

Modelowanie zmienności albedo gleb w warunkach czystego nieba w zależności od kąta zenitalnego Słońca i szorstkości powierzchni gleby

Modelling of the soil surface albedo variation for clear-sky conditions depending on the solar zenith angle and the soil surface roughness

Jerzy CIERNIEWSKI

The paper describes how the broadband blue-sky albedo of soil surfaces varies under clear sky conditions in dependence on the solar zenith angle and the surface roughness. This relation was determined using the model of Cierniewski et al. (2004), predicting the overall hemispherical-reflectance distribution from rough soil surfaces. Three virtual surfaces, smooth, moderate and rough, also described by their roughness, are used here for the soil albedo variation analysis. The soil albedo (α) versus the solar zenith angle (θ_s), strongly depends on the surface roughness. In the θ_s range from 0° to

60°, the α of the smooth surface (S) is about 1.3 times higher than the α of the rough surface (R). For the θ_s higher than 60°, this proportion becomes lower, reaching about 1.15 at the $\theta_s=85^\circ$. The higher the θ_s , the higher the α . In the θ_s range from 0° to about 60°, the α raises insignificantly, not exceeding 1% and 2% per each 10° of the θ_s for the S and R surfaces, respectively. For the θ_s higher than 60°, the α rises more evidently, reaching between 75° and 85° more than 25% and 35% for these surfaces in that order.

Wstęp

Albedo jakiejś powierzchni definiowane jest jako stosunek krótkofalowego promieniowania słonecznego odbitego od niej we wszystkich możliwych kierunkach do padającego na nią też ze wszystkich kierunków, przy czym oba promieniowania, to skierowane w górę i to skierowane w dół, rzutowane są na tę powierzchnię jako na usytuowaną poziomo (Janza, 1975; Schaepman-Strub i in., 2006). W zależności od tego czy wielkość ta odnosi się do całego zakresu krótkofalowego promieniowania (o długości od 0,3 do 3 μm) czy też tylko do jego jakiegoś wąskiego wycinka, używa się odpowiednio pojęć albedo szerokopasmowe i albedo wąskopasmowe (spektralne) (Martonchik i in., 2000). Ta bezwymiarowa wielkość charakteryzuje właściwości samej powierzchni, jak i warunki jej oświetlenia. Pinty i in., (1989), omawiając wąskopasmowe albedo zaporanych gleb, odnoszące się do zakresów czułości kanałów 1 i 2 radiometru AVHRR NOAA, zauważył, że jego wartość rośnie wraz ze zwiększaniem się kąta zenitalnego Słońca. Lewis i Barnsley (1994), rozważając wąskopasmowe albedo powierzchni alkalicznych i gleb pozbawionych roślinno-

ści, a Wang i in. (2005), analizując albedo ponad trzydziestu powierzchni gleb pustynnych przy użyciu danych MODIS, wnioskowali, że wąskopasmowe albedo tych powierzchni zmienia się istotnie dopiero przy wysokich kątach zenitalnych Słońca. Liu i in. (1994), analizując zmienność albedo tych samych gleb w zmieniających się warunkach od czystego do zamglonego nieba, zaobserwowali, że ona rośnie wraz ze zwiększaniem się grubości optycznej atmosfery. Kondratyev (1969), badając albedo suchych powierzchni glebowych i skalistych, pisał, że ono spada odpowiednio od 0,22 do 0,12 i od 0,34 do 0,18, gdy kąt zenitalny Słońca zmniejsza się od 80° do 30°. Odbicie od powierzchni gleby wzrasta gdy wielkość agregatów glebowych zmniejsza się. Mniejsze agregaty mają bardziej okrągły kształt niż większe. Większe nieregularności dużych agregatów i brył są pułapką dla padającego promieniowania (Mikhaylova i Orlov, 1986). Nieregularności powierzchni gleby są największe bezpośrednio po zabiegach agrotechnicznych i stopniowo zmniejszają się po opadach deszczu. Im większa szorstkość powierzchni gleby, tym mniejsze jej albedo. Ta zależność została potwierdzona przez Matthiasa i in. (2000), mierzących w warunkach czystego

