

Jan Piekarczyk, Marek Wójtowicz*, Andrzej Wójtowicz**

Uniwersytet Adama Mickiewicza w Poznaniu

* Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin, Oddział w Poznaniu, ** Instytut Ochrony Roślin w Poznaniu

Wpływ nawożenia azotowego i odmian na charakterystyki spektralne łanu rzepaku ozimego

Influence of nitrogen fertilisation and varieties on spectral characteristic of oilseed rape crop

Słowa kluczowe: rzepak ozimy, odmiany, nawożenie azotem, charakterystyki spektralne roślin

W pracy oceniono wpływ odmiany i nawożenia azotowego na spektralne charakterystyki łanu rzepaku ozimego. Polowe pomiary odbicia spektralnego wykonano przy użyciu luminancjometru rejestrującego odbicie promieniowania w trzech zakresach spektralnych: widzialnym (650 nm), bliskiej podczerwieni (850 nm) i środkowej podczerwieni (1650 nm). Pomiary wykonywano w trzech terminach w sezonie wiosennym. Na podstawie zmierzonych współczynników odbicia obliczono trzy wskaźniki wegetacyjne (NDVI, ELAI oraz STVI). Zastosowane wskaźniki wegetacyjne pozwoliły na uchwycenie różnic w rozwoju rzepaku ozimego wynikających z reakcji roślin na analizowane czynniki doświadczalne (nawożenie azotem, odmiana).

Key words: winter oilseed rape, cultivars, nitrogen application, spectral characteristic of crop

The effect of variety and nitrogen fertilisation on spectral characteristic of oilseed rape crop was estimated. Field spectral reflectance measurements were made with the field luminancemeter in three wavebands: visible (650 nm), near-infrared (850 nm) and shortwave infrared (1650 nm). Measurements were taken on three dates in the spring season. Three vegetation indices (NDVI, ELAI and STVI) were developed by combining two or three reflectance factors. The vegetation indices enable to seize differences in oilseed plant development resulted from applied experimental factors (nitrogen fertilisation, variety). Significant differentiation of NDVI and ELAI values, in budding and ripening stage, between BOH 3103 or DH W-15 and Mazur or MR 153 was demonstrated. Variance analysis of yield also showed significant differences between these varieties. In flowering stage significant differentiation between five varieties was proved only by the SWO_{850} . Differentiation of fertilisation doses was reflected in spectral reflectance mainly in ripening stage. With the increase of nitrogen dose the increase of ELAI and NDVI indices and decrease of STVI index were observed. Significant difference of yield was noticed between plots fertilised by nitrogen with dose of 60 kg N ha^{-1} and plots where 140, 180 and 220 kg N ha^{-1} were applied. Significantly higher ELAI and NDVI index values were registered from plots fertilised with dose of 180 and 220 kg N ha^{-1} . Coincidence of spectral characteristic and yields representing experimental combinations proved opportunity of applying vegetation indices to forecasting the yield of oilseed rape.

Wstęp

W ciągu ostatnich 30 lat zastosowanie teledetekcji w rolnictwie było przedmiotem licznych badań. Zdalna obserwacja pól uprawnych prowadzona z poziomu naziemnego, lotniczego lub satelitarnego może być źródłem informacji o ich stanie dzięki specyficznym właściwościom optycznym roślin. W zależności od stanu fizjologicznego, pokroju, stopnia pokrycia gleby itd., rośliny w zróżnicowanym stopniu pochłaniają, przepuszczają i odbijają promieniowanie słoneczne. Na podstawie wielkości odbicia od roślin promieniowania z zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni można wnioskować o ich właściwościach biofizycznych. Silną zależność między odbiciem spektralnym a takimi parametrami biofizycznymi roślin jak biomasa, pokrycie gleby przez rośliny, wskaźnik powierzchni liści (LAI) potwierdzają wyniki wielu badań (Vaesen i in. 2001, Thenkabail i in. 2000, Maas 2000, Davidson i Csillag 2001, Broge i Leblanc 2000).

