

**LABORATORYJNE POMIARY KIERUNKOWEGO ODBICIA SPEKTRALNEGO
OD POWIERZCHNI GLEB PRZY ZMIENIAJĄCEJ SIĘ ICH SZORSTKOŚCI
I OŚWIETLENIU**

**LABORATORY MEASUREMENTS OF DIRECTIONAL SPECTRAL
REFLECTANCE OF SOIL SURFACE AT VARIOUS ROUGHNESS AND
ILLUMINATION LEVELS**

Jerzy Cierniewski

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

SŁOWA KLUCZOWE: laboratoryjne pomiary, kierunkowe odbicie spektralne, gleby, szorstkość, albedo gleb

STRESZCZENIE: W 2008 roku w Zakładzie Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, w ramach projektu badawczego finansowanego przez MNiSW, zaprojektowano i wykonano goniometryczne urządzenie do pomiaru kierunkowego odbicia spektralnego od obiektów o rozmiarze kilkudziesięciu cm średnicy. Zgodnie z celem wspomnianego projektu, wykorzystano je do obliczenia albedo gleb o różnej szorstkości, trudnych do uzyskania drogą bezpośrednich pomiarów terenowych dla pełnego zakresu kąta zenitalnego Słońca. Kształt badanych powierzchni glebowych mierzono za pomocą 3-wymiarowego laserowego skanera Konica Minolta VI-910. Ustalono, że albedo badanych gleb z ich sztucznie uformowanymi powierzchniami zwiększa się wraz ze wzrostem kąta zenitalnego źródła światła. Bardziej szorstkie powierzchnie wykazują wyraźnie niższe albedo.

1. WSTĘP

Tak jak większość naturalnych powierzchni, również te glebowe nie przykryte roślinnością, uprawne i nieuprawne, zachowują się jak obiekty nielambertowkie. Odbijają padające na nie promieniowanie niejednakowo we wszystkich kierunkach. Największą zmienność odbitego promieniowania w zakresie optycznym obserwuje się w głównej płaszczyźnie słonecznej. W przypadku gleb uprawnych jego maksimum odnotowuje się w kierunku odsłonecznym, pod kątem zenitalnym zbliżonym do kąta zenitalnego Słońca, a minimum w kierunku dosłonecznym, gdy patrzy się na nie możliwie skośnie (Kimes i Sellers, 1985). Na występowania silnego odbicia również z kierunków dosłonecznych od świeżo zaoranych gleb wytworzonych z materiału związłego zwracali uwagę Irons i Smith (1990). Caulson (1966) dowiódł, że powierzchnie pustynne pokryte piaskiem gipsowym czy kwarcowym cechuje się w zakresie optycznym bardzo dużym odbiciem z kierunków dosłonecznych. Eaton i Dirmhin (1979) zaobserwowali, że również największym odbiciem z kierunków dosłonecznych cechują się gładkie zasolone gleby. Badania Shoshany (1993)

pokazują, że ostrokrawędzisty materiał pustynny z obszarów Australii ujawnia natomiast największe odbicie spektralne z kierunków odsłonecznych. Deering *et. al.*, (1990), przedstawili przykłady powierzchni pustynnych, gleb alkalicznych oraz piasków wydmy, wykazujących maksimum odbicia zarówno z kierunkach odsłonecznych, jak i dosłonecznych.

