

Jerzy CIERNIEWSKI

Wirtualne powierzchnie symulujące jasność gleb w zmieniających się warunkach ich oświetlenia i obserwacji

Virtual surfaces simulating soil brightness in their variable illumination and observation conditions

Virtual surfaces, used to predict the soil bidirectional reflectance in the optical domain are discussed in the paper on the background of their real equivalents and their directional reflectance characteristics. These surfaces are defined by the horizontal and vertical semiaxis of equal-sized opaque spheroids simulating their particles or aggregates. The spheroids are regularly dispersed, in a net of squares of the given side, on freely sloping plane being absorbed into the ground having their tops on the given height above the slope. The material of the vertical structure is additionally defined by its refractive index. The virtual surface described in this way determines a part of input data to the geometrical model which predicts the soil surface normalised reflectance NR , expressed as the ratio of the total radiance of the simulated surface viewed from the off-nadir direction to the radiance viewed from the nadir. The soil surface NR is calculated by the model along the solar principal plane SPP in the view zenith angle function, assuming the sensor, with the given field of view, is suspended over the surface in the given distance and this surface is illuminated by the solar beams coming at the solar zenith angle and the diffuse light defined by the ratio for the given wavelength. Assuming that the soil NR in the plane OP perpendicular

oriented to the SPP for each of the view zenith angle is 1, the model approximates the NR distribution along any planes, interpolating it linearly between the SPP and the OP planes.

Six virtual soil surfaces, simulating the rough soil surfaces developed from: the loamy sand with aggregates progressively broken into smaller fragments up to smoothing them, the dune sand on surfaces sloped at different angles and the couple made of the stones and the loamy clods, similar in the stones general shape and size, are presented here. The virtual surfaces of the dune sand is essentially different in size of its irregularities and their shape from the others. The flatten spheroids, insignificant absorbed in the slope plane and almost touch to each others, create that first one surface, while the other rough surfaces are described by the much more higher very vertically elongated spheroids being very deeply absorbed into the ground. The relatively flat NR curves with clear specular effects in the forwardscattering range produce the surface simulating the dune sand slopes. A quite different NR curves, with a the clear reflectance peak in the backscattering range and the minimum in the forwardscatter directions, generate the other rough surfaces.

Wstęp

Metody teledetekcji wykorzystuje się przede wszystkim do określenia granic między różnymi obiektami na powierzchni Ziemi, albo też do wnioskowania o ich właściwościach fizycznych, chemicznych czy biologicznych. W zakresie optycznym, informacje o tych obiektach i ich właściwościach są przenoszone za pomocą promieniowania elektromagnetycznego odbitego od ich powierzchni. Obiekty te są odpowiednio rozpoznawane i następnie oddzielane od innych, gdy odbite od nich promieniowanie jest różne od promieniowania obiektów sąsiednich. Promieniowanie to zmienia się w czasie i wraz z dłu-

gością fali. Jest ono także odpowiednio modyfikowane przez atmosferę. Przede wszystkim jednak zmienność promieniowania odbitego od rozważanych obiektów zależy od geometrii dwóch czynników, tj. kierunku oświetlenia ich powierzchni i kierunku ich obserwacji (*dwukierunkowego odbicia*). Ta zmienność jest wyraźnie większa dla powierzchni bardziej szorstkich.

Niniejsza praca koncentruje się na dwukierunkowym odbiciu od powierzchni gleb. Nie pokryte roślinnością gleby, tak jak większość naturalnych obiektów, wykazują zróżnicowanie odbicia w zależności od kierunku ich oświetlenia i widzenia z pułapu naziemnego, lotniczego, czy satelitarnego. Nieregularności powierzchni

gleby, wynikające z jej uziarnienia, obecności różnej wielkości agregatów i specyficznego mikroreliefu, powodują zacinienie pewnych fragmentów gleby, do których nie dociera bezpośrednie promieniowanie słoneczne. Poziom energii odbitej od zacienionych fragmentów gleby jest wielokrotnie mniejszy od poziomu energii odbitej od bezpośrednio oświetlonych jej fragmentów. Gleby uprawne, odbijające głównie w sposób dyfuzyjny padające na nie bezpośrednie promieniowanie, wydają się najjaśniejsze z kierunku, z którego widać najmniej zacienionych jej fragmentów. Takie gleby ujawniają zwykle maksymalne odbicie w kierunkach odsłonecznych, pod kątem zenitalnym zbliżonym do kąta zenitalnego Słońca, oraz minimalne odbicie w kierunku dosłonecznym, gdy obserwuje się je możliwie skośnie, prawie horyzontalnie. Powierzchnie piasków wydmyowych wykazują natomiast minimalne odbicie przy ich obserwacji w kierunku nadiru i maksymalne w kierunkach dosłonecznych, gdy sensor patrzy na nie możliwie skośnie.

Większość geometrycznych modeli opisujących dwukierunkowe odbicie od powierzchni gleb, uwzględniających wpływ geometrii powierzchni gleby, opiera się o założenie, że zacinienia powodowane przez nieregularności powierzchni gleb w mezoskali mają większy wpływ na kierunkowe odbicie spektralne niż sam charakter tego odbicia w mikroskali, zależny od proporcji między komponentem zwierciadlanym oraz dyfuzyjnym odbicia. Agregaty glebowe w modelu Normana i in. (1985) są opisywane za pomocą prostopadłościaków. Zmienność kształtu struktury symulującej powierzchnię gleby w modelu Coopera i Smitha (1985) określa funkcja cosinus. Modele autora (Cierniewski, 1987, 1989) oraz Ironsa i in. (1992) przedstawiają agregaty glebowe jako nieprzezroczyste kule jednakowej wielkości, równomiernie rozłożone na płaszczyźnie stoku glebowego. Kolejne modele autora, opracowane z Verbugghe i innymi (Cierniewski i in., 1996; Cierniewski i Verbugghe, 1997a) opisujące te agregaty jako elipsoidy o określonej proporcji ich półosi pionowej do poziomej, uwzględniają obok dyfuzyjnego komponentu w ich odbiciu także komponent zwierciadlany.

Nowy model, przedstawiający agregaty glebowe jako nieprzezroczyste elipsoidy wciśnięte w płaszczyznę stoku i równomiernie na nim rozłożone, uwzględniający też odpowiednio dokładniej wpływ obu wspomnianych komponentów w odbiciu spektralnym od powierzchni gleby, wykorzystano do wygenerowania wirtualnych powierzchni, symulujących dwukierunkowe odbicie od naturalnych powierzchni glebowych o różnej szorstkości, w zmieniających się warunkach ich oświetlenia i obserwacji. Model ten opracowano przy wykorzystaniu danych spektralnych zebranych w trakcie realizacji grantu KBN 6P04E 006 09 (Cierniewski i in., 1997). Celem niniejszej pracy jest omówienie relacji między rzeczywistymi powierzchniami glebowymi a ich wirtualnymi odpowiednikami, uzyskanymi poprzez odwrócenie działania wykorzystanego tu modelu. Prezentowane wyniki są kontynuacją wcześniejszych rozważań autora nad możliwością odwzorowania geometrii powierzchni gleby za

pośrednictwem danych spektralnych opisujących ich kierunkowe odbicie w zakresie optycznym poprzez odwrócenie działania modeli geometrycznych (Cierniewski i Verbugghe, 1997b; Cierniewski i Marlewski, 1998).

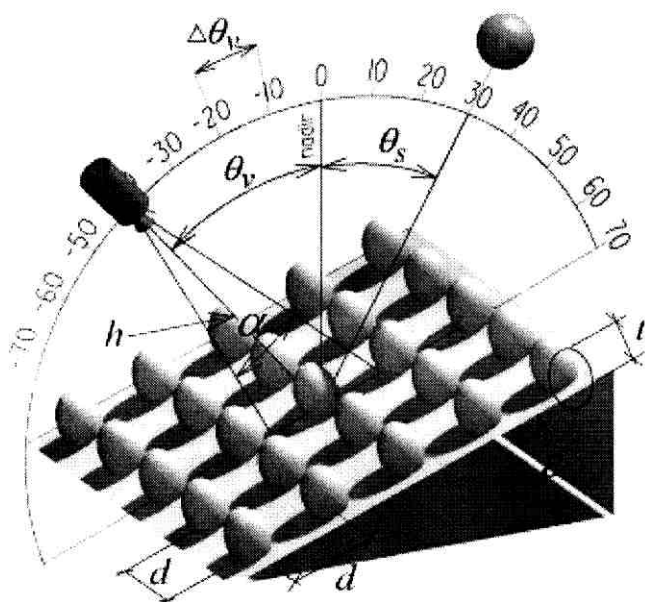
Przedstawione w niniejszej pracy przykłady wirtualnych powierzchni glebowych pozwalają głębiej rozumieć mechanizmy interakcji zachodzących pomiędzy falami elektromagnetycznymi a szorstką powierzchnią gleby, co jest również ważne w doskonaleniu metod teledetekcji, jak sam postęp technologiczny w pozyskiwaniu danych. Powierzchnie takie mogą być wykorzystane do uzupełnienia glebowych danych spektralnych, wykraczających poza możliwe warunki ich rejestracji. Prawdopodobnie w przyszłości powierzchnie te będą wykorzystane do odpowiedniej standardowej korekcji teledetekcyjnych danych glebowych zarejestrowanych w różnych warunkach oświetlenia i obserwacji. Taka korekcja obrazu gleby, dokonana jeszcze przed jej klasyfikacją, pozwoli na polepszenie wyników interpretacji pokrywy glebowej. Można przypuszczać, że korekcja ta będzie miała szczególnie istotne znaczenie dla interpretacji obrazów ze współczesnych satelitów teledetekcyjnych wyposażonych w sensory o szerokim polu widzenia, a także o wąskim polu widzenia, ale obserwujących powierzchnię Ziemi skośnie, jak skaner AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) satelitów serii NOAA, HRV (High Resolution Visible) satelitów SPOT, czy skanujących stożkowo, jak ATSR (Along-Track Scanning Radiometer) satelity ERS-1. Możliwość skośnej obserwacji tych samych powierzchni glebowych jednocześnie pod kilkoma różnymi kątami wzrosną, gdy wyniesione zostaną na orbitę nowe amerykańskie instrumenty teledetekcyjne, tworzące nowy Earth Observing System (EOS). Moderate Resolution Imaging Spectrometer-Tilt (MODIS-T) obserwować będzie powierzchnię Ziemi wzdłuż toru przelotu pod kilkoma kątami zenitalnymi w zakresie $\pm 50^\circ$. Multi-angle Imaging Spectro Radiometer (MISR) pozwoli na zarejestrowanie kilku obrazów tego samego fragmentu Ziemi przez sensor o różnym kącie widzenia $\pm 58^\circ$ (Barnsley, 1994).

