

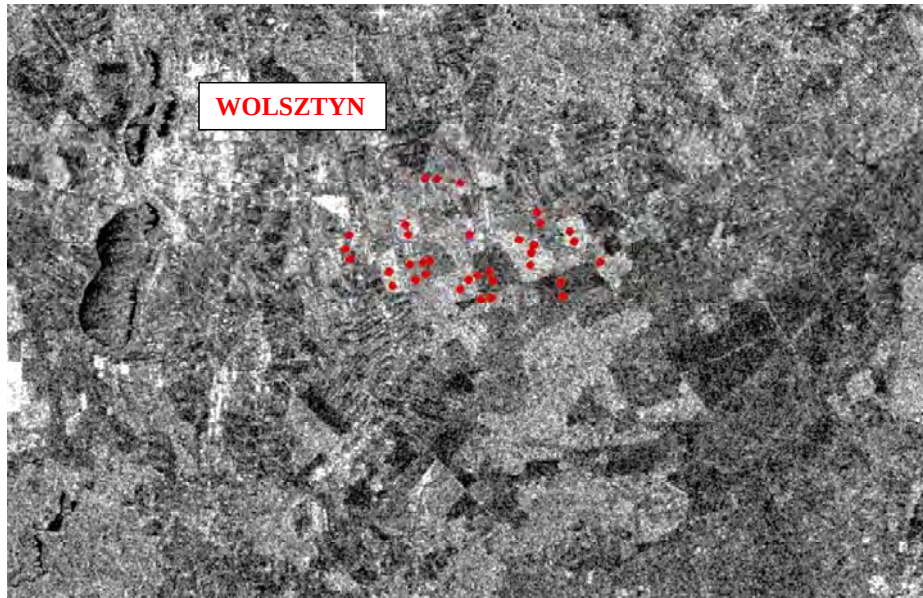
MARIA GRUSZCZYŃSKA

**SZACOWANIE WILGOTNOŚCI GLEBY POD ZBOŻAMI ZE ZDJĘĆ
RADAROWYCH ERS-2.SAR REJESTROWANYCH
W PAŚMIE C (VV)**

ZARYS TREŚCI: W artykule przedstawiono opracowaną przez autorkę metodę szacowania wilgotności gleby pod zbożami z danych radarowych zarejestrowanych przez satelitę ERS-2. Prezentowany artykuł jest fragmentem rozprawy doktorskiej autorki.

1. WSTĘP

Zdjęcia mikrofalowe SAR otrzymywane z satelity ERS-2 przedstawiają rozkład amplitudy sygnału odbitego od badanej powierzchni w zakresie C o częstotliwości 5,3 GHz i długości fali 5,7 cm spolaryzowanej pionowo (VV). Obrazowany pas powierzchni Ziemi znajduje się po prawej stronie orbity w odległości około 300 km od śladu rzutu toru lotu na Ziemi. Średnia wysokość orbity wynosi 785 km, a średnia odległość między satelitą a powierzchnią Ziemi dla środka zdjęcia wynosi około 850 km. Obrazy mikrofalowe wykorzystane w niniejszej pracy są tzw. produktami PRI (Precision Image), po wprowadzeniu korekcji systemowych, ze zredukowanymi szumami i jednakową wielkością pikseli o wymiarach 12,5x12,5 m (Ciołkosz A. i inni 1994, Stankiewicz K. 1998). Z wartości liczbowych przypisanych poszczególnym pikselom zdjęcia radarowego oblicza się współczynnik rozpraszania wstecznego tzw. σ^0 (Laur H. 1992), który wyraża natężenie promieniowania mikrofalowego odbitego od badanej powierzchni. Wszystkie parametry niezbędne do obliczenia współczynnika σ^0 są umieszczane w nagłówku obrazu cyfrowego. Na rysunku 1 pokazano fragment zdjęcia mikrofalowego pokrywającego badany teren.



Rys.1. Fragment zdjęcia ERS-2.SAR.PRI z zaznaczonymi punktami pomiarowymi na polu testowym Gościeszyn

Współczynnik rozpraszania wstecznego σ° zależy głównie od dwóch czynników (pomijając wpływ parametrów związanych z typem systemu radarowego, np. długość fali, typ polaryzacji, kąt wysyłania wiązki, które to parametry są stałe dla systemu zainstalowanego na satelicie ERS) – szorstkości i wilgotności badanej powierzchni (Ulaby F.T. i inni 1986). Zatem, aby móc jeden z tych czynników obliczać na podstawie współczynnika σ° , postanowiono ograniczyć do minimum wpływ drugiego z nich.

Przy określaniu wilgotności badanych powierzchni roślinnych wpływ szorstkości na wielkość współczynnika σ° można ograniczyć do minimum, wykonując to zadanie dla obszarów o jednakowej szorstkości. W wyniku badań przeprowadzonych na rolniczym obszarze zlokalizowanym w okolicach Grodziska Wielkopolskiego i Gościeszyna stwierdzono, że szorstkość powierzchni zbóż rozpatrywana w mezoskali (Henderson F.M., Lewis A.J. 1998) może być wyrażona poprzez wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści, tzw. LAI (Leaf Area Index) (Gruszczyńska M. 1994, Gruszczyńska M. i Dąbrowska-Zielińska K. 1998b). 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 σ° , otrzymanych dla powierzchni o jednakowej szorstkości wyrażonej zbliżonymi wartościami LAI, są wtedy powodowane głównie różnicami w wilgotności badanego obiektu. W przypadku gleb pokrytych roślinnością, będzie to zarówno wilgotność gleby, jak i wilgotność

samych roślin. Pozostaje zatem problem ograniczenia wpływu drugiego czynnika. W wyniku badań przeprowadzonych na obszarze badawczym w latach 1992–1999 otrzymano, że w poszczególnych rozpatrywanych fazach rozwojowych zbóż (od fazy krzewienia do fazy dojrzałości pełnej) zawartość wody w roślinach jest stała. Upoważnia to do stwierdzenia, że wpływ tego czynnika na wielkość współczynnika σ° 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 σ° , 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. Wyniki sprawdzenia dokładności opracowanej metody są zadowalające – średni błąd szacowania wilgotności gleby pod zbożami wyniósł 10%.

2. STAN BADAŃ NAD OKREŚLANIEM WILGOTNOŚCI GLEBY POKRYTEJ ROŚLINNOŚCIĄ ZE ZDJĘĆ RADAROWYCH REJESTROWANYCH W PAŃMIE C

Obecnie stosowane metody oznaczania wilgotności gleby są punktowe, pracochłonne i kosztowne (Gruszczyńska M. 1998a, Roszak Wł. 1997). W związku z tym są one nieprzydatne do wykonywania pomiarów na dużym obszarze i z dużą częstotliwością, odpowiadającą czasowej zmienności wilgotności gleby w ciągu okresu wegetacyjnego. Metody teledetekcji pozwalają na określenie przestrzennego rozkładu tego parametru na dużym obszarze, w krótkim czasie i za względnie niską cenę (Idso S.B., Jackson R.D. 1969; Byrne G.F. i inni 1981; Jackson R.D. 1983; Lo C.P. 1986; Moran M.S. i inni 1994; Olędzki J.R. 1993; Schmugge T. 1990). Wśród wielu zakresów promieniowania elektromagnetycznego dostępnych do prowadzenia teledetekcyjnych obserwacji powierzchni Ziemi mikrofałe posiadają największy potencjał do określania wilgotności gleby, ponieważ wnikają w jej głąb (Ulaby F.T. 1982 i 1998). Poza tym promieniowanie mikrofalowe przenika przez chmury, co jest szczególnie ważne w przypadku wykonywania pomiarów wielokrotnych w ściśle określonych terminach okresu wegetacyjnego. Jednak podstawową cechą, dzięki której możliwe jest stosowanie zakresu mikrofal do oceny wilgotności gleby, jest reakcja tego promieniowania na wielkość stałej dielektrycznej gleby, która jest w ścisłym związku z ilością zawartej w niej wody. Stała dielektryczna gleb mokrych może być dziesięć razy większa od stałej dielektrycznej gleb suchych. Właściwość ta spowodowała zainteresowanie naukowców badaniami wilgotności gleby za pomocą mikrofal już od momentu udostępnienia techniki radarowej do celów cywilnych (Gruszczyńska M. 1999).

Pionierem badań wilgotności gleby za pomocą aktywnych mikrofal jest Fawwaz T. Ulaby. Jego pierwsze badania (Ulaby F.T. 1974; Cihlar J. i Ulaby F.T. 1974) dotyczyły gleb nie porośniętych roślinnością, lecz o różnej szorstkości, a wykonane były za pomocą systemu radarowego FM-CW (10 zakresów od 4 do 8 GHz, 8 kątów padania wiązki od 0° do 70° oraz wszystkie typy polaryzacji fali) zamontowanego na maszcie. Analizowany zakres wilgotności gleby wynosił 4–36% (w % wagowych). Badania wykazały, że na zależność pomiędzy odbieranym sygnałem radarowym a wilgotnością gleby ma wpływ szorstkość powierzchni, zastosowany zakres promieniowania oraz kąt padania wiązki mikrofalowej. Niezależnie od zastosowanych parametrów systemu radarowego, Ulaby otrzymał zależność wprost proporcjonalną pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem σ^0 . Badania gleb nie pokrytych roślinnością były kontynuowane pod kierownictwem Ulaby'ego w roku 1975 przy zastosowaniu tego samego systemu radarowego (Ulaby F.T., Batlivala P.P. 1976a; Ulaby F.T. i inni 1978a). Autorzy stwierdzili, że odpowiedni dobór parametrów systemu pozwoli na zminimalizowanie wpływu szorstkości badanej powierzchni na odbierany sygnał. Zaproponowano następującą konfigurację systemu SAR: zakres – 4GHz, kąt padania wiązki – 0°–15°, polaryzacja podłużna – HH lub VV. Późniejsze badania prowadzone przez Ulaby'ego (Ulaby F.T., Batlivala P.P. 1976b) zweryfikowały te zalecenia (zakres – 4.25, kąt 0°–17°, polaryzacja – HH). Ulaby wraz z innymi naukowcami zajmował się również badaniem wilgotności gleb nie pokrytych roślinnością, lecz zróżnicowanych pod względem uziarnienia (Ulaby F.T. i inni 1978a; Dobson M.C., Ulaby F.T. 1978) oraz wilgotnością gleb pod różnymi roślinami (Ulaby F.T. i inni 1978b). Badacze nie stwierdzili znaczącego wpływu uziarnienia gleby na zależność pomiędzy wilgotnością gleby wyrażoną w procentach pojemności polowej i współczynnikiem wstecznego rozpraszania. W przypadku gleb pokrytych roślinnością (kukurydza, soja, proso afrykańskie, pszenica), przy optymalnej konfiguracji systemu radarowego, za którą uznali zastosowanie zakresu poniżej 6 GHz i kąta padania wiązki mniejszego od 20°, otrzymali dla warstwy gleby 0–5 cm silną zależność, o współczynniku korelacji $r = 0,92$. Tak wysoki współczynnik korelacji wynikał według nich z braku wpływu na rejestrowany sygnał radarowy szorstkości gleby przy całkowitym pokryciu jej przez rośliny. Wyniki otrzymane przez Ulaby'ego i jego współpracowników są przyjmowane przez naukowców na całym świecie jako pewniki.

W roku 1987 naukowcy z Francji (Beaudoin A. i inni 1990) przeprowadzili w Kanadzie (Quebec) badania wilgotności gleb pod różnymi uprawami, stosując system radarowy SAR pracujący w paśmie C przy polaryzacji HH lub VV i kącie padania wiązki 10°–70°. System ten zainstalowany był na pokładzie samolotu. W czasie lotu wykonywane były w terenie pomiary wilgotności, uziarnienia i ciężaru właściwego gleb w warstwie 0–5 cm. Badania były symulacją przyszłego kanadyjskiego satelity RADARSAT oraz europejskiego ERS-1. Potwierdziły one wpływ szorstkości badanej powierzchni na zależność pomiędzy współczynnikiem σ^0 a wilgotnością

gleby. Autorzy uznali, że wpływ ten jest najmniejszy przy małych kątach padania wiązki radarowej, a takie przewidziano w systemach instalowanych na satelitach RADARSAT i ERS-1. Szacowanie wilgotności gleby bezpośrednio ze współczynnika rozpraszania wstecznego uznali za możliwe, wiązali jednak większe nadzieje z systemami radarowymi o wielu konfiguracjach zakresów, polaryzacji czy kątów padania wiązki mikrofalowej.

Inne francuskie badania o nazwie Orgeval'89 (Benallegue M. i inni 1995) zostały przeprowadzone w regionie rolniczym Brie w celu określenia możliwości stosowania danych lotniczych SAR oraz przyszłych danych satelitarnych ERS-1.SAR do szacowania wilgotności gleby i szorstkości badanych powierzchni. Wykorzystano tu system radarowy FM-CW ERASME skonstruowany w CRPE (Centre de Recherches en Physique de l'Environnement), który został umieszczony na pokładzie helikoptera. Radar pracował w dwóch pasmach – C i X, z możliwością generowania fali spolaryzowanej poziomo lub pionowo (HH, VV) pod kątem od 15° do 30°, do wyboru. Na wybranych 12 polach testowych wykonane zostały pomiary wilgotności gleby w warstwie 0–5 cm, szorstkości (dwumetrowe profile z dokładnością 0,5 cm co 1 cm), LAI oraz zawartości wody w roślinach. Stosując konfigurację systemu radarowego zbliżoną do tej, która miała być zainstalowana na satelicie ERS-1, autorzy nie otrzymali bezpośredniej zależności współczynnika rozpraszania wstecznego σ^0 od wilgotności gleby. Tłumaczyli to nieuwzględnieniem wpływu szorstkości na rejestrowany sygnał radarowy. Jednak otrzymane wyniki eksperymentu (spadek wilgotności, jaki zanotowano w ciągu okresu wegetacyjnego i towarzyszący mu spadek wartości współczynnika σ^0) pozwoliły autorom na stwierdzenie, że przyszłe dane z satelity ERS-1 mogą być stosowane do monitorowania uwilgotnienia gleby pokrytej roślinnością.

