

## Szacowanie wilgotności gleb ze zdjęć mikrofalowych ERS-2

*Soil moisture assessment using ERS-2 microwave images*

Maria GRUSZCZYŃSKA, Katarzyna DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA

The paper presents the investigation carried out for agricultural area using remote sensing and field measurements. The microwave images from ERS-2 satellites covering western part of Poland taken in 1997–1999 growing seasons have been analysed and backscattering coefficient  $\sigma^{\circ}$  values have been compared to the parameters, which characterise soil-vegetation conditions. These parameters have been measured at the ground level during the satellite overpasses. The impact of ground truth variables such as soil and vegetation moisture, and vegetation biomass on microwave signals expressed by backscattering coefficient  $\sigma^{\circ}$  has been examined in order to develop the method of soil moisture assessment in agricultural areas covered with vari-

ous crops. It was found that the relationship between backscattering coefficient  $\sigma^{\circ}$  and soil moisture is strongly dependent on vegetation surface roughness and vegetation moisture. It was assumed that the roughness of vegetation might be characterised by Leaf Area Index (LAI) and vegetation moisture by phase of vegetation development. Thus to assess the soil moisture condition the roughness of vegetation covering the examined area and its growing stage should be known. The method for soil moisture assessment has been developed taking into account these assumptions and verified for data excluded from statistical analysis, and additionally for data obtained for different test site. This paper shows obtained results for main crops in Poland.

### Wstęp

W pracy wykorzystano zdjęcia mikrofalowe ERS-2.SAR.PRI przedstawiające rozkład amplitudy sygnału odbitego od badanej powierzchni w zakresie C o częstotliwości 5,3 GHz i długości fali 5,7 cm spolaryzowanej pionowo (VV). Produkty PRI (*Precision Image*) zawierają korektę systemową, zredukowane szумы i jednakową wielkość pikseli o wymiarach 12,5 × 12,5 m (Ciołkosz i in., 1994; Stankiewicz, 1998). Z wartości liczbowych przypisanych poszczególnym pikselom zdjęcia radarowego oblicza się współczynnik rozpraszania wstecznego, tzw.  $\sigma^{\circ}$  (Laur, 1992), który wyraża natężenie promieniowania mikrofalowego odbitego od badanej powierzchni. Na rycinie 1 pokazano fragment zdjęcia mikrofalowego pokrywającego badany teren w dniu 30 V 1999 r.

Współczynnik rozpraszania wstecznego,  $\sigma^{\circ}$  zależy głównie od dwóch czynników: szorstkości i wilgotności badanej powierzchni. Wpływ czynników systemowych (długość fali, typ polaryzacji, kąt wysyłania wiązki), można pominąć, gdyż parametry te są stałe dla systemu zainstalowanego na satelicie ERS (Ulaby i in., 1986; Ulaby, 1998). W celu obliczenia jednego z czynników zmiennych na podstawie współczynnika  $\sigma^{\circ}$  postanowiono ograniczyć do minimum wpływ drugiego z nich. Przy określaniu wilgotności badanych powierzchni roślinnych wpływ szorstkości na wielkość współczynnika  $\sigma^{\circ}$  można ograniczyć do minimum, wykonując to zadanie dla obszarów o jednakowej szorstkości.

W wyniku badań przeprowadzonych na rolniczym obszarze zlokalizowanym w Wielkopolsce (obszary badawcze *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski*) stwier-

dono, że szorstkość powierzchni zbóż rozpatrywana w mezoskali (Henderson, Lewis, 1998) może być wyrażona poprzez wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści, tzw. *LAI* (Leaf Area Index) (Gruszczynska, 1994; Gruszczynska, 1998; Gruszczynska, Dąbrowska-Zielińska, 1998). Wielkość ta wyraża zarówno gęstość roślin, jak i ich geometrię oraz przybiera charakterystyczne dla danej fazy rozwojowej roślin wartości. Różnice w wartościach współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$ , otrzymanych dla powierzchni o jednakowej szorstkości wyrażonej zbliżonymi wartościami *LAI* są wtedy powodowane głównie różnicami wilgotności badanego obiektu. W przypadku gleb pokrytych roślinnością, będzie to zarówno wilgotność gleby jak i wilgotność samych roślin.

