej energii fotosyntetycznie czynnej, choć jej wpływ jest zauważalny, nie jest jedynym czynnikiem kształtującym zmienne wartości spektralnych wskaźników roślinności w cyklu dobowym (świadczą o tym obserwowany w przypadku obu wskaźników dość silny rozrzut wartości oraz stosunkowo niskie wartości współczynników determinacji).

Zaobserwowane zależności wymagają zatem potwierdzenia w dalszych badaniach, które koncentrować się powinny na przetestowaniu ich także podczas całodziennych kampanii pomiarowych w innych fazach fenologicznych roślin oraz dla danych z sezonu wegetacyjnego jako całości.

PIŚMIENNICTWO

- Asner G.P., 1998. Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 64, 234-253.
- Asrar G., Myneni R.B., Kanemasu E.T., 1989. Estimation of plant canopy attributes from spectral reflectance measurements. W G.Asrar (red.): *Theory and applications of optical remote sensing*. John Wiley and Sons, 252-297.
- Blecharczyk A., 2002. Reakcja żyta ozimego i jęczmienia jarego na system następstwa roślin i nawożenie w doświadczeniu wieloletnim. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu*, 326, 1-126.
- 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*, 7, 33-50.
- 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*, 41, 35-44.
- Gobron N., Pinty B., Auzanedat O., Chen J.M., Cohen W.B., Fensholt R., Gond V., Huemmrich K.F., Lavergne T., Melin F., Privette J.L., Sandholt I., Taberner M., Turner D.P., Verstraete M.M., Widlowski J.-L., 2006. Evaluation of fraction of absorbed photosynthetically active radiation products for different canopy radiation transfer regimes: Methodology and results using Joint Research Center products derived from SeaWiFS against ground-based observations. *Journal of Geophysical Research*, 111.
- Goward S.N., Huemmrich K.F., 1992. Vegetation canopy PAR absorbance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 39, 119-140.

- Hall F.G., Hilker T., Coops N.C., Lyapustin A., Huemmrich K.F., Middleton E., Margolis H., Drolet G., Black T.A., 2008. Multi-angle remote sensing of forest light use efficiency by observing PRI variation with canopy shadow fraction. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3201-3211.
- Hanan N.P., Kabat P., Dolman A.J., Elbers J.A., 1998. Photosynthesis and carbon balance of a Sahelian fallow savanna. *Global Change Biology*, 4, 523-538.
- Hanan N.P., Burba G., Verma S.B., Berry J.A., Suyker A., Walter-Shea E.A., 2002. Inversion of net ecosystem CO₂ flux measurements for estimation of canopy PAR absorption. *Global Change Biology*, 8, 563-574.
- 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*, 83, 195-213.
- Jarocińska A., Zagajewski B., 2008. Korelacje naziemnych i lotniczych teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla zlewni Bystrzanki. *Teledetekcja Środowiska*, 40, 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*, 2, 247-254.
- Knorr W., Gobron N., Scholze M., Kaminski T., Pinty B., 2005. Global drought conditions causing recent atmospheric carbon dioxide increase. *Eos Trans. AGU*, 86, 178-181.
- Lambers H. Chapin F.S., Pons T.L., 1998. *Plant Physiological Ecology*. New York: Springer-Verlag.
- 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*, 188-189, 697-724.
- Liang S., 2004. *Quantitative remote sensing of land surfaces*. Wyd.1. New Jersey. Wiley-Interscience.
- Nakaji T., Ide R., Oguma H., Saigusa N., Fujinuma Y., 2007. Utility of spectral vegetation index for estimation of gross CO₂ flux under varied sky conditions. *Remote Sensing of Environment*, 109, 274-284.
- Rouse, J.W., Jr., R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, 93p. (NTIS No. E73-106393).
- Running S.R., Thornton P.E., Nemani R.R., Glassy J.M., 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the Earth observing system. W O.E. Sala, R.B. Jackson, H.A. Mooney, R.W. Howard (red.): *Methods in Ecosystem Science*, Springer-Verlag.
- Running S.R., Nemani R.R., Heinsch F., Zhao M., Reeves M., Hashimoto H., 2004. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 54, 547-560.
- Sims D.A., Luo H., Hastings S., Oechel W.C., Rahman A.F., Gamon J.A., 2006. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO₂ exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 103, 289-303.
- 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*, 102, 161-175.
- Tenhunen J.D., Catarino F.M., Lange O.L., Oechel W.C. (red.), 1987. *Plant Responses to Stress. Functional Analysis in Mediterranean Ecosystems*. Springer-Verlag.
- 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*, 70, 52-68.
- User manual for the SunScan Canopy Analysis System, 2008. Delta-T Devices Ltd.