Jedne z pierwszych zdjęć radarowych, otrzymanych z satelity ERS-1 w roku 1991, stały się przedmiotem badań naukowców angielskich (Wooding M.G. i inni 1992). W trakcie przelotów satelity nad obszarem badawczym znajdującym się w Romney Marsh (Kent) wykonali oni na 3 stanowiskach szczegółowe pomiary wilgotności i szorstkości gleb nie pokrytych roślinnością oraz gleb porośniętych łąkami. Otrzymali oni wysoką korelację między wartościami współczynnika σ^0 a wilgotnością (w % obj. w zakresie 10–40%) w przypadku gleb nie pokrytych roślinnością (nieco mniejszą dla gleb o dużej szorstkości powierzchni) oraz brak zależności dla gleb porośniętych roślinnością trawiastą. Stwierdzili, że wilgotność gleby pokrytej łąkami ma niewielki wpływ na rejestrowany sygnał radarowy. Autorzy nie uwzględnili wpływu szorstkości powierzchni roślinnej na rejestrowany sygnał. Eksperyment został powtórzony w roku następnym (Wooding M.G. i inni 1993) na różnych uprawach rolnych. Współczynnik σ^0 obliczany był jako wartość średnia dla całego badanego pola. Autorzy nie otrzymali istotnych zależności, z wyjątkiem jednego stanowiska pszenicy ozimej na glebach torfowych cechujących się dużą wilgotnością, tj. od 70% do 120% (w % wagowych).

Naukowcy z Uniwersytetu w Monachium (Demircan A. i inni 1992) wykorzystali jedno z pierwszych zdjęć radarowych z satelity ERS-1 do badania wilgotności gleby pokrytej roślinnością. W okresie wegetacyjnym 1991 roku na polu testowym usytuowanym w dolinie Renu wykonali pomiary wilgotności gleby pod kukurydzą (0–2 cm) oraz LAI, biomasy i wysokości roślin. Ze zdjęć radarowych typu SLC (Single Look Complex) obliczyli wartości natężenia promieniowania radarowego jako średnie z całego badanego pola. Pomiedzy wartościami natężenia promieniowania radarowego a wilgotnością gleby pod kukurydzą otrzymali zależność liniową wprost proporcjonalną o współczynniku korelacji $r = 0,89$. Nie znaleźli natomiast istotnego związku natężenia promieniowania radarowego z biomasą i LAI. Inni naukowcy z Uniwersytetu w Monachium (Rombach M., Mauser W. 1997) zajmowali się badaniem wilgotności gleby pod kukurydzą, jęczmieniem, owsem oraz pod roślinnością trawiastą. W czasie sezonów wegetacyjnych od 1991 do 1994 roku (w trakcie przelotu satelity ERS-1) wykonywali na 30 wybranych polach pomiary wilgotności gleby oraz innych parametrów glebowych jak porowatość, ciężar objętościowy, krzywa pF, skład granulometryczny. Mierzyli wysokość roślin, LAI, biomasę i ich gęstość, notowali też ich aktualną fazę fenologiczną. W celu szacowania wilgotności gleby z danych radarowych postanowili wyeliminować wpływ na rejestrowany sygnał innych czynników, takich jak: typ gleby, stan rozwojowy roślin, wilgotność roślin, szorstkość badanej powierzchni. W związku z tym analizowali oddzielnie zależności pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° a każdym z tych parametrów. Sygnały radarowe korygowali na podstawie znajomości danych naziemnych i ich wkładu w wartość tego sygnału. W celu wyeliminowania wpływu typu gleby autorzy zamienili wartości wilgotności gleby na wartości stałej dielektrycznej. Dla gleb mineralnych zastosowali algorytm opracowany przez Hallikainena (Hallikainen M.T. i inni 1985), a dla gleb organicznych funkcję opracowaną przez Rotha (Roth C.H. i inni 1992). Pomiedzy wartościami współczynnika rozpraszania wstecznego σ° a wartościami stałej dielektrycznej otrzymali zależność nieliniową. Na podstawie tej zależności i empirycznego modelu symulacyjnego (Michigan Microwave Canopy Scattering Model) (Ulaby F.T. i inni 1990), opracowanego dla konfiguracji systemu radarowego satelity ERS, szacowali szorstkość każdej z badanych klas użytkowania ziemi oddzielnie na podstawie pomiaru tzw. RMS, tj. odchylenia standardowego wysokości od płaskiej powierzchni referencyjnej. W celu wyeliminowania jej wpływu na sygnał radarowy wartości współczynników rozpraszania wstecznego σ° otrzymane przy danej szorstkości na podstawie modelu zostały zamienione na wartości odpowiadające tzw. nieefektywnym klasom szorstkości cechującym się $RMS > 2,4$ cm. Dopiero dla tak poprawionych wartości współczynników σ° przeprowadzili analizę ich zależności z wartościami wilgotności gleby. Uzyskany ze wszystkich pomiarów współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,88$. Zależność ta posłużyła autorom do wykonania mapy rozkładu wilgotności gleby na badanym obszarze rolniczym. Autorzy zastrzegają, że proponowana przez

nich metoda może być stosowana tylko do zbadanych przez nich typów upraw oraz przy znajomości ich fazy rozwojowej, biomasy, typu gleby i jej uziarnienia.

W roku 1993 naukowcy z Kanady (Soulis E.D. i inni 1995) w ramach eksperymentu Grand River przeprowadzonego w Ontario zajmowali się badaniami nad zastosowaniem zdjęć radarowych ERS-1 do szacowania wilgotności gleby w obrębie takich użytków zielonych, jak łąki, parki, place zabaw i pola golfowe. Pomiar wilgotności objętościowej gleb wykształconych na utworach typu glina ilasta i ił zostały wykonane na wybranych stanowiskach trawiastych, o wysokości roślin nie przekraczającej 25 cm. Bezpośrednia korelacja między współczynnikiem σ^0 a wilgotnością gleby była istotna tylko dla wartości wilgotności mniejszych od 30%, a otrzymany współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,85$. Brak korelacji dla gleb wilgotniejszych autorzy tłumaczą zjawiskiem lustrzanego odbicia fal radarowych od niektórych powierzchni nadmiernie przesyconych wodą lub różnicą między głębokością pobrania próbki (0–5 cm) a głębokością penetracji fali radarowej. Wierzchnia warstwa gleb, zwłaszcza gliniastych i ilastych, jest bardziej wyschnięta od warstw głębszych. Inaczej jest w przypadku gleb piaszczystych, na których w Polsce uprawia się zboża. Wahań wilgotności warstwy powierzchniowej odczuwane są w całym profilu glebowym.

Badacze niemieccy z Instytutu Hydrologicznego w Koblenz (Portmann F., Mendel H.G. 1997) również wykorzystali zdjęcia satelitarne ERS-2.SAR do badania wilgotności gleby nie pokrytej roślinnością. Otrzymali wysoki współczynnik korelacji liniowej między współczynnikiem σ^0 a wilgotnością gleby ($r = 0,84$). Dla danych otrzymanych dla terenu pokrytego roślinnością współczynnik korelacji spadł do wartości równej 0,45. Uznali oni, że w tym przypadku niezbędne jest stosowanie empirycznych modeli wzrostu roślin, których to modeli jednak nie zaproponowali.

Naukowcy z INRA (Prevot L. i inni 1998) w ramach eksperymentu Alpilles-ReSeDA przeprowadzonego w okresie od października 1996 roku do listopada 1997 roku na obszarze rolniczym w okolicy Avignon (Francja) zajmowali się badaniami pszenicy ozimej na podstawie zdjęć radarowych ERS i RADARSAT. Do bezpośredniego modelowania sygnału radarowego zastosowali półempiryczny model stworzony przez Attema i Ulaby (Attema E.P., Ulaby F.T. 1978), znany powszechnie pod nazwą *water-cloud*. W modelu uwzględniony jest wpływ zawartości wody w roślinach oraz wpływ szorstkości i wilgotności gleby. Współczynniki występujące przy wymienionych zmiennych zostały określone na podstawie najlepszych korelacji, jakie uzyskano pomiędzy pomiarami terenowymi a wartościami współczynników rozpraszania wstecznego σ^0 . Najmniejsze różnice pomiędzy wartościami współczynnika σ^0 obliczonymi z modelu i ze zdjęć radarowych (0,94 dB) otrzymano po zastosowaniu danych otrzymanych z systemu RADARSAT. Dla danych z ERS błąd wyniósł 2,21 dB. Otrzymane błędy autorzy tłumaczą różnicami zakresów, jakie wystąpiły pomiędzy pomiarami terenowymi wziętymi do kalibracji modelu a pomiarami zastosowanymi do jego weryfikacji.

Naukowcy z USA (Cravey R.L. i inni 1998) przeprowadzili w południowej części Wielkich Równin w Oklahomie (SGP97 Experiment) eksperyment dotyczący między innymi zastosowania danych radarowych z satelity ERS-2 do badań wilgotności gleby pokrytej roślinnością (pszenica ozima, użytki zielone). Badane pola dzielono na cztery kategorie, w zależności od pokrycia roślinnego: ściernisko po pszenicy ozimej, pszenica ozima w fazie krzewienia, pastwiska o rzadkim pokryciu roślinnym ($LAI < 2$) oraz pastwiska o gęstym pokryciu roślinnym ($LAI > 2$). Dla każdej kategorii oddzielnie zbadano korelację pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° i wilgotnością gleby. Otrzymano zależność wprost proporcjonalną o modelu liniowym, najsilniejszą dla pastwisk o gęstym pokryciu roślinnym – współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,84$. Najsłabszą zależność otrzymano dla pól pszenicy znajdującej się w fazie krzewienia. W tym stadium rozwojowym badana powierzchnia cechuje się największą szorstkością, której wpływu na sygnał radarowy autorzy nie uwzględnili.

Z zamieszczonego przeglądu literatury można zauważyć, że problem szacowania wilgotności gleby pod zbożami na podstawie współczynnika rozpraszania wstecznego σ° był tematem prac badawczych podejmowanych przez wielu naukowców na całym świecie. Jeśli chodzi o zakres C (5,3 GHz) promieniowania mikrofalowego, spolaryzowanego pionowo (VV), w jakim pracuje system radarowy zainstalowany na satelitach ERS, problem ten nie został jeszcze rozwiązany. Do tej pory przy określaniu wilgotności gleby pokrytej roślinnością nie opracowano bezpośredniej metody eliminacji wpływu szorstkości i ilości wody zawartej w biomase na sygnał radarowy. Proponowane modele symulacyjne, np. *water-cloud* i Michigan Microwave Canopy Scattering Model, stosowane są do pojedynczych typów upraw zbożowych i wymagają szczegółowych danych terenowych. Zboża są podstawową uprawą i zajmują około 70% ogólnej powierzchni wszystkich zasiewów w Polsce. Istnieje więc potrzeba opracowania nowej metody szacowania wilgotności gleby dla dużych obszarów, możliwej do stosowania niezależnie od warunków pogodowych. W artykule przedstawiona jest propozycja takiej metody.

3. BADANIA TERENOWE

3.1. Opis obszaru badawczego

Wybrany obszar badawczy położony jest w zasięgu mezoregionu Dolina Środkowej Obry, wchodzącego w skład makroregionu Pradolina Warciańsko-Obrzańska, należącego do krainy Pojezierza Południowo-Bałtyckiego (Kondracki J. 1978). Geneza tego terenu związana jest z odpływem wód polodowcowych zlodowacenia bałtyckiego. Obszar badawczy zajmuje część rolniczej powierzchni Wielkopolski pomiędzy 52° a $52^{\circ}20'$ szerokości geograficznej północnej oraz pomiędzy $16^{\circ}05'$ a $16^{\circ}25'$ długości geograficznej wschodniej. Na obszarze tym wybrane zostały dwa pola testowe do badań

szczegółowych, jeden zlokalizowany w okolicy Gościeszyna (rys. 1), drugi w okolicy Grodziska Wielkopolskiego (rys. 2). Wybrane obszary leżą na płaskim terenie rolniczym o średniej wysokości 70 m n.p.m. – pole testowe *Gościeszyn* i 75 m n.p.m. – pole testowe *Grodzisk Wielkopolski* (rys. 3).