Opracowanie metod teledetekcyjnych, które umożliwiłyby ocenę stanu upraw rolniczych i prognozowanie plonów na podstawie odbicia spektralnego wymaga dokładnych badań właściwości spektralnych danego gatunku rośliny. Badania takie prowadzi się wykonując naziemne pomiary spektralne, które polegają na rejestrowaniu odbicia promieniowania elektromagnetycznego o różnych długościach fal od upraw rolniczych przy użyciu luminancjometrów. W zakresie widzialnym odbicie promieniowania od roślin jest niskie ze względu na dużą jego absorpcję przez barwniki roślinne. Znacznie większe odbicie występuje w zakresie bliskiej podczerwieni, gdyż fale z tej części widma po wnikięciu do wnętrza liści są wielokrotnie odbijane od jego struktur wewnętrznych. W zakresie środkowej podczerwieni promieniowanie jest pochłaniane przez wodę i dlatego wielkość odbicia z tego zakresu spektralnego w dużym stopniu zależy od uwodnienia tkanek roślinnych. Dane zebrane w trakcie spektralnych pomiarów polowych służą do sporządzania charakterystyk spektralnych powierzchni roślinnych, z których korzysta się przy interpretacji obrazów satelitarnych lub zdjęć lotniczych.

Dotychczas prowadzone badania właściwości spektralnych dotyczyły różnych upraw rolniczych, takich jak pszenica i jęczmień (Leamer i in. 1978, Giovacchini i in. 1984, Kuusk 1991), kukurydza (O'Neil i in. 1984, Daughtry i in. 2000), fasola i groch (Ridao i in. 1996) oraz ryż (Vaesen i in. 2001). Zmienność charakterystyk spektralnych rzepaku ozimego w sezonie wegetacyjnym wynikającą ze zróżnicowania morfologicznego roślin opisał Piekarczyk (2001).

Celem pracy było określenie zróżnicowania spektralnego pięciu odmian rzepaku ozimego oraz wpływu zróżnicowanych dawek nawożenia azotowego na odbicie spektralne od upraw rzepaku ozimego w sezonie wiosennym.

Metoda

Badania przeprowadzono w sezonie 2002/2003 w miejscowości Łagiewniki (N 51°46' E 17°14'). Doświadczenie założono w układzie losowanych podbloków w czterech powtórzeniach na glebie brunatnej właściwej, należącej do kompleksu pszenno-żytniego oraz IIIa klasy bonitacyjnej. Przedsięwzięcie zastosowano: 18–20 kg N ha⁻¹, 60 kg P₂O₅ ha⁻¹, 90–160 kg K₂O ha⁻¹ w formie Polifoski 6. Obiektem badawczym była odmiana Lisek, dwie odmiany mieszańcowe zrestorowane — BOH 3103 i MR 153, odmiana mieszańcowa złożona — Mazur oraz linia DH W-15. Nasiona wysiano 27 sierpnia na poletkach o powierzchni 10,8 m². Siew nasion wykonano siewnikiem samobieżnym w rozstawie 30 cm. Norma wysiewu wynosiła 70 szt m⁻². Wiosną rzepak nawieziono saletrą amonową według schematu doświadczenia (60, 100, 140, 180, 220 kg N ha⁻¹). Rośliny zebrano kombajnem 8 lipca. Powierzchnia poletek do zbioru wynosiła 9,6 m².

Pomiary spektralne wykonywano w trzech terminach w sezonie wiosennym 2003 roku: 16 kwietnia gdy rośliny były w fazie pełni pąkowania, 8 maja w fazie kwitnienia roślin i 29 maja w fazie początku dojrzewania. Odbicie promieniowania słonecznego od poletek rzepaku mierzono przy użyciu luminancjometru polowego CIMEL CE 313-21, o polu widzenia α 10°, rejestrującego luminancję w trzech następujących kanałach: 650 nm, 850 nm i 1650 nm. Głowica luminancjometru była zamontowana na ręcznym statywie, na wysokości 250 cm. Warunki oświetlenia badanych poletek rzepaku ozimego w czasie pomiarów ich luminancji w trzech terminach przedstawiono w tabeli 1. Dla zapewnienia najlepszych warunków oświetlenia pomiary wykonywano przy najwyższym położeniu zenitalnym Słońca (θ_s) w danym dniu. Na każdym poletku, w czterech powtórzeniach, mierzono odbicie promieniowania słonecznego od uprawy w kierunku nadirowym. Przed rozpoczęciem i po zakończeniu każdej serii pomiarowej rejestrowano wartość luminancji halonowego wzorca bieli L_h. Ponieważ przy stosunkowo niskim położeniu Słońca, w okresie gdy prowadzono badania, zmiany jego położenia zenitalnego następowały szybko, dlatego w celu kontroli zmian warunków oświetlenia każdemu pomiarowi luminancji poletek rzepaku towarzyszył pomiar gęstości strumienia padającego promieniowania w zakresie od 400 do 1100 nm, wykonywany przy użyciu pyranometru LICOR LI-250. Czujnik urządzenia był umieszczony poziomo na szczycie statywu.

