



Jerzy Cierniewski¹, Tomasz Gdala²

WPLYW ROZKŁADU RADIACJI NIEBA NA OBRAZ GLEB W ZAKRESIE OPTYCZNYM

INFLUENCE OF SKY RADIANCE DISTRIBUTION ON SOIL IMAGE IN THE OPTICAL DOMAIN

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Instytut Geografii Fizycznej
i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Zakład Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb

² Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Matematyki i Informatyki

STRESZCZENIE: W niniejszej pracy przedstawiona jest funkcja opisująca rozkład radiacji nieba, wykorzystywana w hemisferyczno-kierunkowym modelu odbicia od powierzchni gleby, umożliwiającym przewidywanie obrazu gleby o zdefiniowanym kształcie powierzchni, pokrywającej dowolnie zorientowany stok, oświetlonej światłem widzialnym i podczerwonym oraz obserwowanej z jakiegoś kierunku przez sensor zawieszony nad nią. Nazemne pomiary kierunkowego odbicia od powierzchni gleb uprawnych, zgromadzone w pobliżu jednej ze stacji sieci AERONET w Sede Boker w Izraelu, pozwoliły na odpowiednio wiarygodne przeanalizowanie wpływu światła dyfuzyjnego nieba na obraz gleb uprawnych nie pokrytych roślinnością. Posłużono się przykładem dwóch bardzo podobnych powierzchni glebowych zbudowanych z tego samego materiału glebowego, z agregatami glebowymi rozrzuconymi losowo i rozłożonymi kierunkowo w postaci mikroreliefu brzdowego. Analizowano możliwość ich odróżnienia w różnych warunkach oświetlenia.

SŁOWA KLUCZOWE: radiacja nieba, funkcja dwukierunkowego odbicia, gleby uprawne, teledetekcja

1. WSTĘP

Gleby uprawne, nie przykryte roślinnością, odbijają padające na nie promieniowanie niejednakowo we wszystkich kierunkach (Kimes i Sellers, 1985; Milton i Webb, 1987). Nieregularności ich powierzchni, zwykle dużo większe w porównaniu do długości fal w zakresie optycznym i nieprzezroczystość materiału glebowego dla tych fal, powodują jej zacienienie (Kriebel, 1995). Zmieniający się udział zacienionych fragmentów takich powierzchni w polu widzenia obserwującego ją sensora uważany jest za główną przyczynę nielambertowskiego zachowania się powierzchni gleby w zakresie optycznym.

Kierunkowe odbicie spektralne od powierzchni gleb w warunkach połowych poprawniej byłoby nie opisywać za pomocą funkcji rozkładu dwukierunkowego odbicia (Bidirectional Reflectance Distribution Function *BRDF*), lecz przy pomocy funkcji rozkładu hemisferyczno-kierunkowego odbicia (Hemispherical-Directional Reflectance Distribution Function *HDRDF*). Bowiem o ile z definicji *BRDF* wynika, że jasność

jakieś powierzchni widzianej z określonego kierunku zależy tylko od kierunku promieniowania bezpośrednio padającego (Nicodemus in., 1977), to z definicji *HDRDF* zależy ona zarówno od kierunku promieniowania bezpośrednio padającego, jak i rozkładu promieniowania nieba z pozostałych kierunków hemisfery (Strub, i in., 2002). Kątowy rozkład natężenia radiacji nieba nawet przy bezchmurnej pogodzie jest wyraźnie nierównomierny. Naziemne pomiary rozkładu natężenia radiacji nieba dla fal niebieskiej i czerwonej, przeprowadzone w terenie pustynnym Nowego Meksyku, pozwoliły ustalić, że niebo jest najjaśniejsze wokół Słońca, w obrębie tzw. aureoli, względnie jasne jest ono w pobliżu horyzontu, a najciemniejsze – w głównej płaszczyźnie słonecznej w odległości zenitalnej około 90° od Słońca (Fraser, 1975). Gdy kąt zenitalny Słońca maleje, zróżnicowanie natężenia promieniowania nieba zmniejsza się (Kondratyev, 1969). Rozkład energii docierającej do powierzchni Ziemi zależy również wyraźnie od właściwości odbiciowych samej powierzchni. Inny jest nad oceanami niż nad powierzchniami lądowymi, pustynnymi, czy obszarami zanieczyszczonymi przez działalność człowieka. Rozkład ten jest również efektem pochłaniania i rozpraszania fal elektromagnetycznych na aerozolach znajdujących się w atmosferze. Udział światła rozproszonego w stosunku do całkowitego, docierającego do powierzchni Ziemi, zmienia się wraz ze stopniem zachmurzenia nieba. Przy całkowitym zachmurzeniu kątowy rozkład natężenia radiacji nieba może być już traktowany jako równomierny. Obserwuje się tylko monotoniczny spadek natężenia promieniowania od zenitu do horyzontu. Natężenie światła rozproszonego nieba zależy od grubości optycznej atmosfery. Posługując się pojęciem całkowitej normalnej grubości optycznej atmosfery, będącej sumą grubości optycznych wszystkich składników atmosfery powodujących absorpcję i rozproszenie światła, odniesionej do długości fali oraz kąta zenitalnego Słońca, można określić stosunek radiacji promieniowania słonecznego bezpośredniego do całkowitego padającego na powierzchnię poziomą (Fraser, 1975). Można więc kątowy rozkład promieniowania dyfuzyjnego nieba związać z bezpośrednim promieniowaniem słonecznym i opisać je w funkcji długości fali i pozycji zenitalnej Słońca.