Odbicie spektralne od powierzchni gleb cechujących się tak nierównomiernym rozkładem w zakresie optycznym najlepiej może być scharakteryzowane za pomocą dwukierunkowej funkcji rozkładu odbicia BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) (Schaeppman-Strub *et. al.*, 2006). Funkcja ta zdefiniowana jest jako stosunek odbitej energii do padającej, ale tylko z jednego punktowego źródła światła z określonego kierunku. Podobnie, tylko dla jednego źródła światła definiowany jest dwukierunkowy wskaźnik odbicia BRF (Bidirectional Reflectance Factor), jako stosunek promieniowania odbitego od danej powierzchni do energii odbitej przez standardowy lambertowski wzorec bieli, gdy obie powierzchnie, badana i wzorcowa, znajdują się w tych samych warunkach oświetlenia i obserwacji. Odniesienie ilości odbitego promieniowania od badanej powierzchni do ilości promieniowania odbitego od takiego wzorca wynika z założenia, że wzorec ten wcale nie pochłania padającego promieniowania, a tylko je równomiernie odbija we wszystkich możliwych kierunkach. Obecnie jako wzorec lambertowski najczęściej wykorzystuje się Spectralon, biały matowy syntetyczny materiał, odbijający przeciętnie 98,2% promieniowania w zakresie optycznym (McCoy, 2005). Wymóg tylko jednego punktowego źródła promieniowania nie może być spełniony w warunkach pomiarów polowych w ciągu dnia. Promieniowanie bezpośrednio padające z określonego kierunku z prawie punktowego źródła światła, za jakie uznać można Słońce w warunkach bezchmurnych, uzupełniane jest bowiem promieniowaniem rozproszonym nieba docierającym z pozostałych kierunków z niezliczonej liczby wielu innych źródeł na hemisferze nieba. Ponieważ w ciągu dnia nierealne jest całkowite wyeliminowanie światła dyfuzyjnego, zaleca się aby pomiary kierunkowego odbicia odbywały się przy minimalnym oddziaływaniu światła nieba, tj. w warunkach czystego nieba przy niewielkim i stabilnym stężeniu aerozoli w atmosferze i tylko dla ograniczonego zakresu długości fali, dla którego wpływ aerozoli może być zaniedbany (Sandmaier, 2000). Kriebel (1996) uważa, że pomiary odbicia wykonywane dla powierzchni zaoranych gleb mogą już być obciążone zbyt dużym błędem, gdy odnoszą się do fali o długości mniejszej od 0,7 μm , dla której odbicie może okazać się za małe w stosunku do silnego rozproszenia w atmosferze. Zestaw danych charakteryzujących kierunkowe odbicie od danej powierzchni pozyskany przy określonym położeniu Słońca w specyficznych warunkach rozkładu rozproszonego światła nieba, zarejestrowany w jednym czasie, nie może być uzupełniany innym zestawem danych, zebranych w innym czasie w innych warunkach atmosferycznych. Niektórzy, jak Peltoniemi *et. al.*, (2007), pozbywają się wpływu atmosfery, dokonując pomiarów polowych w nocy przy zastosowaniu sztucznego punktowego źródła światła. Wymóg tylko jednego punktowego źródła promieniowania może być też spełniony w warunkach pomiarów w laboratorium, kiedy zmienność wysokościowa badanej powierzchni nie przekracza kilku-kilkunastu centymetrów. Takie laboratoryjne urządzenia do pomiaru kierunkowego odbicia spektralnego skonstruowano i wykorzystuje się we Włoszech w Joint Research Centre (Sandmeier *et. al.*, 1998), w Finlandii w Finnish Geodetic Institute (Peltoniemi *et. al.*, 2007) czy w Izraelu na Uniwersytecie w Tel-Awiiwie (Feingersh *et. al.*, 2005).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości wykorzystania laboratoryjnego urządzenia goniometrycznego, zaprojektowanego i wykonanego w Zakładzie Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb UAM do pomiarów kierunkowego odbicia spektralnego od gleb o zmieniającym się ukształtowaniu ich powierzchni i warunkach oświetlenia. Pomiary te posłużyły do ustalenia zmienności albedo gleb o różnej szorstkości ich powierzchni we funkcji kąta zenitalnego źródła światła. Opisanie tej zmienności za pomocą bezpośrednich pomiarów albedo gleb w warunkach polowych jest ograniczone w Polsce ze względu na położenie geograficzne i utrudnione przez często występujące nieodpowiednie warunki pogodowe.