Metody badań

Model

Model ustala rozkład wskaźnika energii odbitej od gleby w zakresie widzialnym oraz bliskiej i środkowej podczerwieni o szorstkości wynikającej z obecności równomiernie rozmieszczonych na jej powierzchni ziaren i agregatów glebowych różnego kształtu i wielkości. Rozkład ten obliczany jest wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej GPS, tj. płaszczyzny, którą wyznaczają promienie słoneczne oświetlające analizowaną powierzchnię. W płaszczyźnie tej zróżnicowanie odbitej energii jest największe. Zakładając, że w płaszczyźnie do niej prostopadłej PP to zróżnicowanie teoretycznie powinno być zbliżone do zera, model ten przybliży również rozkład odbicia spektralnego w dowolnej płaszczyźnie między GPS a PP, posługując się zasadami interpolacji

prostoliniowej. Szorstką powierzchnię glebową symulują nieprzezroczyste, równej wielkości elipsoidy obrotowe o półosi poziomej a i pionowej b , leżące na dowolnie nachylonej, pod kątem ε , płaszczyźnie (ryc. 1). Są one wciśnięte w tę płaszczyznę tak, że ich wierzchołki wy-



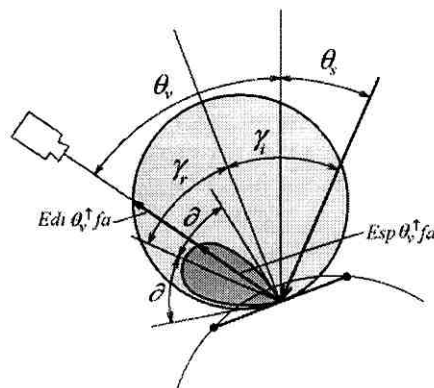
Ryc. 1. Schemat geometrii funkcjonowania modelu
Fig. 1. Schema of the model geometry representation

stają nad nią na wysokość t . Elipsoidy są rozłożone w siatkę kwadratów o boku d . Powyższa struktura geometryczna oświetlona jest bezpośrednio padającymi na nią promieniami słonecznymi, opisanymi kątem zenitalnym θ_s oraz światłem dyfuzyjnym nieba o wskaźniku energii f_{dt} , definiowanym jako ułamek energii bezpośrednio docierającego promieniowania słonecznego. Ponad strukturą symulującą powierzchnię gleby umieszczony jest sensor, obserwujący ją w płaszczyźnie GPS pod kątem zenitalnym θ_v , w odstępach co $\Delta\theta_v$, 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 się obserwowanych z danego kierunku fragmentów elipsoid i płaszczyzny stoku między nimi. Ilości energii docierającej do bezpośrednio oświetlonych fragmentów oblicza się za pomocą wskaźnika $E_{\theta_v, fa}^{\downarrow}$:

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

gdzie: β jest kątem nachylenia elementarnego fragmentu tej struktury, ϕ_r i ϕ_s są kątami azymutalnymi opisującymi odpowiednio położenie stoku glebowego i Słońca. Wskaźnik $E_{\theta_v, fa}^{\downarrow}$ wyraża cosinus kąta padania promieni γ względem normalnej do rozpatrywanego elementarnego fragmentu fa . Bezpośrednio padające promienio-

wanie 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



Ryc. 2. Rozkład energii odbitej w sposób zwierciadlany i dyfuzyjny 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

komponentu zwierciadlanego, traktowanego jako światło niespolaryzowane, wyliczana jest za pomocą równań Fresnela:

$$Esp_{\theta_v, fa}^{\uparrow} = E_{\theta_v, fa}^{\downarrow} \cdot Fp_{(\gamma)}$$

$$Fp_{(\gamma)} = \frac{r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2}{2}$$

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

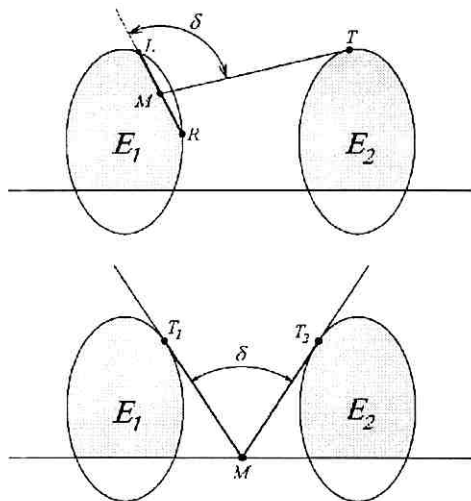
gdzie r_{\perp} i r_{\parallel} są odpowiednio prostopadłym i równoległym współczynnikiem odbicia Fresnela, a n jest współczynnikiem załamania światła o określonej długości. Wektor energii odbitej w sposób zwierciadlany $E_{\theta_v, fa}^{\uparrow}$ jest zorientowany w taki sposób, że kąt padania γ_i równa się kątowi odbicia γ_r . Efekty odbicia zwierciadlanego dostrzegane są przez sensor tylko w ograniczonym zakresie, definiowanym przez kąt 2δ wokół kierunku γ_r . Długość wektora $E_{\theta_v, fa}^{\uparrow}$ w odległości $\pm \delta$ od γ_r spada liniowo do zera. Długość wektora $E_{\theta_v, fa}^{\downarrow}$ uzupełnia dyfuzyjny komponent $E_{\theta_v, fa}^{\downarrow}$ definiowany jako:

$$E_{\theta_v, fa}^{\downarrow} = (1 - Fp_{(\gamma)}) \cdot E_{\theta_v, fa}^{\downarrow} \cdot \cos \theta_v \quad (3)$$

Ostatecznie całkowita energia $E_{\theta_v, fa}^{\uparrow}$ docierająca do sensora zorientowanego pod kątem θ_v , odbita od bezpośrednio oświetlonego elementarnego fragmentu fa symulowanej gleby, jest określona jako:

$$E_{\theta_v, fa}^{\uparrow} = \frac{E_{\theta_v, fa}^{\downarrow}}{\cos \theta_v} \quad (4)$$

Do fragmentów zarówno bezpośrednio oświetlonych promieniami, jak i zacienionych, dociera także światło dyfuzyjne nieba. Jego wartość jest redukowana poprzez



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 sides to the adjoining ellips

obecność sąsiednich elipsoid, ograniczających jego dopływ w stosunku do sytuacji, gdy dociera ono z całej półkuli przestrzeni trójwymiarowej (ryc. 3). W efekcie tego, od elementarnego odcinka rozpraszana zostaje dodatkowa porcja energii, opisana równaniem:

$$E_{sk\ fa}^{\downarrow} = f \cdot \frac{\delta}{180^\circ} \quad (5)$$

gdzie δ jest kątem płaskim 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:

$$L_{\theta_v\ pr}^{\uparrow} = \sum_{i=1}^j \left[\left(E i s_{\theta_v\ fa}^{\uparrow} + E s k_{fa}^{\uparrow} \right) \xi i_{fa} \right] + \sum_{i=1}^j \left(E s k_{fa}^{\uparrow} \cdot \xi s_{fa} \right) \quad (6)$$

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

$$L_{\theta_v\ FOV}^{\uparrow} = L_{\theta_v\ pr}^{\uparrow} \frac{a}{2m-1} + \sum_{i=2}^m L_{\theta_v\ pr}^{\uparrow} \frac{a}{m-0,5} + L_{\theta_v\ sm}^{\uparrow} \left(\frac{d}{2} - a \right) \quad (7)$$

gdzie m jest liczbą profili. 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 $NR_{(\phi_v = GPS, \theta_v)}$ w funkcji kąta azymutalnego f_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 ϕ_v jest względnym poziomym kątem określającym odległość kątową od GPS.