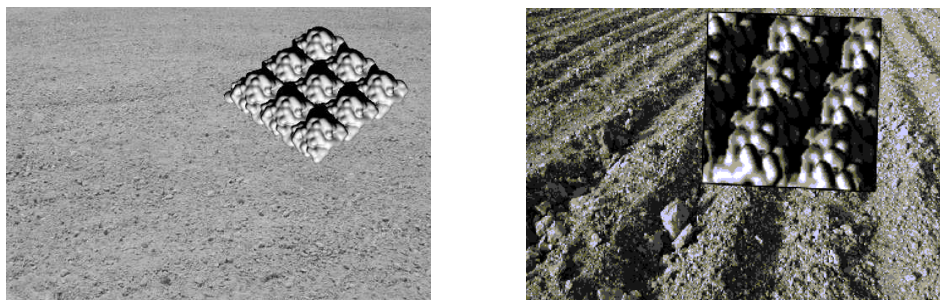
Pomiary radiacji całkowitej oraz jej składowych, tj. bezpośredniego promieniowania słonecznego i promieniowania dyfuzyjnego, prowadzone są od wielu lat w różnych miejscach na Ziemi. Dane te pozyskiwano z różną częstotliwością czasową i niejednakową dokładnością przestrzenną. AERONET (AErosol RObotic NETwork), stworzona i nadzorowana przez NASA, tworzy obecnie najnowocześniejszą sieć złożoną ze 123 naziemnych stacji monitorujących radiację nieba (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov:8080>). Wszystkie one wyposażone są w identyczne radiometry CIMEL 318A, automatycznie skanujące niebo. Dane z tych instrumentów przesyłane są drogą satelitarną do NASA, Goddard Space Flight Center, gdzie po wstępnym ich przetwarzaniu, są udostępniane w czasie rzeczywistym przez INTERNET.

Celem niniejszej pracy jest scharakteryzowanie zmienności rozkładu radiacji nieba w zakresie optycznym oraz przedstawienie wpływu tego rozkładu na obraz gleb uprawnych wykorzystywany do interpretacji pokrywy glebowej metodami teledetekcyjnymi. Posłużono się przykładem dwóch bardzo podobnych powierzchni glebowych zbudowanych z tego samego materiału glebowego, z agregatami rozrzuconymi losowo oraz rozłożonymi kierunkowo w postaci mikroreliefu bruzdowego, analizując możliwość ich odróżnienia w różnych warunkach oświetlenia. Wykorzystano dane wygenerowane za

pomocą modelu geometrycznego przewidującego hemisferyczno-kierunkowe odbicie od powierzchni gleb, odnoszące się do eksperymentu pomiarowego, w trakcie którego jednocześnie rejestrowano odbicie kierunkowe od powierzchni gleb oraz radiację oświetlającego je nieba.

2. METODYKA PRACY

Analizowano obraz powierzchni gleb wytworzonych z gliny piaszczystej nie pokrytych roślinnością, leżących w obrębie doświadczalnego gospodarstwa rolnego koło Beer Shevy (31,33°N; 34,67°E) w Izraelu (ryc. 1).