2. METODYKA

Dane dla ustalenia albedo wybranych powierzchni glebowych w warunkach laboratoryjnych uzyskano za pomocą 4-kanalowego radiometru zamontowanego na goniometrycznym statywie, skonstruowanym i wykonanym w ramach projektu badawczego 2P04E03029, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (rys. 1). To goniometryczne urządzenie składa się z talerza pomiarowego i dwóch poruszających się nad nim ramion. Na jednym z nich zamontowany jest radiometr, na drugim zaś źródło światła. Ich osie, odpowiednio obserwacji i oświetlenia, wycelowane są zawsze w środek wspomnianego talerza z umieszczoną na nim badaną powierzchnią.



Rys. 1. Laboratoryjne urządzenie goniometryczne oraz 3-wymiarowy laserowy skaner Konica Minolta VI-910 wraz ze stolikiem.

Oba ramiona, zgodnie z przygotowanym wcześniej scenariuszem, zmieniając swoją kątową zenitalną i horyzontalną pozycję, umożliwiają oświetlenie badanej powierzchni z dowolnych kierunków, jak również jej obserwację przez radiometr z kierunków ograniczonych jedynie kątem zenitalnym od 0° do 75° . Ściany i sufit pomieszczenia, w którym umieszczono to urządzenie wyłożono czarną matową tkaniną zabezpieczającą przed niekontrolowanymi odbłaskami z otoczenia badanej powierzchni. Kierunkowe odbicie spektralne od badanych powierzchni ze sztucznie uformowaną powierzchnią mierzono przy kątach zenitalnych źródła światła θ_s od 0° do 80° w odstępach co 10° . Dla każdej z tych dziewięciu wartości θ_s , radiometr obserwował badane powierzchnie ze 192 różnych kierunków, zmieniając swoje położenie zenitalne co 10° w przedziale od $\theta_v=0^\circ$ do

$\theta_v=70^\circ$ i poziome (azymutalnie) co 15° od $\phi_v=0^\circ$ do $\phi_v=360^\circ$. Odbicie spektralne badano radiometrem o polu widzenia 12° z odległości 75 cm w 4 pasmach, których środki odpowiadają następującym długościom fali λ (nm): 440, 540, 650 i 850. Ponieważ kierunkowe odbicie spektralne dla powyższych λ zamierzano wyrazić za pomocą dwukierunkowego wskaźnika odbicia BRF_{λ} , dla tych samych wartości θ_s oraz θ_v i ϕ_v zgromadzono również wartości promieniowania odbitego od wzorca powierzchni lambertowskiej, jakim w tym eksperymencie był panel Spectralon firmy Labsphere.