Powierzchnie glebowe

W niniejszym artykule omówiono sześć powierzchni glebowych wraz z ich wirtualnymi odpowiednikami, wybranych spośród 17 powierzchni analizowanych we wspomnianym wyżej granie (Cierniewski i in., 1997). Reprezentują one: 3 powierzchnie zbudowane z piasków gliniastych lekkich o stopniowo zmniejszającej się wielkości agregatów ($S1^\circ$, $S4^\circ$ i $S5^\circ$), 1 powierzchnię piasków luźnych wydmych (Sd) położonych na stokach o różnym nachyleniu ε oraz 2 powierzchnie zbudowane z niejednakowych materiałów — jedną pokrytą kamieniami (St), a drugą bryłami z gliny lekkiej (Lo) o podobnej wielkości i kształcie.

Wszystkie te powierzchnie były fotografowane z wysokości 150 cm na 60 mm panchromatycznym filmie, a ich obraz był skanowany z rozdzielczością 2000 dpi i poddawany następnie analizie za pomocą oprogramowania TNTMips. Ich materiał glebowy analizowano w laboratorium pod względem: uziarnienia metodą areometryczną Casagrande w modyfikacji Prószyńskiego, zawartości substancji organicznej poprzez straty żarzenia w temperaturze $460^\circ C$ (Lityński i in., 1976) i barwy posługując się tablicami Munsella.

Pomiary kierunkowego odbicia

Powierzchnie piasków wydmych były badane spektralnie w warunkach naturalnych, na wybrzeżu Bałtyku w pobliżu Łeby ($54,75^\circ N$, $17,39^\circ E$), natomiast pozostałe w kuwetach o wymiarze 190×60 cm i głębokości 2,5 cm w Poznaniu ($52,03^\circ N$, $16,94^\circ E$). Poddano je 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: 550 nm, 650 nm, 850 nm i 1650 nm. Luminancję wspomnianych powierzchni glebowych mierzono w głównej płaszczyźnie słonecznej z wysokości $h 200$ cm pod 15 różnymi kątami zenitalnymi θ_v od -70° , poprzez 0° , do $+70^\circ$ w odstępach co 10° przy kątach zenitalnych Słońca zestawionych w tabeli 1.

Tabela 1.

Wartości kąta zenitalnego Słońca θ_s , przy których dokonywano pomiarów luminancji powierzchni glebowych o nachyleniu stoku ε
Values of the solar zenith angle θ_s for which the luminance measurements for the soil surfaces sloped at the angle ε were collected

Data Date	SP	θ_s / ε (%)										
96.06.01	S1°	66,2/0	59,4/0	52,3/0	45,6/0	41,6/0	36,0/0	31,8/0	30,3/0			
96.06.05	S2°	70,6/0	53,3/0	43,1/0	38,0/0							
96.06.06	S2°	71,9/0	67,0/0	59,5/0	53,8/0	44,6/0	40,1/0	35,3/0	31,5/0	29,9/0	32,6/0	
96.06.07	S3°	38,1/0	45,5/0	55,8/0	64,1/0	70,4/0						
96.06.08	S4°	63,2/0	58,4/0	47,8/0	38,7/0	31,3/0						
96.06.11	S5°	60,4/0	56,4/0	48,1/0	44,6/0	39,9/0	35,1/0					
96.08.07	Sd	38,6/0	39,0/8	40,5/3	52,0/0	53,4/-7	57,3/-3					
96.08.09	Sd	45,0/-6	43,2/0	40,4/-10	39,6/0	39,1/-9	63,2/5	65,1/0	66,8/-3	69,5/6	71,6/0	74,2/12
96.08.10	Sd	71,9/7	63,7/-10	61,2/-7	51,6/-5							
96.08.21	St	71,6/0	66,6/0	61,6/0	56,3/0	51,6/0	46,0/0	41,8/0	40,9/0			
96.08.21	Lo	68,0/0	62,9/0	57,5/0	52,6/0	46,7/0	42,6/0	41,2/0				

SP — symbol powierzchni glebowej *soil surface symbol*

Ustalenie parametrów powierzchni wirtualnych

Znalezienie odpowiednich parametrów geometrycznych wirtualnych powierzchni glebowych, które przy wykorzystaniu wyżej omówionego modelu umożliwiałyby odpowiednio dokładne przewidywanie krzywych wskaźnika znormalizowanego odbicia NR analizowanych powierzchni glebowych w określonych warunkach oświetlenia, dokonano poprzez odwrócenie działania tego modelu. Podstawiając do modelu zmieniające się z określonym skokiem: wartości półosi pionowej b elipsoid symulujących nieregularności badanych powierzchni, odległości d między elipsoidami oraz wysokości t ich wierzchołków ponad płaszczyznę stoku glebowego, uzupełnione współczynnikiem załamania światła n i udziału światła dyfuzyjnego f_{di} dla danej długości fali, szukano takich ich wartości, które dawały najmniejsze wartości średniego błędu kwadratowego rms między danymi pomierzonymi a wygenerowanymi za pomocą modelu. Błąd ten obliczano według następującej formuły:

$$rms = \frac{1}{no - 1} \sqrt{\sum (P - M)^2} \quad (9)$$

gdzie no jest liczbą analizowanych par danych, a P i M są odpowiednio wygenerowanymi przez model i pomierzonymi wartościami NR . Wielkość półosi poziomej a elipsoid przyjęto jako wartość średnią agregatów (kamieni) pomierzoną z fotografii badanych powierzchni. Kąt nachylenia ε badanych stoków i inne parametry opisujące warunki oświetlenia i obserwacji analizowanych powierzchni były przyjmowane poprzez ich zmierzenie.

Omówienie wyników

Powierzchnie glebowe

Fotografie analizowanych powierzchni glebowych przedstawiono na rycinach 4 i 5, a ich materiał glebowy scharakteryzowano w tabeli 2. Powierzchnia kamieni (St), wykorzystanych do badań mających na celu ustalenie na ile sam materiał tworzący nieregularności

powierzchni wpływa na dwukierunkowe odbicie od powierzchni gleb, była wyraźnie gładzsza od brył z materiału gliniastego naśladujących ogólny kształt kamieni (ryc. 5). Powierzchnie z piasku wydmowego (Sd) (ryc. 5) reprezentowały inny rodzaj szorstkości niż powierzchnie piasku gliniastego lekkiego (S1°, S4° i S5°) (ryc. 4) i gliny lekkiej (Lo) (ryc. 5). Nieregularności powierzchni Sd wynikały tylko z ich gruboziarnistej tekstury. Czasami na tych powierzchniach dostrzec można było również riplemarki.

Tabela 2.

Właściwości materiału glebowego badanych powierzchni
Soil material features of studied soil surfaces

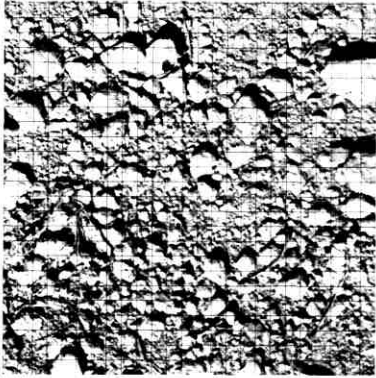
SP	Frakcje uziarnienia w % <i>Mechanical fractions in %</i>			OM (%)	Barwa na sucho <i>Dry colour</i>
	1-0,1 mm	0,1-0,02 mm	< 0,02 mm		
S	52,6	16,8	30,6	1,1	10YR6/4
Sd	97,1	2,9	0	0	10YR8/2
St	-	-	-	0	10YR6/2
Lo	49,7	17,2	33,1	1,8	10YR5/4

SP — symbol powierzchni glebowej *soil surface symbol*,
 OM — zawartość materii organicznej *organic matter content*

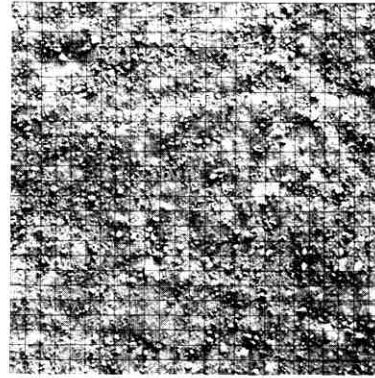
Mierzone krzywe odbicia

Rozkład wskaźnika znormalizowanego odbicia NR od badanych powierzchni w funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_v dla pięciu mierzonych kanałów wykazuje bardzo niewielkie zróżnicowanie. To zróżnicowanie obserwuje się tylko dla kierunków odśrodkowych wokół kątów zenitalnych obserwacji, dla których luminancjometr „widzi” cień rzucany przez siebie na badaną powierzchnię, a także dla kierunków dosłonecznych, w których ujawniają się efekty odbicia zwierciadlanego. Zatem, choć mierzone krzywe wskaźnika NR analizowanych powierzchni i odpowiadające im krzywe generowane za pomocą omówionego modelu odnoszą się na ryc. 6 tylko do jednego wybranego kanału, 650 nm, to charakteryzują one też w bardzo podobny sposób pozostałe kanały.

