

Modelowanie kierunkowego odbicia od powierzchni gleb w zakresie optycznym z uwzględnieniem kierunku ich uprawy

*Directional reflectance modelling of soil surfaces
in the optical domain incorporating their farming direction*

Jerzy CIERNIEWSKI, Jan PIEKARCZYK, Adam MARLEWSKI

A new model describing the directional reflectance in the optical domain from cultivated soil surfaces, taking into account their farming direction, is presented in the paper. The model considers a soil surface as equal-sized opaque apheroids of definite shape and size dispersed in a net of squares on freely sloping plane. They are absorbed into the plane having their tops on a height above it. Different values of the height, along and across the soil cultivation direction, are parameters which express the variation of soil surface irregularities caused by furrowed farming treatments as ploughing or harrowing. The structure is illuminated by the direct solar beams at solar zenith and azimuth angles, and also diffuse light. Wave energy reflected from individual facets of the surface is reflected in the diffuse and the specular way. Reflectance features of the simulated soil material are characterized its refractive index. A set of the geometrical parameters of the structure, completed by the refractive index, called as the "virtual surface", determines a part of input data for the discussed model. The model predicts the soil surface normalized reflectance index *NR*, expressed as the ration of the total radiance of the simulated surface viewed from the off-nadir direction to the radiance viewed from the

nadir. The model assumes that the sensor of the definite field of view is suspended over the surface in the given distance. The model was tested on five plots, ploughed and harrowed. Their directional reflectance, measured by a five-channels field luminancemeter in the visible, near-and-middle-infrared range, was collected along the solar principal plane. Variation of the *NR* for the ploughed soil surface in the view zenith angle function was higher than for the harrowed surfaces at similar illumination and viewing conditions. For the both kind of the cultivated surfaces, the higher horizontal angle between the azimuth angles of the Sun and the furrow orientation, the higher the variation of the *NR* in the function of the view zenith angle. The accuracy of the model was tested by a linear regression analysis of the *NR* of the studied soil surfaces, measured and predicted by the model, for the channel of the wavelength of 850 nm. The analysis was performed separately for 9 *NR* curves for the ploughed, as well as the harrowed surfaces. Results of the regression analysis, relating to all measured reflectance data, expressed by the coefficient of determination, show that the precision of the model operation for the ploughed and harrowed surface is 97% and 98%, respectively.

Wstęp

Odbicie światła w zakresie optycznym od powierzchni gleb jest silnie uzależnione od geometrii ich oświetlenia i obserwacji. Nieregularności powierzchni gleb, wynikające z ich uziarnienia, zbrylenia, a także mikroreliefu powodowanego zabiegami uprawowymi, są przyczyną ich częściowego zacielenia. Zacielenie fragmenty gleby są wielokrotnie ciemniejsze od tych bezpośrednio oświetlonych promieniami słonecznymi. Gleby uprawne, pozbawione pokrywy roślinnej i nie wykazujące

cech odbicia zwierciadlanego, wydają się jaśniejsze, gdy obserwowane są z kierunków, z których dostrzega się mniejszy udział ich zacielenych fragmentów (Cierniewski, 1987; Graetz i Gentle, 1982; Huete, 1987; Peč i in., 1986; Ransen i in., 1985). Takie powierzchnie są najjaśniejsze, gdy obserwujący je sensor ma Słońce za sobą, a kierunek ich obserwacji zbliżony jest do kierunku padania promieni słonecznych. Stopień zacielenia powierzchni gleb zależy od nachylenia płaszczyzny całych stoków oraz mniejszych płaszczyzn ich mikroreliefu względem kierunku padania promieni słonecznych. Za-

leży on także od gęstości rozmieszczenia agregatów glebowych na tych płaszczyznach. Dotychczas opracowane modele opisujące kierunkowe odbicie od powierzchni gleb zakładały, że zacienienie powodowane przez nieregularności powierzchni gleb ma większy wpływ na rozkład tego odbicia w zakresie optycznym niż właściwości odbiciowe samego materiału glebowego w mikroskali. Agregaty glebowe w modelu Normana i in. (1985) opisywane były za pomocą prostopadłościów. Kształt struktury opisującej powierzchnię gleby w modelu Coopera i Smitha (1985) określała funkcja cosinus. Modele Cierniewskiego (1987, 1989) oraz Ironsa i in. (1992) przedstawiały agregaty glebowe jako nieprzezroczyste, jednakowej wielkości kule równomiernie rozłożone na płaszczyźnie stoku glebowego. Kolejne modele autora, opracowane także z Verbrugge i innymi (Cierniewski i in., 1996; Cierniewski i Verbrugge, 1997; Cierniewski, 1999), opisujące te agregaty jako elipsoidy o określonej proporcji ich pól pionowej do poziomej, uwzględniały obok dyfuzyjnego komponentu w ich odbiciu także komponent zwierciadlany. Także geometryczny model, opisujący powierzchnie gleb uprawnych o mikroreliefie bruzdowym, pokrytych materiałem odbijającym światło tylko w sposób dyfuzyjny, wykorzystano do analizowania zmiennej jasności gleb uprawnych w różnych warunkach ich oświetlenia i obserwacji (Cierniewski i Marlewski, 1997, Cierniewski i in., 1998). Dane wygenerowane za pomocą tego modelu pozwoliły ilościowo ocenić wpływ kierunkowych zabiegów agrotechnicznych na postrzeganie przez sensory pracujące w zakresie optycznym świeżo zaoranych pól oraz pól z uformowanymi redlinami przygotowanymi pod uprawę ziemniaków.

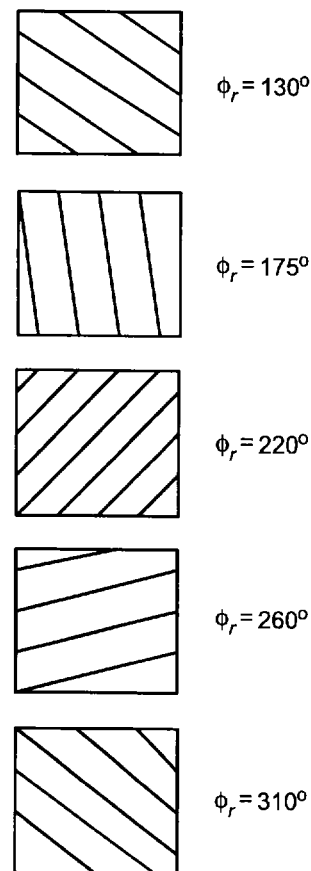
W niniejszej pracy przedstawiono kolejny model opisujący kierunkowe odbicie od gleb poddanych zabiegom uprawowym. Wykorzystuje on założenia wcześniejszego modelu (Cierniewski, 1999), przedstawiającego powierzchnię zbryloną gleby za pomocą nieprzezroczystych równej wielkości elipsoid obrotowych leżących na płaszczyźnie odpowiednio zorientowanego względem Słońca stoku glebowego. Materiał glebowy traktowany jest jako obiekt odbijający światło w sposób zarówno dyfuzyjny, jak i zwierciadlany. Model ten opracowywany jest w ramach projektu badawczego 6PO4E02316, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych. W niniejszej pracy posłużono się tym modelem do przeanalizowania kierunkowego odbicia od pól zaoranych i zabronowanych, zwracając szczególną uwagę na wpływ zorientowania kierunku tych zabiegów względem promieni słonecznych.

Wiedza na temat rozkładu kierunkowego odbicia od gleb uprawnych jest szczególnie przydatna przy interpretacji danych glebowych uzyskiwanych za pośrednictwem tych fragmentów obrazów lotniczych czy satelitarnych, które obserwowane są przez sensor nie w kierunku nadiru, ale skośnie (Barnsley, 1994).

Metody badań

Powierzchnie glebowe

Działanie niniejszego modelu testowano na pięciu poletkach doświadczalnych koło Poznania (52,40°N, 16,84°E), których powierzchnię, wytworzoną z piasku słabo gliniastego, najpierw zaorano pługiem trójskibowym, a potem wyrównano przy użyciu brony średniej. Wspomniane zabiegi uprawowe wykonywano w lipcu i sierpniu 1999 roku na poziomo usytuowanych poletkach o wymiarze 10 × 10 m wzdłuż następujących kierunków określonych kątem azymutalnym: 130°, 175°, 220°, 260°, 310° (ryc. 1).



Ryc. 1. Kierunki zabiegów uprawowych na badanych poletkach określone kątem azymutalnym ϕ_r .

Fig. 1. Directions of farming treatments on studied plots expressed by azimuth angles ϕ_r .