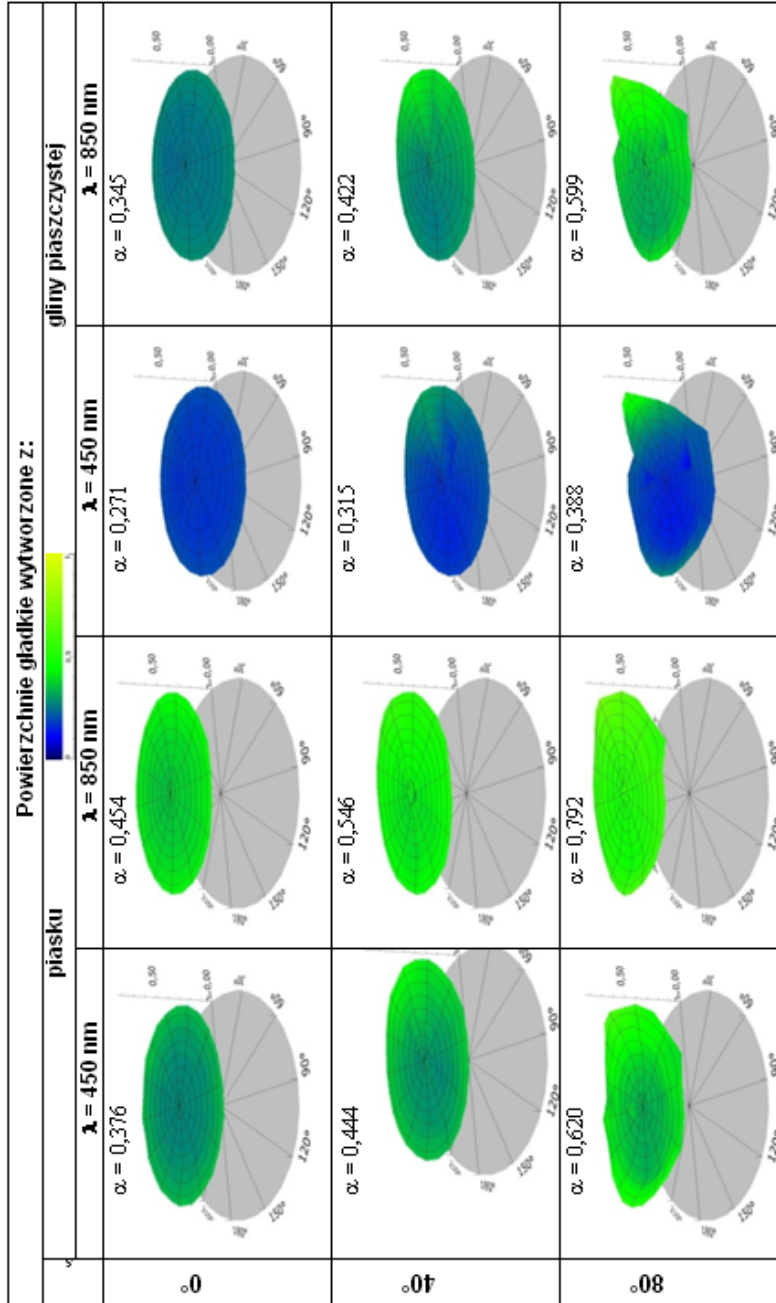
Pomiarom kierunkowego odbicia spektralnego gleb w warunkach laboratoryjnych towarzyszyły również pomiary ukształtowania ich powierzchni. Wykonywano je bezdotykowym 3-wymiarowym laserowym skanerem Konica Minolta VI-910 przy użyciu stolika z obracającą się tarczą, na której umieszczano badane powierzchnie glebowe (rys.1). Tarcza obracając się 4-krotnie w trakcie skanowania o kąt poziomy 90° , umożliwiała skanowanie badanych powierzchni z czterech kierunków.

Materiał glebowy badany spektralnie poddano analizom uziarnienia, zawartości materii organicznej i CaCO_3 , barwy w stanie powietrznie suchym wg skali Munsella oraz odczynu. Uziarnienie materiału glebowego określano metodą areometryczną Casagrande w modyfikacji Prószyńskiego wg normy PN-R-04032 z 1998 roku. Zawartość węgla organicznego ustalano metodą Walkley Black'a (Nelson, Summers, 1982) a zawartość węglanu wapnia metoda Scheiblera.