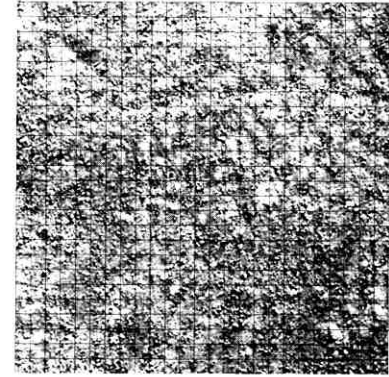
S1°



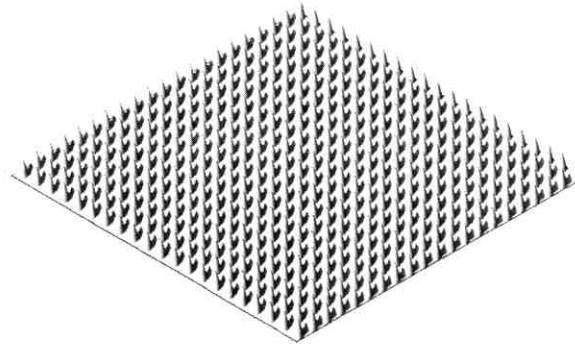
S4°



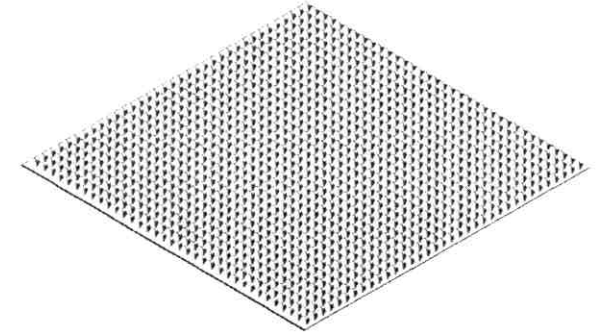
S5°



$a = 2,1 \text{ cm}; b = 15,0 \text{ cm};$
 $t = 4,0; d = 4,2 \text{ cm}$



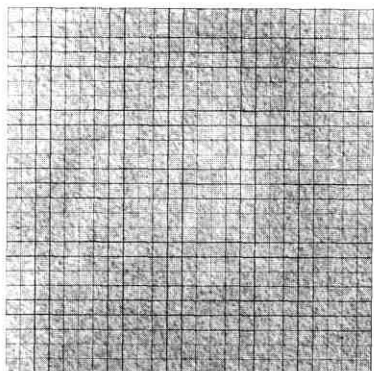
$a = 0,6 \text{ cm}; b = 4,9 \text{ cm};$
 $t = 1,3; d = 1,2 \text{ cm}$



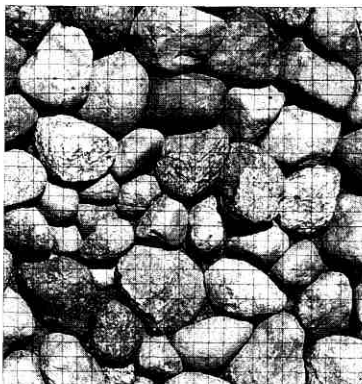
$a = 0,4 \text{ cm}; b = 16,0 \text{ cm};$
 $t = 4,0; d = 4,5 \text{ cm}$

Ryc. 4. Fotografie powierzchni piasku gliniastego lekkiego (S) o szorstkości 1°, 4° i 5° i ich wirtualne odpowiedniki
 Fig. 4. Photographs of the loamy sand surface (S) of roughness 1°, 4° and 5° and their virtual equivalents

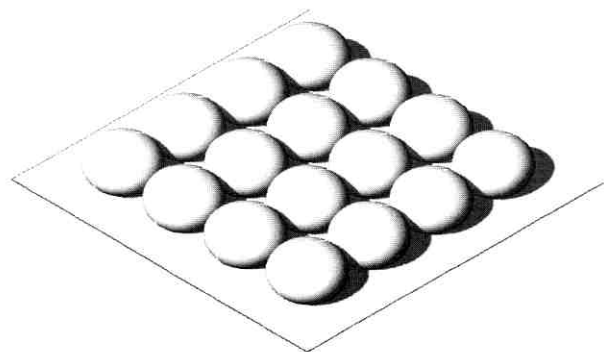
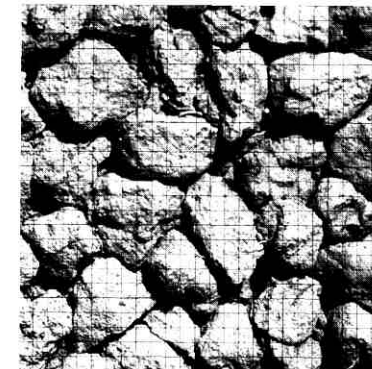
Sd



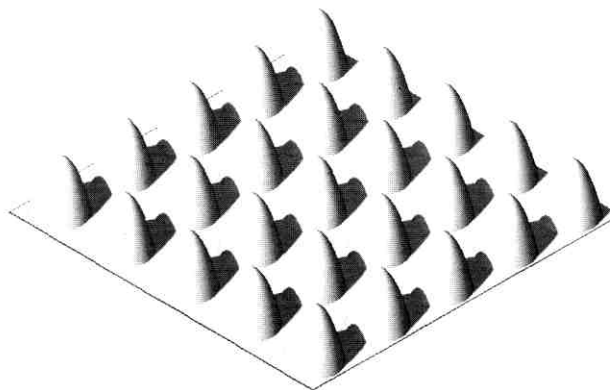
St



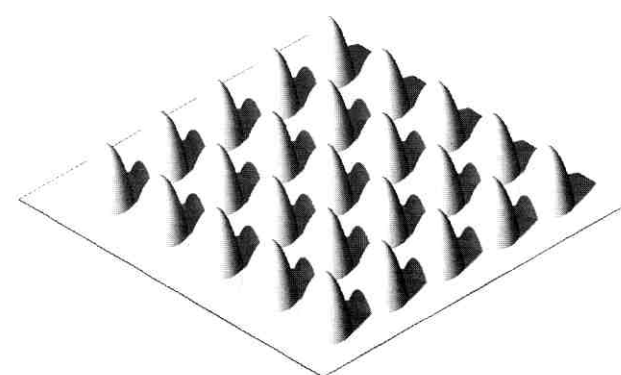
Lo



$a = 0,025$ cm; $b = 0,018$ cm;
 $t = 0,031$; $d = 0,052$ cm



$a = 3,0$ cm; $b = 18,0$ cm;
 $t = 4,0$; $d = 5,2$ cm



$a = 0,4$ cm; $b = 16,0$ cm;
 $t = 4,0$; $d = 4,5$ cm

Ryc. 5. Fotografie powierzchni pokrytych kamieniami (St) i bryłami z gliny lekkiej (Lo) o podobnej wielkości i kształcie oraz piaskiem luźnym wydymowym (Sd) i ich wirtualne odpowiedniki
 Fig. 5. Photographs of the stony (St) and the sandy loam (Lo) surfaces of similar clods considering their shape and size and their virtual equivalents

Generalnie, im mniejsze agregaty powierzchni zbudowanej z piasków gliniastych lekkich (S), które na ogół są bardziej jednorodne co do ich wielkości i kształtu (tab. 1), tym mniejsze zróżnicowanie wskaźnika NR w funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_v . Krzywe NR tych powierzchni, ujawniające wyraźny pik w kierunkach odsłonecznych, stają się bardziej płaskie, gdy maleje wielkość agregatów. Obserwuje się to szczególnie w zakresie dosłonecznym.

Zupełnie innym kształtem charakteryzują się krzywe wskaźnika znormalizowanego odbicia NR piasku wydymowego (Sd). W porównaniu z wyżej omówionymi krzywymi, są one od nich zdecydowanie bardziej płaskie, z minimum równym 1 blisko kąta zenitalnego obserwacji $\theta_v = 0^\circ$. Oznacza to, że powierzchnie piasków wydymowych wydają się najciemniejsze, jeśli są obserwowane w kierunku nadiru. Są one jaśniejsze, gdy obserwowane są zarówno z kierunków odsłonecznych, jak i dosłonecznych. Staje się to tym wyraźniejsze, im pod większym kątem zenitalnym Słońca θ_s są one oświetlone. Ich rozjaśnienie z kierunków dosłonecznych jest także efektem odbicia promieni słonecznych w sposób zwierciadlany. Krzywe NR piasków wydymowych na ryc. 6 zaprezentowano tak, aby odpowiednio łatwo można było prześledzić wpływ kąta nachylenia stoków ϵ na ich kształt. Wybrane krzywe odpowiadają podobnym pozycjom Słońca. Zostały one zarejestrowane przy kącie zenitalnym Słońca θ_s w zakresach od 39° do $40,5^\circ$ oraz od $63,7^\circ$ do $66,8^\circ$. Na ich przykładzie można dostrzec ten wpływ wyraźnie. Jeśli piaski te pokrywają stoki o ekspozycji dosłonecznej i odsłonecznej, oba nachylone pod kątem ϵ , to zachowują się one spektralnie tak, jak gdyby były usytuowane poziomo, ale oświetlone odpowiednio pod mniejszym kątem zenitalnym Słońca $\theta_s - \epsilon$ lub większym $\theta_s + \epsilon$.