Określenie szorstkości badanych powierzchni

Stan szorstkości badanych powierzchni glebowych rejestrowano na obrazach stereoskopowych. Obrazy te wykonywano aparatem cyfrowym AGFA ePhoto 1680 o rozdzielczości 1680 × 1200 punktów. Aparat umieszczono na dwóch równoległych do siebie wypoziomowanych listwach, wyznaczających oś zobrazowania, podpartych na dwóch statywach. Zobrazowanie wykonano

z wysokości 1,7 m przesuwając aparat wzdłuż wspomnianej osi o 40 cm. Na zobrazowane powierzchnie nakładano duraluminiową ramę z siatką stalową o wymiarze 5×5 cm. Po wypoziomowaniu ramy, węzły tej siatki stanowiły odniesienie wysokościowe do leżących pod nią punktów mierzonej powierzchni. Wysokość tych punktów domierzano z dokładnością 1 mm. Rozdzielczość obrazu zapewniała rzeczywisty wymiar piksela $0,8 \times 0,8$ mm. Stereoskopowy obraz badanych powierzchni przetwarzano za pomocą oprogramowania TNTMips, uzyskując ich cyfrowe modele wysokościowe. Z modeli tych wyliczono dla badanych powierzchni wzdłuż i poprzecznie do kierunku wykonanego zabiegu uprawowego następujące wskaźniki szorstkości:

RL_r i RL_p — wyrażające przeciętny stosunek długości linii profili analizowanej powierzchni do długości jej rzutu poziomego, gdzie indeksy r i p odnoszą się odpowiednio do stanu szorstkości w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku przeprowadzonego zabiegu; RH_r i RH_p — opisujące odchylenie standardowe wysokości analizowanej powierzchni względem jej średniej wartości odpowiednio w kierunku równoległym i prostopadłym do kierunku przeprowadzonego zabiegu.

Pomiary kierunkowego odbicia

Powierzchnie te poddano kierunkowym pomiarom luminancji za pomocą luminancjometru polowego CIMEL CE 313-21 o polu widzenia $\alpha 10^\circ$, rejestrującego tę wielkość w pięciu kanałach o następujących długościach fal: 450 nm, 550 nm, 650 nm, 850 nm i 1650 nm. Luminancję tych powierzchni mierzono w głównej płaszczyźnie słonecznej GPS pod 15 różnymi kątami zenitalnymi θ_u od -70° , poprzez 0° , do $+70^\circ$ w odstępach co 10° przy kątach zenitalnych Słońca θ_s oraz kątach poziomych ϕ_p , opisujących kąt pomiędzy kierunkiem Słońca a kierunkiem wykonania zabiegu uprawowego zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1.

Wartości kąta zenitalnego θ_s i azymutalnego ϕ_s Słońca oraz kąta azymutalnego kierunku uprawy θ_r i poziomego kąta oświetlenia bruzd ϕ_r badanych powierzchni
Values of solar zenith θ_s and azimuth ϕ_s angles and azimuth angle of cultivation direction θ_r and horizontal angle of furrows illumination ϕ_r studied surfaces

	Powierzchnia orana <i>Ploughed surface</i>									Powierzchnia bronowana <i>Harrowed surface</i>								
θ_s ($^\circ$)	35,4	36,4	37,6	47,8	47,7	47,8	59,5	63,3	62,4	35,4	35,8	36,2	47,1	47,9	48,5	61,0	61,8	62,3
ϕ_s ($^\circ$)	210	216	220	182	180	172	130	120	122	225	226	227	250	251	252	270	271	271
θ_r ($^\circ$)	220	175	130	175	220	260	310	175	220	220	260	310	260	220	175	260	220	175
ϕ_r ($^\circ$)	10	41	90	7	40	88	0	55	82	4	36	82	10	30	77	12	50	83

Luminancję powierzchni zaoranych mierzono z odległości $h = 300$ cm, a powierzchni zabronowanych $h = 215$ cm. W jednej płaszczyźnie dokonywano siedemnastu kanałowych pomiarów luminancji. Wyżej wspomnianą serię złożoną z 15 pomiarów poprzedzano bowiem i kończono dodatkowymi pomiarami w kierunku nadiru $\theta_u = 0^\circ$. Automatyczny zapis wszystkich danych w jednej płaszczyźnie trwał około 4 minut. Wszystkie pomiary luminancji wykonywano przy bezchmurnym niebie.

Model

Model ustala rozkład wskaźnika promieniowania elektromagnetycznego odbitego w zakresie optycznym od szorstkiej powierzchni glebowej, poddanej kierunkowym zabiegom agrotechnicznym. Szorstkość ta wynika z obecności różnej wielkości i różnego kształtu cząstek i agregatów glebowych rozłożonych na jej powierzchni rzędowo, tworząc rodzaj bruzd wzdłuż kierunku dokonywania tych zabiegów. Szorstką powierzchnię glebową symulują nieprzezroczyste, równej wielkości elipsoidy obrotowe o półośi poziomej a i pionowej b , rozłożone w siatce kwadratów o boku d , odpowiadającym odległości między rzędami wspomnianych bruzd. Elipsoidy leżą na stoku, nachylnym pod kątami ϵ . Orientację tego stoku określają dwie równoległe do siebie płaszczyzny: niżej usytuowana, którą wyznaczają linie przebiegające w dnie zagłębień między bruzdami oraz wyżej położona płaszczyzna stanowiąca podstawę grzbietu tych bruzd. Elipsoidy są wciśnięte w niżej położoną płaszczyznę tak, że ich wierzchołki wystają nad nią na wysokość t_p , która charakteryzuje nieregularności symulowanej powierzchni w kierunku prostopadłym do kierunku bruzd. Nieregularności tej powierzchni wzdłuż kierunku bruzd są mniejsze, co wyraża się mniejszą wysokością wystających części elipsoid t_r ponad płaszczyznę grzbietu bruzd. Taka struktura geometryczna oświetlona jest bezpośrednio padającymi na nią promieniami słonecznymi, opisanymi kątem zenitalnym θ_s oraz światłem dyfuzyjnym nieba o wskaźniku energii f_{di} definiowanym jako ułamek energii bezpośrednio docierającego promieniowania słonecznego. Ponad tą strukturą umieszczony jest sensor, obserwujący ją w wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej GPS, którą wyznaczają promienie słoneczne oświetlające analizowaną powierzchnię. W płaszczyźnie tej zróżnicowanie odbitej energii jest największe. Obserwacja jest dokonywana pod kątem zenitalnym θ_u , w odstępach co $\Delta\theta_u$, w kierunkach dosłonecznych i odsłonecznych, przyjmujących odpowiednio wartości

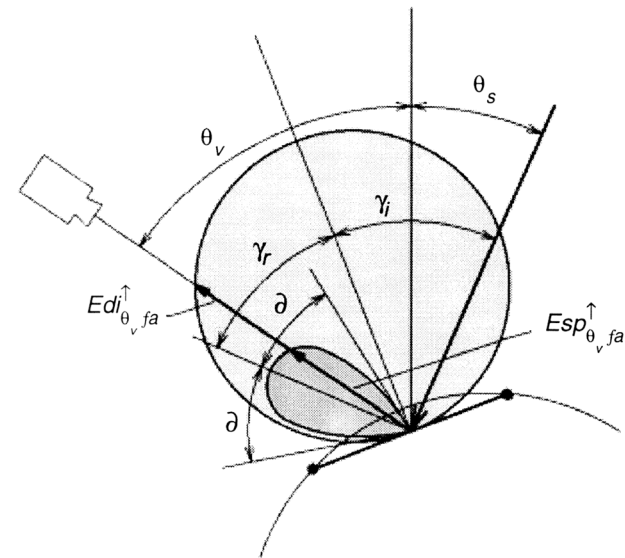
ujemne i dodatnie. Sensor wycelowany jest stale w ten sam punkt rozpatrywanej powierzchni, znajdujący się od niego w odległości h . Pole widzenia sensora określa kąt α .

Położenie granicy rozdzielającej bezpośrednio oświetlone i zacienione fragmenty badanej struktury ustalane jest za pomocą odpowiednich równań trygonometrycznych, uwzględniając wzajemne przesłanianie obserwowanych z danego kierunku fragmentów elipsoid

i odcinka stoku między nimi. Obliczenia prowadzone są dwukrotnie przy założeniu, że GPS przebiega wzdłuż bruzd wyznaczających kierunek uprawy oraz prostopadle do tego kierunku. Ilości energii docierającej do bezpośrednio oświetlonych fragmentów symulowanej struktury glebowej oblicza się za pomocą wskaźnika $Ei_{\theta_v fa}^{\uparrow}$:

$$Ei_{\theta_v fa}^{\downarrow} = \cos\theta_s \cos\beta + \sin\beta + \sin\theta_s \cos(\phi_r - \phi_s) \quad (1)$$

gdzie β jest kątem nachylenia elementarnego fragmentu tej struktury, a ϕ_p i ϕ_s są kątami azymutalnymi opisującymi odpowiednio położenie stoku glebowego i Słońca. Wskaźnik $Ei_{\theta_v fa}^{\downarrow}$ wyraża cosinus kąta padania promieni γ względem normalnej do rozpatrywanego elementarnego fragmentu fa . Bezpośrednio padające promieniowanie odbijane jest zarówno w sposób dyfuzyjny, jak i zwierciadlany, przy czym ich wektory w dwuwymiarowej płaszczyźnie tworzą odpowiednio kształt okręgu oraz wydłużonej elipsy (ryc. 2). Długość wektorów kompo-