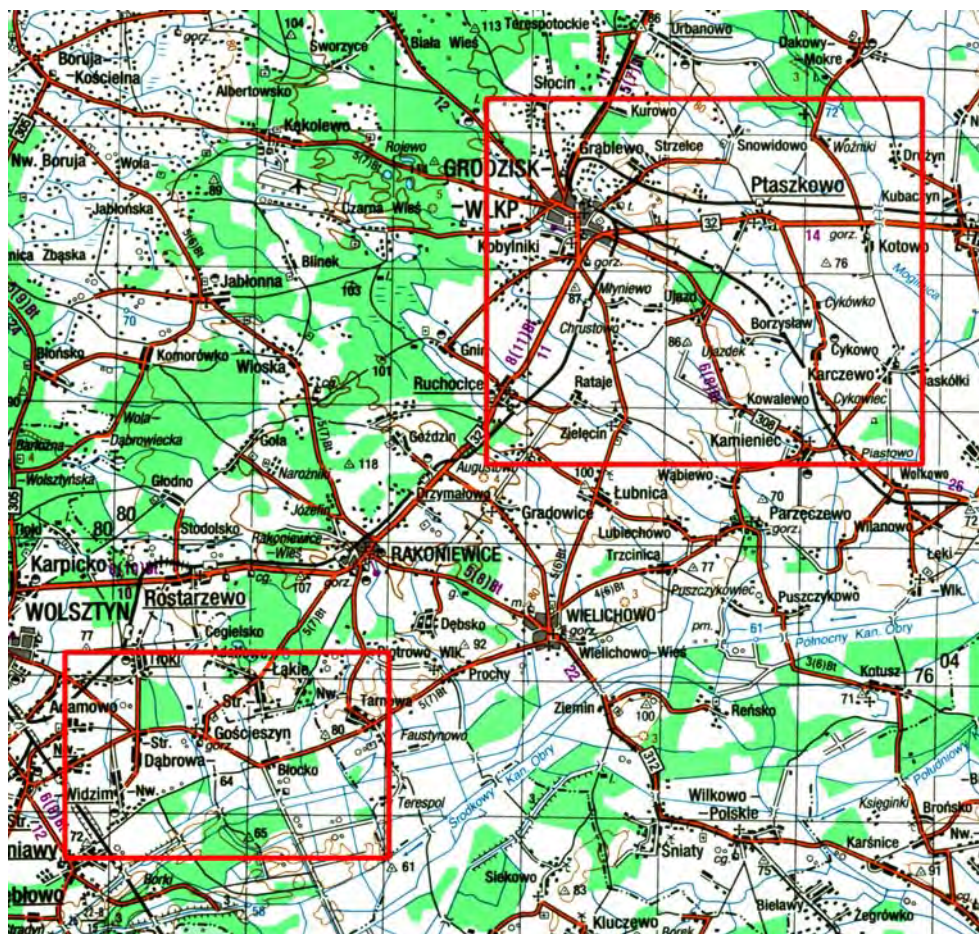


Rys 2. Zdjęcie mikrofalowe ERS-2.SAR.PRI z zaznaczonymi punktami pomiarowymi na polu testowym Grodzisk Wielkopolski

Badany teren jest, jak na warunki polskie, obszarem ciepłym, w okresie wczesnego lata jest tu jednak więcej dni z przymrozkami niż w innych rejonach kraju, co tłumaczy się mniejszą zawartością pary wodnej w powietrzu, spowodowaną najniższymi w Polsce opadami – średnio 500 mm w skali roku. Cechą charakterystyczną jest również to, że wiosna jest bardziej sucha niż jesień. Długość okresu wegetacyjnego waha się od 220 do 230 dni w roku, co stawia ten rejon w czołówce obszarów Polski pod tym względem. Średnie plony zbóż są tu wyższe niż na innych obszarach w Polsce. Obszar, na którym znajdują się pola testowe uważany jest za główny spichlerz Polski.

Obszar badawczy pokrywają głównie grunty orne znajdujące się na następujących typach i podtypach gleb, należących w przeważającej części do IV klasy bonitacyjnej (czyli gleb średniej jakości): gleby bielcowe lub płowe, gleby brunatne kwaśne lub gleby rdzawe oraz gleby brunatne właściwe. Głównymi rodzajami i gatunkami gleb, które wytworzyły się na badanym terenie, są piaski słabo gliniaste, piaski gliniaste lekkie i piaski luźne (Mapa glebowo-rolnicza IUNG 1989; Kuźnicki F. i inni 1979; Mocek A. i inni 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.



Rys. 3. Lokalizacja pól testowych na obszarze badawczym

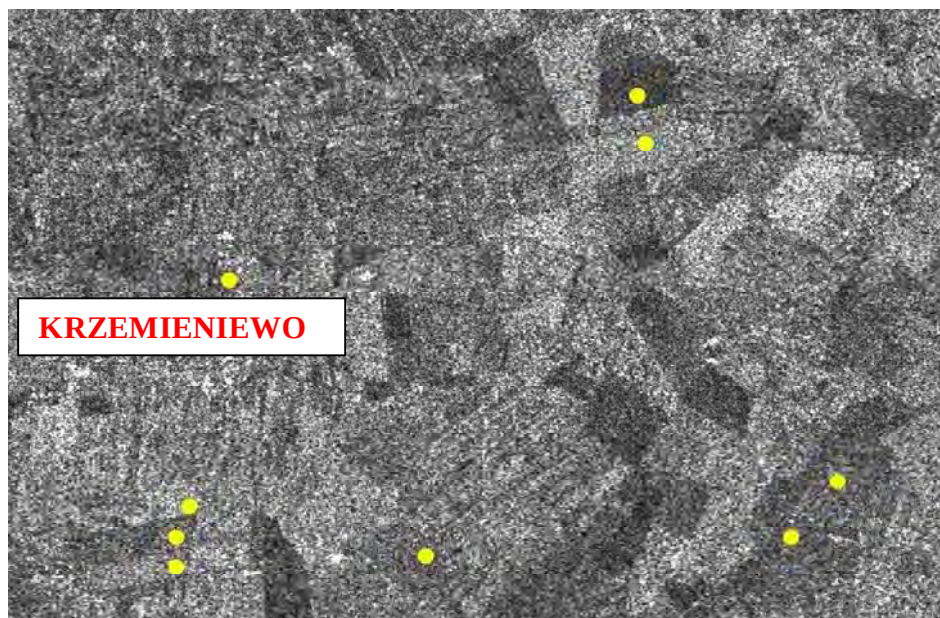
3.2. Pomiary przeprowadzone na obszarze badawczym

W celu opracowania metody szacowania wilgotności gleby z danych ERS.SAR, w latach 1992–1999 od maja do sierpnia prowadzono badania terenowe, których terminy były związane z przelotem satelity nad obszarem badawczym. Badania wykonywano wokół wybranych punktów znajdujących się na gruntach ornych. Punkty reprezentowały obszar jednorodny pod względem

szorstkości badanej powierzchni roślinnej. Do wykonania prac zostały wykorzystane pomiary parametrów glebowo-roślinnych przeprowadzone na polach obsianych zbożami.

W latach 1992–1999 wykonywane były pomiary powierzchni projekcyjnej liści (LAI, [m^2m^{-2}]), biomasy świeżej (Bw [gm^{-2}]) oraz procentowej zawartości wody w roślinach (WR [%]). 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 Farm Obra na podstawie prób zebranych w terenie z powierzchni 1 m^2 . W latach 1997–1999 prowadzone były pomiary wilgotności objętościowej gleby [%] w profilu 0–15 cm metodą reflektometryczną za pomocą instrumentu TRIME-FM. Pomiary te wykonywane były w kilku miejscach wokół punktu pomiarowego, a następnie uśredniane do jednej wartości reprezentującej powierzchnię badanego łanu zboża. W pracy wykorzystano również pomiary wilgotności gleby i LAI wykonane w dniach 30 czerwca 1998 roku i 20 lipca 1999 roku na polu testowym *Gostyń*, leżącym na wschód od miasta Gostyń. Celem wykonania tych pomiarów było sprawdzenie dokładności wyprowadzonych algorytmów. Lokalizacja punktów pomiarowych na polu testowym *Gostyń* pokazana jest na rysunku 4, przedstawiającym zdjęcie radarowe ERS-2.SAR wykonane w dniu 20 lipca 1999 roku. Na rysunku 5 pokazana jest mapa topograficzna pola testowego *Gostyń*. 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 IUNG, 1989; Mocek A. 1997).

Oprócz wymienionych prac terenowych, notowana była aktualna faza rozwojowa zbóż i ich kondycja (wysokość, gęstość, wigor), a także warunki pogodowe w dniach rejestracji satelitarnej. W ciągu okresu badawczego pierwsze pomiary terenowe przeprowadzano najczęściej wtedy, gdy zboża ozime wkraczały już w fazę kłoszenia, a zboża jare znajdowały się w fazie krzewienia lub strzelania w źdźbło. Wynikało to z terminu rejestracji zdjęć satelitarnych ERS w danym roku. Wyniki wykonanych pomiarów terenowych zostały wprowadzone do baz danych typu EXCEL i STATGRAPHIC-PLUS zawierających również dane satelitarne, w których wykonywano wszystkie analizy statystyczne.



Rys. 4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na polu testowym Gostyni na tle zdjęcia mikrofalowego ERS-2.SAR PRI wykonanego w dniu 20 lipca 1999 roku



Rys. 5. Lokalizacja punktów pomiarowych na polu testowym Gostyni

3.3. Charakterystyka warunków agrometeorologicznych wegetacji zboż na obszarze badawczym w latach wykonywania pomiarów wilgotności gleby (1997–1999)

Rok 1997 cechował się występowaniem znacznych anomalii pogodowych i bardzo zróżnicowanymi warunkami agrometeorologicznymi, często niekorzystnymi dla rolnictwa. Bardzo ciepła słoneczna pogoda w drugiej dekadzie maja powodowała szybkie wyczerpywanie się niewielkich zasobów wilgoci, w wyniku czego na obszarze badawczym nastąpiło nadmierne przesuszenie wierzchniej warstwy gleby. W trzeciej dekadzie maja średnia wilgotność objętościowa gleby pod zbożami wyniosła 5,5%. Przesuszenie wierzchniej warstwy gleby trwało jednak krótko, gdyż obfite deszcze w drugiej połowie maja zlikwidowały niedobory wilgoci. W tym czasie zboża ozime znajdowały się w fazie kłoszenia, a zboża jare rozpoczęły fazę strzelania w źdźbło. W okresie zwiększonego zapotrzebowania zboż na wodę, tj. w drugiej połowie maja i w czerwcu, występowała dostateczna ilość wilgoci w glebie, co zrównoważyło ujemne skutki prawie bezśnieżnej zimy. Na obszarze badawczym w końcu czerwca zboża ozime rozpoczynały fazę dojrzałości woskowej, zboża jare fazę dojrzałości mleczej, a średnia wilgotność gleby pod zbożami była niedostateczna i wyniosła zaledwie 4,5%. Ulewne deszcze w lipcu spowodowały w południowej i zachodniej części kraju powódzie o nienotowanych rozmiarach. Na obszarach nie objętych powodzią ulewne deszcze w wielu rejonach spowodowały nadmierne uwilgotnienie gleby i silne wylęgnięcie łanów zboż. Na terenie objętym badaniami średnia wilgotność gleby pod zbożami wyniosła na początku sierpnia 12%, dwukrotnie więcej niż miesiąc wcześniej, a zboża ozime i jare osiągnęły już dojrzałość pełną. W drugiej dekadzie sierpnia nastąpiła poprawa warunków agrometeorologicznych co spowodowało szybkie obsychanie pól i sprzyjające warunki do przeprowadzenia zniw, wpływając dodatnio na wielkość zbiorów. Najwyższe plony zboż uzyskano m.in. w woj. Poznańskim, gdzie znajduje się pole testowe *Grodzisk Wielkopolski* – 36,9 dt/ha, a w woj. zielonogórskim, gdzie znajduje się pole testowe *Gościeszyn*, plony wyniosły jedynie 26,8 dt/ha (GUS 1997a, 1997b i 1998a).

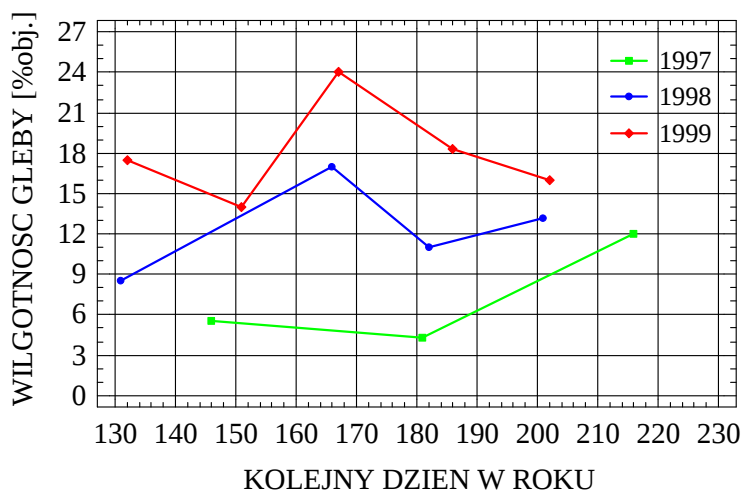
W roku 1998 warunki agrometeorologiczne na przeważającym obszarze kraju oceniono jako korzystne dla rolnictwa, mimo dużej zmienności pogody. W pierwszej połowie maja pogoda była bardzo korzystna dla wschodów, wzrostu i rozwoju zboż. Przewaga dni suchych i słonecznych w drugiej dekadzie maja wpłynęła na przyspieszenie tempa wegetacji, powodując jednocześnie w wielu rejonach przesuszenie wierzchniej warstwy gleby. W tym czasie na obszarze badawczym zboża ozime znajdowały się pod koniec fazy strzelania w źdźbło, a niektóre rozpoczęły już fazę kłoszenia, natomiast zboża jare, wysiane wcześniej niż zwykle, były już pod koniec fazy krzewienia i niektóre rozpoczynały fazę strzelania w źdźbło. Są to okresy zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę i mimo że w wielu rejonach na skutek niedoboru opadów zaobserwowano przesuszenie wierzchniej warstwy gleby,

stan zbóż oceniono jako dość dobry, znacznie lepszy niż w analogicznym okresie ubiegłego roku. Średnia wilgotność gleby pod zbożami na terenie objętym badaniami wyniosła 8,5%. Opady deszczu, które wystąpiły pod koniec maja poprawiły stan uwilgotnienia gleby. Pod koniec czerwca wilgotność wierzchniej warstwy gleby przeważnie była zadowalająca na terenie objętym badaniami i wyniosła średnio 11% obj. W tym czasie na obszarze badawczym zboża ozime znajdowały się w fazie dojrzałości woskowej, a zboża jare w fazie dojrzałości mleczonej. Chłodna i deszczowa pogoda w pierwszej dekadzie lipca opóźniała jednak proces dojrzewania ziarna zbóż. W wielu rejonach kraju wystąpiło nadmierne uwilgotnienie gleby. Niedobór opadów w drugiej dekadzie lipca w znacznej części zlikwidował wcześniejsze nadmiary wilgoci w glebie i wpłynął na poprawę stanu upraw. Na terenie objętym badaniami średnia wilgotność gleby wyniosła 13,2% obj. Warunki pogodowe w tym czasie sprzyjały dojrzewaniu zbóż, a pod koniec dekady także pracom żniwnym. Plony zbóż w porównaniu do osiągniętych w 1997 roku były wyższe średnio o 7,4%, na co wpłynął długi okres wegetacji i korzystny układ warunków termiczno-wilgotnościowych w całym jego okresie. W byłym woj. poznańskim średnie plony wyniosły 39,3 dt/ha, natomiast w woj. zielonogórskim 28,6 dt/ha (GUS 1998b i 1998c).