Krzywe NR charakteryzujące odbicie od powierzchni o bardzo podobnej geometrii, w tym wypadku od powierzchni pokrytych kamieniami (St) oraz podobnymi w kształcie i wielkości bryłami gliniastymi (Lo), wykazują w tych samych warunkach oświetlenia tylko nieznaczne różnice między sobą (ryc. 6). Krzywe opisujące powierzchnie kamieniste są trochę bardziej płaskie, wykazując mniejszą zmienność wskaźnika znormalizowanego odbicia NR zarówno w zakresie dosłonecznym, jak i odsłonecznym. W zakresie dosłonecznym krzywe St mieszczą się w przedziale 0,8–1, natomiast krzywe Lo w przedziale szerszym, 0,6–1. W zakresie odsłonecznym zróżnicowanie między krzywymi analizowanych tu powierzchni zwiększa się wraz ze wzrostem kąta zenitalnego Słońca θ_s . Dla θ_s mniejszego od 60° wskaźnik znormalizowanego odbicia NR wokół piku odbicia dla powierzchni kamienistych jest mniejszy o około 0,2–0,3 w stosunku do powierzchni pokrytych bryłami z materiału gliniastego.

Poprawność dopasowania powierzchni wirtualnych

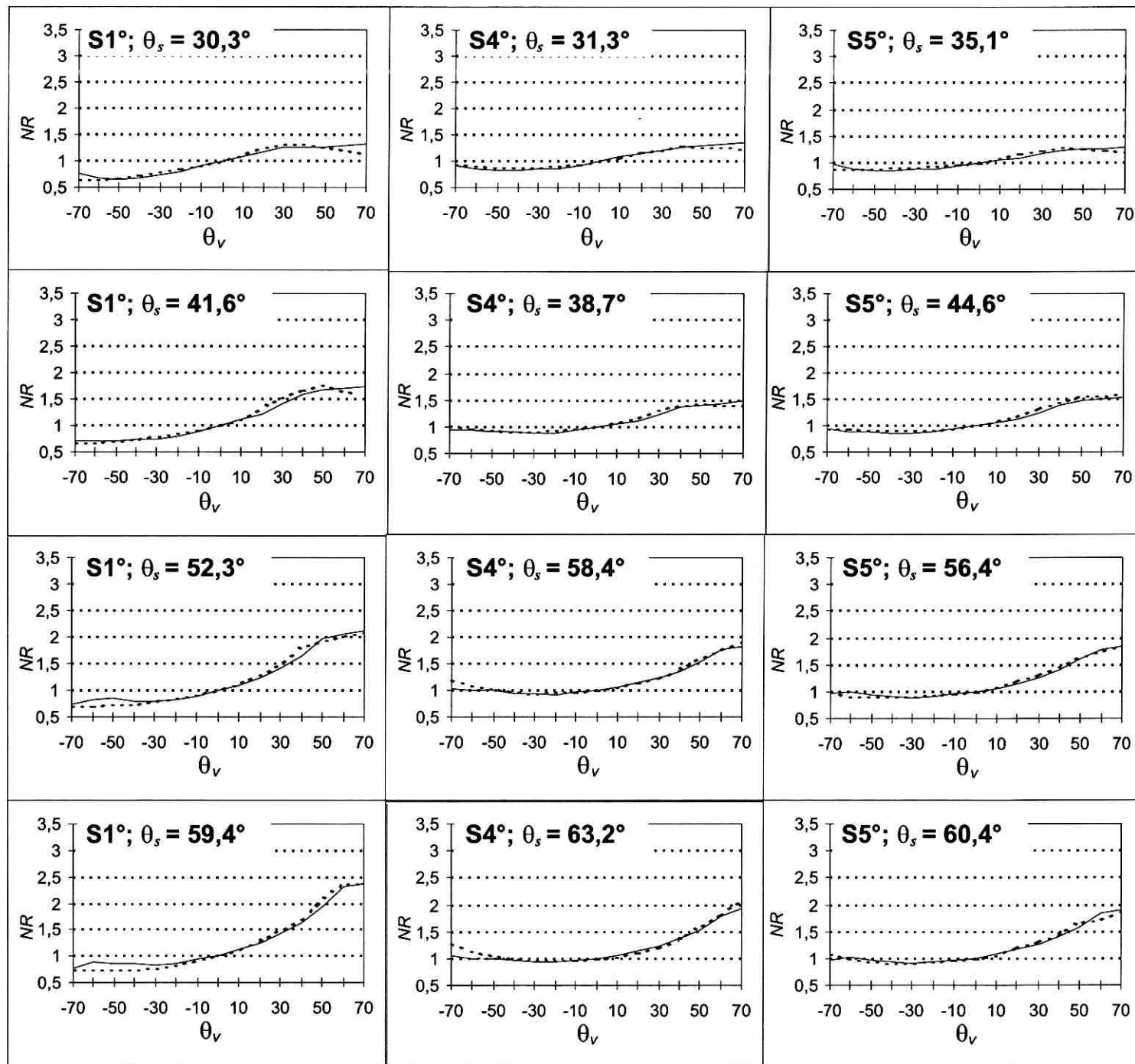
Poprawność dopasowania parametrów b , d , t oraz n i f_{di} oszacowano metodą analizy regresji liniowej danych

wyrażających wartości wskaźnika znormalizowanego odbicia NR , mierzonych przez luminancjometr CIMEL i generowanych przez wyżej omówiony model. W analizie tej uwzględniono dane z 74 krzywych NR , zawierających od 13 do 15 wartości NR , eliminując z obliczeń średniego błędu kwadratowego rms oraz współczynnika determinacji r^2 te pary danych NR , dla których luminancjometr mierząc odbicie od powierzchni gleby miał w swoim polu widzenia również fragmenty gleby przez siebie zacienione. Powyższe parametry statystyczne obliczono oddzielnie dla każdego z pięciu kanałów użytego luminancjometru (tab. 4). Średnie wartości błędu rms NR badanych powierzchni, obliczanego niezależnie od warunków ich oświetlenia wskazują, że poprawność funkcjonowania modelu jest podobna dla wszystkich wykorzystywanych tu długości fali. Wyraża się ona wąskim przedziałem rms , wynoszącym 0,017–0,020. Użycie bardziej złożonego parametru statystycznego, r^2 , pozwoliło stwierdzić, że poprawność przewidywania krzywych NR za pomocą modelu dla powierzchni piasku wydymowego (Sd) położonych na stokach o różnym nachyleniu, czasami pokrytych też riplemarkami, wynosi około 85%, natomiast dla pozostałych omawianych tu powierzchni, badanych tylko w położeniu poziomym, jest większa i wynosi od 93% do 98%.

Powierzchnie wirtualne

Dopasowując odpowiednie parametry geometryczne do powierzchni wirtualnych badanych gleb przyjęto, że: wektor energii odbitej w sposób zwierciadlany widoczny będzie przez sensor w zakresie $\pm 60^\circ$, obliczenia odbicia dokonywane będą wzdłuż pięciu przekrojów pr , dzieląc każdy krzywoliniowy fragment symulowanej struktury gleby na 3 elementarne prostoliniowe odcinki, a współczynniki załamania światła n i udziału światła dyfuzyjnego f_{di} dla danej długości fali będą ustalane z dokładnością do 0,05. Wyniki tego dopasowania przedstawiono na rycinach 4 i 5. Wszystkie te wirtualne powierzchnie, poza powierzchnią wyobrażającą piaski wydymowe (Sd), odpowiadają arealowi 25×25 cm. Powierzchnia Sd, powiększona tu 100-krotnie, przedstawia w rzeczywistości kwadrat o boku $0,25 \times 0,25$ cm.

Powierzchnia wirtualna piasku wydymowego różni się wyraźnie od pozostałych prezentowanych tu powierzchni. W rzeczywistości zbudowana jest z zaokrąglonych bardzo jasnych ziaren kwarcowych prawie jednakowej wielkości. Jako obiekt wirtualny tworzy tę powierzchnię materiał o współczynniku załamania światła $n = 1,90$ dla fal w przedziale 550–850 nm. Stanowi on spłaszczone elipsoidy o stosunku półosi pionowej do poziomej $b/a = 0,7$, leżące bardzo blisko siebie, prawie dotykając się nawzajem, w odległości względnej $d/a = 2,1$. Elipsoidy te są tylko nieznacznie wciśnięte w płaszczyznę stoku o $t/a = 1,2$ (tab. 3). Pozostałe powierzchnie są w rzeczywistości ciemniejsze, o znacznie większych elementach powodujących ich szorstkość, nieregularnych co do kształtu i rozmiaru. Wirtualnie natomiast opisane są one za pomocą bardzo mocno



Ryc. 6. Zależność pomiędzy znormalizowanym wskaźnikiem odbicia analizowanych powierzchni glebowych wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej dla fali czerwonej o długości 650 nm, ustalonym za pomocą modelu (linia ciągła) i zmierzonym (linia przerywana) dla wybranych wartości kąta zenitalnego Słońca θ_s .

Fig. 6. Relation between the normalised reflectance NR of the analysed soil surfaces along the solar principal plane for the channel of 650 nm predicted by the model (solid line) and the measured (dashed line) for selected solar zenith angles θ_s .