Równocześnie z pomiarami spektralnymi rejestrowano obrazy mierzonej powierzchni przy użyciu aparatu cyfrowego AGFA ePhoto 1680, które później przetwarzano za pomocą oprogramowania TNTMips w celu obliczenia stopnia pokrycia gleby przez liście oraz stopnia zakrycia zielonych części roślin przez kwiaty.

Wyniki pomiarów spektralnych poletek rzepaku przedstawiono w postaci spektralnych współczynników odbicia fal widzialnych (SWO₆₅₀), z zakresu bliskiej podczerwieni (SWO₈₅₀) i środkowej podczerwieni (SWO₁₆₅₀) oraz trzech wskaźników wegetacyjnych. Spektralny współczynnik odbicia jest definiowany jako

Tabela 1

Kąt zenitalny Słońca (θ_s), pokrycie gleby przez rośliny oraz udział w polu widzenia luminancjometru kwiatów roślin pięciu odmian rzepaku ozimego w trzech terminach pomiarowych *Solar zenith angle (θ_s), ground cover and proportion of flowers in the luminancemeter field of view (FOV) of five winter oilseed rape varieties in three dates*

Data Date	θ_s [°]	Faza rozwojowa Growing stage	Odmiana Variety	Pokrycie gleby Ground cover [%]	Udział kwiatów w polu widzenia luminancjometru [%] Proportion of flowers in the FOV
16.04	42	pełnia pąkowania	BOH 3103	38	–
			Lisek	42	–
			DH W-15	38	–
			Mazur	28	–
			MR 153	34	–
08.05	35	kwitnienie roślin	BOH 3103	100	36
			Lisek		24
			DH W-15		26
			Mazur		29
			MR 153		27
29.05	30	początek dojrzewania	BOH 3103	100	–
			Lisek		–
			DH W-15		–
			Mazur		–
			MR 153		–

stosunek całkowitej luminancji obiektu do całkowitej luminancji powierzchni wzorcowej dla określonej długości fali. Wskaźniki wegetacyjne obliczono na podstawie zmierzonych wartości wspomnianych spektralnych współczynników odbicia. Stosowane w badaniach teledetekcyjnych wskaźniki wegetacyjne oblicza się jako sumę, różnicę lub iloraz współczynników odbicia fal z zakresu czerwieni i bliskiej podczerwieni widma elektromagnetycznego. Najczęściej stosowanym wskaźnikiem jest NDVI — Normalized Difference Vegetation Index (Bauer 1985, McDonald i in. 1998), którego przydatność może być jednak ograniczana przez zanieczyszczenia atmosfery lub obecność tła glebowego. Dlatego wykorzystuje się również inne wskaźniki, które w konkretnych zastosowaniach mogą być bardziej przydatne niż wskaźnik NDVI. Wskaźniki wegetacyjne bardzo często stanowią lepszą podstawę do opisu właściwości spektralnych roślinności niż pomiary odbicia każdej z fal analizowane oddzielnie. W niniejszej pracy zastosowano następujące wskaźniki wegetacyjne:

$$\text{NDVI} = (\text{SWO}_{850} - \text{SWO}_{650}) / (\text{SWO}_{850} + \text{SWO}_{650}) \quad (\text{Rouse i in. 1973}),$$

$$\text{ELAI} = -0,441 + 0,285 \times (\text{SWO}_{850} / \text{SWO}_{650}) \quad (\text{Nilsson 1985}),$$

$$STVI = (SWO_{1650} \times SWO_{650}) / SWO_{850} \quad (\text{Ridao i in. 1998}),$$

gdzie:

SWO_{650} — spektralny współczynnik odbicia fal czerwonych,

SWO_{850} — spektralny współczynnik odbicia fal z zakresu bliskiej podczerwieni,

SWO_{1650} — spektralny współczynnik odbicia fal z zakresu środkowej podczerwieni.

Uzyskane wyniki oszacowano analizą wariancji, a istotność różnic określono na poziomie ufności $P \leq 0,05$.