W 1999 roku korzystny układ warunków agrometeorologicznych, trwający do połowy kwietnia, przyczynił się do znacznego przyspieszenia wegetacji. Dość zróżnicowana pogoda w maju i czerwcu powodowała jednak przejściowe pogorszenie warunków wegetacji. Po silnych przymrozkach, które zanotowano w pierwszej i drugiej dekadzie maja, nastąpiło ocieplenie. Na obszarze badawczym na początku drugiej dekady maja średnia wilgotność gleby pod zbożami była duża i wyniosła 17,5%, zboża ozime weszły w fazę strzelania w źdźbło, a zboża jare znajdowały się w fazie krzewienia. W trzeciej dekadzie maja ocieplenie i dostateczne uwilgotnienie gleby wpłynęły na poprawę warunków wzrostu i rozwoju zbóż. Na terenie badawczym średnia wilgotność gleby pod zbożami pod koniec maja była dostateczna i wyniosła 14%, zboża ozime weszły w fazę zapełniania kłosów ziarnem, a zboża jare znajdowały się w fazie strzelania w źdźbło. Korzystne warunki agrometeorologiczne utrzymywały się również w pierwszej dekadzie czerwca, natomiast w drugiej i trzeciej dekadzie miesiąca na znacznym obszarze kraju wystąpiły obfite opady deszczu, powodując nadmierne uwilgotnienie gleby i wylęgnięcie zbóż. Na obszarze badawczym w połowie czerwca średnia wilgotność gleby pod zbożami była bardzo duża i wyniosła 24%. Zboża ozime były w tym czasie w fazie dojrzałości mleczonej, natomiast zboża jare pod koniec fazy kłoszenia lub rozpoczęły fazę zapełniania ziarnem. Rozwój zbóż przebiegał w niepomysłnych dla tych faz warunkach pogodowych. W pierwszej i drugiej dekadzie lipca warunki agrometeorologiczne na przeważającym obszarze kraju były dobre dla wegetacji roślin. Na początku lipca średnia wilgotność gleby pod zbożami na terenie objętym badaniami wyniosła 18,3%, zboża ozime osiągnęły fazę dojrzałości woskowej, a jare dojrzałości mleczonej. W ostatnim dniu drugiej

dekady lipca średnia wilgotność gleby pod zbożami jeszcze spadła i wyniosła na obszarze badawczym 16% obj. Zboża ozime osiągnęły już fazę dojrzałości pełnej, a jare dojrzałości woskowej. Jednak bardzo wysokie temperatury pod koniec lipca i w sierpniu wpłynęły niekorzystnie na rozwój roślin, powodując obniżenie ich plonowania. Nastąpiło przyspieszenie i skrócenie fazy dojrzewania ziarna zbóż, przez co nie zostało ono w pełni wykształcone. Plony zbóż oceniono na 3-4,3% niższe niż w 1998 roku (GUS 1999a i 1999b).

Wilgotność gleby pod zbożami w ciągu trzech lat wykonywania pomiarów zmieniała się, począwszy od wartości średnio 4,5%, które wystąpiły pod koniec czerwca 1997 roku, a skończywszy na wartościach średnio 24%, które zanotowano w połowie czerwca 1999 roku. Warunki wegetacji zbóż od maja do czerwca w roku 1997, a więc w okresach zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę, przebiegały w warunkach niedostatecznego uwilgotnienia gleby. Warunki wilgotnościowe gleby poprawiły się dopiero pod koniec okresu wegetacyjnego zbóż, osiągając wartość średnio 12%. Nie miało to już wpływu na plonowanie zbóż, najniższe spośród lat 1997–1999. W okresie zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę w roku 1998 warunki wilgotnościowe były dostateczne i wyniosły średnio 15%. Utrzymywały się one przez pozostałą część okresu wegetacyjnego zbóż. Natomiast w roku 1999 zanotowano dostateczną wilgotność gleby w maju, która wyniosła 17,5–14% i nadmierną wilgotność w czerwcu, kiedy to osiągnęła średnio 24%. Spowodowało to wspomniane obniżenie plonowania roślin. Na rysunku 6 przedstawiony jest przebieg średnich wartości wilgotności gleby pod zbożami w latach 1997–1999 na polach testowych *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski* w dniach rejestracji satelitarnej ERS-2.SAR. Jak widać z rysunku, badania obejmują szerokie spektrum wilgotności gleby.



Rys. 6. Przebieg średnich wartości wilgotności gleby pod zbożami w latach 1997–1999 w dniach rejestracji satelitarnej ERS-2.SAR

4. WSKAŹNIK POWIERZCHNI PROJEKCYJNEJ LIŚCI – LAI

4.1. Wstęp

Wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści LAI jest wielkością bezwymiarową, charakteryzującą stosunek powierzchni liści do jednostkowej powierzchni gleby (zwykle jest nią 1 m^2), którą ta roślinność zajmuje. Wskaźnik ten może być również przedstawiany w postaci wymiarowej i wtedy jego jednostką jest $[\text{m}^2 \text{m}^{-2}]$. Przyrządy stosowane ostatnio do oznaczania LAI coraz częściej oparte są na pomiarach ilości promieniowania słonecznego przechodzącego przez roślinność za pomocą takich instrumentów, jak: Line Quantum Sensors, DEMON, Fisheye Photography, CROWNMETER, CEPTOMETER. Mierzą one powierzchnię całej masy roślinnej, włączając powierzchnię łodyg, kwiatów, owoców itd., zachowując przyjętą powszechnie terminologię wskaźnika LAI. Wówczas wielkość ta wyraża zarówno gęstość roślin, jak i ich geometrię (Welles J. M. i inni 1990). Jednym z nich jest przyrząd LAI-2000 Plant Canopy Analyser produkcji amerykańskiej firmy LI-COR wykorzystany w prezentowanych tu badaniach (LAI-2000 Plant Canopy Analyser, Operating Manual 1991; Gruszczyńska M. 1992). Wartości LAI można również określać na podstawie zdjęć satelitarnych wykonanych w optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego (Dąbrowska-Zielińska K. 1995). Odnoszą się one wtedy do powierzchni reprezentowanej przez piksel na zdjęciu satelitarnym.

4.2. Wyniki pomiarów wskaźnika LAI przeprowadzonych na obszarze badawczym

Pomiary wskaźnika LAI wykonywane były w trakcie przelotu satelitów ERS-1 i ERS-2, od maja do sierpnia w punktach pomiarowych rozmieszczonych na gruntach ornych. W tabeli 1 zamieszczone są wartości wskaźnika LAI, które otrzymano dla zbóż w poszczególnych fazach rozwojowych roślin. Są to wartości średnie, minimalne oraz maksymalne, jakie wystąpiły w analizowanym wieloleciu na obszarze badawczym obejmującym pola testowe *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski*.

Tabela 1. Wartości wskaźnika LAI dla zbóż otrzymane w latach 1992–1999

LAI		Faza rozwojowa roślin						
		0	1	2	3	4	5	6
zboża	wartość średnia	1,60	3,21	3,50	3,15	2,88	2,50	1,82
	S	0,41	1,05	1,08	1,07	0,81	0,64	0,51
	min.	0,80	1,20	2,00	1,93	1,38	1,35	0,55
	maks.	2,10	5,40	5,88	5,25	5,00	3,70	2,60
	liczba obserwacji	7	42	35	22	87	43	38

Objaśnienia:

S – odchylenie standardowe średniej,*min.* – wartość minimalna,*maks.* – wartość maksymalna,

0 – krzewienie,

1 – strzelanie w źdźbło,

2 – kłoszenie,

3 – zapełnianie ziarnem,

4 – dojrzałość mleczna,

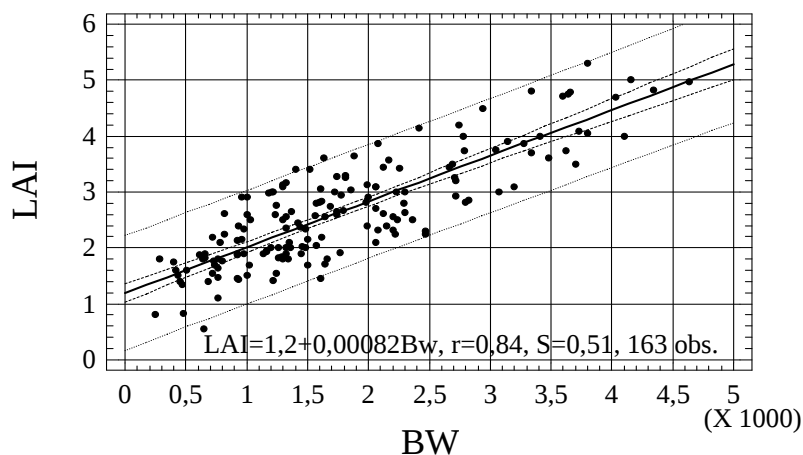
5 – dojrzałość woskowa,

6 – dojrzałość pełna.

Jak można zauważyć, największe wartości wskaźnika LAI wystąpiły w fazie kłoszenia, a najmniejsze w fazie krzewienia. Przy dużych wartościach LAI powierzchnia gleby jest przykryta przez zboża, które tworzą w rozpatrywanej skali szorstkości (Gruszczyńska M. 2000) niemal jednolitą powierzchnię masy roślinnej. Począwszy od fazy kłoszenia, wartości wskaźnika LAI zaczynają maleć, co jest związane z obsychaniem roślin w fazach dojrzewania. Wartości wskaźnika LAI są podobne w pierwszej i w ostatniej z rozpatrywanych faz rozwojowych zbóż. Wtedy też powierzchnia łąnów zbóż rozpatrywana w mezoskali jest najbardziej szorstka.

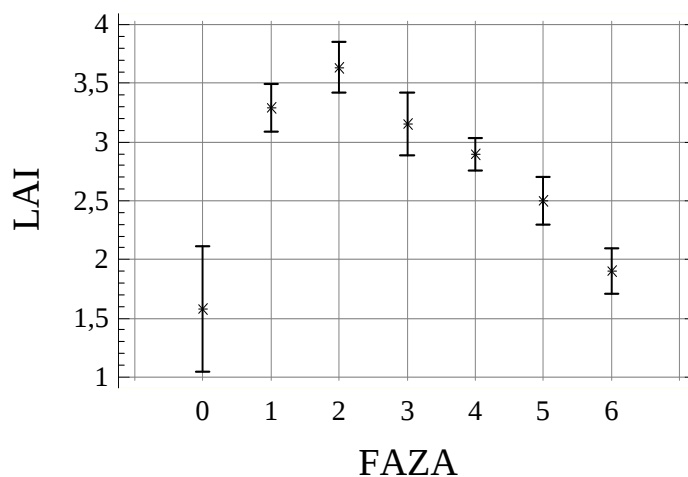
4.3. Analiza wartości wskaźnika LAI dla zbóż

Analizując dane zebrane w tabeli 1, można zauważyć, że wraz z rozwojem roślin wartości LAI rosną, aż do pewnej wartości maksymalnej, różnej w zależności od typu zboża i jego kondycji (gęstości, wysokości itp.). Po tym okresie następuje spadek wartości LAI, związany z wysychaniem roślin. W analizowanym wieloleciu największe wartości wskaźnika LAI wystąpiły pod koniec fazy strzelania w źdźbło (1), w fazie kłoszenia (2) oraz w fazie zapełniania ziarnem (3), kiedy zboża miały największą biomasę. Badania przeprowadzone na obszarach testowych potwierdziły, że istnieje silna zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI i biomasą (*Bw*) zbóż ($r = 0,84$). Rysunek 7 przedstawia tę zależność otrzymaną w wyniku przeprowadzenia analizy regresji liniowej z jedną zmienną niezależną na poziomie ufności 99%.



Rys. 7. Zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI i biomasą świeżą *Bw* dla zbóż

Bujna roślinność stosunkowo szybciej i z głębszych warstw wyczerpuje wodę z gleby, wcześniej i ostrzej reaguje też na jej brak (Ślusarczyk E. 1978). Fazy cechujące się największymi wartościami LAI są zatem jednocześnie okresami zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę. Brak odpowiedniej ilości wody w glebie w tym czasie spowoduje spadek plonowania roślin. W fazie kłoszenia, gdy wystąpiły największe wartości wskaźnika LAI, prawie cała powierzchnia gleby była zasłonięta przez rośliny. W następnych fazach wartości LAI zbóż zaczynają maleć, co jest związane ze zmniejszeniem się powierzchni liści w wyniku ich obumierania. W fazie dojrzałości pełnej zarówno liście, jak i źdźbła są już żółte i suche, co ma swoje odzwierciedlenie w małych wartościach LAI. Opracowano wykres, zamieszczony na rysunku 8, przedstawiający średnie wartości wskaźnika LAI dla zbóż wraz z przedziałami ufności w rozpatrywanych różnych fazach rozwojowych, który potwierdza powyższe stwierdzenia. Wykres ten powstał w wyniku przeprowadzenia jednokierunkowej analizy wariancji (ONE-WAY ANOVA), w której czynnikiem klasyfikacyjnym wartości LAI była faza rozwojowa zbóż (Podgórski J. 1995). Szczegółowe dane dotyczące wykresu zamieszczone są w tabeli 1. Kierując się wynikami przeprowadzonej analizy statystycznej, dokonano podziału wartości LAI dla zbóż na następujące trzy klasy: $LAI < 2$, $LAI 2-3$, $LAI > 3$.