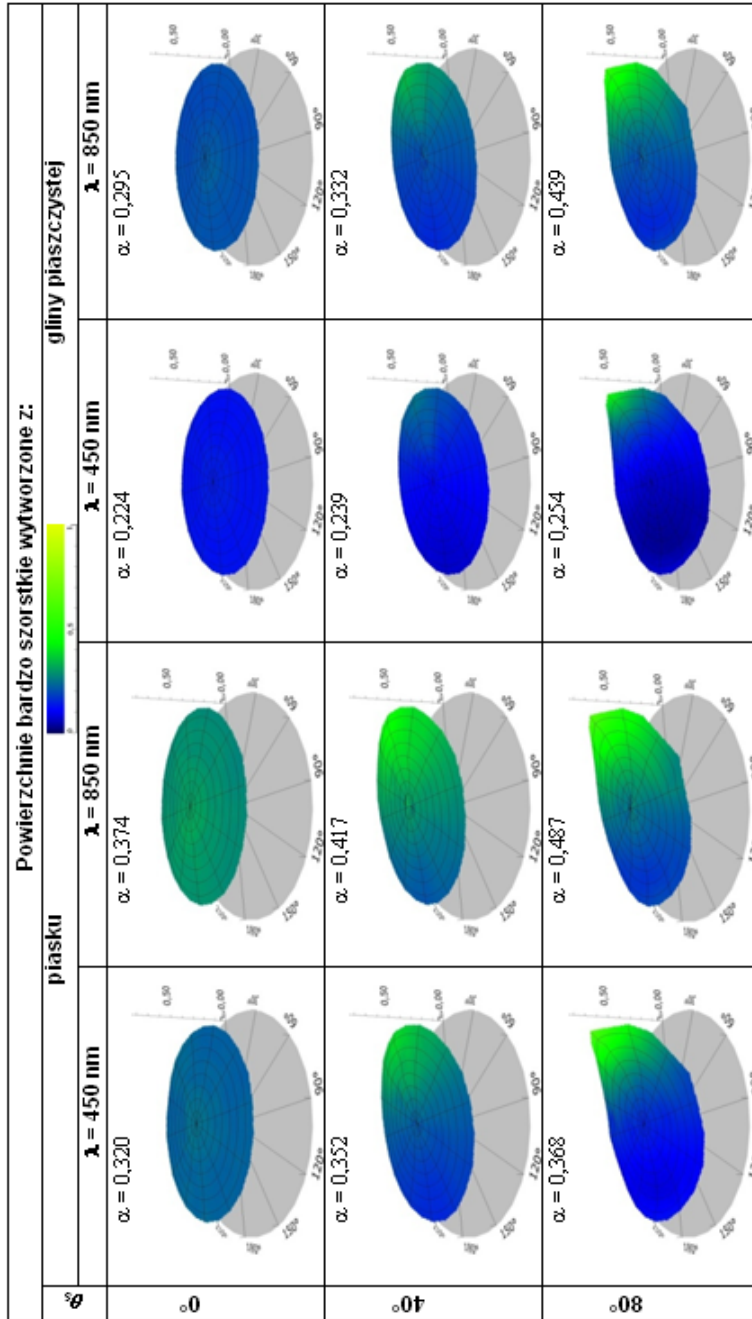
3. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

We wspomnianym wyżej projekcie przeanalizowano spektralnie 4 materiały glebowe. Właściwości dwóch z nich przedstawiono w tabeli 1. Ich powierzchnię kształtowano tak aby uzyskać dla każdego materiału od 5 do 10 różnych stanów szorstkości o losowym rozkładzie agregatów glebowych. Kształt badanych powierzchni, zmierzonych skanerem, zapisano w plikach tekstowych w postaci punktów o współrzędnych X, Y i Z. Z nich obliczono cyfrowe modele badanych powierzchni, przyjmując rozmiar 1x1mm piksela obrazu rastrowego. Obliczono dwa parametry charakteryzujące szorstkość analizowanych powierzchni: stosunek rzeczywistego areału do areału rzutowanego na płaszczyznę T_B oraz odchylenie standardowe rzędnych powierzchni S_D (Kamphorst et al., 2007). Do ich obliczeń wykorzystano moduł Geometric/Attributes/Surface Properties programu TNTmips 7.4. W tabeli 2 scharakteryzowano trzy stany szorstkości dwóch wyżej opisanych materiałów glebowych.

3-wymiarowe rozkłady kierunkowego odbicia spektralnego od badanych powierzchni, wyrażone za pomocą dwukierunkowego wskaźnika odbicia spektralnego BRF_{λ} , przedstawiono na rys. 2 i 3 we funkcji kąta poziomego obserwacji ϕ_v (opisanego liczbami wokół kołowej podstawy ich wykresu) oraz kąta zenitalnego obserwacji θ_v (zaznaczonego na płaszczyźnie wykresu za pomocą współśrodkowych okręgów w odstępach co 10°). Położenie źródła światła wyznacza kąt poziomy $\phi_s=\phi_v=0^\circ$ oraz kąt zenitalny θ_s . Prezentowane wykresy odnoszą się do długości fali λ : 450 nm i 850 nm. Rozkłady te uzyskano po wyeliminowaniu wartości mierzonej luminancji z tych kierunków, w których obserwujący radiometr „dostrzegł” zaciemnione fragmenty powierzchni gleby i spektralonu przez ramiona goniometru i głowicę radiometru.