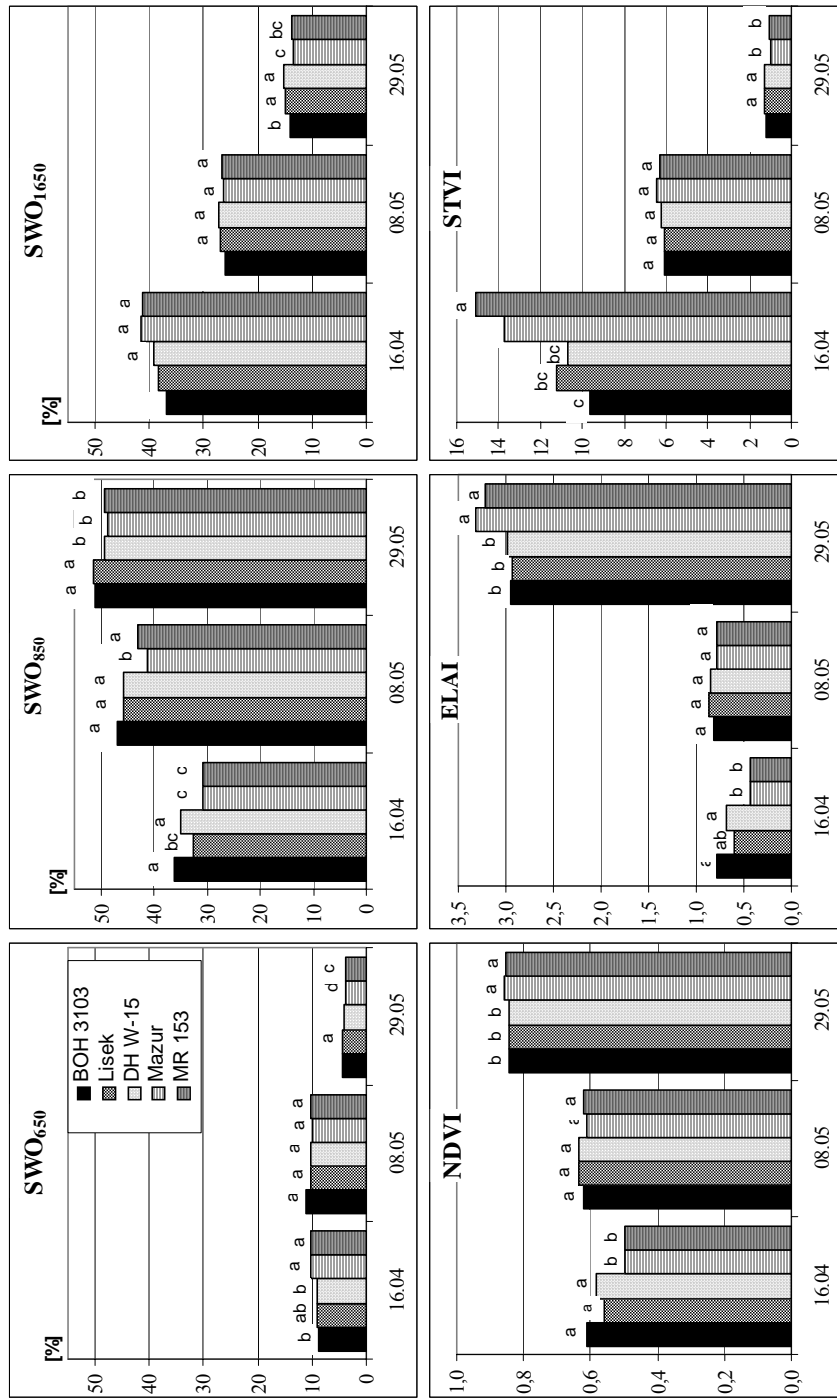
Wyniki

W fazie pąkowania roślin duży wpływ na odbicie promieniowania słonecznego od poletek rzepaku miała gleba, stanowiąca średnio od 58% pola widzenia luminancjometru na poletkach odmiany Lisek do 72% na poletkach odmiany Mazur (tab. 1). W tym stadium rośliny odmian Mazur i MR 153 rozwijały się wolniej niż rośliny trzech pozostałych odmian i dlatego ich liście w mniejszym stopniu zakrywały glebę. Mniejsze pokrycie gleby przez rośliny powodowało wzrost odbicia fal czerwonych i fal z zakresu środkowej podczerwieni oraz spadek odbicia fal z zakresu bliskiej podczerwieni (rys. 1). W fazie pąkowania największe zróżnicowanie między odmianami wykazano wskaźnikiem ELAI, którego wartości obliczone dla odmiany Mazur były prawie dwukrotnie niższe niż dla BOH 3103. Odmiany BOH 3103 i DH W-15 charakteryzowały się wyższymi wartościami wskaźników NDVI i ELAI, a niższymi wartościami wskaźnika STVI niż odmiany Mazur i MR153. Wartości wskaźników NDVI i ELAI dla odmiany Lisek nie różniły się istotnie od wartości tych wskaźników dla pozostałych odmian.