Objaśnienia:

0 – krzewienie

1 – strzelanie w źdźbło

2 – kłoszenie

3 – wypełnianie ziarnem

4 – dojrzałość mleczna

5 – dojrzałość woskowa

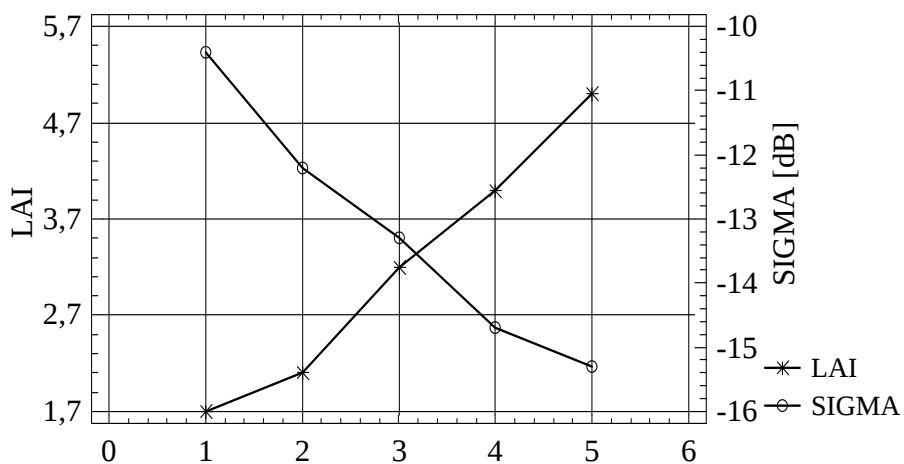
6 – dojrzałość pełna

Rys. 8. Wartości średnie wskaźnika LAI dla zbóż wraz z przedziałami ufności wyznaczonymi na poziomie ufności 95% metodą najmniejszej istotnej różnicy (LSD)

4.4. Wskaźnik LAI a szorstkość badanej powierzchni roślinnej

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 σ° 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 przez tak dużą masę roślinną. Natomiast przy niewielkich wartościach LAI, które występują w początkowych i końcowych fazach rozwojowych zbóż, wartości współczynnika rozpraszania wstecznego σ° 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. Im większa jest szorstkość badanej powierzchni, tym większy jest współczynnik rozpraszania wstecznego σ° .

Zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI a współczynnikiem σ° , jaką otrzymano przy wyeliminowaniu wpływu wilgotności gleby i roślin na odbity sygnał radarowy, jest odwrotnie proporcjonalna. W miarę wzrostu wartości LAI wartości σ° maleją, osiągając wartości minimalne przy maksymalnych wartościach wskaźnika LAI. Jest to spowodowane wzrostem tłumienia promieniowania mikrofalowego przez coraz to większą masę roślinną. Potwierdzają to wykresy (rys. 9 i 10) przedstawiające dwa przypadki. Pierwszy odzwierciedla wpływ wskaźnika LAI na wartość współczynnika σ° przy stałej wilgotności objętościowej gleby wynoszącej około 5% i stałej wilgotności roślin wynoszącej 80–90%, drugi – przy stałej wilgotności gleby wynoszącej około 15% i stałej wilgotności roślin równej 72–84%. Na osi x-ów 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 wartości współczynnika σ° .



Objaśnienia:

1 – jęczmień jary (30.06.1998)

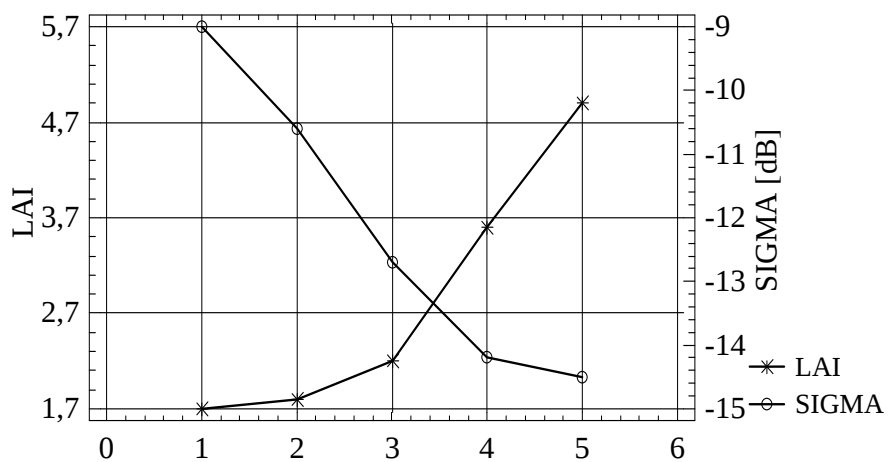
4 – pszenżyto ozime (25.05.1997)

2 – jęczmień jary (10.05.1998)

5 – pszenżyto ozime (25.05.1997)

3 – jęczmień jary (25.05.1997)

Rys. 9. Wpływ wskaźnika LAI na wartość σ° przy wilgotności gleby 5% i wilgotności roślin 80–90%



Objaśnienia:

1 – jęczmień jary (14.06.1998)

4 – pszenica ozima (30.06.1998)

2 – pszenżyto ozime (19.07.1998)

5 – pszenżyto ozime (10.05.1998)

3 – pszenica ozima (14.06.1998)

Rys. 10. Wpływ wskaźnika LAI na wartość σ° przy wilgotności gleby 5% i wilgotności roślin 80–90%

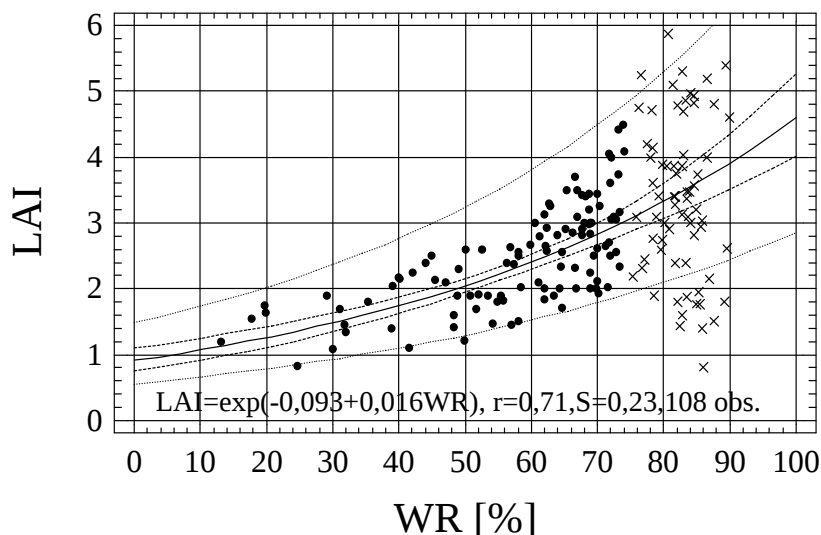
Przy zachowaniu stałej wilgotności gleby i stałej wilgotności roślin na wartość współczynnika σ° wpływa głównie szorstkość badanej powierzchni. Zatem przy zachowaniu wymienionych warunków zmiana wartości współczynnika rozpraszania wstecznego σ° wywołana zmianą wartości wskaźnika LAI świadczy o tym, że wskaźnik ten wyraża szorstkość badanej powierzchni roślinnej. Wyniki te upoważniły do przyjęcia założenia, że wskaźnik LAI odzwierciedla szorstkość badanej powierzchni roślinnej. Można więc przyjąć, że wyznaczone klasy LAI (LAI<2, LAI 2-3, LAI>3) są również klasami szorstkości badanej powierzchni roślinnej.

5. ZAWARTOŚĆ WODY W ROŚLINACH

W czasie przelotów satelitów ERS-1 i ERS-2 nad obszarem badawczym wykonywane były również pomiary biomasy świeżej i suchej. Rośliny ścinano z powierzchni 1m², a następnie ważono. W laboratorium określana była sucha masa roślin oraz procentowa zawartość wody w roślinach (różnica pomiędzy wagą biomasy świeżej i suchej).

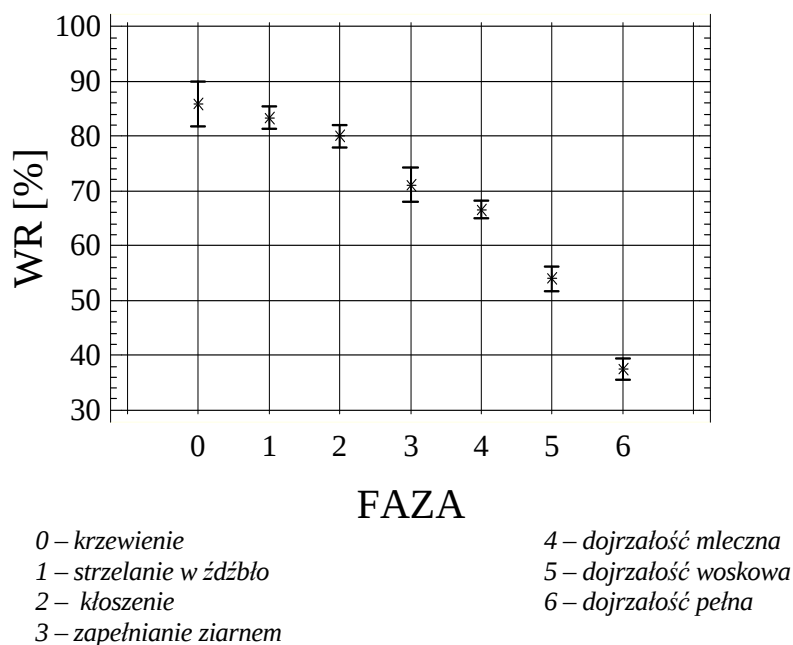
W pierwszej z zarejestrowanych na zdjęciach satelitarnych faz rozwojowych zbóż (0 – krzewienie) rośliny miały już dużą wilgotność, która wynosiła od 82% do ok. 90% (tab. 2) przy małych wartościach wskaźnika LAI wynoszących średnio 1,6 (tab. 1). Zawartość wody w roślinach wzrosła już niewiele, osiągając wartości 90% w następnej fazie rozwojowej zbóż strzelania w źdźbło, przy jednoczesnym dużym wzroście wartości LAI. Od fazy kłoszenia do początku fazy zapelniania 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 (WR). Ilość wody w zbożach zaczęła intensywnie spadać dopiero począwszy od fazy dojrzałości młecznej, podczas gdy spadek wartości LAI rozpoczął się wcześniej. Pod koniec fazy dojrzewania zbóż zarówno wartości zawartości 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, na poziomie ufności 99%. Zależność tę przedstawia rysunek 11. Potwierdza on podane wyżej obserwacje – silnego zróżnicowania wartości LAI, od 0,8 do 5,88, które występowało przy praktycznie stałej wilgotności roślin wynoszącej 80-90%, co miało miejsce od fazy krzewienia do fazy zapelniania ziarnem. Objawiło się to brakiem korelacji między wskaźnikiem LAI a WR dla wartości wilgotności roślin powyżej 75%.



Rys. 11. Zależność pomiędzy wartościami LAI a procentową zawartością wody w roślinach WR (dla WR < 75%) dla zbóż, otrzymana w wyniku pomiarów terenowych przeprowadzonych w latach 1992–1998

Zatem zależność pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° powinna być zbadana w obrębie stałych warunków szorstkości i wilgotności roślin. Oba warunki mogą być jednocześnie spełnione poprzez podział badanych zbóż na klasy według wartości LAI i wartości zawartości wody w roślinach. Jak już wspomniano wcześniej, kierując się wynikami analizy statystycznej przedstawionymi na rysunku 8, wyróżniono następujące klasy LAI dla zbóż: LAI < 2, LAI 2-3, LAI > 3. Klasy wilgotności roślin zostały wyróżnione na podstawie podziału na fazy rozwojowe zbóż, gdyż zawartość wody w roślinach jest z nimi związana (tab. 2). Rysunek 12 przedstawia wynik graficzny jednokierunkowej analizy wariancji, w której czynnikiem klasyfikacyjnym wilgotności roślin (WR) była faza rozwojowa zbóż. Szczegółowe dane dotyczące wykresu, otrzymane w wyniku pomiarów terenowych przeprowadzonych w latach 1992–1998 na obszarze testowym, zamieszczone są w tabeli 2. Przeprowadzona analiza wariancji pozwoliła na właściwy wybór klas wilgotności roślin. Klasa pierwsza obejmowała fazy 0-2, od krzewienia do kłoszenia, cechujące się dużą wilgotnością roślin, tj. średnio >80% (tab. 2). Klasa druga fazy 3-4, od zapełniania ziarnem do dojrzałości mleczonej, o wilgotności średnio 65–75%. Klasa trzecia fazy 5-6, od dojrzałości woskowej do pełnej, tj. o wilgotności średnio <55%. W obrębie każdej klasy wilgotności roślin znajdowały się wyróżnione 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 postanowiono szukać relacji pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° .



Rys. 12. Wartości średniej procentowej zawartości wody w roślinach (WR) otrzymane dla zbóż wraz z przedziałami ufności wyznaczonymi na poziomie ufności 95% metodą najmniejszej istotnej różnicy (LSD)

Tabela 2. Wartości procentowej zawartości wody w roślinach otrzymane dla zbóż w latach 1992–1999.

Zawartość wody w roślinach		Faza rozwojowa roślin						
		0	1	2	3	4	5	6
Zboża	średnia	85,82	83,37	79,94	71,11	66,58	53,98	37,48
	S	2,12	3,14	4,67	6,37	6,72	10,05	14,28
	min.	82,00	75,90	69,85	60,00	48,30	32,00	13,10
	maks.	89,20	89,90	88,10	81,96	79,00	67,05	59,90
	liczba obserwacji	8	34	34	14	52	27	34

Objaśnienia:

średnia – wartość średnia,
S – odchylenie standardowe średniej,
min. – wartość minimalna,
maks. – wartość maksymalna,
0 – krzewienie,
1 – strzelanie w źdźbło,

2 – kłoszenie,
3 – wypełnianie ziarnem,
4 – dojrzałość mleczna,
5 – dojrzałość woskowa,
6 – dojrzałość pełna.