W poszczególnych fazach rozwojowych zbóż (rozpatrywano fazy od krzewienia do dojrzałości pełnej) zawartość wody w roślinach jest stała. Upoważnia to do stwierdzenia, że wpływ tego czynnika na wielkość współczynnika  $\sigma^{\circ}$  będzie w poszczególnych okresach wzrostu roślin również stały. Po zapewnieniu stałych warunków szorstkości i wilgotności roślin, poprzez odpowiedni podział badanych zbóż na klasy według wartości *LAI* i wilgotności roślin, otrzymano bezpośrednią korelację pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  obliczanym ze zdjęć mikrofalowych rejestrowanych przez system radarowy SAR satelity ERS. Otrzymane algorytmy zostały sprawdzone na danych, losowo wyłączonych z analiz statystycznych, a także danych otrzymanych dla obszaru nie objętego badaniami.

## Badania terenowe

Wybrany do badań obszar zajmuje część rolniczej powierzchni Wielkopolski pomiędzy 52° a 52°20' szerokości geograficznej północnej oraz pomiędzy 16°05' a 16°25' długości geograficznej wschodniej. Do badań szczegółowych wybrane zostały dwa podobszary: jeden zlokalizowany w okolicy Gościeszyna (ryc. 1), drugi w okolicy Grodziska Wielkopolskiego (ryc. 2), leżące na płaskim terenie rolniczym o średniej wysokości 70 m n.p.m. — Gościeszyn i 75 m n.p.m. — Grodzisk Wielkopolski.

Badany teren jest, jak na warunki polskie, obszarem ciepłym, o najniższych w Polsce opadach — średnio 500 mm w skali roku. Cechą charakterystyczną jest również to, że wiosna jest bardziej sucha niż jesień. Obszar badawczy pokrywają głównie grunty orne znajdujące się na piaskach: słabo gliniastych, gliniastych lekkich i luźnych (*Mapa glebowo-rolnicza IUNG*, PTG, 1989; Kuźnicki i in., 1979; Mocek i in., 1997). Na terenie tym uprawia się głównie zboża: pszenicę, pszenżyto, jęczmień, żyto, owies, kukurydzę, rośliny okopowe: buraki cukrowe i pastewne oraz ziemniaki, a z roślin oleistych: rzepak.

Badania terenowe prowadzono w latach 1997–1999 od maja do sierpnia w czasie przelotu satelity ERS-2 nad obszarem badawczym. Pomiary parametrów gle-



Rys. 1. Zdjęcie ERS-2.SAR.PRI z zaznaczonymi punktami pomiarowymi na obszarze badawczym Gościeszyn.

Fig. 1. ERS-2.SAR.PRI image overlaid with measurement points at the Gościeszyn test site.



Rys. 2. Zdjęcie ERS-2.SAR.PRI z zaznaczonymi punktami pomiarowymi na obszarze badawczym Grodzisk Wielkopolski.

Fig. 2. ERS-2.SAR.PRI image overlaid with measurement points at the Grodzisk Wielkopolski test site.

bowo-roślinnych wykonywano wokół wybranych punktów znajdujących się na gruntach ornych obsianych zbożami. Punkty reprezentowały obszar jednorodny pod względem szorstkości badanej powierzchni roślinnej. Pomiary dotyczyły: wilgotności objętościowej gleby (*WG* [%]), powierzchni projekcyjnej liści (*LAI*, [ $m^2 m^{-2}$ ]), biomasy świeżej (*Bw* [ $gm^{-2}$ ]) oraz procentowej zawartości wody w roślinach (*WR* [%]).

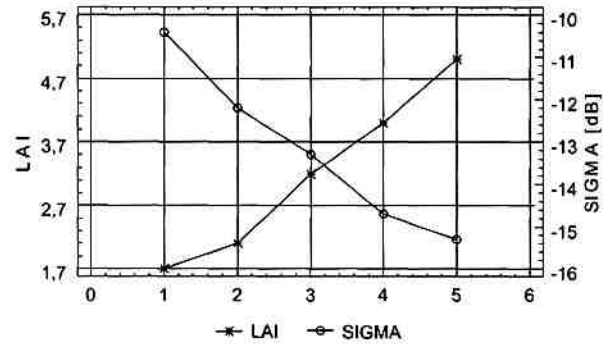
Pomiary wilgotności objętościowej gleby wykonywane były w profilu 0–15 cm metodą reflektometryczną za pomocą instrumentu TRIME-FM. Pomiary *LAI* wykonywane były instrumentem LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Oznaczenia biomasy świeżej (*Bw*) i procentowej zawartości wody w roślinach (*WR*) wykonywane były w laboratorium na podstawie prób zebranych w terenie z powierzchni 1  $m^2$ . W pracy wykorzystano również pomiary wykonane dodatkowo w dniach 30 VI 1998 i 20 VII 1999 na polu testowym *Gostyń*, leżącym na południe od obszaru badawczego. Celem tych pomiarów było sprawdzenie dokładności wypracowanych algorytmów. Jest to również teren płaski,