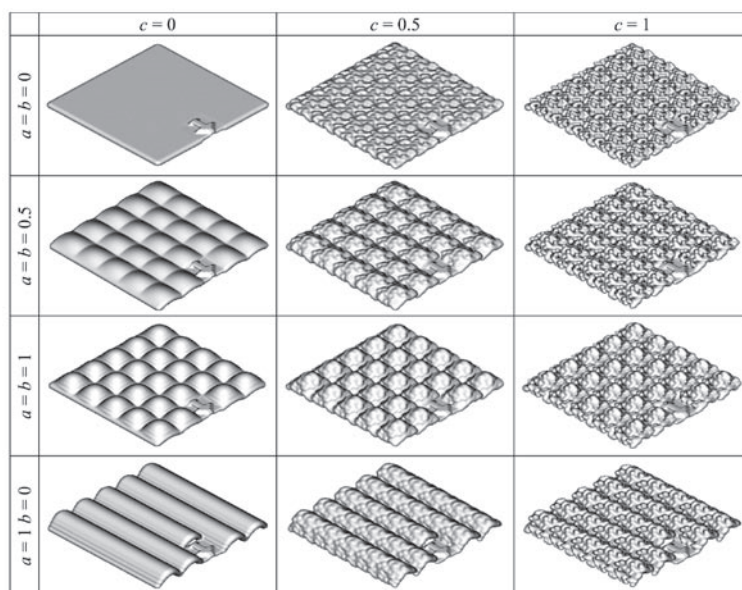
nieba szerokopasmowe albedo powierzchni gleb w ich czterech stanach szorstkości, gładkich oraz odpowiednio szorstkich, ukształtowanych przez pług, bronę talerzową i siewnik. Obukhov i Orlov (1964) donoszą, że gleby niestrukturalne odbijają od 15% do 20% mniej promieniowania krótkofalowego niż gleby o dobrze wykształconej strukturze. Kondratyev i Fedchenko (1980) zauważyli, że gleby o bryłach zaskorupionych o średnicy od 5 do 15 cm wykazują większe odbicie o 10% do 15% w stosunku do tych nie ujawniających zaskorupienia.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie zmienności szerokopasmowego albedo gleb nie przykrytych roślinnością w warunkach czystego nieba w zależności od kąta zenitalnego Słońca i stanu szorstkości powierzchni gleby. Posłużono się danymi wygenerowanymi za pomocą modelu hemisferyczno-kierunkowego odbicia od powierzchni gleb (Cierniewski i in., 2004).

Metody badań

Wykorzystany model przewiduje całkowity rozkład kierunkowego odbicia od szorstkiej powierzchni gleby jako efekt jej oświetlenia przez anizotropowe hemisferyczne źródło światła o rozkładzie podobnym do warunków naturalnych czystego nieba. Nieregularności powierzchni gleby, wynikające z obecności agregatów glebowych, wyobrażane są przez strukturę geometryczną przypominającą zlewające się ze sobą krople. Kształt powierzchni gleby opisywany jest za pomocą trzech parametrów a , b i c . Parametry a i b opisują jej zmienność wysokościową za pomocą amplitudy funkcji sinus, odpowiednio wzdłuż osi x i y . Parametr c wyraża zaburzenie w zmienności wysokościowej powierzchni w stosunku do sytuacji opisanej tylko za pomocą a i b . Widok kilku wirtualnych powierzchni na rysunku 1, wygenerowanych za pomocą różnych wartości powyższych parametrów, ułatwia zrozumienie jak parametry te wpływają na kształt symulowanych powierzchni. Zmienność wysokości tych powierzchni rośnie wraz ze zwiększaniem wartości a oraz c . Kierunkowość kształtu generowanych powierzchni staje się wyraźniejsza, gdy wzrasta wielkość a a maleje b .