Ryc. 2. Rozkład energii odbitej w sposób dyfuzyjny i zwierciadlany od elementarnego fragmentu struktury symulowanej powierzchni glebowej

Fig. 2. Distribution of the energy leaving a facet of the simulated soil surface in the specular and the diffuse way

nentu zwierciadlanego, traktowanego jako światło niepolaryzowane, wyliczana jest za pomocą równań Fresnela:

$$Esp_{\theta_v fa}^{\uparrow} = Ei_{\theta_v fa}^{\uparrow} FP(\gamma_i) \quad FP(\gamma_i) = \frac{r^2 + r_{\perp}^2}{2}, \quad (2)$$

$$r = \frac{-n^2 \cos\gamma_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\gamma_i}}{n^2 \cos\gamma_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\gamma_i}}; \quad r_{\perp} = \frac{\cos\gamma_i - \sqrt{n^2 - \sin^2\gamma_i}}{\cos\gamma_i + \sqrt{n^2 - \sin^2\gamma_i}}$$

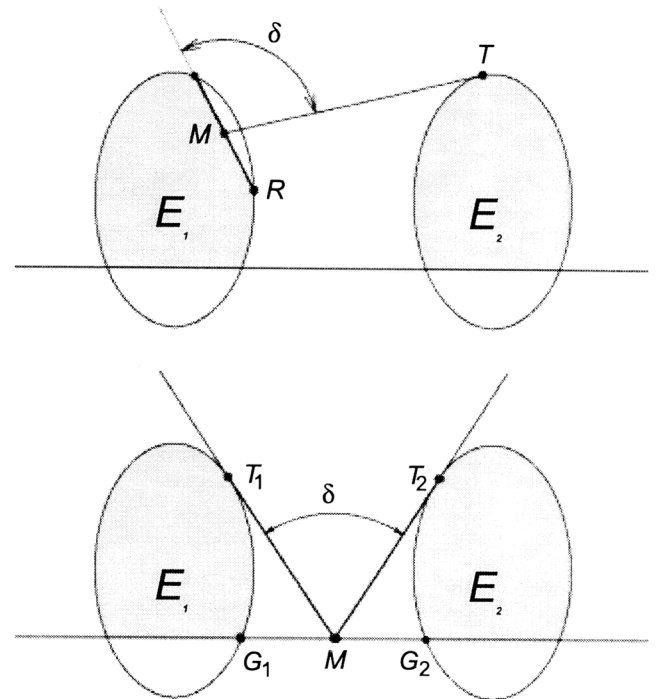
gdzie r i r_{\perp} są odpowiednio prostopadłym i równoległym współczynnikiem odbicia Fresnela, a n jest współczynnikiem załamania światła o określonej długości. Wektor energii odbitej w sposób zwierciadlany $Esp_{\theta_v fa}^{\uparrow}$ jest zorientowany w taki sposób, że kąt padania γ_i równa się kątowi odbicia γ_r . Efekty odbicia zwierciadlanego dostrzegane są przez sensor tylko w ograniczonym zakresie, defi-

niowanym przez kąt 2δ wokół kierunku γ_r . Długość wektora $Esp_{\theta_v fa}^{\uparrow}$ w odległości $\pm\delta$ od γ_r spada liniowo do zera. Długość wektora $Ei_{\theta_v fa}^{\uparrow}$ uzupełnia dyfuzyjny komponent $Edi_{\theta_v fa}^{\uparrow}$ definiowany jako:

$$Edi_{\theta_v fa}^{\uparrow} = (1 - FP(\gamma_i)) \cdot Ei_{\theta_v fa}^{\uparrow} \cos\theta_v \quad (3)$$

Ostatecznie całkowitą energię $Eis_{\theta_v fa}^{\uparrow}$ docierająca do sensora zorientowanego pod kątem θ_v , odbiła od bezpośrednio oświetlonego elementarnego fragmentu fa symulowanej gleby, oblicza się dzieląc $Ei_{\theta_v fa}^{\uparrow}$ przez $\cos\theta_v$.

Do fragmentów zarówno bezpośrednio oświetlonych promieniami, jak i zacienionych, dociera także światło dyfuzyjne nieba. Jego wartość jest redukowana poprzez obecność sąsiednich elipsoid, ograniczających jego dopływ w stosunku do sytuacji, gdy dociera ono z całej półkuli przestrzeni trójwymiarowej (ryc. 3). W efekcie



Ryc. 3. Ograniczenie dopływu światła dyfuzyjnego nieba do elementarnego odcinka LR na łuku elipsy E_1 oraz na płaszczyźnie stoku między elipsami E_1 i E_2 wyrażone kątem δ . M jest punktem środkowym odcinka LR oraz G_1 i G_2 , a T , T_1 i T_2 są punktami styczności ramion kąta δ do sąsiednich elips

Fig. 3. Limitation in illumination by skylight of the facet segment LR on the ellipse E_1 ark and the slope plane between ellipses E_1 and E_2 , expressed by the angle δ . M is the middle point of the segments LR and G_1, G_2 . T , T_1 and T_2 are the tangent points of the angle δ sides to the adjoining ellipses

tego, od elementarnego odcinka rozpraszana zostaje dodatkowa porcja energii, opisana równaniem:

$$E_{sk fa}^{\downarrow} = f_{di} \frac{\delta}{180^\circ} \quad (4)$$

gdzie δ jest kątem płaskim w analizowanej płaszczyźnie, ograniczającym dopływ światła nieba do analizowanego fragmentu symulowanej powierzchni gleby. Wskaźnik luminancji symulowanej powierzchni glebowej, obejmującej oświetlone oraz zacienione elementarne jej fragmenty, widziane z określonego kierunku θ_v wzdłuż określonego przekroju pr definiowany jest jako:

$$L_{\theta_v, pr}^{\uparrow} = \sum_{i=1}^j \left[\left(E i s_{\theta_v, f_{q(i)}}^{\uparrow} + E s k_{f_{q(i)}}^{\uparrow} \xi_{i, f_{q(i)}}^{\uparrow} \right) + \sum_{i=1}^j \left(E s k_{f_{q(i)}}^{\uparrow} \cdot \xi_{s_{f_{q(i)}}} \right) \right] \quad (5)$$

gdzie i jest i -tym fragmentem analizowanej struktury, $\xi_{i, f_{q(i)}}^{\uparrow}$ oraz $\xi_{s_{f_{q(i)}}}$ są odpowiednio elementarnymi kątami widzenia oświetlonych i zacienionych fragmentów. Luminancja odbierana przez sensor z całego jego pola widzenia $L_{\theta_v}^{\uparrow}$ jest średnią wartością luminancji z poszczególnych przekrojów $L_{\theta_v, pr}^{\uparrow}$ oraz przestrzeni między elipsoidami $L_{\theta_v}^{\uparrow}$, ważoną według równania:

$$L_{\theta_v, FOV}^{\uparrow} = L_{\theta_v, pr(1)}^{\uparrow} \frac{a}{2m-1} + \sum_{i=2}^m L_{\theta_v, pr(i)}^{\uparrow} \frac{a}{m-0,5} + L_{\theta_v, sm}^{\uparrow} \left(\frac{d}{2} - a \right), \quad (6)$$

gdzie m jest liczbą profili.

Kiedy modelowanie kierunkowego odbicia spektralnego ma odnosić się do sytuacji, gdy główna płaszczyzna słoneczna GPS nie przebiega ani równoległe, ani prostopadle do kierunku brzd, to luminancja $L_{(\phi_r, \theta_v), FOV}^{\uparrow}$ tak oświetlonej powierzchni obliczana jest według równania:

$$L_{(\phi_r, \theta_v), FOV}^{\uparrow} = L_{\theta_v, FOV}^{\uparrow} \left(1 - \frac{\psi}{90^\circ} \right) + L_{p_{\theta_v}, FOV} \frac{\psi}{90^\circ} \quad (7)$$

gdzie $L_{r_{\theta_v}}$ i $L_{p_{\theta_v}}$ są wartościami luminancji obliczanymi odpowiednio wzdłuż i prostopadle do kierunku brzd, a ψ jest kątem poziomym mierzonym między GPS i kierunkiem przebiegu wspomnianych brzd.

Ostatecznie odbicie od szorstkiej powierzchni gleby wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej GPS jest opisywane za pomocą znormalizowanego wskaźnika $NR_{(\phi_v = GPS, \theta_v)}$, definiowanego jako stosunek całkowitej luminancji $L_{\theta_v, FOV}^{\uparrow}$ powierzchni gleby mierzonej skośnie do jej luminancji mierzonej w kierunku nadiru. Zakładając, że wskaźnik ten w płaszczyźnie do niej prostopadłej PP dla każdego kąta θ_v przyjmuje wartość 1, rozkład $NR_{(\phi_v = GPS, \theta_v)}$ we funkcji kąta azymutalnego θ_v pomiędzy GPS a PP ma przebieg prostoliniowy i jego wartość $NR_{(\phi_v, \theta_v)}$ dla dowolnie zorientowanej płaszczyzny może być definiowana jako:

$$NR_{(\phi_v, \theta_v)} = NR_{(\phi_v = GPS, \theta_v)} \left(1 - \frac{\phi_v}{90^\circ} \right) + \frac{\phi_v}{90^\circ} \quad (8)$$

gdzie θ_v jest względnym poziomym kątem określającym odległość kątową od GPS .