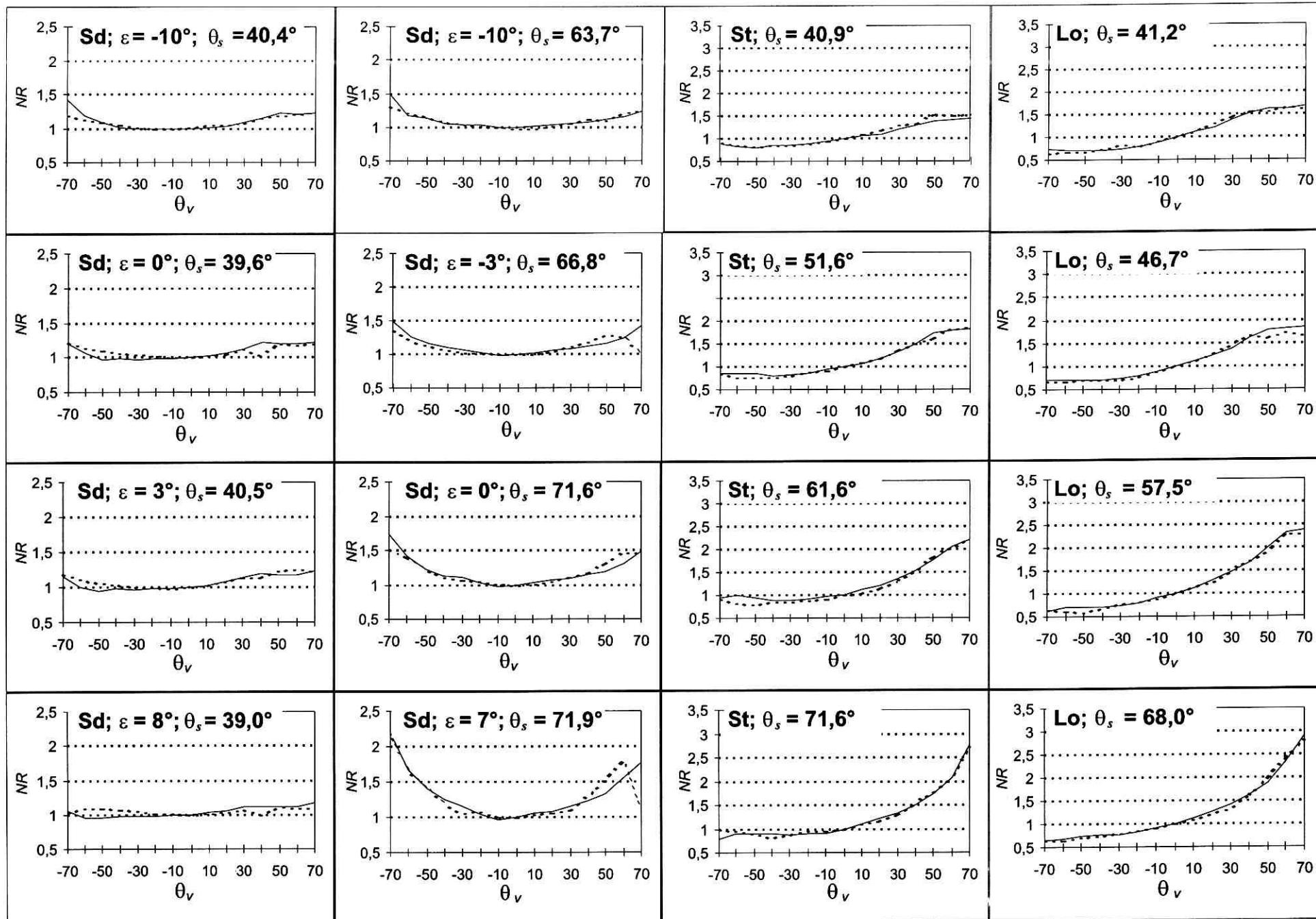


Tabela 3.

Charakterystyka wirtualnych powierzchni glebowych
Characteristic of the virtual soil surfaces

SP	n			a (cm)	b/a	d/a	t/a	s/a
	450 nm	550–850	1650 nm					
S1°	2,90	2,85	2,80	2,1	7,1	2,0	1,9	0,6
S2°	2,80	2,75	2,70	1,8	6,9	2,0	1,9	0,6
S3°	3,10	3,05	3,00	1,1	10,0	3,1	2,9	1,7
S4°	3,10	3,05	3,00	0,6	8,2	2,0	2,2	0,6
S5°	3,10	3,05	3,05	0,4	5,5	1,7	1,5	0,4
Sd	1,95	1,90	1,85	0,025	0,7	2,1	1,2	0,7
Lo	2,25	2,20	2,15	3,0	6,1	1,7	1,5	0,4
St	2,90	2,85	2,80	2,6	6,0	1,7	1,3	0,5

SP — symbol powierzchni glebowej soil surface symbol,

a — przeciętny poziomy promień agregatów glebowych i symulujących je elipsoid powierzchni wirtualnych
mean horizontal radius of soil aggregates and simulating them spheroids of the virtual surfaces,

b — pionowy promień elipsoid vertical radius of the spheroids,

d — odległość między elipsoidami distance between the spheroids,

t — wysokość wierzchołków elipsoid ponad płaszczyznę stoku
height of the spheroid tops above the slope plane,

$s = 2 \left(\frac{d}{2} - a \sqrt{\frac{t}{b} \left(2 - \frac{t}{b} \right)} \right)$ — wielkość przestrzeni między elipsoidami w płaszczyźnie stoku space between the spheroids in slope plane.

pionowo wydłużonych elipsoid o stosunku b/a w zakresie od 5,5 do 10, bardzo głęboko wciśniętych w płaszczyznę stoku, co określa ich stosunek t/a pomiędzy 1,3 a 2,9, leżących we względnie niewielkich odległościach od siebie $s/a = 0,03-0,6$, gdzie s stanowi przestrzeń wolną między elipsoidami na poziomie symulowanego stoku. Poziomy wymiar elipsoid w płaszczyźnie stoku jest bardzo podobny do wymiaru pionowego fragmentów elipsoid wystających ponad stok. Dla wszystkich wirtualnych powierzchni najwyższą wartość n dopasowano do kanału o długości fali 450 nm, a najmniejszą do kanału o najdłuższej fali 1650 nm (tab. 3). Ustalono, że powierzchnie z piasku gliniastego lekkiego (S) tworzy materiał o współczynniku n dla długości fali od 550 nm do 850 nm w granicach od 2,75 do 3,05, a z gliny lekkiej (Lo) i kamieni (St) o wielkości n odpowiednio 2,20 i 2,85. Zauważono również, że wyższe wartości wskaźnika udziału światła dyfuzyjnego f_{di} , wynoszące dla fal o długości od 450 nm do 850 nm i 1650 nm odpowiednio 0,15 i 0,20, dopasowano dla danych mierzonych w sytuacji, gdy słabo widoczne chmury *cirrus* przykrywały tarczę Słońca.

Porównując geometrię wirtualnych powierzchni z kształtem generowanych za ich pośrednictwem krzywych wskaźnika znormalizowanego odbicia NR, dostrzec można między nimi następujące zależności. Płaskie elipsoidy, symulujące powierzchnie piasku wdmowego (Sd), nieznacznie wciśnięte w płaszczyznę stoku, prawie wzajemnie dotykające się, tworzą względnie gładką strukturę geometryczną. Generuje ona wzdłuż głównej płaszczyzny słonecznej względnie płaskie krzywe wskaźnika znormalizowanego odbicia, wykazujące niewielką zmienność wskaźnika NR oraz niewyraźny pik w zakresie odsłonecznym. Krzywe te,

szczególnie przy dużych kątach zenitalnych Słońca θ_s , wykazują też pik w zakresie dosłonecznym, ujawniając efekty odbicia zwierciadlanego. Prawie poziomo usytuowane fragmenty powierzchni wirtualnej są niezbędne do wygenerowania tych efektów. Taką rolę pełnią względnie płaskie wierzchołki spłaszczonych elipsoid powierzchni Sd.

Wyraźnie bardziej strome w swoim przebiegu są krzywe NR, opisujące szorstkie powierzchnie glebowe wytworzone z piasku gliniastego S1° oraz gliny lekkiej Lo i kamieni St. Większe zróżnicowanie wskaźnika NR tych krzywych i znacznie wyraźniejszy ich pik w zakresie odsłonecznym są przede wszystkim efektem dużego wydłużenia elipsoid w pionie b/a , względnie dużej wysokości wystających fragmentów elipsoid ponad płaszczyznę stoku t/a oraz niewielkich przestrzeni między elipsoidami w płaszczyźnie stoku glebowego s/a (tab. 3). Znaczne pionowe wydłużenie elipsoid, jak w poprzedniej pracy autora (Cierniewski i in., 1996) zastępuje bardziej skomplikowaną niejednorodną geometrię powierzchni glebowych pokrytych agregatami o zróżnicowanym kształcie i wielkości.

Wyniki eksperymentu z udziałem powierzchni pokrytych kamieniami (St) i bryłami z gliny lekkiej (Lo) o podobnym do kamieni kształcie i wielkości, mającego sprecyzować wpływ cech samego materiału glebowego na charakter dwukierunkowego odbicia, pozwalają przypuszczać, że zróżnicowanie kształtu krzywych NR w znacznie mniejszym stopniu niż ogólny kształt powierzchni może być tłumaczone odmiennością współczynnika załamania światła n badanych powierzchni. Powierzchnię z kamieni charakteryzuje bowiem wyższy współczynnik n równy 2,85 dla fal w przedziale 550–850 nm, niż dla powierzchni uformowanej z materiału gliniastego o współczynniku n wynoszącym 2,20 dla tego samego przedziału długości fal.