o średniej wysokości 115 m n.p.m. Obszar ten zajmują gleby pseudobielicowe utworzone z piasków gliniastych lekkich i gleby brunatne kwaśne utworzone z piasków gliniastych mocnych (Mapa glebowo-rolnicza..., 1989; Mocek, 1997).

### Szorstkowość badanej powierzchni

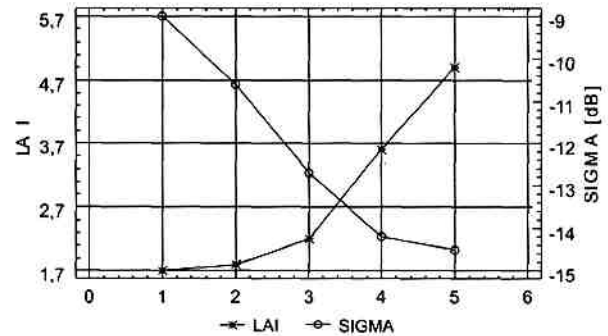
W okresie gwałtownego wzrostu wartości LAI, który zaczyna się pod koniec fazy strzelania w źdźbło i trwa do fazy zapełniania się kłosów ziarnem (maj-czerwiec), powierzchnia gleby jest przykryta przez rośliny, które osiągają swoją największą biomasę. Górna powierzchnia roślin staje się jednolita, o niewielkiej szorstkości mezoskalowej. Wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  są w tym czasie najmniejsze, gdyż padające na powierzchnię roślin promieniowanie mikrofalowe ulega częściowo lustrzanemu odbiciu, a ta część, która wnika w głąb roślin, podlega silnemu rozpraszaniu i tłumieniu. Natomiast przy niewielkich wartościach LAI, które występują w początkowych i końcowych fazach rozwojowych zbóż, wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  są największe. Jest to związane z dużą szorstkością powierzchni roślinnej (fazy początkowe — gleba częściowo przykryta roślinami, nierównomierny rozwój roślin, fazy końcowe — obsychanie roślin, wyłożenia), na którą pada promieniowanie mikrofalowe. Wtedy też tłumienie promieniowania mikrofalowego jest najmniejsze. W miarę wzrostu LAI wartości  $\sigma^{\circ}$  maleją, osiągając wartości minimalne przy maksymalnych wartościach LAI — ryciny 3 i 4. Wykresy przedstawiają dwa przypadki, pierwszy odzwierciedla wpływ wskaźnika LAI na wartość współczynnika  $\sigma^{\circ}$  przy stałej wilgotności objętościowej gleby wynoszącej około 5% i stałej wilgotności roślin wynoszącej 80–90%, drugi przy stałej wilgotności gleby wynoszącej ok. 15% i stałej wilgotności roślin równej 75–85%. Na osi X znajdują się punkty, dla których wykonano w terenie pomiary wskaźnika LAI, wilgotności gleby i zawartości wody w roślinach oraz obliczono ze zdjęć satelitarnych ERS-2.SAR.PRI wartości współczynnika  $\sigma^{\circ}$ .

Przy zachowaniu stałej wilgotności gleby i stałej wilgotności roślin na wartość współczynnika  $\sigma^{\circ}$  wpływa już głównie szorstkość badanej powierzchni. Zatem zmiana wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  wywołana zmianą wartości LAI świadczy o tym, że wskaźnik ten wyraża szorstkość badanej powierzchni roślinnej. W celu klasyfikacji szorstkości badanej powierzchni opracowano wykres przedstawiający średnie wartości LAI w rozpatrywanych fazach rozwojowych (ryc. 5). Wykres ten powstał w wyniku przeprowadzenia jednokierunkowej analizy wariancji, w której czynnikiem klasyfikacyjnym wartości LAI była faza rozwoju zbóż (Podgórski, 1995). Kierując się wynikami przeprowadzonej analizy statystycznej dokonano podziału wartości LAI na następujące trzy klasy: LAI < 2, LAI 2–3, LAI > 3. Wyznaczone klasy są również klasami szorstkości badanej powierzchni roślinnej.