Omówienie wyników

Stan szorstkości powierzchni glebowych

Orkę na wszystkich badanych poletkach wykonywano do jednakowej głębokości 30 cm przy optymalnym uwilgotnieniu gleby, dzięki czemu uzyskano stosunkowo płaską powierzchnię o głębokości brzd zaledwie

około 7 cm, przebiegających w rozstawie co 28 cm. Zabronowanie gleb spowodowało wyrównanie ich powierzchni i rozdrobnienie największych brył. Głębokość brzd po tym zabiegu, przebiegających w rozstawie co 12 cm, wynosiła średnio 2.8 cm (ryc. 4). Wskaźniki szorstkości badanych powierzchni po przeprowadzeniu orki i po bronowaniu (tab. 2), obliczone z ich cyfrowych

Tabela 2.

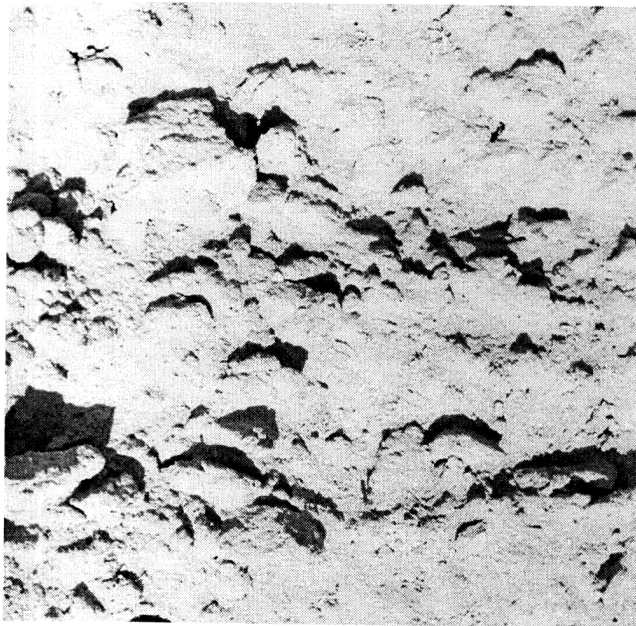
Wskaźniki szorstkości badanych powierzchni glebowych
Roughness indexes of the studied soil surfaces

Po zabiegach uprawowych <i>After farming treatments</i>	Wskaźniki szorstkości <i>Roughness indexes</i>					
	RL_p	RL_r	RL_p/RL_r	RH_p (cm)	RH_r (cm)	RH_p/RH_r
Orce <i>Ploughing</i>	1,44	1,34	1,075	0,76	0,64	1,188
Bronowaniu <i>Harrowing</i>	1,17	1,12	1,045	0,43	0,30	1,433

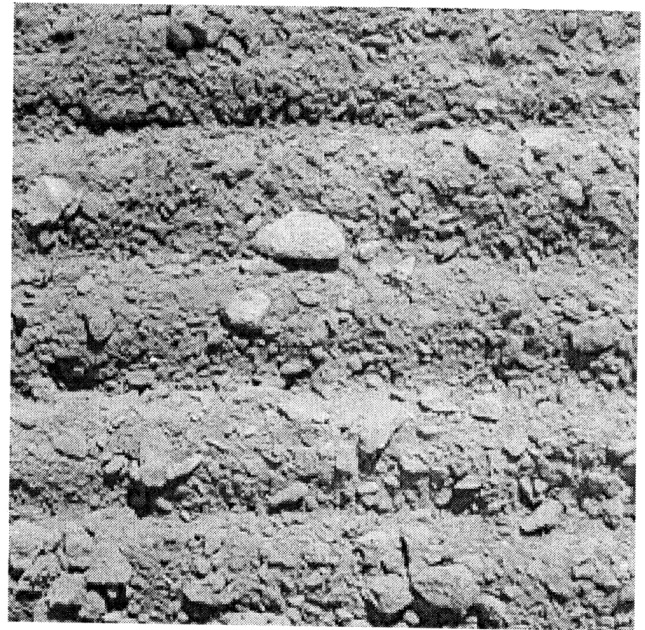
modeli wysokościowych (ryc. 5), wskazują, że ich szorstkość jest wyraźnie większa w kierunku prostopadłym niż równoległym do kierunku wykonanych zabiegów. Wskaźnik wyrażający stosunek długości linii profilowej powierzchni do jej rzutu poziomego poprzecznie do kierunku uprawy RL_p w porównaniu do kierunku przebiegającego wzdłuż uprawy RL_r jest o około 7% większy po przeprowadzeniu orki i o około 5% większy po wykonaniu bronowania. Wskaźnik opisujący wielkość odchylenia standardowego wysokości analizowanych powierzchni poprzecznie do kierunku uprawy RH_p w stosunku do kierunku wzdłuż uprawy RH_r jest o około 19% większy po przeoraniu gleby i o około 43% większy po jej zbronowaniu.

Mierzone krzywe odbicia

Rozkład wskaźnika znormalizowanego odbicia NR od badanych powierzchni uprawnych we funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_v dla pięciu mierzonych kanałów wykazuje bardzo niewielkie zróżnicowanie. To zróżnicowanie obserwuje się wyraźnie tylko w stosunku do kierunków odslonecznych wokół kątów zenitalnych obserwacji, dla których luminancjometr „widzi” cień rzucany przez siebie na badaną powierzchnię. Choć mierzone krzywe wskaźnika NR analizowanych powierzchni i odpowiadające im krzywe generowane za pomocą omówionego modelu na rycinie 6 odnoszą się tylko do jednego wybranego kanału, 850 nm, to charakteryzują one też w bardzo podobny sposób pozostałe kanały. Aby na omawianej rycinie łatwiej można było porównać krzywe NR powierzchni zaoranych z krzywymi NR powierzchni zabronowanych, zestawiono je w odniesieniu do prawie tych samych warunków oświetlenia określonych kątem zenitalnym Słońca θ_s : zbliżonym do 35–37°, 47–48° i 60–62° (ryc. 6). W celu zaobserwowania wpływu kąta poziomego ϕ_p oświetlenia brzd, zawartego między główną płaszczyzną słoneczną GPS a kierunkiem uprawy, wybrano dane odnoszące się do najwyższych, śred-



Powierzchnia zaorana
Ploughed surface



Powierzchnia zabronowana
Harrowed surface

Ryc. 4. Widok analizowanych powierzchni glebowych
Fig. 4. View of the analysed soil surfaces

nich i wysokich wartości tego kąta. Generalnie, w podobnych warunkach oświetlenia powierzchnie zaorane wzdłuż GPS wykazują większą zmienność wskaźnika znormalizowanego odbicia NR we funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_v , niż powierzchnie zabronowane. Wraz ze wzrostem kąta oświetlenia bruzd ϕ_p dla obu rodzajów powierzchni uprawnych zmienność ta powiększa się i to najwyraźniej w kierunkach odsłonecznych.

Poprawność działania modelu

Poprawność funkcjonowania omawianego modelu oszacowano metodą analizy regresji liniowej wartości wskaźników znormalizowanego odbicia NR , mierzonych za pomocą luminancjometru na badanych powierzchniach uprawnych i generowanych przez model za pomocą parametrów uzyskanych poprzez odwrócenie działania tego modelu. Odpowiedni zestaw wartości tych parametrów, wyobrażających geometrię powierzchni i jej właściwości odbiciowe, przy użyciu których za pomocą opisanego modelu można byłoby poprawnie wygenerować rozkład odbitych od niej fal elektromagnetycznych o określonej długości, tworzy syntetyczną powierzchnię, którą zaproponowano nazywać „powierzchnią wirtualną” (Cierniewski, 1998). Właściwe wartości parametrów (a , b , d , t_p , i t_r , n i f_{dl}) tworzące wirtualne powierzchnie dla badanych gleb poddanych orce i bronowaniu uzyskano za pomocą specjalnie przygotowanego programu, napisanego w *Object Pascal*. Realizowany był on w dwóch etapach. W pierwszym etapie dla danej powierzchni obliczano średni błąd kwadratowy $rms_{\theta_s, \phi_r, s}$ między danymi NR pomierzonymi a wygenerowanymi za pomocą modelu dla danych warunków jej