Ryc. 1. Badane powierzchnie, z agregatami rozrzuconymi losowo oraz rozłożonymi kierunkowo w postaci brzd, wraz z ich sztucznymi odpowiednikami

Fig. 1. Studied surfaces, with aggregates spread randomly and directly with furrows, together with their artificial equivalents

14 lipca 2003 roku, przy 6 różnych kątach zenitalnych Słońca θ_s , zmieniających się od 34° do 80°, dokonano pomiarów ich kierunkowego odbicia w płaszczyznach odległych od siebie o 30°, poczynając od głównej płaszczyzny słonecznej, pod 15 różnymi kątami zenitalnymi θ_v od -70° (dosłonecznie), poprzez 0° (nadir), do +70° (odslonecznie). Wykonywano je w następujących długościach fali λ : 450 nm, 550 nm, 650 nm, 850 nm i 1650 nm przy bezchmurnym niebie za pomocą radiometru polowego CIMEL-313-21.

Stan atmosfery w trakcie dokonywanych pomiarów odbicia kontrolowano za pomocą danych zarejestrowanych na stacji Sede Boker (30,84°N; 34,78°E), należącej do sieci AERONET. Dane te przedstawiają rozkład radiacji nieba w głównej płaszczyźnie słonecznej oraz w płaszczyźnie poziomej na wysokości Słońca, pomierzony za pomocą radiometru CIMEL CE-318 dla fal o długości λ : 440, 675, 870, 940 i 1020 nm.

Pomiary radiometryczne energii docierającej i odbitej od badanych powierzchni glebowych pozwoliły ustalić za pośrednictwem hemisferyczno-kierunkowego modelu odbicia (Cierniewski i Gdala, 2004) ich sztuczne odpowiedniki. Były one konstruowane za pomocą zbiorów $n = 1600$ punktów k_i o współrzędnych (x_i, y_i, z_i) o $i = 1, \dots, n$ oraz odpowiadających im dodatnich liczb rzeczywistych $r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$. Jakąś ich parę (k_i, r_i) interpretuje się jako kulę o promieniu r_i i środku k_i . Geometrię sztucznych powierzchni opisuje następujące równanie:

$$\sum_{i=1}^n (2d_i^3 - 3d_i^2 + 1) - \frac{1}{2} = 0, \quad (1)$$

$$\text{gdzie } d_i = \frac{\min(r_i, \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2})}{r_i}.$$

W rzucie prostym do płaszczyzny XY środki kul ułożone są regularnie w przecięciach siatki kwadratów o boku $1/\sqrt{n}$. Wysokość z_i środków kul k_i opisuje formuła:

$$z_i = a \cdot |\sin(\pi \cdot x_i)| \cdot \left[1 - b \cdot \left[1 - |\sin(\pi \cdot y_i)| \right] \right] + c \cdot f_{dis}(i) \quad (2)$$

gdzie: a wyraża amplitudę funkcji sinus wzdłuż osi x , a b wzdłuż osi y (określając ją względem a). Ostateczna wysokość z_i środka i -tej kuli jest efektem zaburzenia opisanego ciągiem $f_{dis}(i) \in [0,1]$. Parametr c charakteryzuje tu maksimum odchylenia od wartości z_i , przy założeniu, że wynika ono tylko z wartości parametrów a i b . Promień r_i opisywanych powierzchni zmienia się według formuły:

$$r_i = [3 - c \cdot f_{dis}(i)] \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

i jest tak dobrać aby wyeliminować przerwy pomiędzy odpowiednio zdeformowanymi kulami, przypominającymi zlewające się ze sobą krople cieczy.

Sztuczne powierzchnie, odpowiadające badanym powierzchniom glebowym, charakteryzują następujące wartości parametrów geometrycznych a , b , c :

powierzchnie	a	b	c
z agregatami rozrzuconymi losowo	0,60	1,00	0,60
z agregatami rozłożonymi wzdłuż bruzd	0,50	0,25	0,50

3. WYNIKI BADAŃ

Założono, że stosunek radiacji słonecznej bezpośredniej do całkowitej $\delta(\vec{S}, \tau)$ w warunkach polowych zmienia się wraz z pozycją Słońca $\vec{S} = [\theta_s, \phi_s]$ i grubością optyczną atmosfery τ . Rozkład energii hemisferycznego światła nieba $H_{\vec{k}}$ wzdłuż kierunku \vec{k} opisano za pomocą funkcji, wzorowanej na propozycji Granta i in. (1996):

$$H_{\vec{k}} = c_1 + c_2 \cdot (\angle(\vec{k}, \vec{n}_d))^2 + c_3 \cdot e^{c_4 \cdot \angle(\vec{S}, \vec{k})} + c_5 \cdot \cos^2(\angle(\vec{S}, \vec{k})) \quad (4)$$