Duża dokładność działania omówionego modelu, wyrażona niskimi wartościami błędów rms i wysokimi wartościami współczynnika determinacji r^2 (prezentowanymi w tabeli 4), pozwala potraktować go także jako narzędzie do ilościowej analizy wpływu parametrów geometrii wirtualnych powierzchni glebowych na generowane przez nie krzywe rozkładu wskaźnika znormalizowanego NR. W ten sposób przeanalizowano wpływ następujących ich parametrów geometrycznych na kształt krzywych NR:

a) względnego wydłużenia elipsoid b/a i jednocześnie wysokości ich wierzchołków t/a ponad płaszczyznę stoku w sytuacji, gdy elipsoidy te stykają się ze sobą w tej płaszczyźnie, oraz

b) względnej odległości między elipsoidami d/a .

Jako przykład wybrano powierzchnię o współczynniku załamania światła $n = 2,95$. Analizowano krzywe NR odnoszące się do trzech istotnie różnych warunków ich oświetlenia, wyrażonych kątami zenitalnymi Słońca θ_s 30°, 50° i 70° i stałym dla tych trzech kątów wskaźnikiem udziału światła dyfuzyjnego f_{di} wynoszącym 0,1. Krzywe te generowano w głównej płaszczyźnie słonecznej, w której zmienność NR w funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_v jest największa (ryc. 7).

Tabela 4.

Współczynnik determinacji r^2 i średni błąd kwadratowy rms znormalizowanego odbicia analizowanych powierzchni glebowych o określonej szorstkości, mierzonego i ustalonego za pomocą modelu

Coefficient of determination r^2 and root mean square error rms for measured and model-predicted normalised reflectance of analysed soil surfaces at given roughness

SP	no	450 nm		550 nm		650 nm		850 nm		1650 nm		średnia z mean from 450-1650 nm	
		r^2	rms	r^2	rms	r^2	rms	r^2	rms	r^2	rms	r^2	rms
S1°	108	0,974	0,020	0,975	0,020	0,973	0,021	0,975	0,020	0,972	0,019	0,974	0,020
S2°	194	0,955	0,022	0,965	0,021	0,961	0,022	0,962	0,021	0,947	0,023	0,958	0,022
S3°	70	0,938	0,023	0,937	0,017	0,951	0,014	0,953	0,013	0,911	0,015	0,938	0,016
S4°	70	0,917	0,021	0,932	0,019	0,946	0,016	0,939	0,017	0,937	0,020	0,934	0,019
S5°	84	0,950	0,019	0,964	0,017	0,971	0,015	0,955	0,013	0,953	0,015	0,956	0,016
Sd	295	0,817	0,021	0,851	0,020	0,853	0,019	0,851	0,018	0,851	0,019	0,845	0,016
Lo	98	0,983	0,020	0,985	0,022	0,984	0,016	0,973	0,015	0,978	0,016	0,981	0,018
St	113	0,977	0,018	0,981	0,021	0,977	0,016	0,969	0,015	0,972	0,016	0,975	0,017
średnia mean	—	0,939	0,020	0,949	0,020	0,952	0,017	0,947	0,017	0,940	0,018	0,945	0,018

SP — symbol powierzchni glebowej soil surface symbol,

no — liczba analizowanych par danych number of analysed pairs of data ($\Sigma no = 1032$).

Przeanalizowano krzywe odnoszące się do 10 powierzchni o wydłużeniu pionowym elipsoid b/a od 1 do 10 oraz wysokości ich wierzchołków ponad płaszczyznę stoku t/a od 0,5 do 5 (ryc. 7a). Wpływ obu tych parametrów w funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_v wzrasta wraz z kątem zenitalnym Słońca θ_s i jest znacznie wyraźniejszy w zakresie odsłonecznym. O ile dla $\theta_s = 30^\circ$ powierzchnia o najmniejszym tu analizowanym wydłużeniu elipsoid, wyrażonym parametrami $b/a = 1$ i $t/a = 0,5$ (kule w 1/4 swej wysokości wystające ponad płaszczyznę stoku), przyjmuje w tym zakresie obserwacji maksimum NR na poziomie 0,9, o tyle dla powierzchni o największym tu rozpatrywanym wydłużeniu elipsoid, $b/a = 10$ i $t/a = 5$ (znacznie wydłużone elipsoidy, też w 1/4 swej wysokości wystające ponad płaszczyznę stoku), maksimum to osiąga już wartość 2. Odpowiednio te same powierzchnie o najmniejszym i największym wydłużeniu elipsoid w identycznych warunkach obserwacji przy $\theta_s = 50^\circ$ charakteryzują się maksimum NR na poziomie 1,0 i 3,2, a przy $\theta_s = 70^\circ$ maksimum NR na poziomie 1,3 i 4,0. Jak z omawianych tu przykładów wirtualnych powierzchni glebowych wynika, głębokie wciśnięcie elipsoid w płaszczyznę stoku, przy niewielkim ich pionowym wydłużeniu $b/a \leq 2$ daje możliwość wygenerowania krzywych NR wykazujących także wyraźne efekty odbicia zwierciadlanego.

Efektów tych w wystarczający sposób nie można uzyskać zwiększając tylko względną odległość między elipsoidami d/a . Dowodzą tego chociażby przykłady krzywych NR odnoszących się do 10 powierzchni glebowych o wzrastającej systematycznie o 0,25 wartości d/a w przedziale od 1,75 do 4 (ryc. 7b). Pierwsza wartość tego parametru, $d/a = 1,75$, opisuje powierzchnię, której elipsoidy o względnym wydłużeniu $b/a = 5,8$ i względnej wysokości ich wierzchołków ponad płaszczyznę stoku $t/a = 2$ prawie dotykają się wzajemnie, a druga wartość, $d/a = 4$, powierzchnię z identycznymi elipsoidami, ale tak odległymi od siebie, że przestrzeń

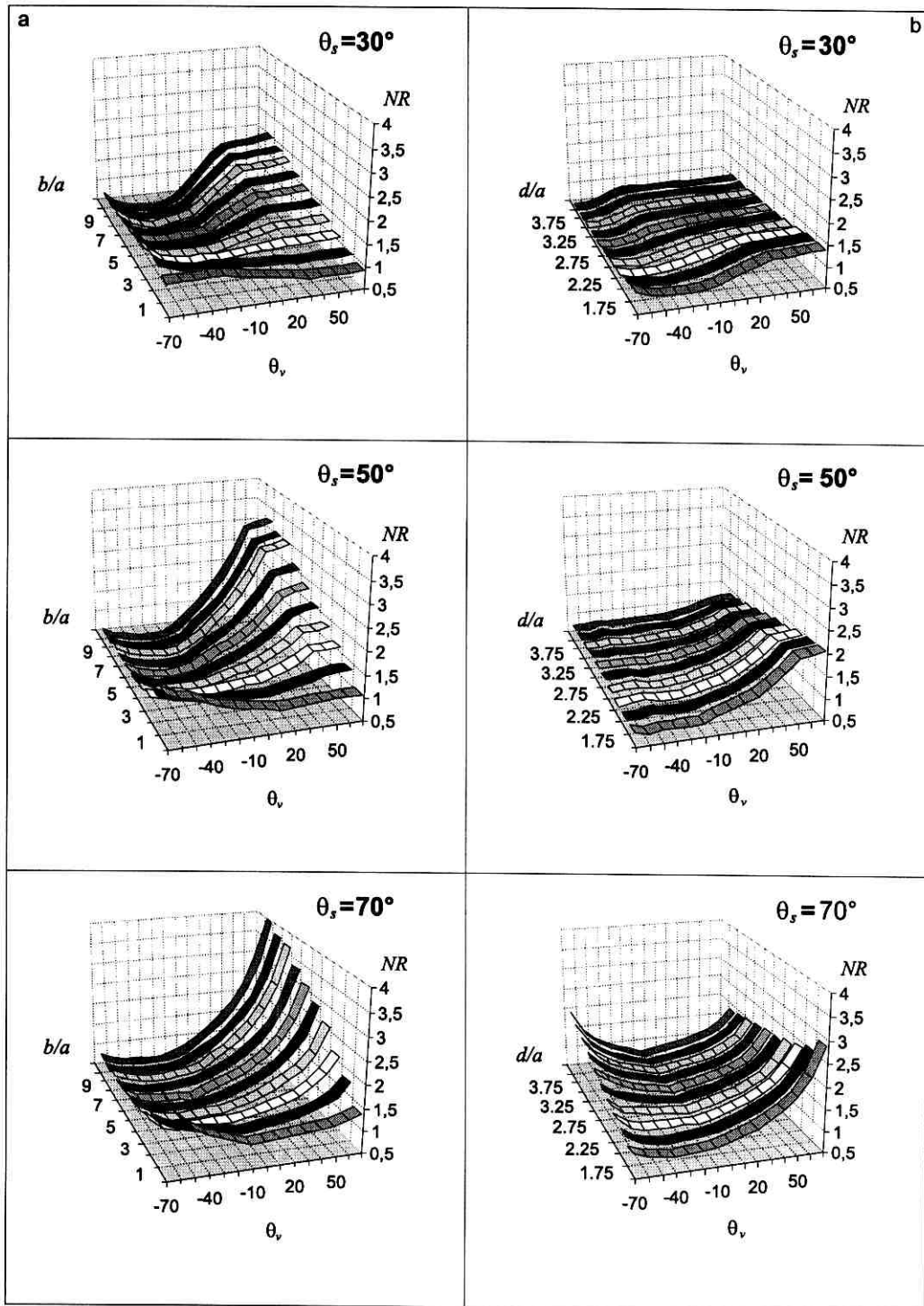
między nimi w płaszczyźnie stoku s/a wynosi 2,5. Wygenerowane krzywe ujawniają efekty odbicia zwierciadlanego tylko przy kącie zenitalnym Słońca θ_s zbliżonym do 70° , gdy względna odległość d/a między tymi elipsoidami przekracza wartość 2,25. Tak więc przy niezbyt dużych kątach θ_s samo powiększenie odległości między elipsoidami przede wszystkim spłaszcza kształt krzywych NR w zakresie odsłonecznym, tym słabiej, im pod mniejszym kątem θ_s dana powierzchnia jest oświetlona.