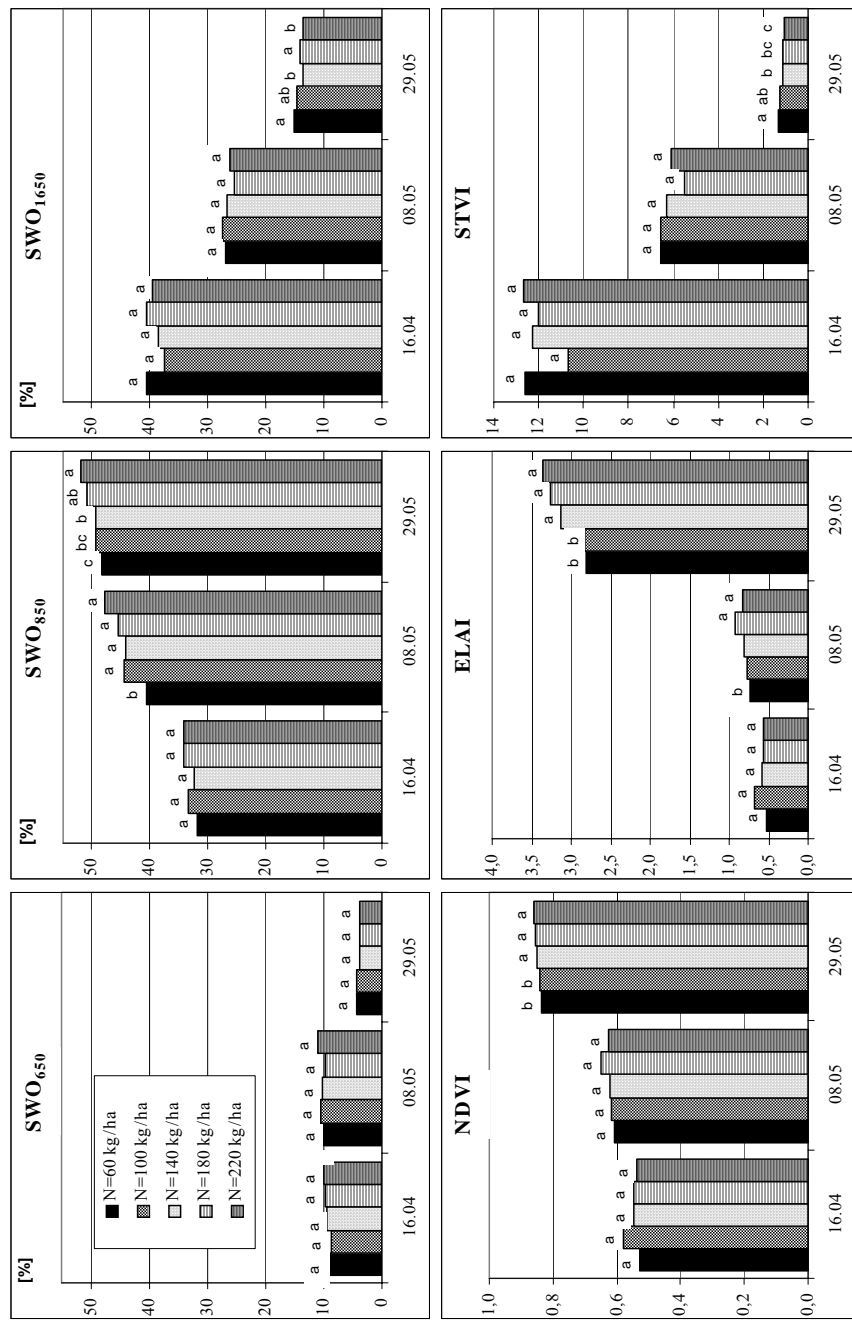
W fazie pąkowania wysokość nawożenia nie miała wpływu na zróżnicowanie odbicia spektralnego. Wartości współczynników odbicia fal z wszystkich trzech analizowanych zakresów spektralnych, jak i wartości trzech wskaźników wegetacyjnych obliczonych dla pięciu różnych dawek nawożenia nie różniły się między sobą istotnie (rys. 2).