Model zakłada, że przedstawione wyżej powierzchnie oświetlone są hemisferycznym źródłem promieniowania o rozkładzie $H(\lambda)$, złożonym z wielu punktowych źródeł promieniowania o radiancji $e_1, e_2, e_3, \dots, e_m$, równomiernie rozłożonych na hemisferze odpowiednio w punktach $s_1, s_2, s_3, \dots, s_m$. Ich radiancja spektralna obliczana jest za pomocą zmodyfikowanej empirycznej funkcji Granta i in. (1986), zależnej od kątów Słońca, zenitalnego θ_s i poziomego φ_s , jak i normalnej optycznej grubości atmosfery τ związanej z długością fali λ . Możliwość zdefiniowania wektora normalnej \vec{n} do dowolnego



Ryc. 1. Wirtualne powierzchnie glebowe generowane modelem Cierniewskiego i in. (2004) za pomocą różnych wartości geometrycznych parametrów a , b i c . Wszystkie powierzchnie są oświetlone i obserwowane w tych samych warunkach. Strzałki wskazują kierunek północy.

Fig. 1. Virtual surfaces generated by the model of Cierniewski et al. (2004) with different values of their a , b and c geometrical parameters. All of the surfaces are illuminated and viewed at the same conditions. The arrows show the North direction.

punktu symulowanej powierzchni pozwala na określenie energii jaka tam dociera. Radiancja spektralna $H_k(\lambda)$, docierająca do elementarnego fragmentu f_R tej powierzchni wzdłuż kierunku \vec{k} jeśli ten wycinek nie jest przesłonięty przez sąsiednie fragmenty rozpatrywanej powierzchni, i konsekwentnie ilość energii odbitej od f_R zależy od kąta pomiędzy \vec{k} i \vec{n} . Promieniowanie odbite od każdego homogenicznego fragmentu f_R jest rozpraszane według funkcji niby lambertowskiej, będącej kombinacją funkcji opisującej rozpraszanie w sposób lambertowski i niby zwierciadlany. Wektory promieniowania e_{fR} odbitego tylko jednokrotnie od f_R , jako efekt oświetlenia nie zasłoniętego punktowego źródła promieniowania s_i o określonej radiancji e_i , tworzą trójwymiarową chmurę o specyficznym kształcie i wielkości. Stosunek radiancji e_{fR} odbitej w określonym kierunku do irradiancji e_i jednego punktowego źródła promieniowania padającej na elementarny fragment f_R spełnia klasyczne ograniczenia funkcji dwukierunkowego rozkładu odbicia (BRDF – bidirectional reflectance distribution function) (Di Girolamo, 2003). Rozkład całkowitego promieniowania odbitego od całej symulowanej powierzchni, definiowanej za pomocą parametrów a , b i c , jest opisany za pomocą hemisferyczno-kierunkowej funkcji odbicia HDR. Całkowite promieniowanie $HDR(v)$, odbite od całej powierzchni i obserwowanej przez jakiś sensor wzdłuż kierunku v (definiowanego przez kąty widzenia, zenitalny θ_v i poziomy φ_v) jest sumą wszystkich wektorów promieniowania odbitego wzdłuż tego kierunku od każdego elementarnego fragmentu f_R tej powierzchni jako efekt jej oświetlenia przez każde nie

zasłonięte punktowe źródło promieniowania s_i o radiancji e_i obliczanej za pomocą funkcji $H_k(\lambda)$. Te dwa nierównomierne hemisferyczne rozkłady promieniowania elektromagnetycznego, opisany funkcją $H(\lambda)$ jako energii docierającej do symulowanej powierzchni glebowej i opisanego funkcją $HDR(v)$ jako energii odbitej od niej, są tutaj wykorzystane do obliczenia wąskopasmowego (spektralnego) albedo tzw. niebieskiego nieba (blue-sky) $\alpha(\lambda)$, definiowanego za pomocą formuły:

$$\alpha(\lambda) = \frac{\int HDR(v) \cos \angle(\vec{v}, \vec{n}_{dir}) dU}{\int H_k(\lambda) \cos \angle(\vec{k}, \vec{n}_{dir}) dU}$$