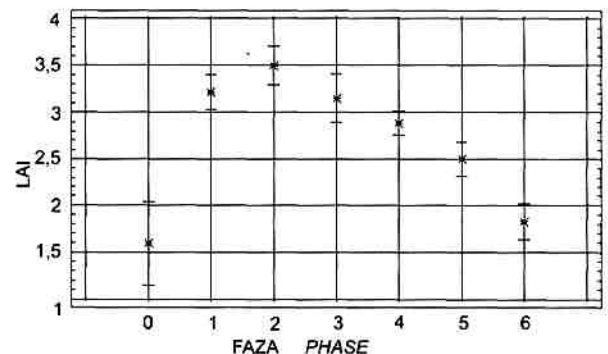
Ryc. 3. Wpływ LAI na wartość  $\sigma^{\circ}$  przy wilgotności gleby 5% i wilgotności roślin 80–90%.

Fig. 3. Influence of LAI on backscattering coefficient  $\sigma^{\circ}$  for soil moisture equal to 5% and vegetation moisture from 80 to 90%.



Ryc. 4. Wpływ LAI na wartość  $\sigma^{\circ}$  przy wilgotności gleby 15% i wilgotności roślin 72–84%.

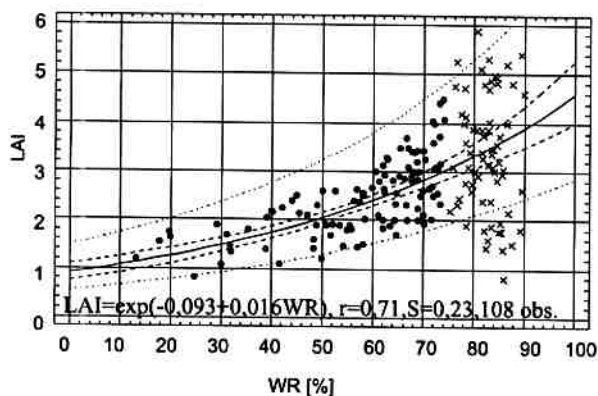
Fig. 4. Influence of LAI on backscattering coefficient  $\sigma^{\circ}$  for soil moisture equal to 15% and vegetation moisture from 72 to 84%.



Ryc. 5. Wartości średnie LAI dla zbóż: 0 – krzewienie, 1 – strzelanie w źdźbło, 2 – kłoszenie, 3 – zapełnianie ziarnem, 4 – dojrzałość mleczna, 5 – dojrzałość woskowa, 6 – dojrzałość pełna.  
Fig. 5. Means plot of LAI for cereals. 0 – tillering, 1 – jointing, 2 – heading, 3 – graining, 4 – milk rape, 5 – dough, 6 – maturity.

## Zawartość wody w roślinach

W pierwszej z zarejestrowanych na zdjęciach satelitarnych faz rozwojowych zbóż (krzewienie) rośliny miały już dużą wilgotność (>80%) przy małych wartościach LAI (średnio 1,6). Zawartość wody w roślinach wzrosła niewiele w następnej fazie rozwojowej zbóż (strzelanie w źdźbło) przy jednoczesnym dużym wzroście LAI. Od fazy kłoszenia do początku fazy zapełniania ziarnem zawartość wody w roślinach zaczęła wolno spadać do wartości niewiele niższych od tych zaobserwowanych w fazie krzewienia, przy ciągłym jeszcze wzroście LAI. Można zatem przyjąć, że intensywny przyrost wartości LAI odbywał się praktycznie przy stałej zawartości wody w roślinach. Ilość wody w zbożach zaczęła intensywnie spadać dopiero począwszy od fazy dojrzałości mleczonej, podczas gdy spadek wartości LAI rozpoczął się wcześniej. Pod koniec fazy dojrzenia zbóż zarówno ilość wody w roślinach jak i wartości LAI były już niskie. Najsilniejszą zależność pomiędzy wilgotnością roślin a wartościami LAI dla zbóż otrzymano dla wilgotności roślin <75% przy zastosowaniu modelu wykładniczego. Zależność tę przedstawia rycina 6. Jak widać na rysunku przy stałej wilgotności roślin wynoszącej 80–90% występuje silne zróżnicowanie wartości LAI. Klasy wilgotności roślin zostały wyróżnione na podstawie podziału na fazy rozwojowe zbóż, gdyż zawartość wody w roślinach jest z nią związana.