W dniu 8 maja rośliny wszystkich odmian znajdowały się w fazie kwitnienia. Obecność kwiatów, które zasłaniały niżej położone, zawierające chlorofil, zielone części roślin powodowała wysokie odbicie w zakresie widzialnym. Dlatego wielkość odbicia fal czerwonych w fazie kwitnienia była bardzo zbliżona do odbicia tych fal rejestrowanego wcześniej, w fazie pąkowania, mimo iż biomasa roślin i pokrycie gleby znacznie się zwiększyły w okresie między 16 kwietnia i 8 maja. Najwyższe wartości współczynnika SWO_{650} rejestrowano na poletkach odmiany BOH 3103, gdzie kwiaty zajmowały średnio prawie 36% pola widzenia luminancjometru (tab. 1). Rośliny tej odmiany rosły najszybciej i zakwitły najwcześniej.

W fazie kwitnienia odbicie promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni zwiększyło się w porównaniu z odbiciem zarejestrowanym w fazie pąkowania, co wynikało ze zwiększenia biomasy roślin i całkowitego zakrycia przez nie gleby.



Rys. 1. Zróżnicowanie wartości trzech współczynników odbicia fal z zakresu widzialnego, bliskiej i środkowej podzerwieni oraz trzech wskaźników wegetacyjnych (NDVI, ELAI i STVI) obliczonych dla pięciu odmian rzepaku ozimego w trzech fazach rozwojowych — *Differentiation of three reflectance factors and three vegetation indices (NDVI, ELAI i STVI) calculated for five oilseed rape varieties in three growth stages*



Rys. 2. Zróżnicowanie wartości trzech współczynników odbicia fal z zakresu widzialnego, bliskiej i środkowej podczerwieni oraz trzech wskaźników wegetacyjnych (NDVI, ELAI i STVI) obliczonych dla poletek rzepaku ozimego nawożonych pięcioma dawkami azotu w trzech terminach — *Differentiation of three reflectance factors and three vegetation indices (NDVI, ELAI i STVI) calculated for oilseed rape plots fertilised with five doses of nitrogen in three terms*

Najwyższe wartości współczynnika SWO_{850} w fazie kwitnienia uzyskano, podobnie jak w fazie pąkowania, dla odmiany BOH 3103, a najniższe dla odmiany Mazur. Spośród trzech analizowanych współczynników odbicia i trzech wskaźników wegetacyjnych jedynie wartości współczynnika SWO_{850} wykazywały istotne statystycznie różnice odmianowe. Wartości SWO_{850} odmian BOH 3103, Lisek i DH W-15 były istotnie wyższe niż wartości dla odmiany Mazur.

W zakresie środkowej podczerwieni, wzrost biomasy roślin, w fazie kwitnienia, a co za tym idzie zwiększenie ilości wody w nich zawartej, powodował silniejszą absorpcję promieniowania z tego zakresu spektralnego i spadek odbicia w stosunku do fazy pąkowania.

W fazie kwitnienia istotne zróżnicowanie spektralne między poletkami nawożonymi różnymi dawkami azotu obserwowano w przypadku wskaźnika ELAI i współczynnika SWO_{850} . Istotnie statystycznie różnice w wartościach wskaźnika ELAI występowały między poletkami nawożonymi dawkami 60 i 180 kg ha⁻¹, natomiast współczynnik SWO_{850} wykazywał istotne różnice między dawkami 60 i 220 kg ha⁻¹.