- Uździcka B., Juszcak R., Sakowska K., Olejnik J., 2012. Związek między wskaźnikiem LAI a spektralnymi wskaźnikami roślinności na przykładzie wybranych gatunków roślin uprawnych. Woda - Środowisko - Obszary Wiejskie, 38, 283-311.
- Veroustraete F., Sabbe H., Earens H., 2002. Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. Remote Sensing of Environment, 81, 376-399.
- Walter-Shea E.A., Blad B.L., Hays C.J., Mesarch M.A., Deering D.W., Middleton E.M., 1992. Biophysical properties affecting vegetative canopy reflectance and absorbed photosynthetically active radiation at the FIFE site. Journal of Geophysical Research, 97, 925-934.
- 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, 97, 641-653.
- Zhang Q., Xiao X., Braswell B., Linder E., Baret F., Moore B. 2005. Estimating light absorption by chlorophyll, leaf and canopy in a deciduous broadleaf forest using MODIS data and a radiative transfer model. Remote Sensing of Environment, 99, 357 - 371.
- Zheng G., Moskal M., 2009. Retrieving Leaf Area Index (LAI) using remote sensing: Theories, methods and sensors. Sensors, 9, 2719-2745.

NDVI AND PRI AS INDICATORS OF DIURNAL CHANGES IN FRACTION OF ABSORBED PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION FOR FALLOW AND SELECTED SPECIES OF CROP PLANTS

*Bogna Uździcka¹, Radosław Juszcak¹, Karolina Sakowska^{1,2},
Bogdan H. Chojnicki¹, Marek Urbaniak¹, Janusz Olejnik¹*

¹Meteorology Department, Poznan University of Life Sciences
ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań, Poland

²Sustainable Agro-ecosystems and Bioresources Department, IASMA,
Research and Innovation Centre,
Fondazione Edmund Mach, San Michele all'Adige, TN, Italy
e-mail: bognauzdicka@gmail.com

Abstract. $fAPAR_{canopy}$ is an important ecophysiological parameter, widely used for Gross Primary Production estimation. The paper presents the effect of diurnal changes in $fAPAR_{canopy}$ on two spectral vegetation indices – $NDVI$ and PRI . Measurements were made on 28th of May, 2012, for 4 measurement plots (fallow, spring barley, winter rye, winter wheat). Measurements of incident, transmitted and reflected photosynthetically active radiation (used for $fAPAR_{canopy}$ calculation) were performed using Delta-T measurements system (Delta-T Devices, Cambridge, UK). Measurements of incident and reflected radiation at 530, 570, 670 and 849 nm were used for $NDVI$ and PRI calculation. They were performed using two SKR1850 sensors (SKYE Instruments Ltd., Llandrindod Wells, UK) mounted in zenith-nadir position on the mobile Spectrosense 2+ device. Presented data showed that $NDVI$ was much better than PRI spectral indicator of diurnal variability of $fAPAR_{canopy}$ of crop plants. Results indicated that the fraction of absorbed photosynthetically active radiation (although its impact was noticeable) was not the only factor affecting diurnal changes in $NDVI$ and PRI values.

Keywords: fraction of absorbed photosynthetically active radiation, spectral vegetation indices, Normalised Difference Vegetation Index, Photochemical Reflectance Index