Rys. 2. Rozkłady kierunkowego odbicia spektralnego od powierzchni gładkich, wyrażonego za pomocą wskaźnika BRF_{λ} przy różnych kątach zenitalnych źródła światła θ_s we funkcji kąta poziomego obserwacji ϕ . α wyraża wąskopasmowe albedo



Rys. 3. Rozkłady kierunkowego odbicia spektralnego od powierzchni bardzo szorstkich, wyrażonego za pomocą wskaźnika BRF_λ przy różnych kątach zenitalnych źródła światła θ_s we funkcji kąta poziomego obserwacji ϕ . α wyraża wąskopasmowe albedo

Tabela 1. Właściwości fizyczne wybranych materiałów glebowych

Materiał glebowy	zawartość frakcji (mm):			zawartość (%)		barwa gleby
	2-0,05	0,05-0,002	<0,02	C org.	CaCO ₃	
piasek	98	1,5	0,5	0,18	1,0	10YR8/4
glina piaszczysta	72	15	13	0,98	0	10YR5/3

Tabela 2. Parametry szorstkości wybranych powierzchni

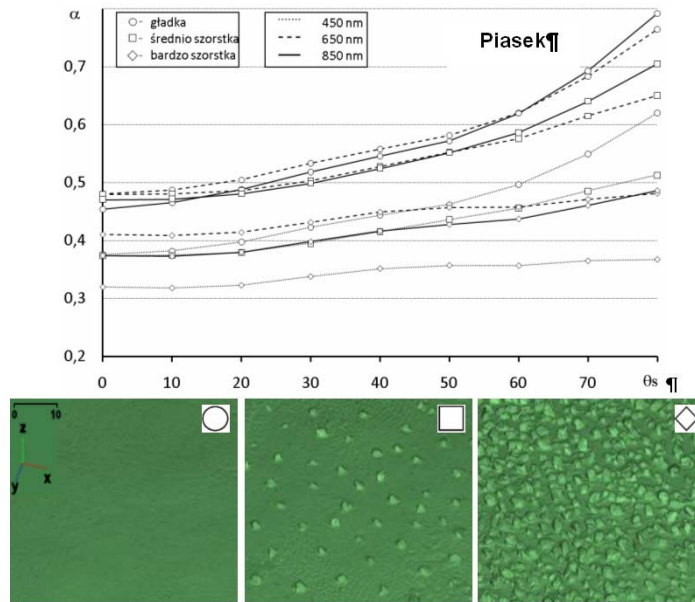
Parametr szorstkości	powierzchnie z piasku			powierzchnie z gliny piaszczystej		
	gładka	śr.szorstka	b.szorstka	gładka	śr.szorstka	b.szorstka
T_B	1,003	1,021	1,125	1,001	1,067	1,113
S_D (mm)	1,058	1,524	3,649	2,415	3,336	4,610

Prezentowane wykresy wskazują, że zmienność odbicia spektralnego od badanych powierzchni wyraźnie zwiększa się wraz ze wzrostem θ_s . Największe odbicie odnotowywane jest, gdy powierzchnie obserwowane są pod $\phi_i=0^\circ$, tj. gdy sensor „widzi” je mając źródło światła za sobą, natomiast najmniejsze, z przeciwnego kierunku. Im powierzchnie są bardziej szorstkie, cechując się niższym odbiciem spektralnym, tym wydają się wyraźnie ciemniejsze. Są tym ciemniejsze im obserwowane są przy udziale krótszych fal.