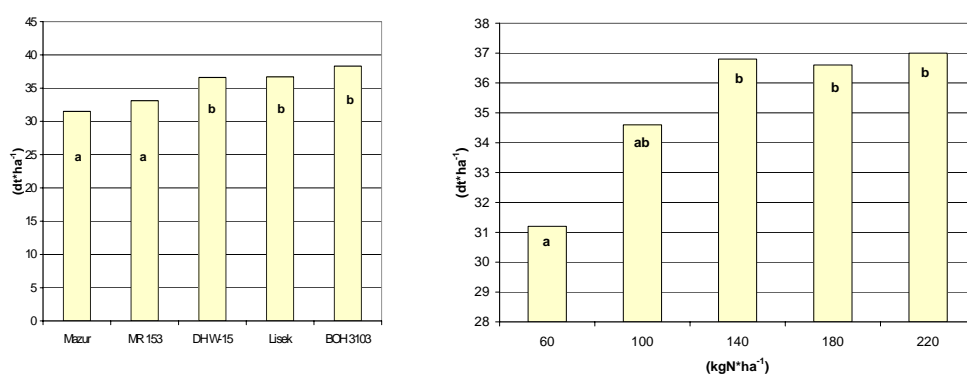
W dniu 29 maja rośliny wszystkich odmian rzepaku znajdowały się w fazie dojrzwania. W polu widzenia luminancjometru znajdowały się tylko zielone części roślin, dlatego w stosunku do poprzedniej fazy wielkość odbicia fal z zakresu widzialnego i środkowej podczerwieni znacząco zmalała. Fale czerwone były silnie pochłaniane przez chlorofil zawarty w liściach i łuszczykach. Najniższe wartości współczynnika SWO_{650} obserwowano w przypadku odmian Mazur i MR 153, których rośliny, rozwijając się wolniej niż rośliny pozostałych trzech odmian, w dniu 29 maja miały wyłącznie łuszczyki całkowicie zielone. Na odmianach BOH 3103, Lisek i DH W-15 łuszczyki zaczynały już brunatnieć i dlatego odbicie fali czerwonej od nich było istotnie wyższe niż od odmian Mazur i MR 153.

Podobnie, w zakresie bliskiej i środkowej podczerwieni, obecność brunatniejących łuszczyków powodowała wzrost odbicia w stosunku do roślin odmian dojrzewających później, które miały łuszczyki zielone. Wartości wskaźników wegetacyjnych wyraźnie odzwierciedlały zróżnicowanie właściwości spektralnych odmian rzepaku w fazie dojrzewania. Wartości wszystkich trzech analizowanych wskaźników wegetacyjnych obliczonych dla odmian Mazur i MR 153 różniły się istotnie statystycznie od wartości tych wskaźników obliczonych dla pozostałych trzech odmian: BOH 3103, Lisek i DH W-15.

W fazie dojrzewania występowało zróżnicowanie wielkości odbicia spektralnego w zależności od dawki nawożenia azotowego. Na poletkach nawożonych wyższymi dawkami (220, 180 i 140 kg N ha⁻¹) odbicie fal czerwonych było niższe niż na poletkach z dawkami niższymi (100 i 60 kg N ha⁻¹), choć różnice te nie były istotne statystycznie. Większe zróżnicowanie między poletkami nawożonymi różnymi dawkami azotu odnotowano w przypadku współczynników odbicia fal z zakresu podczerwieni oraz wskaźników wegetacyjnych. Wartości wskaźników NDVI oraz ELAI uzyskane z poletek nawożonych dawkami 180 i 220 kg N ha⁻¹ były istotnie statystycznie wyższe od wartości tych wskaźników z poletek nawożo-

nych dawkami 60 i 100 kg N ha⁻¹. Wartości wskaźnika STVI z poletek nawożonych dawkami 60 i 100 kg N ha⁻¹ były istotnie wyższe od wartości tego wskaźnika dla poletek nawożonych dawką 220 kg N ha⁻¹.

Uwzględnione w badaniach odmiany rzepaku ozimego można podzielić na dwie grupy różniące się wielkością uzyskanego plonu. Odmiany: BOH 3103, Lisek i DH W-15 plonowały istotnie wyżej od odmian: Mazur i MR 153 (rys. 3). Wysokość plonów była modyfikowana również przez nawożenie azotowe. Istotne statystycznie różnice występowały między poletkami nawożonymi azotem w dawce 60 kg N ha⁻¹ a poletkami, na których zastosowano 140, 180, 220 kg N ha⁻¹. Obliczona korelacja między wysokością plonu i wartościami wskaźników wegetacyjnych okazała się istotna statystycznie w przypadku wskaźników NDVI i ELAI w pierwszym terminie pomiarowym (16.04) (tab. 2).