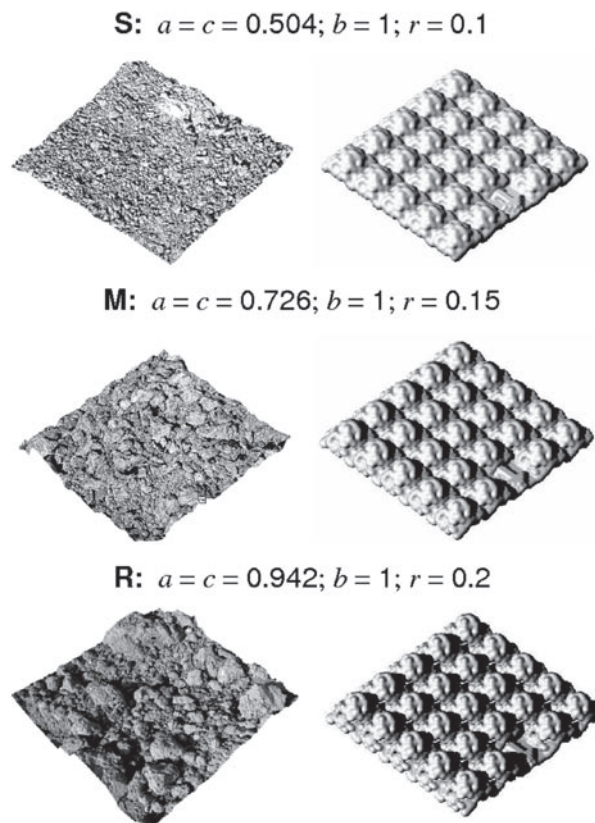
gdzie radiancja i irradiancja są całkowane z całych półsfery U . Wyrażenie $\angle(\dots, \dots)$ jest kątem wyrażonym w radianach pomiędzy dwoma wektorami, odbitego promieniowania \vec{v} lub padającego \vec{k} i nadirem \vec{n}_{dir} . Symulowana powierzchnia jest usytuowana poziomo. Chociaż jest heterogeniczna, gdy przyglądamy się jej szczegółowo, oraz jej oświetlenie nie stanowi jednokierunkowe źródło promieniowania, założono, że zsumowanie oddzielnych porcji promieniowania e_{fr} pozwala określić średni rozkład odbicia wewnątrz skończonego pola widzenia sensora od całej symulowanej powierzchni, oświetlonej przez całe hemisferyczne źródło promieniowania, spełniając zasady definicji BRDF generalizowanej przez Snydera (2002).

Zakładając, że irradiancja $H(\lambda)$ ma taki rozkład spektralny jak ciało doskonale czarne w temperaturze 6000°K i ponadto rozkład ten nie zmienia się w czasie, szerokopasmowe albedo α przybliżano na podstawie wąskopasmowego albedo $\alpha(\lambda)$ generowanego dla następujących długości fali λ (nm): 350, 450, 550, 650, 850, 1650 i 3000.

Omówienie wyników badań

Zmienność szerokopasmowego albedo powierzchni gleb w warunkach czystego nieba w zależności od kąta zenitalnego Słońca analizowano na przykładzie 3 powierzchni o różnej szorstkości: względnie gładkiej i (S), przeciętnie szorstkiej (M) i bardzo szorstkiej (R) (rys. 2). Reprezentują one rzeczywisty materiał glebowy o właściwościach scharakteryzowanych w tabeli 1. Nie kierunkowy kształt wybranych powierzchni glebowych, wyrażany zależnościami $a=c$ i $b=1$, uzupełniono wskaźnikiem ich szorstkości r , definiowanym jako odchylenie standardowe ze zmienności wysokości analizowanych powierzchni.

Jak wynika z rysunku 3, uzyskana przy wykorzystaniu omówionego wyżej modelu relacja pomiędzy sze-



Ryc. 2. Widok badanych powierzchni glebowych i ich wirtualnych odpowiedników: gładkiej (S), przeciętnie szorstkiej (M) i bardzo szorstkiej (R), oświetlonych i obserwowanych w tych samych warunkach. Strzałki wskazują kierunek północy.