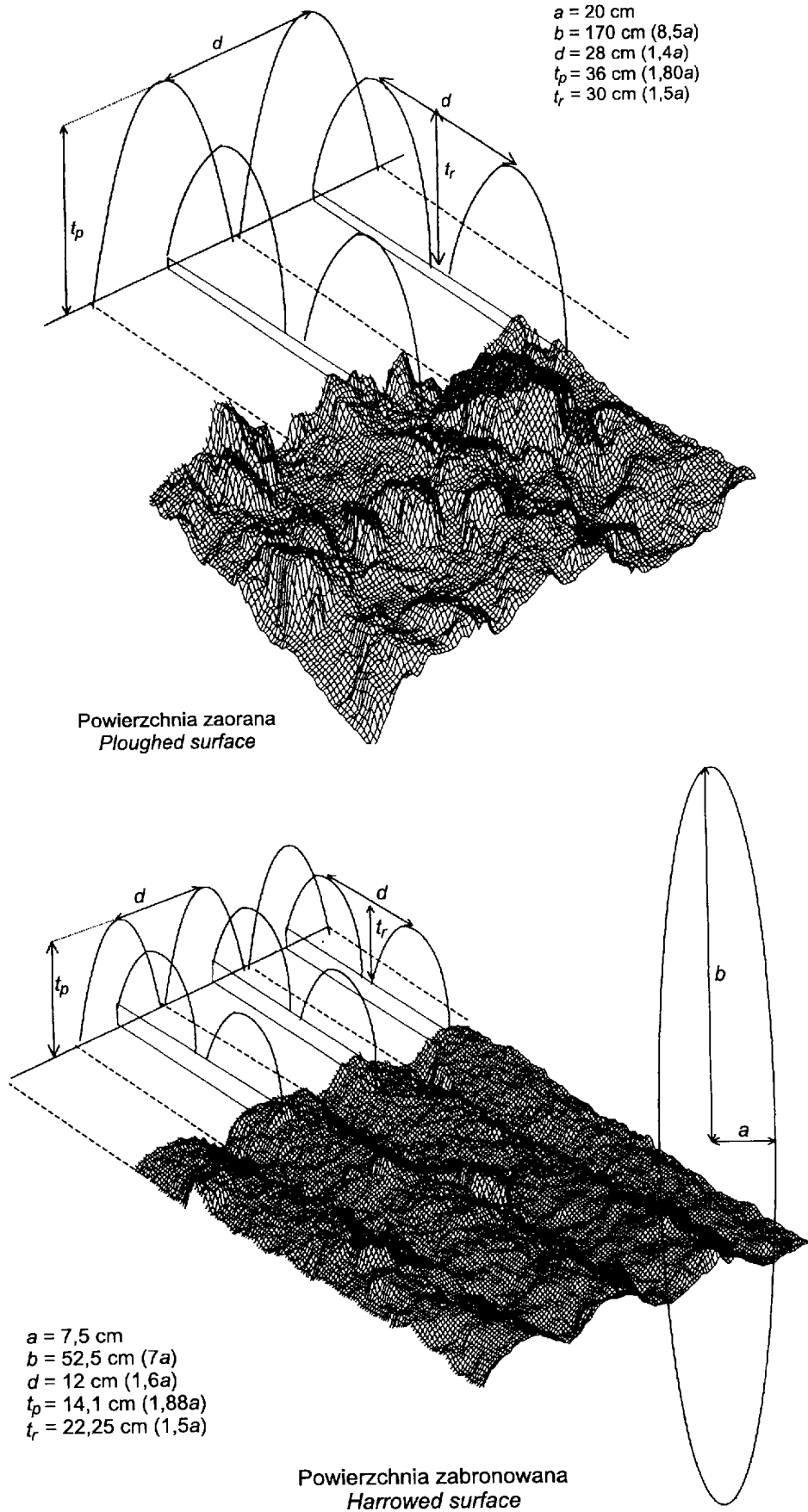
oświetlenia, określonych kątami θ_s i ϕ_r . Błąd ten obliczano według następującej formuły:

$$rms_{\theta_s, \phi_r, s} = \frac{1}{nv - 1} \sqrt{\sum_{nv=1}^{nv} (M_{\theta_s, \phi_r, \theta_v} - P_{\theta_s, \phi_r, s})^2} \quad (9)$$

gdzie nv jest liczbą kątów θ_s ; $M_{\theta_s, \phi_r, \theta_v}$ jest wartością znormalizowanego odbicia NR zmierzoną przy kątach θ_s , ϕ_r i θ_v ; $P_{\theta_s, \phi_r, s}$ modelowaną wartością NR dla tych kątów i zestawu s parametrów a , b , d , t_p , i t_r oraz n i f_{dl} . Odległość d między elipsoidami zgodnie z założeniami modelu odpowiada odległości między rzędami bruzd powstałych w trakcie analizowanych zabiegach uprawowych. Ze względu na niewielkie zróżnicowanie rozkładu wartości i wskaźników NR wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej GPS we funkcji długości fali, niniejszą procedurę ograniczono do warunków oświetlenia falą z zakresu bliskiej podczerwieni o długości 850 nm. Wykorzystując nabyte doświadczenie w modelowaniu powierzchni gleb uprawnych (Cierniewski, 1999) przyjęto, że współczynnik n dla fali podczerwonej o długości 850 nm wynosi 2,5, a wskaźnik f_{dl} 0,05. Kąt nachylenia stoku ϵ wynosił 0, a pozostałe parametry opisujące warunki oświetlenia i obserwacji analizowanych powierzchni, θ_s , ϕ_r , h , α były przyjmowane przez ich zmierzenie. W drugim etapie dla wszystkich zestawów s parametrów a , b , d , t_p , t_r , n i f_{dl} danej powierzchni obliczano sumę K_s :

$$K_s = \sum rms_{\theta_s, \phi_r, s} \quad (10)$$

ujmującą jednocześnie wartości $rms_{\theta_s, \phi_r, s}$ odnosząc się



Ryc. 5. Cyfrowe modele wysokościowe badanych powierzchni glebowych przetworzone z ich obrazów stereoskopowych uzupełnione profilami powierzchni wirtualnych symulujących rozkład ich kierunkowego odbicia

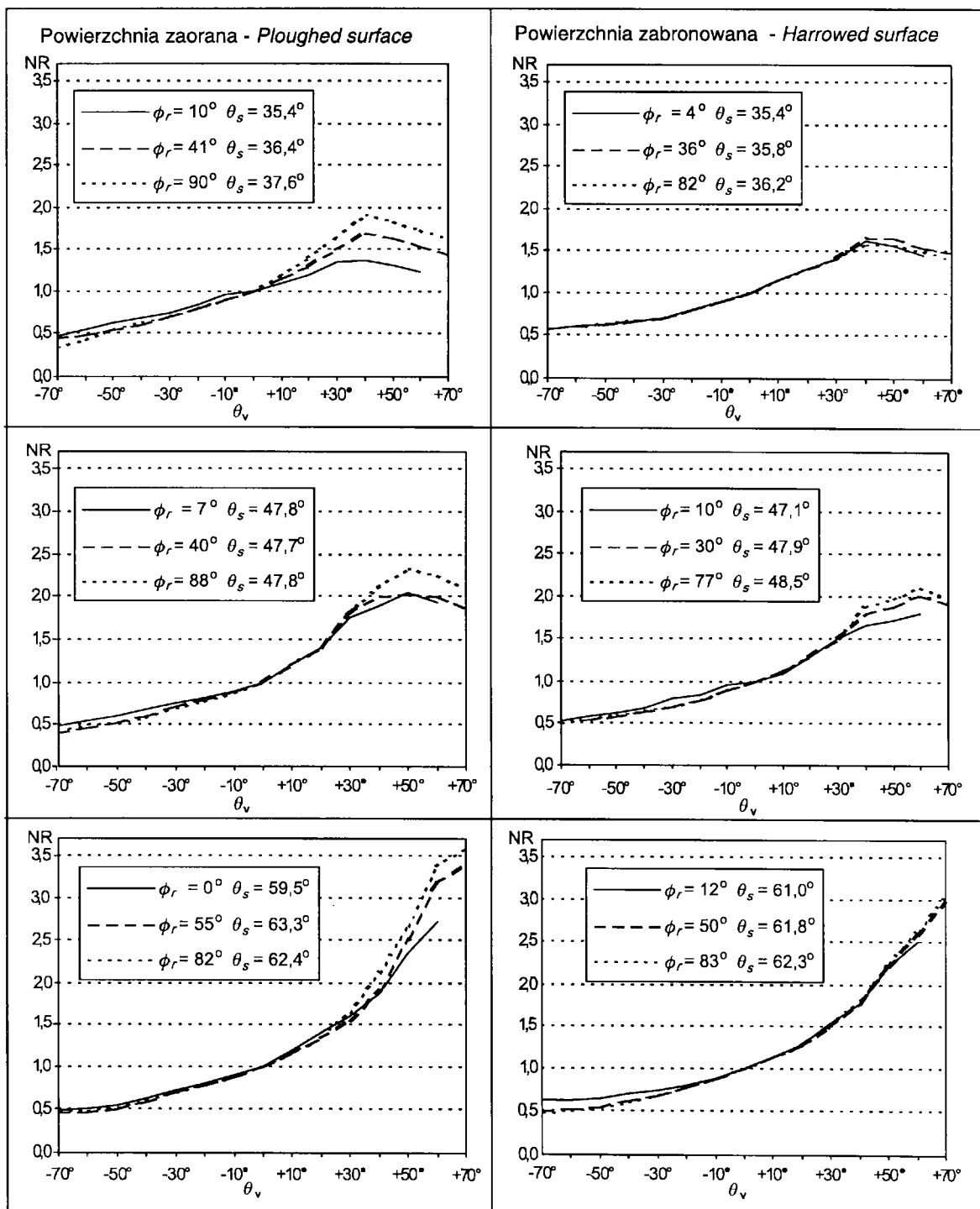
Fig. 5. Digital elevation models of the studied soil surfaces processed from their stereoscopic images completed by profiles of their virtual surfaces simulating their directional reflectance distribution

do wszystkich analizowanych warunków oświetlenia. Ostatecznie za najwłaściwszy zestaw wartości parametrów geometrycznych, umożliwiających przewidywanie odbicia spektralnego analizowanych powierzchni z jak najmniejszym błędem uznawano ten, dla którego powyższa suma była najmniejsza.