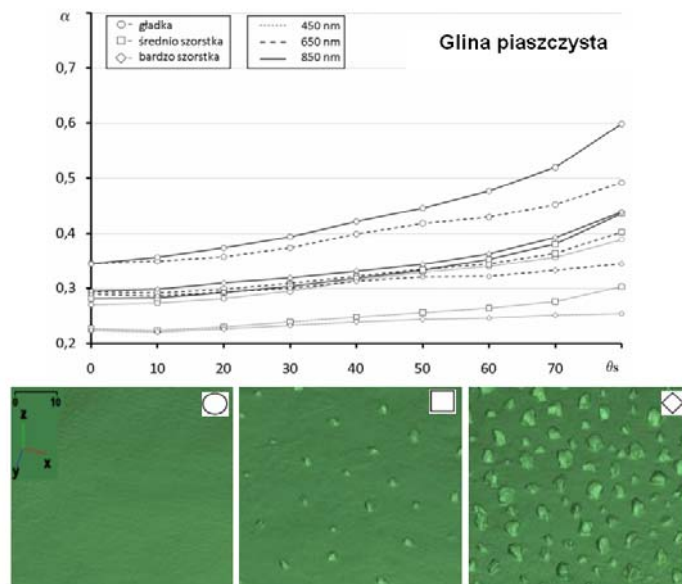
Wąskopasmowe albedo α (rys. 4 i 5) wybranych powierzchni rośnie wraz z kątem θ_s . W analizowanym przedziale θ_s od 0° do 80° najmniejszy wzrost α wykazują powierzchnie bardzo szorstkie. Wynosi on: 9% i 12% dla gliny piaszczystej (*gp*) i piasku (*p*) przy długości fali $\lambda=450\text{nm}$ i odpowiednio 17% i 30% dla *gp* i *p* przy $\lambda=850\text{nm}$. Wzrost α dla powierzchni gładkich w badanym zakresie θ_s jest znacznie większy. Dla *gp* i *p* osiąga on 43% i 68% dla $\lambda=450\text{nm}$ i odpowiednio 72% i 71% dla $\lambda=850\text{nm}$. O ile wzrost α dla powierzchni bardzo szorstkich ma bardzo jednostajny przebieg w całym badanym zakresie θ_s , to dla powierzchni gładkich staje się wyraźnie gwałtowniejszy przy $\theta_s>60^\circ$. Taki przebieg zmienności albedo badanych powierzchni we funkcji θ_s potwierdzają pomiary połowe albedo powierzchni glebowych przeprowadzone przez autora w 2008 roku na terenie Izraela (Cierniewski, 2008).

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki wskazują na przydatność urządzenia goniometrycznego skonstruowanego i wykonanego w Zakładzie Gleboznawstwa i Teledetekcji Gleb UAM do badań nad zmiennością albedo różnie ukształtowanych powierzchni we funkcji kąta zenitalnego źródła światła. Rezultaty te dowodzą, że badania nad albedem powierzchni o zmienności wysokości nie przekraczającej kilkunastu centymetrów można również prowadzić w oparciu o pomiary kierunkowego odbicia spektralnego w warunkach laboratoryjnych. Nie trzeba zatem badań albedo takich powierzchni opierać wyłącznie na pomiarach terenowych czy modelowaniu.



Rys. 4. Zmienność wąskopasmowego albedo α wybranych powierzchni z piasku we funkcji kąta zenitalnego źródła światła θ_s oraz ukształtowanie tych powierzchni.



Rys. 5. Zmienność wąskopasmowego albedo α wybranych powierzchni z gliny piaszczystej we funkcji kąta zenitalnego źródła światła θ_s oraz ukształtowanie tych powierzchni zmierzone skanerem laserowym.