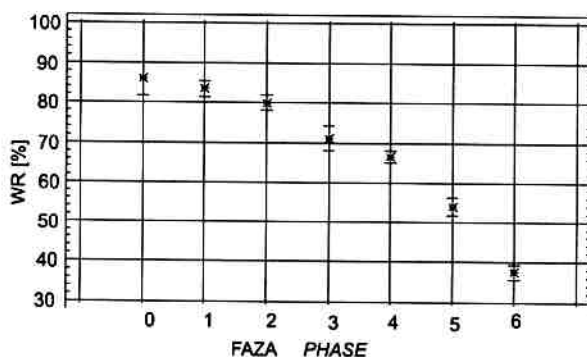


Ryc. 6. Zależność pomiędzy LAI a wilgotnością roślin WR (przy WR < 75%) dla zbóż.

Fig. 6. Relation between LAI and vegetation moisture WR (for WR > 75% for cereals).

Rycina 7 przedstawia wynik graficzny jednokierunkowej analizy wariancji, w której czynnikiem klasyfikacyjnym wilgotności roślin (WR) była faza rozwojowa zbóż. Przeprowadzona analiza wariancji pozwoliła na właściwy wybór klas wilgotności roślin. Klasa pierwsza obejmowała fazy od krzewienia do kłoszenia charakteryzujące się dużą wilgotnością roślin, tj. średnio >80; klasa druga — fazy od zapełniania ziarnem do dojrzałości mleczonej o wilgotności średnio 65–75%;

klasa trzecia — fazy od dojrzałości woskowej do pełnej tj. średnio <55%. W obrębie każdej klasy wilgotności roślin znajdowały się wyróżnione wcześniej klasy LAI. Utworzenie takich klas, w których danym wartościom wilgotności roślin przypisane są odpowiednie wartości LAI, pozwoli na zapewnienie stałych warunków szorstkości badanych łąnów zbóż. W ramach tak przygotowanego podziału danych szukano relacji pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$ .



Rys. 7. Wartości średnie procentowej zawartości wody w roślinach (WR) otrzymane dla zbóż: 0 – krzewienie, 1 – strzelanie w źdźbło, 2 – kłoszenie, 3 – zapełnianie ziarnem, 4 – dojrzałość mlecza, 5 – dojrzałość woskowa, 6 – dojrzałość pełna.

Fig. 7. Means plot of percentage of vegetation moisture (WR) for cereals: 0 – tillering, 1 – jointing, 2 – heading, 3 – graining, 4 – milk rape, 5 – dough, 6 – maturity.

## Zależność pomiędzy współczynnikiem $\sigma^{\circ}$ i wilgotnością gleby

Analizę statystyczną danych naziemnych (wilgotność objętościowa gleby) i satelitarnych (współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$ ) przeprowadzono przy wykorzystaniu programu komputerowego STATGRAPHIC-PLUS. Wyniki przeprowadzonych analiz regresji pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  i wilgotnością gleby dla wydzielonych klas wilgotności i szorstkości są przedstawione w tabeli 1. Otrzymane współczynniki korelacji świadczą o wysokim stopniu współzależności obu badanych wielkości. Zbudowane modele mogą być zatem wykorzystane do przewidywania wilgotności gleby na podstawie wartości współczynnika  $\sigma^{\circ}$  otrzymanych ze zdjęć mikrofalowych zarejestrowanych w zakresie C i polaryzacji pionowej (VV).

Jak widać z tabeli 1, współczynniki korelacji są wysokie. Najniższe otrzymano dla drugiej klasy wilgotności roślin i trzeciej klasy szorstkości powierzchni roślinnej oraz trzeciej klasy wilgotności roślin i pierwszej klasy szorstkości powierzchni roślinnej. Należy zaznaczyć, że w tych fazach wpływ zawartości wody w glebie na rozwój zbóż nie jest już tak istotny jak w poprzednich fazach. Rośliny wymagają więcej

Tabela 1. Wyniki analizy regresji pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem  $\sigma^\circ$  dla zbóż  
*Results of regression analysis between soil moisture and backscattering coefficient  $\sigma^\circ$  for cereals*