Rys. 3. Wysokość plonowania w zależności od odmiany i wiosennego nawożenia azotem
Effect of cultivar and spring nitrogen fertilisation on yield

Tabela 2

Współczynniki korelacji między plonem i wartościami wskaźników uzyskanymi w trakcie pomiarów spektralnych w pierwszym terminie — Correlation coefficients between the yield and three vegetation indices from spectral measurements taken on the first date (16.04)

Wyszczególnienie — Specification	NDVI	ELAI	STVI	Plon
NDVI — Normalized Difference Vegetation Index	1			
ELAI — Estimated Leaf Area Index	0,99	1		
STVI — Stress Related Vegetation Index	-0,94	-0,92	1	
Plon — Yield	0,46*	0,46*	-0,39	1

* korelacja istotna statystycznie na poziomie $\alpha = 0,05$
correlation statistically significant at the level of $\alpha = 0.05$

Wnioski

1. Zastosowane wskaźniki wegetacyjne pozwoliły na uchwycenie różnic w rozwoju rzepaku ozimego wynikających z reakcji roślin na analizowane czynniki doświadczalne (nawożenie azotem, odmiana).
2. Zróżnicowanie odmianowe poletek rzepaku wynikające z odmiennego tempa wzrostu roślin na początku sezonu wegetacyjnego można stwierdzić na podstawie odbicia spektralnego już w fazie pąkowania.
3. Zróżnicowanie dawek azotu wpływało na zmienność trzech wskaźników wegetacyjnych NDVI, STVI i ELAI oraz współczynnika odbicia SWO_{1650} na początku fazy dojrzewania, a współczynnika odbicia SWO_{850} wcześniej, bo już w fazie kwitnienia.
4. Zbieżność zróżnicowania charakterystyk spektralnych i plonów uzyskanych z kombinacji doświadczalnych potwierdza możliwość zastosowania wskaźników wegetacyjnych do prognozowania wysokości plonu rzepaku ozimego.

Literatura

- Bauer M. E. 1985. Spectral inputs to crop identification and condition assessment. *Proceedings of the IEEE*, 73: 1071-1085.
- Broge N.H., Leblanc E. 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76: 156-172.
- Daughtry C.S.T., Walthall C.L., Kim M.S., Brown de Colstoun E., McMurtrey J.E. 2000. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74: 229-239.
- Davidson A., Csillag F. 2001. The influence of vegetation index and spatial resolution on a two-date remote sensing derived relation to C4 species coverage. *Remote Sensing of Environment*, 75: 138-151.
- Gabrielle B., Denoroy P., Gosse G., Justes E., Andersen M.N. 1998. A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Research*, 57: 209-222.
- Giovacchini A., Mattioli A., Spallaci A. 1984. Multispectral data monitoring of temporal vegetation characteristics. II^e Colloquium int. Signatures spectrales d'objets en teledetection. Bordeaux, 12-16 sept. 1983. INRA Publ. (Les Colloques de l'INRA, n° 23): 201-207.
- Kuusik A. 1991. The angular distribution of reflectance and vegetation indices in barley and clover canopies. *Remote Sensing of Environment*, 37: 143-151.
- Leamer R.W., Noriega J.R., Wiegand C.L. 1978. Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. *Agronomy Journal*, 70: 113-118.
- Maas S.J. 2000. Linear mixture modeling approach for estimating cotton canopy ground cover using satellite multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 72: 304-308.

- McDonald A.J., Gemmel F.M., Lewis P.E. 1998. Investigation of the utility of spectral vegetation indices for determining information on coniferous forests. *Remote Sensing*, 66: 250-272.
- Nilsson H.E. 1985. Remote Sensing of 6-row barley infected by barley stripe disease. *Vaxtskyddsrapporter, Jordbruk* 36, Uppsala, 49.
- O'Neill P.E., Jackson T.J., Blanchard B.J., Wang J.R., Gould W.I. 1984. Effects of corn stalk orientation and water content on passive microwave sensing of soil moisture. *Remote Sensing of Environment*, 16: 55-67.
- Piekarczyk J. 2001. Temporal variation of the winter rape crop spectral characteristics. *Int. Agrophysics*, 15: 101-107.
- Rouse J.W.Jr., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the Earth Research Technical Satellite-1 Symposium*. Goddard Space Flight Center, Washington, DC, 309-317.
- Ridao E., Conde J.R., Minguéz M.I. 1998. Estimating fAPAR from nine vegetation indices for irrigated and nonirrigated faba bean and semileafless pea canopies. *Remote Sensing of Environment*, 66: 87-100.
- Thenkabail P.S., Smith R.B., De Pauw E. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationship with agricultural crop characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 71: 158-182.
- Vaesen K., Gilliams S., Nackaerts K., Coppin P. 2001. Ground-measured spectral signatures as indicators of ground cover and leaf area index: the case of paddy rice. *Field Crops Research*, 69: 13-25.