Fig. 2. View of the studied soil surfaces and their virtual equivalents: the smooth (S), the moderate rough (M) and the very rough (R), illuminated and viewed at the same conditions. The arrows show the North direction.

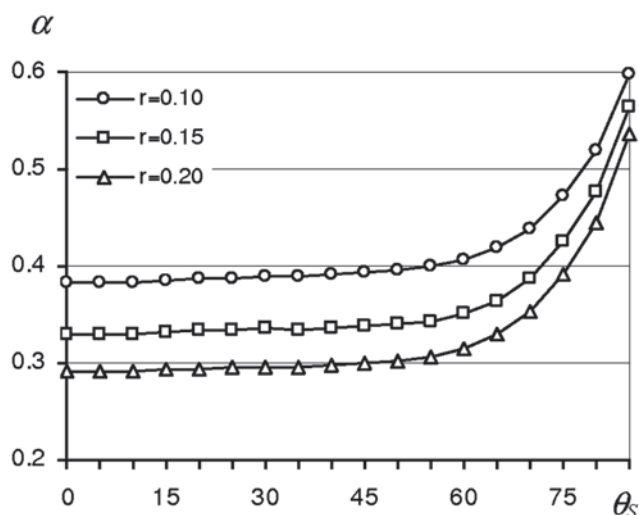
rokokopasmowym albedem α analizowanych powierzchni a kątem zenitalnym Słońca θ_s w warunkach czystego nieba bardzo silnie uzależniona jest od stanu szorstkości powierzchni gleb. W zakresie θ_s od 0° do 60°, α względnie gładkich powierzchni glebowych i przeciętnie szorstkich jest odpowiednio o około 30% i 15% wyższe od α powierzchni bardzo szorstkich. Dla kątów θ_s większych niż 60° różnice między poziomem albedo powierzchni S i M w porównaniu do powierzchni R stają się coraz mniejsze. Przy kącie θ_s równym 85° wynoszą one już odpowiednio tylko 15% i 5%.

Im większy kąt θ_s tym wyższe albedo α . W zakresie θ_s od 0° do 60° wzrost ten jest mało widoczny, nie przekraczający 1% i 2% na 10° przyrostu θ_s dla gładkiej

Tabela 1. Niektóre właściwości rzeczywistego materiału glebowego testowanych powierzchni

Table 1. Certain properties of real soil material of tested surfaces

Symbol powierzchni Surface Surface symbol	Grupa mechaniczna Mechanical group	Zawartość frakcji mechanicznych Mechanical fraction content (%)			Zawartość materii organicznej Organic matter content (%)	Barwa na sucho wg Munsella Dry Munsell colour
		2–0,05 mm	0,05–0,002 mm	<0,002 mm		
S	pg	80	14	5	1,2	10YR6/3
M	gl	62	28	9	2,1	10YR6/4
R	g	47	36	17	2,4	10YR6/4



Ryc. 3. Zmienność szerokopasmowego albedo niebieskiego nieba α dla powierzchni o określonej szorstkości r w zależności od kąta zenitalnego Słońca θ_s .

Fig. 3. Variation of the broadband blue-sky albedo α for soil surfaces of the given roughness r depending on the solar zenith angle θ_s .

i odpowiednio bardzo szorstkiej powierzchni. Przy wzroście θ_s od 75° do 85° α analizowanych powierzchni S, M i R wzrasta już odpowiednio o 25%, 30% i 35%. Prezentowane wyniki są podobne do tych uzyskanych w pracy Hapke (2002).

Uwagi końcowe

Jak wykazały niniejsze badania, wartość szerokopasmowego albedo gleb nie przykrytych roślinnością w warunkach czystego nieba silnie uzależniona jest od szorstkości powierzchni gleby. W zakresie kątów zenitalnych Słońca θ_s od 0° do 60° albedo względnie gładkich powierzchni glebowych jest o około 30% wyższe niż albedo bardzo szorstkich powierzchni. Im większy θ_s , tym wyższe albedo. W zakresie θ_s od 0° do 60° wzrost ten jest mało widoczny, nie przekraczający 1% i 2% na 10° przyrostu θ_s dla gładkiej i odpowiednio bardzo szorstkiej powierzchni. Przy wzroście θ_s od 75° do 85° albedo powierzchni gładkich i szorstkich wzrasta już odpowiednio o 25% i 35%.