Klasy wilgotności roślin (fazy) <i>Vegetation moisture classes (phase)</i>	Klasy szorstkości (LAI) <i>Roughness classes (LAI)</i>	<i>r</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	Równanie <i>Equation</i>
0-2 od fazy krzewienia do fazy kłoszenia <i>from tillering to heading</i>	<2	0,82	3,6	8	WG = 36,61 + 2,54 $\sigma^\circ$
	2-3	0,82	2,7	11	WG = 46,53 + 3,17 $\sigma^\circ$
	>3	0,81	3,7	40	WG = 65,27 + 4,18 $\sigma^\circ$
3-4 od fazy zawiązywania ziarna do fazy dojrzałości mleczonej <i>from graining to milk rape</i>	< 2	0,84	2,0	12	WG = 26,11 + 1,47 $\sigma^\circ$
	2-3	0,81	3,8	32	WG = 37,0 + 2,1 $\sigma^\circ$
	>3	0,76	4,8	33	WG = 44,11 + 2,5 $\sigma^\circ$
5-6 od fazy dojrzałości woskowej do fazy dojrzałości pełnej <i>from dough to maturity</i>	< 2	0,74	2,6	14	WG = 32,46 + 1,66 $\sigma^\circ$
	2-3	0,81	3,2	36	WG = 45,72 + 2,85 $\sigma^\circ$
	>3	0,84	3,8	20	WG = 61,04 + 4,48 $\sigma^\circ$

*r* – współczynnik korelacji, *S* – odchylenie standardowe, *O* – liczba obserwacji,  $\sigma^\circ$  – współczynnik rozpraszania wstecznego [dB], WG – wilgotność gleby [% obj.].

*r* – correlation coefficient, *S* – standard deviation, *O* – number of observation,  $\sigma^\circ$  – backscattering coefficient [dB], WG – soil moisture.

wody w miarę rozwoju i po osiągnięciu maksimum, ich zapotrzebowanie na wodę maleje i znika w okresie pełnej dojrzałości (Dubas, 1997). Dla okresu największego zapotrzebowania zbóż na wodę otrzymano wysokie zależności.

### Sprawdzenie dokładności wyprowadzonych algorytmów

Zbudowane modele predykcji wilgotności gleby pod zbożami na podstawie zdjęć mikrofalowych ERS-2 zo-

stały poddane weryfikacji. W tym celu zamieszczone w tabeli 1 równania wykorzystano do obliczenia wilgotności gleby i porównania tych wartości z wartościami zmierzonymi w terenie. Pomiar wilgotności gleby przeprowadzone na obszarze badawczym w roku 1999, użyte do sprawdzenia dokładności wyprowadzonych algorytmów, zostały wyłączone losowo z analiz statystycznych. Dodatkowo wykorzystano pomiary wykonane w dniach 30 VI 1998 i 20 VII 1999 na polu testowym *Gostyń* znajdującym się na południe od badanego obszaru.

W tabeli 2 znajdują się dane niezbędne do zastoso-

Tabela 2. Wyniki dokładności wyprowadzonych algorytmów — obszary badawcze *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski*  
*Results of algorithm's verification — test sites Gościeszyn and Grodzisk Wielkopolski*

Data <i>Date</i>	Uprawa <i>Crop type</i>	Faza <i>Phase</i>	WG	LAI	$\sigma^\circ$	WG1	$\Delta$
11.05.99	jęczmień jary	0	17,7	2,6	-9,87	15,24	-2,46
11.05.99	pszenica jara	0	14,3	1,6	-8,96	13,85	-0,45
30.05.99	owies jary	1	12,1	5,7	-12,81	11,72	-0,38
30.05.99	pszenica jara	1	7,3	4,7	-13,75	7,80	0,50
30.05.99	pszenica ozima	1	12,4	5,1	-12,54	12,85	0,45
30.05.99	pszenica ozima	2	15,0	3,1	-12,19	14,32	-0,68
30.05.99	pszenica ozima	2	12,3	4,5	-12,97	11,06	-1,24
4.07.99	owies jary	3	10,2	4,3	-12,8	12,11	1,91
15.06.99	pszenica ozima	4	12,4	3,21	-12,24	13,51	1,11
4.07.99	pszenica jara	4	16,3	2,9	-8,34	19,49	3,19
4.07.99	pszenica jara	5	18,3	2,63	-7,64	23,95	5,65
4.07.99	jęczmień jary	5	15,1	3,07	-8,61	19,88	4,78
4.07.99	pszenica ozima	5	17,7	1,89	-7,85	19,43	1,73
20.07.99	pszenica ozima	6	15,5	2,32	-9,79	17,82	2,32
20.07.99	pszenica ozima	6	13,2	2,93	-11,84	11,98	-1,22

WG – zmierzona wilgotność gleby [% obj.], LAI – zmierzony wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści [bezwymiarowe],  $\sigma^\circ$  – współczynnik rozpraszania wstecznego obliczony ze zdjęć ERS-2.SAR [dB], WG1 – wilgotność gleby obliczona według równania z tabeli 1,  $\Delta$  – różnica pomiędzy WG1 i WG [% obj.].