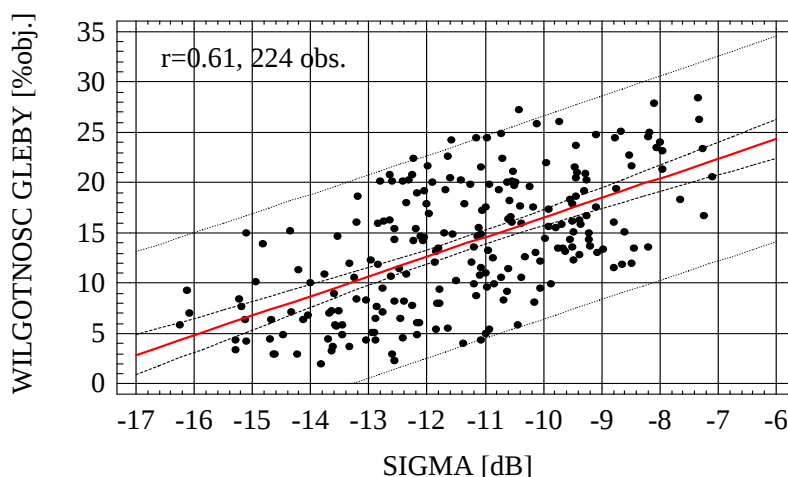
6. ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY WSPÓŁCZYNNIKIEM ROZPRASZANIA WSTECZNEGO σ° I WILGOTNOŚCIĄ GLEBY POD ZBOŻAMI

Współczynnik rozpraszania wstecznego σ° , przy zachowaniu stałych parametrów systemowych, takich jak długość generowanej fali, typ polaryzacji, kąt padania wiązki na badany obiekt, zależy wprost proporcjonalnie głównie od dwóch czynników – szorstkości i wilgotności badanej powierzchni. Udział każdego z nich w przypadku gleb pokrytych roślinnością jest trudny do określenia. Przeprowadzone badania upoważniają do stwierdzenia, że szorstkość powierzchni roślinnej można wyrazić za pomocą wskaźnika LAI, który przybiera charakterystyczne dla danej fazy rozwojowej roślin wartości. Postanowiono zatem zbadać zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby a wartościami współczynnika σ° w wybranych klasach szorstkości wyrażonych za pomocą wskaźnika LAI. Różnice w wartościach współczynnika rozpraszania wstecznego σ° , otrzymanych dla powierzchni o jednakowej szorstkości, powinny być wtedy spowodowane głównie różnicami wilgotności badanego obiektu. W przypadku gleb pokrytych roślinnością będzie to zarówno wilgotność gleby, jak i wilgotność samych roślin. Jak już wspomniano wcześniej, w pewnych fazach rozwojowych zbóż zawartość wody w roślinach jest prawie stała, a więc wpływ i tego czynnika na sygnał mikrofalowy będzie w tym okresie wzrostu roślin stały. Należy się zatem spodziewać, że po wyeliminowaniu wpływu szorstkości i wilgotności roślin na sygnał radarowy otrzymamy bezpośrednią korelację pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° otrzymywanym ze zdjęć mikrofalowych ERS-2.

Analizę statystyczną danych naziemnych – wilgotność objętościowa gleby mierzona metodą TDR – i satelitarnych – współczynnik rozpraszania wstecznego σ° obliczony ze zdjęć ERS-2.SAR.PRI – przeprowadzono przy wykorzystaniu programu komputerowego STATGRAPHIC-PLUS. Zastosowano tu pakiety zawierające analizę regresji z jedną zmienną niezależną oraz analizę regresji wielorakiej.

Analiza regresji jest istotną metodą badania współzależności zjawisk. W ramach analizy regresji wartości zmiennej zależnej wyraża się za pomocą modelu matematycznego, zwanego modelem regresji. Jego podstawową częścią jest tzw. funkcja regresji, która przedstawia zależność zmiennej zależnej względem jednej lub wielu zmiennych niezależnych. Przeprowadzenie analizy regresji pozwala na dobór postaci modelu regresji oraz oszacowanie jego parametrów na podstawie danych empirycznych. Zbudowany „dobry” model z wysokim współczynnikiem korelacji wykorzystuje się do przewidywania wartości zmiennej zależnej przy znanych wartościach zmiennej (lub wielu zmiennych – regresja wieloraka) niezależnej (regresja z jedną zmienną niezależną) (Podgórski J. 1995).

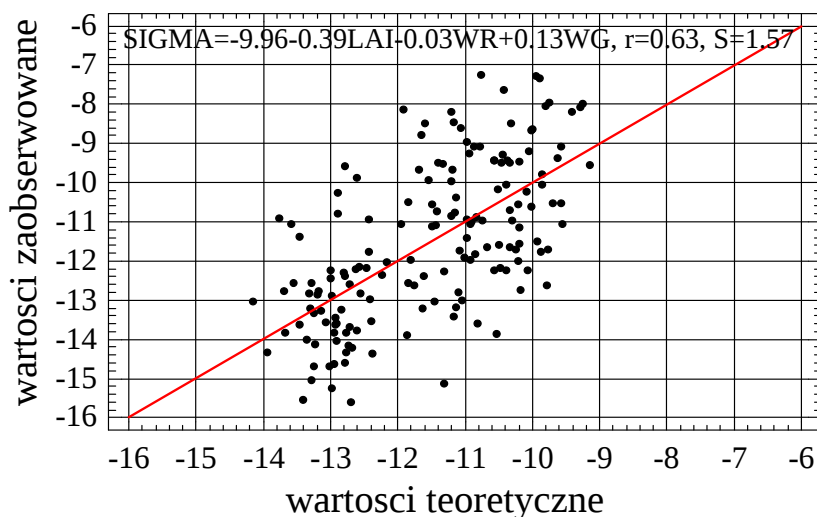
Jak już wspomniano, zależność pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° należy zbadać w obrębie stałych warunków szorstkości i wilgotności roślin. Niezapewnienie tych warunków dało słabą korelację między wymienionymi wielkościami. Współczynnik korelacji otrzymany w wyniku przeprowadzenia analizy regresji o modelu liniowym z jedną zmienną niezależną był niski i wyniósł $r = 0,61$. Wykres otrzymanej zależności przedstawiony jest na rysunku 13. Mimo tak słabego związku pomiędzy badanymi wielkościami można jednak zauważyć, że otrzymana tendencja jest zgodna z wynikami opublikowanymi w literaturze – im większa wilgotność gleby, tym większy współczynnik σ° .



Rys. 13. Zależność pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) bez uwzględnienia szorstkości i wilgotności badanych powierzchni łąnów zbóż

W celu zbadania współzależności pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° a czynnikami mającymi wpływ na jego wartość wykonano analizę regresji wielorakiej, posługując się pakietem dostępnym w programie komputerowym STATGRAPHIC PLUS. W tym wypadku zmienną zależną był współczynnik rozpraszania wstecznego σ° , a zmiennymi niezależnymi czynniki wpływające na jego wartość: wskaźnik LAI, wilgotność roślin (WR) oraz wilgotność gleby (WG). Niektóre wyniki otrzymane po przeprowadzeniu analizy regresji wielorakiej przedstawione są na rysunku 14. Wykres przedstawia wartości teoretyczne współczynnika σ° , obliczone według zamieszczonego na rysunku równania, względem wartości zaobserwowanych na zdjęciu satelitarnym. W zbudowanym modelu regresji poziomy istotności dla każdej ze zmiennych niezależnych były mniejsze od wartości 0,01. Oznacza to, że wszystkie uwzględnione w analizie statystycznej czynniki mają wpływ na wartość współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (Łomnicki A. 1995). Miara

tego wpływu są wartości poziomów istotności, które w tym przypadku wyniosły: dla LAI – 0,0015, dla WR – 0,0001 i dla WG – 0,0000. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że wpływ wszystkich trzech wielkości na wartość współczynnika rozpraszania wstecznego σ° jest istotny i podobny. Dodatnia wartość współczynnika regresji przy zmiennej niezależnej, jaką jest wilgotność gleby (WG), świadczy o wprost proporcjonalnej zależności współczynnika σ° od tej zmiennej, co jest zgodne z teorią (Ulaby F.T. 1974). Natomiast wartość ujemna współczynnika regresji przy pozostałych dwóch zmiennych (LAI i WR) oznacza zależność odwrotnie proporcjonalną współczynnika σ° od wskaźnika LAI i wilgotności roślin (Podgórski J. 1995). Zależność odwrotnie proporcjonalna pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° a wskaźnikiem LAI została wykazana w punkcie 4.4. Im większe są wartości wskaźnika LAI (mniejsza szorstkość badanej powierzchni) tym mniejsza jest wartość współczynnika σ° .



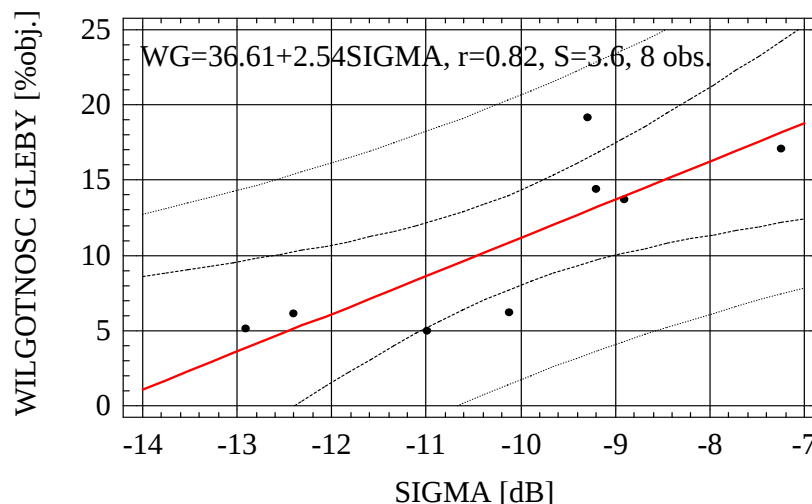
Rys. 14. Zależność wieloraka pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° obliczonym ze zdjęć ERS-2.SAR.PRI a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° obliczonym według równania: $SIGMA = -9,96 - 0,39LAI - 0,03WR + 0,13WG$

Powyższa analiza potwierdziła proponowane założenie, że po wyeliminowaniu wpływu szorstkości i wilgotności roślin otrzymamy bezpośrednią korelację pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° . Oba wymienione warunki zostały spełnione jednocześnie poprzez podział badanych zbóż na klasy według wartości wskaźnika LAI i wartości zawartości wody w roślinach. Wyróżniono trzy następujące klasy LAI dla zbóż: LAI<2, LAI 2-3, LAI>3. Klasy wilgotności roślin wyróżnione zostały na podstawie podziału na fazy rozwojowe zbóż, gdyż

zawartość wody w roślinach jest z nimi związana, co wykazano w rozdziale 5. Odpowiadające fazom rozwojowym zbóż średnie wartości zawartości wody w roślinach są następujące: klasa pierwsza >80%, klasa druga 65–75%, klasa trzecia <55% (tab. 2).

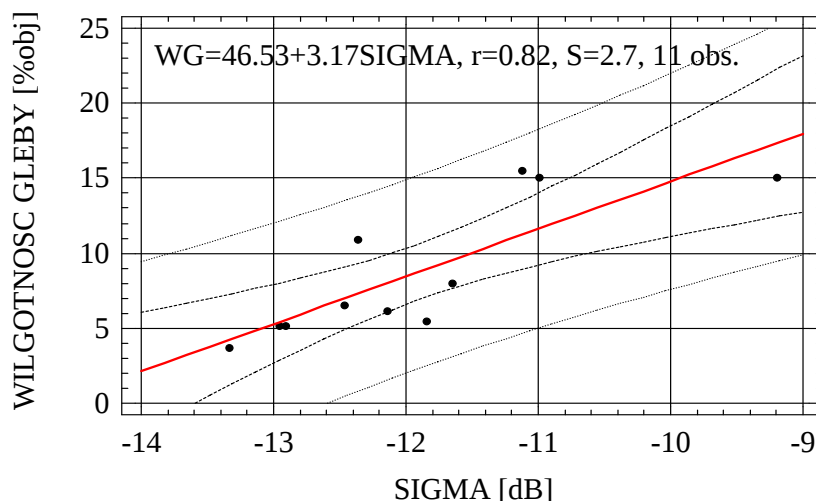
W obrębie każdej klasy wilgotności roślin znajdowały się występujące tu wyróżnione wcześniej klasy wskaźnika LAI. W ramach tak przygotowanego podziału danych postanowiono szukać relacji pomiędzy wilgotnością gleby zmierzoną w terenie metodą TDR i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° , obliczonym dla bloku pikseli 9x9 (Gruszczyńska M. 1993) ze zdjęć satelitarnych ERS-2.SAR.PRI. W tym celu wykorzystano metodę analizy regresji z jedną zmienną niezależną, dostępną w ramach pakietu komputerowego STATGRAPHICS PLUS. Najpierw rozpatrywano liniowy model regresji: $Y=a+bx$, następnie modele nieliniowe. Poniżej przedstawiono wyniki wykonanych analiz statystycznych.

Rysunek 15 przedstawia zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla klasy pierwszej wilgotności roślin: fazy 0–2 i pierwszej klasy szorstkości LAI<2. Jak widać na wykresie istnieje silna zależność pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem σ° o współczynniku korelacji $r = 0,82$. Pierwsza klasa szorstkości występowała jednak bardzo rzadko w pierwszej klasie wilgotności roślin w okresie badawczym 1997–1999, stąd tak mało obserwacji w wykonanej analizie statystycznej. Obliczanie wilgotności gleby na podstawie otrzymanego równania może być zatem obciążone większym niż to przewiduje model błędem. Zastosowanie różnych modeli nieliniowych nie poprawiło stopnia współzależności obu parametrów.



Rys. 15. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 0-2 i wartości LAI<2

Na rysunku 16 pokazana jest zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla pierwszej klasy wilgotności roślin: fazy 0-2 i drugiej klasy szorstkości: LAI 2-3. Otrzymano silną zależność pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° . Współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,82$. Spośród różnych modeli nieliniowych podobną zależność otrzymano jedynie po zastosowaniu funkcji o modelu wykładniczym: $Y = \exp(a+bx)$, przy którym współczynnik korelacji wyniósł również $r = 0,82$. Pozostałe modele nieliniowe (Statgraphic Plus User Manual 1997) opisywały zależność pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° z mniejszym współczynnikiem korelacji.