gdzie: \vec{n}_d – nadir; c_1 – minimum energii światła o analizowanej długości fali λ ; c_2 – rozjaśnienie wokół horyzontu; c_3 – ilość bezpośredniej energii słonecznej, spełniającej zależność $\delta(\vec{S}, \tau) = \frac{H_s}{H_G}(\vec{S}, c_3)$ (H_s i H_G są odpowiednio bezpośrednią i całkowitą radiacją nieba); c_4 – miara koncentracji aureoli wokół Słońca; c_5 – energia najciem-

niejszego fragmentu nieba. Ostatecznie energię docierającą do powierzchni odbijającej z punktu s_i hemisfery zdefiniowano jako:

$$e_i = \frac{H_{\bar{s}_i}}{c_3} \quad (5)$$

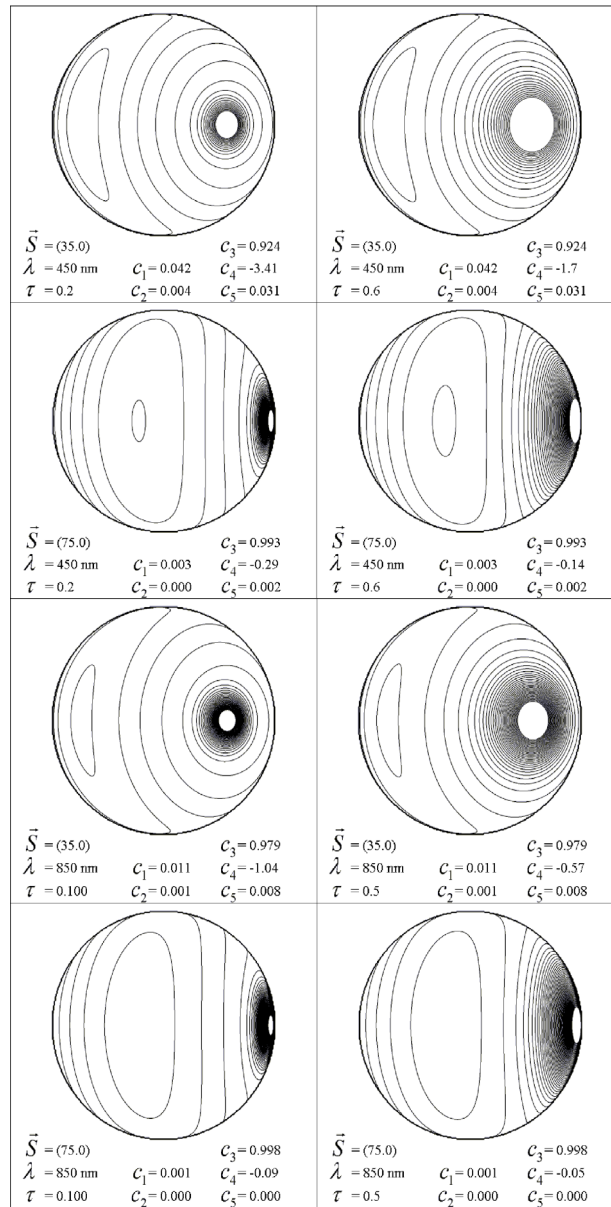
Posługując się funkcją $H_{\bar{k}}$ ustalono zmienność radiacji nieba dla dwóch stanów atmosfery określonych ich grubością optyczną τ wynoszącą 0,2 i 0,6 dla fali o długości λ 450 nm oraz τ 0,1 i 0,5 dla fali o długości λ 850 nm przy 3 wybranych kątach zenitalnych Słońca θ_S : 35°, 55° i 75°. Dla małej grubości atmosfery, charakteryzującej warunki czystego nieba, rozkład radiacji nieba jest bardziej nierównomierny (ryc. 2). Jest to tym wyraźniejsze im dotyczy krótszej fali i mniejszego kąta zenitalnego Słońca.

Dla wyżej scharakteryzowanych warunków oświetlenia, za pomocą wspomnianego modelu obliczono rozkłady funkcji hemisferyczno-kierunkowego odbicia $HDRDF$ od wcześniej ustalonych sztucznych powierzchni glebowych. Rycina 3 przedstawia te rozkłady w formie znormalizowanej $NHRDF$ do powierzchni z mikroreliefem brzdowym obserwowanej w kierunku nadiru. Powierzchnia ta ze względu na obecność bruzd jest bardziej szorstka i przez to ciemniejsza o około 15–20% od uformowanej przez agregaty rozrzucone losowo i obserwowana z analogicznych kierunków. Rozkłady $HDRDF$ dla gleb z mikroreliefem brzdowym są bardziej płaskie, tym bardziej im powierzchnie te są oświetlone falą o mniejszej wartości λ i przede wszystkim padającą pod mniejszym kątem θ_S w warunkach większej grubości atmosfery τ .