WG – measured soil moisture [% vol.], LAI – measured leaf area index [undimensional],  $\sigma^\circ$  – backscattering coefficient calculated from ERS-2.SAR images [dB], WG1 – soil moisture calculated using algorithms from table 1,  $\Delta$  – difference between WG1 and WG [% vol.].

Tabela 3. Wyniki dokładności wyprowadzonych algorytmów — pole testowe *Gostyń*  
*Results of algorithm's verification — Gostyń test site*

Data Date	Uprawa Crop type	Faza Phase	WG	LAI	$\sigma^0$	WG1	$\Delta$
30.06.98	owies jary	4	12,7	2,5	-12,8	10,12	-2,58
30.06.98	jęczmień jary	4	24,2	3,2	-8,33	23,29	-0,91
30.06.98	pszenica jara	4	25,8	3,8	-10,12	18,81	-6,99
30.06.98	pszenżyto ozime	5	19,4	2,3	-8,33	18,63	-0,77
30.06.98	pszenżyto ozime	5	20,6	2,86	-7,09	20,69	0,09
20.07.99	pszenica jara	5	13,6	1,69	-11,19	13,88	0,28
30.06.98	żyto	6	18,3	2,21	-10,69	15,25	-3,05
20.07.99	jęczmień ozimy	6	17,3	2,22	-10,42	16,02	-1,28
20.07.99	pszenica ozima	6	22,7	3,22	-8,53	20,27	-2,43
20.07.99	żyto	6	26,3	3,38	-7,32	26,05	-0,25
20.07.99	pszenżyto ozime	6	23,2	3,8	-7,96	22,99	-0,21

WG – zmierzona wilgotność gleby [% obj.], LAI – zmierzony wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści [bezwymiarowe],  $\sigma^0$  – współczynnik rozpraszania wstecznego obliczony ze zdjęć ERS-2.SAR [dB], WG1 – wilgotność gleby obliczona według równania z tabeli 1,  $\Delta$  – różnica pomiędzy WG1 i WG [% obj.].  
 WG – measured soil moisture [% vol.], LAI – measured leaf area index [undimensional],  $\sigma^0$  – backscattering coefficient calculated from ERS-2.SAR images [dB], WG1 – soil moisture calculated using algorithms from table 1,  $\Delta$  – difference between WG1 and WG [% vol.].

wania proponowanych modeli dla obszarów *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski* (faza, LAI,  $\sigma^0$ ), wyniki obliczeń, różnice pomiędzy wartościami wilgotności gleby obliczonymi i zmierzonymi w terenie oraz błąd względny w procentach. W tabeli 3 zamieszczono analogiczne dane dla pola testowego *Gostyń*. W ten sposób postanowiono sprawdzić dokładność zbudowanych modeli w stosunku do wartości zmierzonych na obszarze nie uwzględnionym w analizach statystycznych.

Średni błąd obliczeń wyniósł 12% dla obszarów badawczych *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski* i 8,6% dla pola testowego *Gostyń*. Zbudowane modele w przeważającej części zawyżały wyniki dla obszaru badawczego i zaniżały dla pola testowego *Gostyń*. Różnice te nie były jednak znaczące, a wartości wilgotności gleby zmierzone w terenie i obliczone ze zdjęć ERS-2.SAR znajdowały się w tych samych warunkach wilgotnościowych gleby.

## Wnioski

Otrzymane na podstawie badań wyniki upoważniają do stwierdzenia, że wilgotność gleby pod zbożami może być obliczana na podstawie współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^0$  otrzymywanego ze zdjęć mikrofalowych w paśmie C przy polaryzacji VV. Obecnie takie zdjęcia można otrzymać z satelity ERS-2 lub z satelity ENVISAT, który został umieszczony na orbicie w 2002 r.