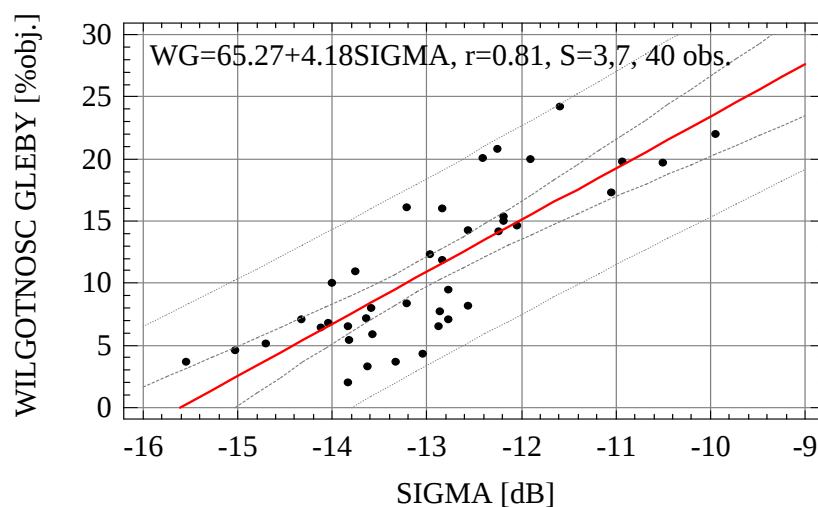


Rys. 16. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 0-2 i wartości LAI w przedziale 2-3

Analogiczne analizy statystyczne służące do zbudowania zależności pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° wykonano dla pozostałych wyznaczonych klas wilgotności i szorstkości łąnów zbóż. Kolejne rysunki od 17 do 23 przedstawiają otrzymane wyniki przeprowadzonych analiz regresji z jedną zmienną niezależną dla funkcji o modelu liniowym.

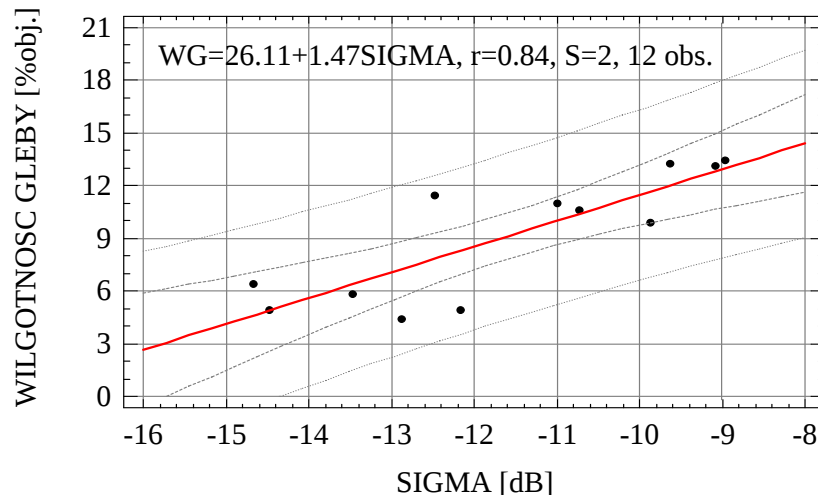
Na rysunku 17 pokazana jest zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla pierwszej klasy wilgotności roślin: fazy 0-2 i trzeciej klasy szorstkości: LAI > 3. Również i w tym wypadku korelacja pomiędzy wilgotnością

gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° jest silna, współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,81$. Zastosowanie różnych modeli nieliniowych nie wpłynęło na poprawę wyników korelacji. Najsilniejszą korelację otrzymano dla modelu wykładniczego – współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,76$.



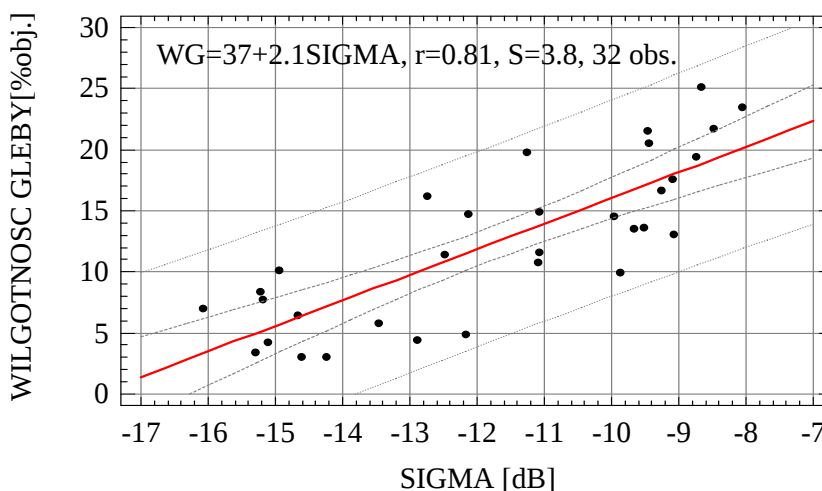
Rys. 17. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 0-2 i wartości LAI > 3

Rysunek 18 przedstawia zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla drugiej klasy wilgotności roślin: fazy 3-4 i pierwszej klasy szorstkości: LAI < 2. Współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,84$. W tym wypadku analiza nie obejmuje roku 1999, w którym nie występowały w drugiej klasie wilgotności roślin (fazy 3-4) wartości wskaźnika LAI dla zbóż < 2. Należy również zwrócić uwagę, że wilgotność objętościowa gleby zmierzona w terenie, odpowiadająca rozpatrywanym warunkom, nie przekraczała wartości 15%, co może być ograniczeniem stosowania otrzymanego równania. Spośród różnych typów modeli nieliniowych jedynie po zastosowaniu regresji o modelu hiperbolicznym: $Y = a + b/x$, otrzymano nieco silniejszą zależność, współczynnik korelacji wyniósł $r = -0,85$.



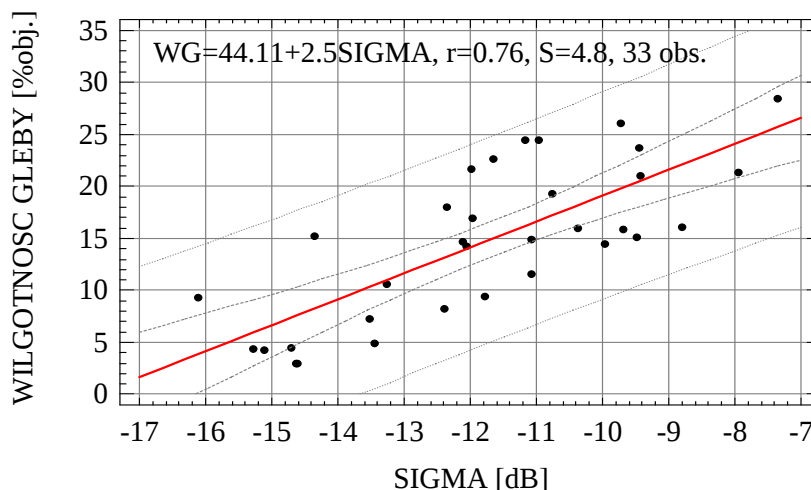
Rys. 18. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 3-4 i wartości LAI < 2

Rysunek 19 przedstawia otrzymaną zależność o modelu liniowym pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° dla drugiej klasy wilgotności roślin: fazy 3-4 i drugiej klasy szorstkości: LAI 2-3. Współczynnik korelacji jest nieco niższy od otrzymanego dla tej samej klasy wilgotności roślin, lecz dla mniejszych wartości wskaźnika LAI < 2 i wynosi $r = 0,81$. Równanie opisujące wymienioną zależność obejmuje jednak szersze niż poprzednio (rys. 18) spektrum wartości wilgotności objętościowej gleby od 3% do 26%. Zastosowanie różnych funkcji nieliniowych nie wpłynęło na poprawę współzależności badanych wielkości w analizowanych warunkach szorstkości i wilgotności łąnów zbóż.



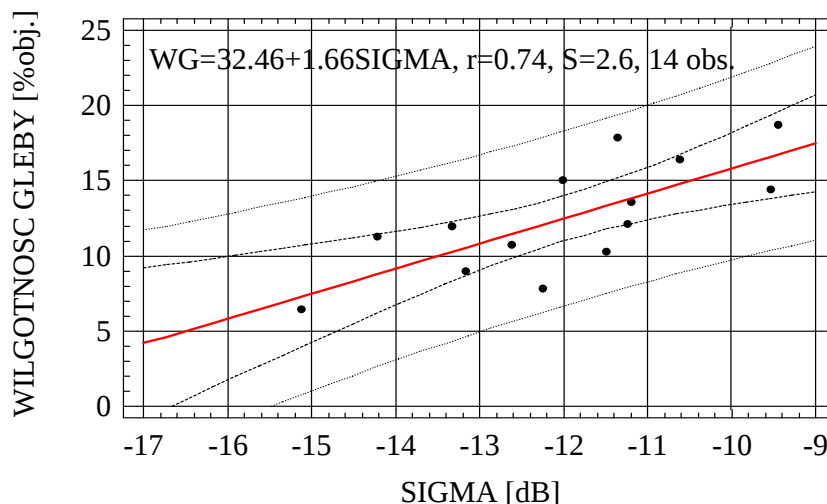
Rys. 19. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 3-4 i wartości LAI 2-3

Na rysunku 20 pokazana jest zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla drugiej klasy wilgotności roślin: fazy 3-4 i trzeciej klasy szorstkości: $LAI > 3$. Jak widać na rysunku, korelacja pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° jest nieco słabsza, współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,76$. Zastosowanie różnych modeli nieliniowych nie poprawiło znacząco wyników korelacji. Jedynie dla modelu wykładniczego otrzymany współczynnik korelacji był niewiele wyższy i wyniósł $r = 0,77$. W analizowanych warunkach zboża są jeszcze zielone, lecz o mniejszej już zawartości wody w porównaniu z pierwszą z wyróżnionych klas wilgotności roślin. Wpływa to na zwiększoną głębokość penetracji fali radarowej. Przy tak dużych wartościach wskaźnika LAI promieniowanie to ulega również większemu tłumieniu (Attema E.P.W. 1978), gdyż dłuższa jest jego droga poprzez masę roślinną. W ten sposób można wytłumaczyć słabszą zależność, jaką otrzymano w rozpatrywanych warunkach szorstkości i wilgotności roślin.



Rys. 20. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 3-4 i wartości $LAI > 3$

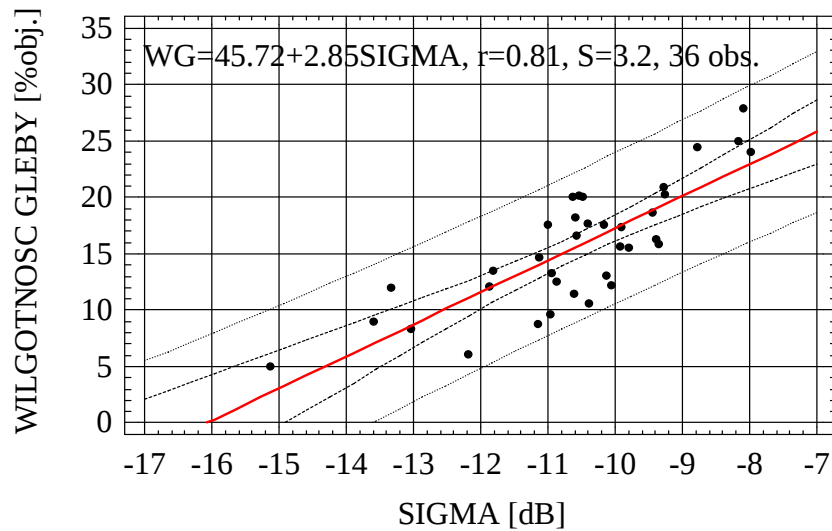
Następne analizy statystyczne wykonano dla trzeciej klasy wilgotności roślin: fazy 5-6. Rysunek 21 przedstawia zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano pomiędzy wilgotnością gleby $< 20\%$ a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° dla pierwszej klasy szorstkości: $LAI < 2$. Współczynnik korelacji w tym wypadku był najniższy ze wszystkich rozpatrywanych i wyniósł $r = 0,74$. Zastosowanie różnych modeli nieliniowych nie poprawiło stopnia współzależności obu parametrów. Przy małych wartościach LAI i wyschniętych już roślinach, na sygnał mikrofalowy mogła mieć wpływ również szorstkość prześwietlającej gleby, nie uwzględniona w proponowanym modelu.



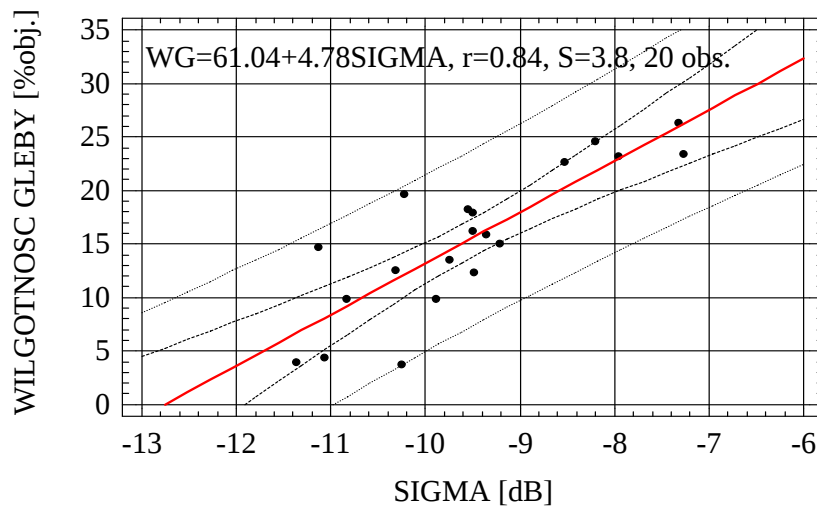
Rys. 21. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 5-6 i wartości LAI < 2

Na rysunku 22 pokazana jest zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla trzeciej klasy wilgotności roślin: fazy 5-6 i drugiej klasy szorstkości: LAI 2-3. W tym wypadku korelacja pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° jest dużo silniejsza, współczynnik korelacji wynosi $r = 0,81$. Można to wytłumaczyć tym, że większe niż w poprzedniej klasie wartości wskaźnika LAI ograniczyły wpływ szorstkości gleby na sygnał mikrofalowy. Zboża znajdujące się w fazie dojrzałości woskowej i pełnej cechują się niewielką wilgotnością. Wpływ wody zawartej w roślinach jest wtedy znikomy i wielkość sygnału mikrofalowego w znacznym stopniu zależy od wilgotności samej gleby. Spośród różnych modeli nieliniowych tylko zastosowanie funkcji hiperbolicznej poprawiło nieco wynik korelacji, a współczynnik korelacji wyniósł $r = 0,82$.