Możliwości odróżnienia obrazu powierzchni tych samych gleb, z agregatami glebowymi rozrzuconymi losowo i rozłożonymi kierunkowo w postaci mikroreliefu brzdowego, opisują ilościowo diagramy stanowiące różnice w rozkładzie ich kierunkowego odbicia $NHRDF$ w wybranych warunkach oświetlenia, charakteryzowanych kątem zenitalnym Słońca θ_S , długością fali λ i grubością atmosfery τ (ryc. 4). Jak z diagramów tych wynika, odróżnienie badanych powierzchni jest możliwe przy dużych kątach θ_S . Dla analogicznych kierunków obserwacji przy $\theta_S = 75^\circ$, kontrast między nimi przy małej grubości optycznej atmosfery $\tau = 0,2$ i $0,1$ (odpowiednio dla fali o długości λ 450 i 850 nm) jest około 2,5-krotnie większy niż przy gęstości atmosfery $\tau = 0,6$ i $0,5$ (opowiadających wartościom λ w porządku jak wyżej). Najłatwiej odróżnić analizowane gleby przy małej grubości atmosfery, obserwując je skośnie w płaszczyźnie pionowej oddalonej od pozycji Słońca o około 90–135°. Wtedy mogą one wykazać między sobą kontrast osiągający 30% jasności powierzchni z mikroreliefem brzdowym obserwowanej w kierunku nadiru.