Wnioski

Wyniki przedstawionych tu badań, zarówno stanowiących efekt bezpośrednich pomiarów kierunkowego odbicia światła widzialnego, bliskiej i środkowej podczerwieni od powierzchni glebowych o różnej szorstkości, jak i tych generowanych za pośrednictwem omówionego modelu, dowodzą, że dwukierunkowe odbicie od gleby zależy w dużym stopniu od geometrii jej powierzchni, usytuowania rozpatrywanej powierzchni względem Słońca i obserwującego ją sensora, jak też warunków atmosferycznych.

Wyniki bezpośrednich pomiarów kierunkowego odbicia od wybranych powierzchni glebowych, wyrażone za pomocą krzywych przedstawiających rozkład wskaźnika ich znormalizowanego odbicia NR (definiowanego jako stosunek ich luminancji mierzonej z danego kierunku do luminancji mierzonej w kierunku nadiru) w funkcji kąta zenitalnego obserwacji θ_v wskazują, że kształt tych krzywych zależy przede wszystkim od uziarnienia, wielkości i kształtu agregatów budujących te powierzchnie.

Omówiony w niniejszej pracy model, za pośrednictwem zespołu parametrów opisujących geometrię powierzchni gleby oraz wielkości charakteryzujących odbicie od niej światła w zakresie optycznym, tworzącego wirtualny odpowiednik jakiejś rzeczywistej po-



Ryc. 7. Krzywe wskaźnika znormalizowanego odbicia wirtualnych powierzchni glebowych o: (a) zmieniającym się wydłużeniu elipsoid b/a i jednocześnie wysokości ich wierzchołków t/a ponad płaszczyznę stoku w sytuacji, gdy elipsoidy te stykają się ze sobą w tej płaszczyźnie, a także (b) zmieniającej się odległości między elipsoidami d/a

Fig. 7. Normalised reflectance curves of virtual soil surfaces with: (a) the varied elongation of the spheroid vertical radius b/a and the height of the spheroid tops t/a above the slope plane in the situation when they touch to each others in this plane, and also with (b) the varied distance between the spheroids d/a

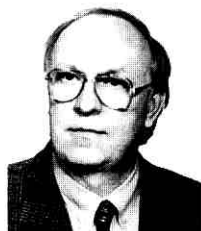
wierzchni glebowej, umożliwia z zadowalającą poprawnością, 85–98%, przewidzieć rozkład kierunkowego od niej odbicia, mierzonego wskaźnikiem NR , w funkcji kąta zenitalnego θ_v i azymutalnego ν obserwacji przy danym kącie zenitalnym θ_s i azymutalnym ϕ_s Słońca i wskaźniku udziału światła dyfuzyjnego f_{di} w jej oświetleniu. Wirtualną powierzchnię glebową opisuje półoś pozioma a i pionowa b elipsoid, symulujących

ziarna lub agregaty glebowe leżące na dowolnie nachylonej, pod kątem ϵ , płaszczyźnie stoku. Elipsoidy te, rozłożone w siatce kwadratów o boku d , są wciśnięte w tę płaszczyznę tak, że ich wierzchołki wystają ponad nią na wysokość t . Materiał, z którego zbudowana jest ta struktura wirtualna jest określany za pomocą współczynnika załamania światła n właściwego dla określonej długości fali.

Ustalono, że odpowiednią powierzchnię wirtualną dla względnie gładkich powierzchni glebowych, reprezentowanych przez piaski luźne wydmowe, zbudowane z prawie równej wielkości bardzo jasnych zaokrąglonych ziaren kwarcowych, tworzą spłaszczone elipsoidy, prawie stykające się wzajemnie i nieznacznie wciśnięte w płaszczyznę stoku, o współczynniku załamania światła $n = 1,90$ dla fal w przedziale 550–850 nm. Prawie poziomo usytuowane fragmenty tej powierzchni, głównie względnie płaskie wierzchołki spłaszczonych tu elipsoid, są niezbędne do wygenerowania efektów odbicia zwierciadlanego symulowanych przez nie powierzchni glebowych. Dla pozostałych przedstawionych tu powierzchni glebowych, znacznie ciemniejszych, pokrytych skomplikowanymi w kształcie i niejednorodnymi pod względem wielkości agregatami z piasku gliniastego lekkiego i gliny lekkiej, a także zbudowanych z kamieni, właściwą powierzchnię wirtualną tworzą silnie pionowo wydłużone elipsoidy, bardzo mocno wciśnięte w płaszczyznę stoku, blisko leżące od siebie, o współczynniku n dla fal o długości od 550 do 850 nm w zakresie od 2,20 do 3,05. Duże pionowe wydłużenie elipsoid, względnie duża ich wysokość ponad płaszczyznę stoku, a także niewielkie przestrzenie między nimi dają możliwość uzyskania znacznego zróżnicowania wskaźnika NR generowanych przez nie krzywych kierunkowego odbicia z wyraźnym ich pikim w zakresie odświecznym.

Wyniki eksperymentu z udziałem powierzchni pokrytych kamieniami i bryłami z gliny lekkiej o podobnym do kamieni kształcie i wielkości, mającego sprecyzować wpływ cech samego materiału glebowego na charakter dwukierunkowego odbicia, pozwalają przypuszczać, że zróżnicowanie kształtu krzywych NR w znacznie mniejszym stopniu niż ogólny kształt powierzchni może być tłumaczone odmiennością współczynnika załamania światła n badanych powierzchni.

Podziękowania. Dr. Adamowi Marlewskiemu z Instytutu Matematyki Politechniki Poznańskiej dziękuję za przygotowanie wyżej przedstawionego modelu w formie programu komputerowego.



Dr hab. Jerzy Cierniewski, profesor Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu urodził się w roku 1948. W roku 1971 ukończył studia na Wydziale Melioracji Wodnych AR w Poznaniu. W 1979 roku uzyskał tam stopień doktora. Habilitował się w roku 1989. Od roku 1987 pracuje w Instytucie Geografii Fizycznej Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Jest autorem ponad 50 prac z zakresu gleboznawstwa i teledetekcji gleboznawczej. Publikował między innymi w *Remote Sensing Reviews*, *Remote Sensing of Environment*, *International Journal of Remote Sensing*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* oraz w *International Agrophysics*.
Instytut Geografii Fizycznej UAM, Fredry 10, 61-701 Poznań.

Literatura

- Barnsley M. J., 1984: Effects of off-nadir view angles on the detected spectral response of vegetation canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 5, 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*, 123, 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*, 127, 135–142.
- Cierniewski J., Baret F., Verbrugge M., Hanocq J., Jacquemud S., 1996: Geometrical modelling of soil bidirectional reflectance incorporating specular effects. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 3691–3704.
- Cierniewski J., Verbrugge M., 1997a: Influence of soil surface roughness on soil bidirectional reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 1277–1288.
- Cierniewski J., Verbrugge M., 1997b: Inferring soil surface roughness from soil bidirectional reflectance data. *International Agrophysics*, 11, 147–157.
- Cierniewski J., Marlewski A., Farys M., Królewicz S., 1997: Model dwukierunkowego odbicia spektralnego od zbrzyonej gleby. *Raport merytoryczny z realizacji projektu badawczego* Nr 6 P04 006 09.
- Cierniewski J., Marlewski A., 1998: Model for inferring soil surface roughness from soil directional reflectance data. *Future Trends in Remote Sensing*, A.A. BALKEMA, Rotterdam, Brookfield, 85–90.
- Cooper K.D., Smith J.A., 1985: A Monte Carlo reflectance model for soil surfaces with three-dimensional structure. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1GE-23, 668–667.
- Irons J.R., Campbell G.S., Norman J.M., Graham D.W., Kovalick W.M., 1992: Prediction and measurement of soil bidirectional reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 2, 249–260.
- Lityński T., Jurkowska H.I., Górlach E., 1976: *Analiza chemiczno-rolnicza*. PWN, Warszawa.
- Norman J.M., Welles J.M., Walter E.A., 1985: Contrast among bidirectional reflectance of leaves, canopies, and soils. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-23, 659–667.