Podziękowania

Niniejsza praca została wykonana w ramach projektu badawczego zatytułowanego „Albedo gleby nie pokrytej roślinnością w zmieniających się warunkach jej oświetlenia a kształt powierzchni gleby” (nr 2 P04E 030



Prof. 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. Stopień doktora i doktora habilitowanego uzyskał w Akademii Rolniczej w Poznaniu kolejno w 1979 i 1989 roku. Od 1987 jest pracownikiem UAM. Tytuł profesora nauk o Ziemi otrzymał w 2000 roku. Jest autorem ponad 100 prac z zakresu gleboznawstwa i teledetekcji gleb, publikowanych między innymi w *Remote Sensing of Environment*, *International Journal of Remote Sensing*, *Remote Sensing Reviews*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* oraz *International Agrophysics*.

29), finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Autor dziękuje mgr Tomaszowi Gdali za przygotowanie oprogramowania umożliwiającego wykonanie niniejszej pracy oraz mgr Krzysztofowi Kuśnierkowi za wykonanie do niej rysunków.

Literatura

- Cierniewski J., Gdala T., Karnieli A., 2004, A hemispherical-directional reflectance model as a tool for understanding image distinctions between cultivated and uncultivated bare surfaces, *Remote Sensing of Environment*, 90, 505–523.
- Janza F. K., 1975, Interaction mechanisms. In: *Manual of Remote Sensing*, American Society of Photogrammetry, Virginia, Falls Church, 75–179.
- Kondratyev K. Y., 1969, *Radiacjonnyje charakteristiki atmosfery i zemnoy poverkhnosti*. Leningrad: Gidro-meteorologičeskoye Izdatelstwo (in Russian).
- Kondratyev K. Y., Fedchenko P. P., 1980, Vliyanie obrabotki na spektralnye otrazatelnye svojstva pochwy, *Pochvovedenie*, 12, 47–53 (in Russian).
- Lewis P., Barnsley M. J., 1994, Influence of the sky radiance distribution on various formulations of the Earth surface albedo. In *Proceeding 6th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, January 17–21, Val d'Isere, France, 707–715.
- Liue C. H., Hen A. J., Liu G. R., (1994, Variability of the bare soil albedo due to different solar zenith angles and atmospheric haziness, *International Journal of Remote Sensing*, 15, 2531–2542.
- Matthias A. D., Fimbres A., Sano E. E., Post D. F., Aciolly L., Batchily A. K., Ferreira L. G., 2000, Surface roughness effects on soil albedo, *Soil Science Society of America Journal*, 64, 1035–1041.
- Martonchik J. V., Bruegge, C. J., Strahler A., 2000, A review of reflectance nomenclature used in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 19, 9–20.
- Mikhaylova N. A., Orlov D. S., 1986, *Optičeskie svojstva pochv i pochvennykh komponentov*. Moskva, Nauka (in Russian).
- Obukhov A. I., Orlov D. S., 1964, Spektralnaya otrazatel'naya sposobnost' glavnejsykh tipov pochv i vozmožnost' ispol'zovaniya diffuznogo otrazeniya pri pochvennykh issledovaniyakh, *Pochvovedenie*, 28, 83–94 (in Russian).
- Pinty B., Verstraete M. M., Dickinson R. E., 1989, A physical model for predicting bidirectional reflectance over bare soil. *Remote Sensing of Environment*, 27, 273–288.
- Schaepman-Strub G., Schaepman M. E., Painter T. H., Dangel S., Martonchik J. V., 2006, Reflectance quantities in optical remote sensing – definitions and case studies, *Remote Sensing of Environment*, 103, 27–42.
- Snyder, W. C., 2002, Definition and invariance properties of structured surface BRDF, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 1032–1037.
- Wang Z., Barlage M., Zeng X., 2005, The solar zenith angle dependence of desert albedo, *Geophysical Research Letters*, 32, L05403, 1–4.