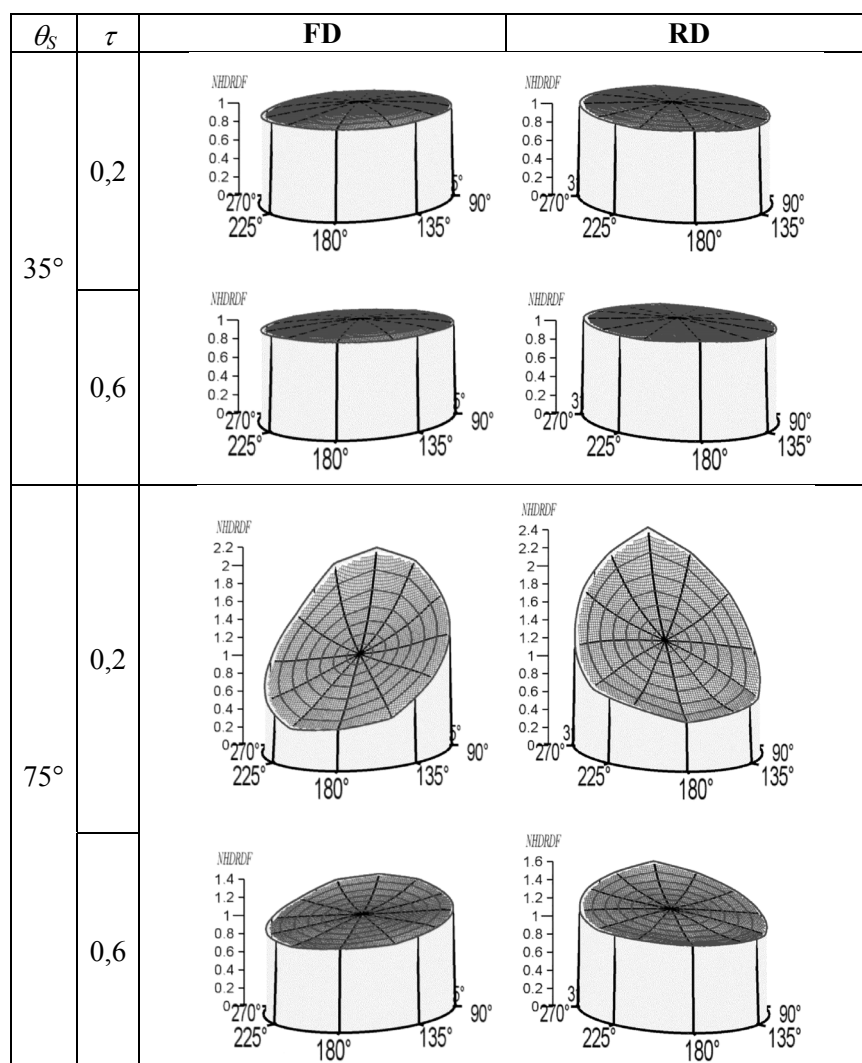
4. UWAGI KOŃCOWE

Do generowania rozkładu radiacji nieba dla jakiegś pozycji zenitalnej Słońca θ_S i grubości optycznej atmosfery τ zaproponowano funkcję empiryczną z parametrami odnoszącymi się do minimum opisywanej energii, rozjaśnienia wokół horyzontu, udziału energii bezpośrednio padającej, koncentracji aureoli wokół Słońca oraz energii najciemniejszego fragmentu nieba.



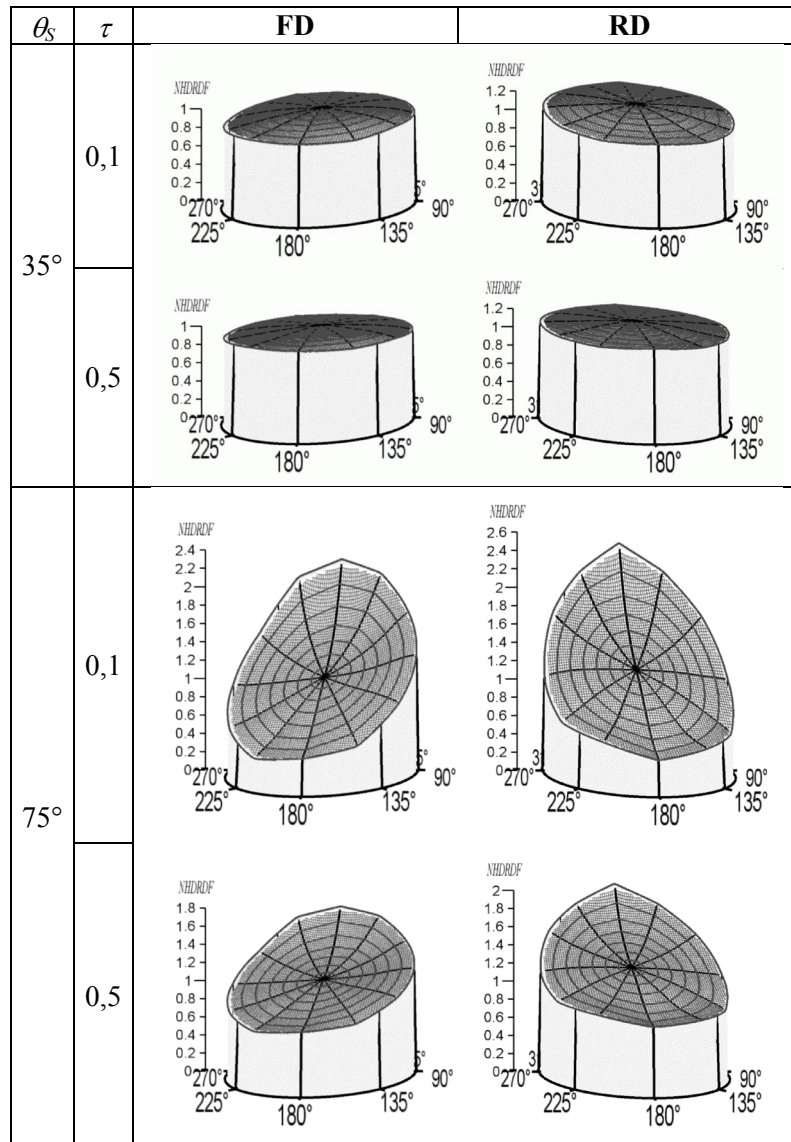
Ryc. 2. Rozkłady radiacji nieba dla kątów zenitalnych Słońca \bar{S} 35° i 75° obliczone za pomocą funkcji $H_{\bar{k}}$ dla analizowanych warunków oświetlenia. Symbole $c_1 \dots c_5$ jak w równaniu (4)

Fig. 2. Sky radiation distribution for solar zenith angles \bar{S} 35° and 75° , calculated by the $H_{\bar{k}}$ function for analyzed illumination condition. Symbols $c_1 \dots c_5$ as in Eq. (4)