W zaproponowanej procedurze poszukania najodpowiedniejszych parametrów powierzchni wirtualnych do modelowania kierunkowego odbicia od powierzchni za-

oranych i zabronowanych wykorzystano tę samą liczbę par danych. Odnosiły się one do 9 krzywych NR, każdej zawierającej od 13 do 14 par wartości NR. Z obliczeń średniego błędu kwadratowego *rms* wyłączono bowiem te pary danych NR, dla których luminancjometr mierząc odbicie od powierzchni gleby miał w swoim polu widzenia również fragmenty gleby przez siebie zacienione.

Stosując wyżej opisaną procedurę ustalono, że odbicie kierunkowe w zakresie bliskiej podczerwieni od ba-



Ryc. 6. Rozkład znormalizowanego wskaźnika odbicia NR analizowanych powierzchni glebowych wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej dla fali o długości 850 nm zmierzonych dla wybranych wartości kątów ich oświetlenia θ_s i ϕ_p

Fig. 6. Distribution of the normalised reflectance NR of the analysed soil surfaces along the solar principal plane for the channel of 850 nm for selected solar zenith angles θ_s and ϕ_p

danych powierzchni z najmniejszym błędem może być przewidywane za pomocą następujących powierzchni wirtualnych, wyobrażonych na rycinie 5 i scharakteryzowanych parametrami zestawionymi w tabeli 3. Powierzchnie wirtualne gleb zarówno zaoranych, jak i za-

Tabela 3.

Zestaw parametrów geometrycznych do modelowania kierunkowego odbicia od badanych powierzchni glebowych
Set of geometrical parameters for modelling of the directional reflectance from the studied soil surfaces

Po zabiegach uprawowych After farming treatments	Parametry geometryczne Geometrical parameters				
	a (cm)	b/a	d/a	t_p/a	t_r/a
Orce Ploughing	20	8,5	1,4	1,80	1,5
Bronowaniu Harrowing	7,5	7,0	1,6	1,88	1,5

a — pozioma półoś elipsoid
horizontal semiaxis of the spheroids;

b — pionowa półoś elipsoid
vertical semiaxis of the spheroids;

d — odległość między elipsoidami
distance between the spheroids;

t_p i t_r — wysokość wierzchołków elipsoid ponad płaszczyznę stoku odpowiednio w kierunku poprzecznym i równoległym do kierunku uprawy
height of the spheroid tops above the slope plane, perpendicular and parallel to the direction of cultivation.

bronowanych tworzą elipsoidy o znacznym pionowym wydłużeniu, niewiele wystające ponad płaszczyznę stoku glebowego, przy czym ich wysokość ponad tą płaszczyznę jest mniejsza wzdłuż kierunku uprawy. Oznacza to, że zgodnie z założeniami dyskusowanego modelu, szorstkość uprawianej gleby w tym kierunku jest mniejsza, ujawniając też wzdłuż tego kierunku mniejszą zmienność jej wskaźnika znormalizowanego odbicia NR w funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_s niż w kierunku poprzecznym do kierunku uprawy. Elipsoidy odnoszące się do powierzchni zaoranych są około 2,5-krotnie większe i o około 20% bardziej wydłużone. Proporcjonalnie do wielkości elipsoid opisujących obie badane powierzchnie, wysokość ich wierzchołków ponad płaszczyznę stoku wzdłuż kierunku uprawy jest taka sama. W kierunku poprzecznym do kierunku uprawy, elipsoidy charakteryzujące powierzchnię zaoraną są mniej wciśnięte w płaszczyznę stoku, co przy założeniach niniejszego modelu oznacza, że powierzchnia ta jest słabiej uporządkowana przez tę uprawę niż powierzchnia zabronowana. Potwierdzenie tego faktu znajdujemy w cyfrowych modelach wysokościowych analizowanych powierzchni (ryc. 5). Porównując kształt omawianych powierzchni wirtualnych z ich rzeczywistymi odpowiednikami widać wyraźnie, że powierzchnie syntetyczne tworzą około 5-krotnie wyższe nieregularności. To nieproporcjonalnie duże wyolbrzymienie wymiaru pionowego nieregularności powierzchni wirtualnych zastępuje znacznie bardziej skomplikowaną w kształcie geometrię powierzchni rzeczywistych (Cierniewski i in., 1996).

Wartości średniego błędu kwadratowego $rms_{\theta_s, \phi_r, s}$

między mierzonymi a modelowanymi wartościami NR, ustalane w trakcie przyjętej procedury dopasowywania parametrów powierzchni wirtualnych, określają poprawność działania tego modelu. Względnie niskie wartości tego błędu, obliczone dla poszczególnych krzywych NR badanych powierzchni uprawnych wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej przy zmieniających się warunkach ich oświetlenia (tab. 4), świadczą o poprawnym

Tabela 4.

Średni błąd kwadratowy rms znormalizowanego odbicia w zakresie bliskiej podczerwieni od powierzchni gleb uprawnych odniesiony do wartości kątów: zenitalnego Słońca θ_s i azymutalnego oświetlenia ϕ_r powierzchni, przy których dokonano pomiarów luminancji

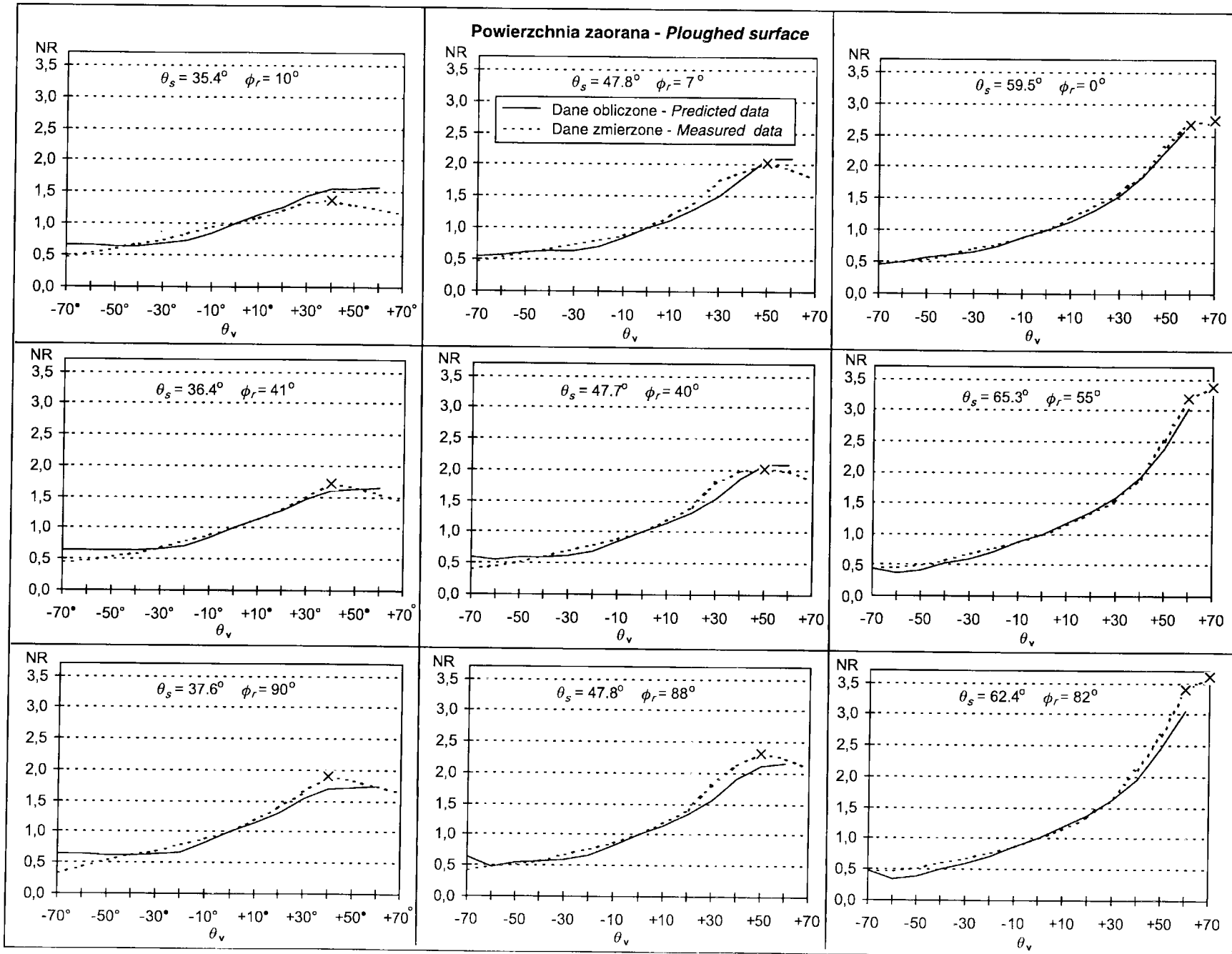
Root mean square error rms for normalised reflectance in the near-infrared of cultivated soils in relation to the solar zenith angle θ_s and the illumination azimuth angle ϕ_r of the surfaces for which the luminance measurements were collected