5. LITERATURA

- Caulson K. L., 1966. Effect of reflection properties of natural surfaces in aerial reconnaissance. *Applied Optics*, 5, s. 905-917.
- Cierniewski J., 2008. Albedo gleby nie pokrytej roślinnością w zmieniających się warunkach jej oświetlenia a kształtu powierzchni gleby. *Raport merytoryczny z realizacji projektu badawczego nr2 P04E 030 29*, Poznań 2008, s.1-208.
- Deering D. W., Eck T. F., Otterman J., 1990. Bidirectional reflectance of selected desert surfaces and their three-parameter soil characterization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52, s. 71-90.
- Eaton F. D., Dirmhirn I., 1979. Reflected irradiance indicatrices of natural surfaces and their effect on albedo. *Applied Optics*, 1, s. 994-1003.
- Feigersh T., Dorigo W., Richter R., Ben-Dor E., 2007. A new model-driven correction factor for BRDF effects in HRS data. *Second Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*. Sobrino. Universitat de Valencia, Valencia, s. 565-576.
- Irons J. R., Smith J. A., 1990. Soil surface roughness characterization from light scattering observations. *10th Annual International Geosciences and Remote Sensing Symposium*, II, s. 1007-1010.
- Kamphorst E. C., Jetten V., Guerif J., Pitkanen J., Iversen B. V., Douglas J. T., Paz A., 2000. Predicting depressional storage from soil surface roughness. *Soil Science Society of American Journal*, 64, s. 1749-1758.
- 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, s. 205-223.
- Kriebel K. T., 1996. On the limited validity of reciprocity in measured BRDFs. *Remote Sensing of Environment*, 58, s. 52-62.
- McCoy R., 2005. Field spectroscopy. *Field Methods in Remote Sensing*. The Guilford Press, New York, London, s. 42-58.
- Nelson D. W., Sommers L. E., 1982. Total carbon and organic matter. W S. Segor (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy Monograph, no. 9* (2ed edition), ASA-SSSA, Madison, USA.
- Peltoniemi J. I., Piironen J., Näränen J., Soumalainen, Kuittinen R., Markelin L., Honkavaara E., 2007. Bidirectional reflectance spectrometry of gravel at the Sjökuilla test field. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing of Environment*, 62, s. 343-354.
- 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, s. 27-42.
- Sandmeier S., Müller C., Hosgood B., Andreoli, G., 1998. Sensitivity Analysis and Quality Assessment of Laboratory BRDF Data. <ftp://ftp.geo.unizh.ch/pub/rs12/paper/1998/RSE98>.
- Sandmaier S. R., 2000. Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers. *Remote Sensing of Environment*, 73, s. 257-269.
- Shoshany M., 1993. Roughness-reflectance relationship of bare desert terrain: An Empirical study. *Remote Sensing of Environment*, 45, s. 15-27.

PODZIĘKOWANIA

Niniejsza praca została wykonana w ramach projektu badawczego zatytułowanego „Albedo gleby nie pokrytej roślinnością w zmieniających się warunkach jej oświetlenia a kształtu powierzchni gleby” (2 P04E 030 29), finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Autor dziękuje Michałowi Roszykowi za przygotowanie do niej rysunków.

LABORATORY MEASUREMENTS OF DIRECTIONAL SPECTRAL REFLECTANCE OF SOIL SURFACE AT VARIOUS ROUGHNESS AND ILLUMINATION LEVELS

KEY WORDS: laboratory measurements, spectral directional reflectance, soils, roughness, soil albedo values

SUMMARY: In 2008, at the Department of Soil Science and Remote Sensing of Soils of Adam Mickiewicz University in Poznań, a goniometric device was designed and constructed for measurements of directional spectral reflectance from objects of a few dozen centimetres in diameter. The device was designed and made within the framework of research project supported by the Polish Ministry of Science and Higher Education. The goal of the project was to use the device for the calculation of the albedo values for soil surfaces with different roughness. The albedo values are difficult to obtain by direct field measurements for the whole range of the solar zenith angle. The shape of investigated soil surfaces was measured by means of a 3-D Konica Minolta VI-910 laser scanner. It was found that the albedo level of investigated soils with their artificially formed surfaces clearly increased with the increase of the light source zenith angle. Rougher soil surfaces demonstrated clearly lower albedo values.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Cierniewski
e-mail: ciernje@amu.edu.pl
tel. +61 8296234
fax +61 8296230