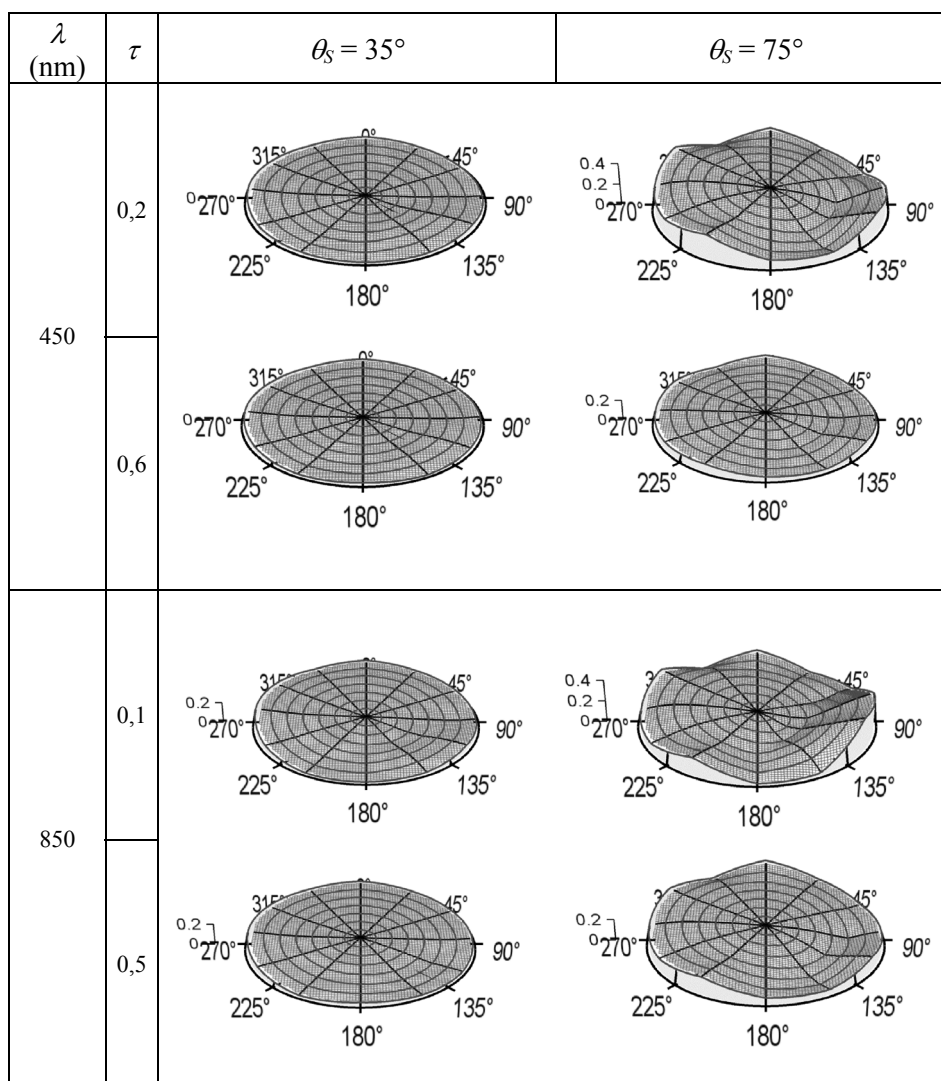
Ryc. 3a. Znormalizowane funkcje rozkładu hemisferyczno-kierunkowego odbicia $NHDRDF$ od badanych gleb z agregatami rozrzuconymi losowo (RD) i rozłożonych kierunkowo wzdłuż bruzd (FD) w wybranych warunków oświetlenia opisanych kątem zenitalnym Słońca θ_s i gęstością atmosfery τ dla fali o długości λ 450 nm.

Fig. 3a. Normalized hemispherical-directional reflectance functions $NHDRDF$ of the studied soil surfaces with aggregates randomly dispersed (RD) and distributed along furrows (FD) in illumination conditions described by the solar zenith angle θ_s and the atmosphere thickness τ for the wavelength λ 450nm.