Po zabiegach uprawowych After farming treatments	θ_s (°)	ϕ_r (°)	rms
Orce Ploughing	35,4	10	0,039
	36,4	41	0,020
	37,6	90	0,027
	47,7	40	0,039
	47,8	88	0,034
	59,5	0	0,013
	63,3	55	0,019
	62,4	82	0,029
średnia mean			0,027
Bronowaniu Harrowing	35,4	4	0,018
	35,8	36	0,016
	36,2	82	0,017
	47,1	10	0,022
	47,9	30	0,017
	48,5	77	0,016
	61,0	12	0,010
	61,8	50	0,012
62,3	83	0,016	
średnia mean			0,016

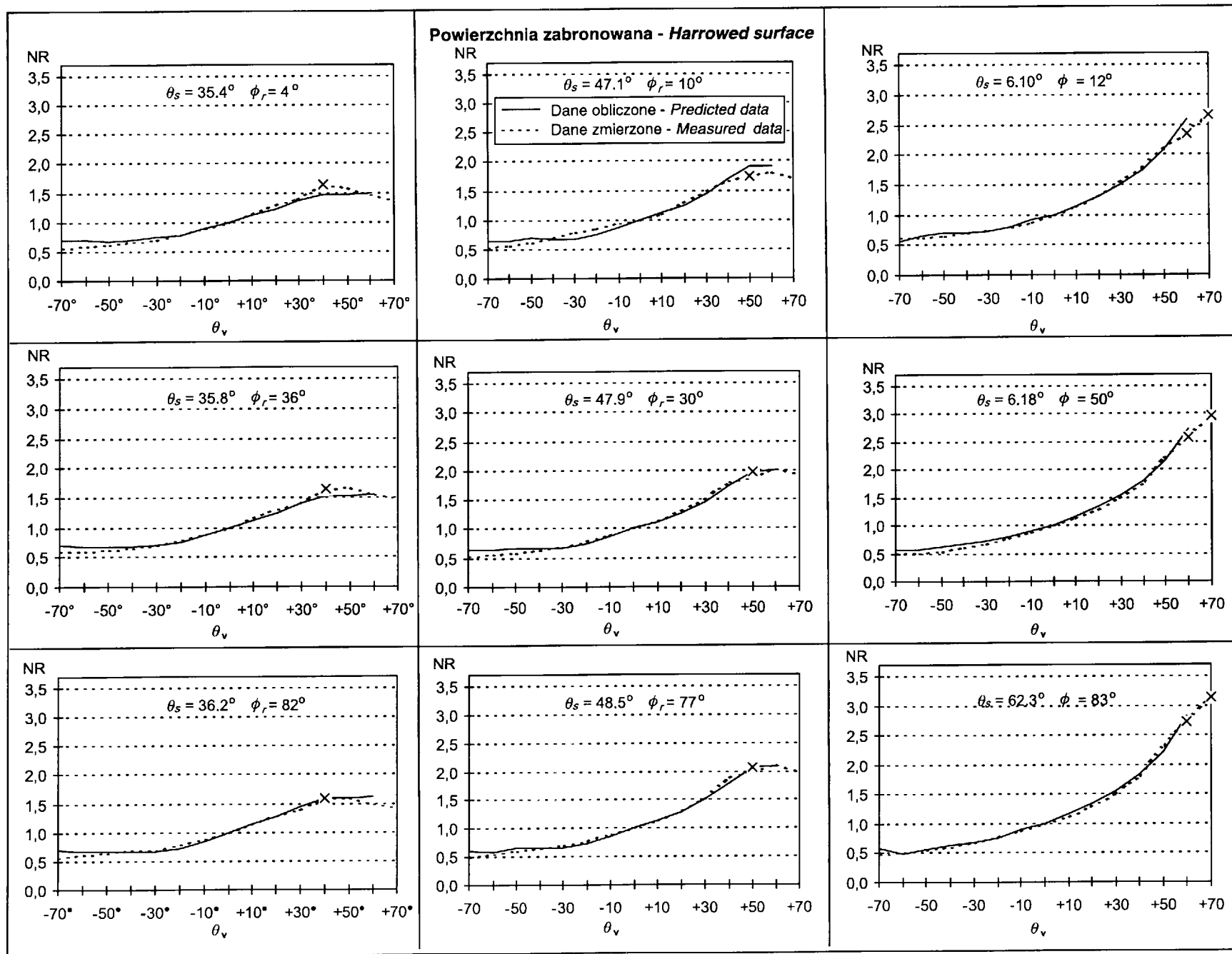
działaniu przedstawionego modelu. Wyraźnie mniejszy błąd funkcjonowania tego modelu stwierdzono w odniesieniu do powierzchni bronowanych, o bardziej uporządkowanym rozkładzie agregatów glebowych i mniejszym zróżnicowaniu ich wielkości. Uwidacznia się to również w większej zbieżności między mierzonymi i modelowanymi krzywymi NR opisującymi powierzchnie bronowane niż zaorane (ryc. 7). Posługując się współczynnikiem determinacji r^2 można stwierdzić, że poprawność przewidywania krzywych wskaźnika znormalizowanego odbicia NR dla powierzchni zabronowanych wynosi 98%, natomiast dla powierzchni zaoranych — 97% (ryc. 8).

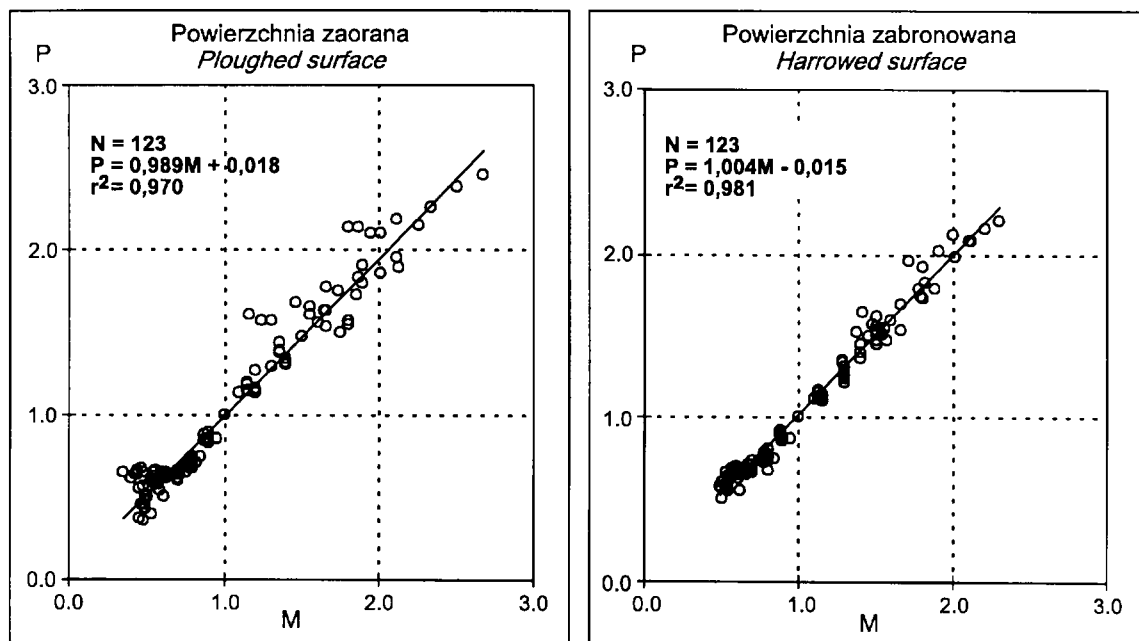
Podsumowanie

Wykorzystując obrazy lotnicze lub satelitarne do interpretacji gleb uprawnych poddanych zabiegom uprawowym, takim jak orka czy bronowanie, należy uwzględnić fakt, że jasność tych powierzchni na wspomnianych obrazach zależy od geometrii ich powierzchni.