Zastosowanie wyprowadzonych równań wymaga znajomości fazy rozwojowej zbóż i wartości wskaźnika LAI oraz zdjęcia mikrofalowego zarejestrowanego w paśmie C przy polaryzacji VV. Wartości wskaźnika LAI dla każdej fazy rozwojowej zbóż można określić

na podstawie zdjęć satelitarnych wykonywanych w optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego (Dąbrowska-Zielińska, 1995) lub przyjmując średnią wartość z ryciny 5. Faza rozwojowa zbóż jest możliwa do określenia przy znajomości daty rozpoczęcia wegetacji na wiosnę na danym obszarze na podstawie danych publikowanych przez IMGW.

## Literatura

- Ciołkosz A., Dąbrowska-Zielińska K., Stankiewicz K., Gruszczyńska M., Zawila Niedźwiecki T., 1994, *Opracowanie metody interpretacji mikrofalowych zdjęć satelitarnych*, Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego Nr 2 2150 92 03p/21.
- Dąbrowska-Zielińska K., 1995, *Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej tąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA, PAN, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Prace Geograficzne, 165.*
- Dubas A., Gładysiak St., 1997, *Szczegółowa uprawa roślin rolniczych*, Wyd. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu.
- Gruszczyńska M., 1994, *Zastosowanie zdjęć satelitarnych ERS-1 SAR w badaniach rolniczych*, Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji, 24, 53–57.
- Gruszczyńska M., 1998, *Zastosowanie zdjęć mikrofalowych z satelitów ERS-1 i ERS-2 do określania wilgotności gleb pod zbożami*, Prace IGiK, XLV, 97, 117–136.
- Gruszczyńska M., Dąbrowska-Zielińska K., 1998, *Application of microwave images from European Remote Sensing Satellites (ERS-1/2) for soil moisture estimates*, Journal of Water and Land Development, 2, 7–18.
- Henderson F.M., Lewis A.J., 1998, *Principles and Applications of Imaging Radar*, Manual of Remote Sensing, Third Edition, 2, R.A. Ryerson, John Wiley and Sons (eds), N.Y.
- Kuźnicki F., Białousz St., Skłodowski P., 1979, *Podstawy glebo-*

znawstwa z elementami kartografii i ochrony gleb, PWN, Warszawa.

Laur H., 1992, *Derivation of backscattering coefficient  $s^0$  in ERS-1 SAR PRI products*, ESA Bulletin, Issue 1, Rev. 0.

Mapa glebowo-rolnicza w skali 1:100 000, 1989, IUNG, Puławy.

Mocek A., Drzymała St., Maszner P., 1997, *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań.

Podgórski J., 1995, *Statystyka z komputerem*, „MIKOM”, Warszawa.

Stankiewicz K., 1998, *Metoda przetwarzania mikrofalowych zdjęć satelitarnych terenów o urozmaiconej rzeźbie z wykorzystaniem*

*numerycznego modelu terenu*, Prace IGiK, XLV, 97, 7-80.

Ulaby F. T., Moore M. K., Fung A. K., 1986, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, 3, Artech House, Norwood, MA.

Ulaby F. T., 1998, *SAR biophysical retrievals: lesson learned and challenges to overcome*, Proc. of the Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, The Netherlands, 19-25.



Dr inż. Maria Gruszczynska ukończyła studia na Wydziale Melioracji Wodnych Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w 1976 r. Od 1976 r. pracuje w Instytucie Geodezji i Kartografii w Zakładzie Teledetekcji-OPOLiS. Zajmuje się wykorzystaniem technik teledetekcji satelitarnej w rolnictwie i ochronie środowiska. Od 2003 r. jest ekspertem UE powołanym do ewaluacji projektów FP6 w dziedzinie Aeronautics and Space. Instytut Geodezji i Kartografii, ul. Modzelewskiego 27, 02-679 Warszawa, tel. 329 19 75, e-mail: Maria.Gruszczynska@igik.edu.pl



Dr hab., prof. IGiK Katarzyna Dąbrowska-Zielińska jest kierownikiem Zakładu Teledetekcji (OPOLiS) w Instytucie Geodezji i Kartografii. Tytuł doktora filozofii otrzymała na Australijskim Narodowym Uniwersytecie w Canberze, gdzie prowadziła badania nad zastosowaniem zdjęć NOAA do lasów eukaliptusowych. W OPOLiS zajmuje się prognozowaniem plonów oraz określaniem warunków wzrostu roślin z zastosowaniem informacji pochodzących z sensorów optycznych i mikrofalowych. Instytut Geodezji i Kartografii, ul. Jasna 2/4, 00-950 Warszawa; e-mail: kasia@igik.edu.pl