Ryc. 3b. Znormalizowane funkcje rozkładu hemisferyczno-kierunkowego odbicia $NHDRDF$ od badanych gleb z agregatami rozrzuconymi losowo (RD) i rozłożonych kierunkowo wzdłuż bruzd (FD) w wybranych warunków oświetlenia opisanych kątem zenitalnym Słońca θ_s i gęstością atmosfery τ dla fali o długości λ 850 nm

Fig. 3b. Normalized hemispherical-directional reflectance functions $NHDRDF$ of the studied soil surfaces with aggregates randomly dispersed (RD) and distributed along furrows (FD) in illumination conditions described by the solar zenith angle θ_s and the atmosphere thickness τ for the wavelength λ 850 nm



Ryc. 4. Diagramy oceniające możliwość odróżnienia obrazu powierzchni tych samych gleb z agregatami glebowymi rozrzuconymi losowo od rozłożonych wzdłuż bruzd, stanowiące różnice w rozkładzie ich kierunkowego odbicia *NHRDF* w wybranych warunkach oświetlenia opisanych kątem zenitalnym Słońca θ_s , długością fali λ i gęstością atmosfery τ

Fig. 4. Diagrams assessing distinction possibilities between the soil surface with aggregates randomly dispersed and aggregates distributed along furrows, being differences in their directional reflectance *NHRDF* under illumination conditions described by the solar zenith angle θ_s , the wavelength λ and the atmosphere thickness τ

Uzyskane wyniki uwidaczniają w sposób ilościowy wpływ tak zdefiniowanych warunków oświetlenia na możliwość odróżnienia obrazu powierzchni tych samych gleb z agregatami glebowymi rozrzuconymi losowo od powierzchni z agregatami rozłożonymi kierunkowo wzdłuż bruzd. Wpływ ten jest najwyraźniejszy przy dużych kątach zenitalnych Słońca. Dla przykładu, dla $\theta_s = 75^\circ$ przy małej grubości optycznej atmosfery ($\tau = 0,2$) kontrast między rozważanymi glebami jest 2,5-krotnie większy niż przy dużej jej grubości ($\tau = 0,6$), osiągając blisko 30% jasności gleby z mikroreliefem bruzdowym obserwowanej w kierunku nadiru.

Niniejsza praca była realizowana w ramach projektu badawczego finansowanego przez Rektora UAM oraz Komisję Europejską w ramach programu "Improving Human Potential – Access to Research Infrastructure". Pierwszy z tych projektów przewiduje wykonanie aparatury umożliwiającej pomiar rozkładu iradiacji nieba dla tych samych pięciu długości fal, obejmujących widmo widzialne, bliską i środkową podczerwień, w jakich autorzy niniejszej pracy rejestrują kierunkową radiację od badanych powierzchni. Drugi natomiast ma na celu przedstawienie praktycznego zastosowania wyżej wspomnianego hemisferyczno-kierunkowego modelu dla zwiększenia dokładności interpretacji obrazu powierzchni gleb z pulapu lotniczego i satelitarnego.

PIŚMIENNICTWO

- [1] AERONET (AErosol RObotic NETwork), <http://aeronet.gsfc.nasa.gov:8080/>.
- [2] Cierniewski J., Gdala T. A hemispherical-directional reflectance model as a tool for understanding image distinctions between cultivated and uncultivated bare soils. *Remote Sensing of Environment* (w druku).
- [3] Fraser R. S. (1975). Interaction mechanisms – within the atmosphere (chapter 5). *Manual of Remote Sensing*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA: 181–233.
- [4] Grant R. H., Gao W. and Heisler G. M. (1996). Photosynthetically-active radiation: sky radiance distributions under clear and overcast conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82: 267–292.
- [5] Kimes D. S., Sellers P. J. (1985). Inferring hemispherical reflectance of the Earth's surface for global energy budget from remotely sensed nadir or directional radiance values. *Remote Sensing of Environment*, 18: 205–223.
- [6] Kondratyev K. (1969). *Radiacjonnyje charakteristiki atmosfery i zemnoj powerchnosti*. Gidromete-orologiceskoje Izdatelstwo. Leningrad.
- [7] Kriebel, K. T. (1995). On the limited validity of reciprocity in measured BRDFs. *Remote Sensing of Environment*, 58: 52–62.
- [8] Milton E. J., Webb, J., P. (1987). Ground radiometry and airborne multispectral survey of bare soils. *International Journal of Remote Sensing*, 18: 3–14.
- [9] Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W., Limperis, T. (1977). Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Technical Report NBS MN-160, National Bureau of Standards.
- [9] Strub, G., Beisl, U., Schaepman, M., Schlaepfer, D., Dickerhof, C. and Itten Klaus. (2002). Evaluation of diurnal hyperspectral HDRF data acquired with the RSL field goniometer during the DAISEX'99 campaign. *Photogrammetry & Remote Sensing*, 57: 184–193.

Recenzent: dr inż. Beata Hejmanowska, AGH Kraków.