Ryc.7. Zależność pomiędzy znormalizowanym wskaźnikiem odbicia NR analizowanych powierzchni glebowych wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej dla fali o długości 850 nm, ustalonym za pomocą modelu (linia ciągła) i zmierzonych (linia przerywana) dla wybranych wartości kątów ich oświetlenia ϕ_s i ϕ_r ; x oznacza zmierzone wartości NR, rejestrowane przy zaciętej powierzchni przez luminancjometr





Ryc. 8. Zależność pomiędzy mierzonymi (M) i przewidywanymi za pomocą modelu (P) wartościami wskaźnika znormalizowanego odbicia NR badanych powierzchni. N jest liczbą par danych, wykorzystaną do obliczenia równania regresji

Fig. 8. Relation between measured (M) and predicted by the model (P) values of the normalised reflectance factor NR of the studied surfaces. N is number of the data pairs used for calculation of the regression equation

Każdy z zabiegów agrotechnicznych powoduje wytworzenie specyficznego stanu szorstkości uprawianych gleb. Mikrorelief brzdowy, wytworzony w trakcie tych zabiegów, ze względu na kierunkowy rozkład tworzących go agregatów glebowych, powoduje, że szorstkość tak uprawianych powierzchni jest zmienna w stosunku do kierunku przeprowadzonych zabiegów. Zmienna szorstkość takich powierzchni względem kierunku uprawy pociąga za sobą również odmienny w stosunku do tego kierunku rozkład odbicia światła. W konsekwencji tego, jasność powierzchni gleb poddanych zabiegom uprawowym zależy również od kąta poziomego pomiędzy główną płaszczyzną słoneczną GPS a kierunkiem uprawy.

W niniejszej pracy omówiono model kierunkowego odbicia światła w zakresie optycznym od gleb poddanych zabiegom agrotechnicznym, uwzględniający wpływ kierunku ich uprawy. Model ten traktuje powierzchnię gleby jako płaszczyznę pokrytą siatką elipsoid obrotowych, o określonej wielkości i określonym kształcie, wciśniętych w płaszczyznę stoku. Parametrem geometrycznym różnicującym szorstkość symulowanej powierzchni glebowej względem kierunku uprawy jest mniejsza wysokość wierzchołków wspomnianych elipsoid ponad płaszczyznę stoku wzdłuż kierunku uprawy niż poprzecznie do niego. Niniejszy model zakłada, że odbicie fal elektromagnetycznych od gleby ma charakter zarówno dyfuzyjny, jak i zwierciadlany.

Prezentowany model testowano na poletkach doświadczalnych, których powierzchnię, wytworzoną z piasku słabo gliniastego, najpierw zaorano pługiem, a potem wyrównano przy użyciu brony. W podobnych warunkach oświetlenia powierzchnie zaorane wzdłuż GPS wykazują większą zmienność wskaźnika znormalizowanego

odbicia NR we funkcji kąta zenitalnego obserwacji niż powierzchnie zabronowane. Dla obu rodzajów tych powierzchni uprawnych, wraz ze wzrostem poziomego kąta oświetlenia ich brzdów zmienność ta powiększa się i to najwyraźniej w kierunkach odsłonecznych.

Kierunkowe odbicie spektralne od badanych powierzchni uprawnych w określonych warunkach oświetlenia i obserwacji można symulować przy wykorzystaniu odpowiednich powierzchni wirtualnych, tworzących zestaw parametrów charakteryzujących geometrię tych powierzchni i ich właściwości odbiciowe dla określonej długości fali.

Poprawność funkcjonowania omawianego modelu oszacowano metodą analizy regresji liniowej wartości wskaźników NR, mierzonych za pomocą luminancjometru na badanych powierzchniach uprawnych i generowanych przez model za pomocą parametrów powierzchni wirtualnych, uzyskanych poprzez odwrócenie działania tego modelu. Stwierdzono, że poprawność przewidywania krzywych rozkładu NR we funkcji kąta zenitalnego obserwacji dla powierzchni zaoranych i bronowanych wynosi odpowiednio 97% i 98%.

Literatura

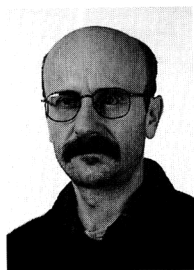
- Barnsley M.J., 1984: Effects of off-nadir view angles on the detected spectral response of vegetation canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 715-728.
- Cierniewski J., 1987: A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near-infrared range. *Remote Sensing of Environment*, 23, 97-115.
- Cierniewski J., 1989: The influence of the viewing geometry of bare rough soil surfaces on their spectral response in the

- visible and near-infrared range. *Remote Sensing of Environment*, 27, 135–142.
- Cierniewski J., Baret F., Verbrugge M., Hanocq J.F., Jacquemoud S., 1996: Geometrical modelling of soil bidirectional reflectance incorporating specular effects. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 3691–3704.
- Cierniewski J., Verbrugge M., 1997: Influence of soil surface roughness on soil bidirectional reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1277–1288.
- Cierniewski J., Marlewski A., 1997: Symulacja postrzegania teledetekcyjnego gleb poddanych kierunkowym zabiegom agrotechnicznym. *Materiały IV Krajowej Konferencji „Komputerowe wspomaganie badań naukowych”*, 16–18 X, 1997, Wrocław–Świeradów Zdrój, 51–56.
- Cierniewski J., Marlewski A., Farys M., Królewicz S., 1998: Brightness variation of furrowed soil surfaces remotely sensed. *Questiones Geographicae*, 19/20, 13–22.
- Cierniewski J., 1998: Wirtualne powierzchnie symulujące jasność gleb w zmieniających się warunkach ich oświetlenia i obserwacji. *Fotointerpretacja w Geografii*, 27, 34–47.
- Cierniewski J., 1999: *Geometrical modelling of soil bidirectional reflectance in the optical domain*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Cooper K.D., Smith J.A., 1985: A Monte Carlo reflectance model for soil surfaces with three-dimensional structure. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1GE-23, 668–673.
- Graetz R.M., Gentle M.R. 1982: A study of the relationship between reflectance characteristics in the Landsat wavebands and the composition and structure of an Australian semi-arid rangeland. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 148, 1721–1736.
- Huete A.R. 1987: Soil and Sun angle interactions on partial canopy spectra. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1307–1317.
- Irons J.R., Campbell G.S., Norman J.M., Graham D.W., Kovallick W.M., 1992: Prediction and measurement of soil bidirectional reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 2, 249–260.
- Norman J.M., Welles J.M., Walter E.A. 1985: Contrast among bidirectional reflectance of leaves, canopies, and soils. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1GE-23, 659–667.
- Pech R.P., Graetz R.R., Davis A.W. 1986: Reflectance modelling and the derivation of vegetation indices for an Australian semi-arid shrubland. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 389–403.
- Ranson K.J., Biehl L.L., Bauer M.E. 1985: Variation in spectral response of soybeans with respect to illumination, view and canopy geometry. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1827–1842.



Dr. hab. Jerzy Cierniewski, kierownik Zakładu Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb Instytutu Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, jest profesorem Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Jest absolwentem Wydziału Melioracji Wodnych Akademii Rolniczej w Poznaniu. Stopień doktora,

a potem doktora habilitowanego uzyskał na tej uczelni kolejno w 1979 i 1989 r. Od 1987 jest pracownikiem UAM. Jest autorem ponad 60 prac z zakresu gleboznawstwa i teledetekcji gleboznawczej, publikowanych między innymi w *Remote Sensing Reviews*, *Remote Sensing of Environment*, *International Journal of Remote Sensing*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* oraz *International Agrophysics*.



Dr inż. Jan Piekarczyk ur. w 1960 r. jest absolwentem Wydziału Rolniczego Akademii Rolniczej w Poznaniu. Pracując w Instytucie Ochrony Roślin w Poznaniu zajmował się opracowaniem charakterystyk spektralnych roślin uprawnych. Efektem tej pracy była rozprawa doktorska pt.: *Dwukierunkowa charakterystyka spektralna uprawy rzepaku w sezonie wegetacyjnym*. Od 1997 r. jest adiunktem na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w Zakładzie Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb, gdzie zajmuje się teledetekcją gleboznawczą i ekologią rolniczą.



Dr Adam Marlewski (ur. w 1950 r.) ukończył z wyróżnieniem studia matematyczne na UAM w 1973. W 1981 r. obronił pracę doktorską, za którą otrzymał nagrodę Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Od 1973 r. pracuje w Instytucie Matematyki Politechniki Poznańskiej. Jest autorem kilku książek na temat użytkowania mikrokomputerów oraz autorem lub współautorem ponad 60 artykułów, między innymi z teorii aproksymacji funkcji rzeczywistych, hydrodynamiki i elektrotechniki. Od kilku lat współpracuje z prof. Jerzym Cierniewskim w zakresie komputerowego modelowania postrzegania teledetekcyjnego.