Rysunek 23 przedstawia zależność o modelu liniowym pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° dla trzeciej klasy wilgotności roślin: fazy 5-6 i trzeciej klasy szorstkości: LAI > 3. Jak widać na rysunku współczynnik korelacji jest jeszcze wyższy od otrzymanych dla tej samej klasy wilgotności roślin, lecz dla mniejszych wartości LAI i wynosi $r = 0,84$. Analiza różnych modeli nieliniowych nie wykazała wzrostu współczynnika korelacji. Jest to najsilniejsza w tej klasie wilgotności roślin zależność pomiędzy badanymi wielkościami. Przy niewielkiej wilgotności roślin głębokość penetracji fali radarowej jest większa, a duże wartości wskaźnika LAI ograniczają wpływ szorstkości gleby, który to wpływ nie został uwzględniony w proponowanej metodzie. Najsilniejszy związek pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami a współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° występuje w tej klasie wilgotności roślin.



Rys. 22. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 5-6 i wartości LAI 2-3



Rys. 23. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 5-6 i wartości LAI >3

Wyniki przeprowadzonych analiz regresji pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° i wilgotnością gleby w warstwie powierzchniowej (0-15 cm) są przedstawione w tabeli 3. Otrzymane współczynniki korelacji świadczą o wysokim stopniu współzależności obu badanych wielkości. Zbudowane modele mogą być zatem wykorzystane do przewidywania wartości wilgotności gleby na podstawie wartości współczynnika σ° otrzymanych ze zdjęć mikrofalowych zarejestrowanych w zakresie C i polaryzacji pionowej (VV). Są to modele liniowe, gdyż zastosowanie funkcji nieliniowych nie poprawiło wyników korelacji.

Tabela 3. Wyniki analizy regresji pomiędzy wilgotnością gleby (WG) [% obj.] i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° [dB] dla zbóż

Klasy wilgotności roślin (fazy)	Klasy szorstkości LAI	r	S	O	Równanie WG – wilgotność gleby [% obj.]
0-2 Od fazy krzewienia do fazy strzelania w źdźbło	<2	0,82	3,6	8	WG = 36,61 + 2,54 σ°
	2-3	0,82	2,7	11	WG = 46,53 + 3,17 σ°
	>3	0,81	3,7	40	WG = 65,27 + 4,18 σ°
3-4 Od fazy zawiązywania ziarna do fazy dojrzałości mleczej	<2	0,84	2,0	12	WG = 26,11 + 1,47 σ°
	2-3	0,81	3,8	32	WG = 37,0 + 2,1 σ°
	>3	0,76	4,8	33	WG = 44,11 + 2,5 σ°
5-6 Od fazy dojrzałości woskowej do fazy dojrzałości pełnej	< 2	0,74	2,6	14	WG = 32,46 + 1,66 σ°
	2-3	0,81	3,2	36	WG = 45,72 + 2,85 σ°
	>3	0,84	3,8	20	WG = 61,04 + 4,48 σ°

Objaśnienia:

r – współczynnik korelacji,

S – odchylenie standardowe średniej,

O – ilość obserwacji,

σ° – współczynnik rozpraszania wstecznego [dB].

Jak widać z tabeli 3, otrzymane 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. Przyczynę słabszych korelacji dla tych warunków wyjaśniono wyżej. Należy zaznaczyć, że w tych fazach wpływ zawartości wody w glebie na rozwój zbóż nie jest już tak istotny, jak w poprzednich. Rośliny wymagają więcej wody w miarę rozwoju i po osiągnięciu maksimum, zapotrzebowanie na wodę maleje i znika w okresie pełnej dojrzałości. Największą wrażliwość na niedostatek wody wykazują zboża w fazie kłoszenia, kwitnienia i zawiązywania ziarna. Wtedy skutek braku dostatecznej ilości wody zwiększa się ilość kwiatów bezpłodnych i źle wykształconych nasion. Dalszy wzrost roślin zostaje zahamowany i skraca się okres dojrzewania, co powoduje gorsze wypełnienie kłosów i obniża plon (Dubas A., Gładysiak St. 1997). Dla okresu największego zapotrzebowania zbóż na wodę otrzymano zależności o dużych współczynnikach korelacji.

7. SPRAWDZENIE DOKŁADNOŚCI WYPROWADZONYCH ALGORYTMÓW

Zbudowane modele predykcji wilgotności gleby pod zbożami na podstawie zdjęć mikrofalowych ERS-2 zostały poddane weryfikacji. W tym celu zamieszczone w tabeli 3 równania wykorzystano do obliczenia wilgotności gleby i porównania tych wartości z wartościami zmierzonymi w terenie. Pomiary 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 czerwca 1998 roku i 20 czerwca 1999 roku na polu testowym *Gostyń* znajdującym się na południe od badanego obszaru. W tabeli 4 znajdują się dane niezbędne do zastosowania proponowanych modeli dla pól testowych *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski* (faza, LAI, σ°), wyniki obliczeń, różnice pomiędzy wartościami wilgotności gleby obliczonymi i zmierzonymi w terenie oraz błąd względny w procentach.

W tabeli 5 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.

Tabela 4. Wyniki dokładności wyprowadzonych algorytmów – pola testowe Gościeszyn i Grodzisk Wielkopolski

Data	Uprawa	Faza	WG	LAI	σ°	WGI	Δ	%l
11.05.99	jęczmień jary	0	17,7	2,6	-9,87	15,24	-2,46	13,9
11.05.99	pszenica jara	0	14,3	1,6	-8,96	13,85	-0,45	3,1
30.05.99	owies jary	1	12,1	5,07	-12,81	11,72	-0,38	3,1
30.05.99	pszenica jara	1	7,3	4,7	-13,75	7,80	0,50	6,8
30.05.99	pszenica ozima	1	12,4	5,1	-12,54	12,85	0,45	3,6
30.05.99	pszenica ozima	2	15,0	3,1	-12,19	14,32	-0,68	4,6
30.05.99	pszenica ozima	2	12,3	4,25	-12,97	11,06	-1,24	10,1
04.07.99	owies jary	3	10,2	4,03	-12,8	12,11	1,91	18,7
15.06.99	pszenica ozima	4	12,4	3,21	-12,24	13,51	1,11	9,0
04.07.99	pszenica jara	4	16,3	2,9	-8,34	19,49	3,19	19,5
04.07.99	pszenica jara	5	18,3	2,63	-7,64	23,95	5,65	30,9
04.07.99	jęczmień jary	5	15,1	3,07	-8,61	19,88	4,78	31,7
04.07.99	pszenica ozima	5	17,7	1,89	-7,85	19,43	1,73	9,8
20.07.99	pszenica ozima	6	15,5	2,32	-9,79	17,82	2,32	15,0
20.07.99	pszenica ozima	6	13,2	2,93	-11,84	11,98	-1,22	9,3
	średnia							12,0

Objaśnienia:

WG – wilgotność gleby [% obj.] zmierzona w terenie instrumentem TRIME-FM,

LAI – wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści zmierzony w terenie [bezwymiarowe],

σ° – współczynnik rozpraszania wstecznego σ° obliczony ze zdjęć ERS- 2.SAR [dB],

WGI – wilgotność gleby obliczona według równania z tabeli 3,

Δ – różnica pomiędzy WGI i WG [% obj.],

%l – błąd względny w procentach (Δ /WG)100.

Tabela 5. Wyniki dokładności wyprowadzonych algorytmów – pole testowe Gostyń

Data	Uprawa	Faza	WG	LAI	σ°	WGI	Δ	% l
30.06.98	owies jary	4	12,7	2,5	-12,8	10,12	-2,58	20,3
30.06.98	jęczmień jary	4	24,2	3,2	-8,33	23,29	-0,91	3,8
30.06.98	pszenica jara	4	25,8	3,8	-10,12	18,81	-6,99	27,1
30.06.98	pszenżyto ozime	5	19,4	2,3	-8,33	18,63	-0,77	4,0
30.06.98	pszenżyto ozime	5	20,6	2,86	-7,09	20,69	0,09	0,4
20.07.99	pszenica jara	5	13,6	1,69	-11,19	13,88	0,28	2,1
30.06.98	żyto	6	18,3	2,21	-10,69	15,25	-3,05	16,6
20.07.99	jęczmień ozimy	6	17,3	2,22	-10,42	16,02	-1,28	7,3
20.07.99	pszenica ozima	6	22,7	3,22	-8,53	20,27	-2,43	10,7
20.07.99	żyto	6	26,3	3,38	-7,32	26,05	-0,25	1,0
20.07.99	pszenżyto ozime	6	23,2	3,8	-7,96	22,99	-0,21	0,9
	średnia							8,6

Objaśnienia:

WG – wilgotność gleby [% obj.] zmierzona w terenie instrumentem TRIME-FM,
 LAI – wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści zmierzony w terenie [bezwymiarowe],

σ° – współczynnik rozpraszania wstecznego σ° obliczony ze zdjęć ERS-2.SAR [dB],

WGI – wilgotność gleby obliczona według równania z tabeli 3,

Δ – różnica pomiędzy WGI i WG [% obj.],

% l – błąd względny w procentach $(\Delta/WG)100$.

Jak widać z przedstawionych tabel, średni błąd obliczeń wykonanych za pomocą równań liniowych wyniósł około 12% dla pól testowych *Gościeszyn* i *Grodzisk Wielkopolski* i 8,6% dla pola testowego *Gostyń*. Zbudowane modele w przeważającej części zawyżały wyniki dla obszaru badawczego (różnica Δ wg tab. 4 dodatnia) i zaniżały dla pola testowego *Gostyń* (różnica Δ wg tab. 5 ujemna). Różnice te nie były jednak znaczące, a wartości wilgotności gleby zmierzone w terenie i obliczone ze zdjęć ERS-2 znajdowały się w tych samych warunkach wilgotnościowych gleby. Tym samym zostało wykazane, że otrzymane równania mogą być stosowane na dowolnym obszarze rolniczym w Polsce.

Największe błędy względne (w %) otrzymane dla obszaru badawczego wystąpiły przy obliczaniu wilgotności gleby pod jęczmieniem jarym i pszenicą jarą (odpowiednio 31,7% i 30,9%). Wartości wilgotności gleby były wtedy jedne z największych spośród analizowanych. Wymienione wyżej zboża znajdowały się w tej samej fazie rozwojowej dojrzałości woskowej, cechującej się niską wilgotnością roślin, lecz w różnych klasach szorstkości, różniły się wartościami wskaźnika LAI. Dla obu tych warunków otrzymano wysoką zależność pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° . Tak duże błędy mogły być spowodowane zwiększoną szorstkością powierzchni roślinnej, wywołaną przez wyleganie zbóż, stwierdzone podczas badań terenowych. W tym wypadku wartości wskaźnika LAI nie charakteryzowały szorstkości powierzchni roślinnej. Biorąc jednak pod uwagę warunki wilgotnościowe gleby, to zarówno wartości zmierzone, jak i obliczone oznaczały dużą wilgotność objętościową gleby, dla której różnice rzędu 5% nie są aż tak istotne, jak w wypadku gleb przesuszonych.

Najmniejsze błędy, jakie otrzymano dla obszaru badawczego, wystąpiły dla zbóż znajdujących się w pierwszej klasie wilgotności roślin, z wyjątkiem jęczmienia jarego. Zboże to znajdowało się w fazie krzewienia, i – jak stwierdzono w trakcie badań – powierzchnia łanu cechowała się większą szorstkością niż powierzchnia innych zbóż w tym czasie. Generalnie można stwierdzić, że większe błędy zaobserwowano w końcowych fazach dojrzewania zbóż, kiedy rośliny nie reagują już tak intensywnie na brak wody w glebie, jak we wcześniejszych fazach, a niewielka ich wilgotność powoduje, że są one narażone na wyleganie. Taki „sztuczny” stan powierzchni badanej nie jest wtedy reprezentowany poprzez wskaźnik LAI, co prowadzi do większych błędów szacowania wilgotności gleby.

Średni błąd otrzymany przy szacowaniu wilgotności gleby dla obszaru testowego *Gostyń*, jest mniejszy od tego, który otrzymano dla obszaru badawczego. Jednak różnice błędów pomiędzy poszczególnymi próbami są tu większe (tab. 5). Największy błąd obliczeń wystąpił dla pszenicy jarej znajdującej się w fazie dojrzałości mleczej i cechującej dużą wartością wskaźnika LAI. Dla tych warunków wzrostu zbóż otrzymano słabszą niż dla innych korelację pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° i tym można tłumaczyć duży błąd oszacowania wilgotności

gleby. Nie znaleziono natomiast jednoznacznej przyczyny wystąpienia dużego błędu przy oszacowaniu wilgotności gleby pod owsem jarym znajdującym się w fazie dojrzałości młecznej i cechującym się średnią wartością wskaźnika LAI. Dla tych warunków otrzymano bowiem zależność o wysokiej korelacji. Ten rodzaj zboża występował jednak bardzo rzadko w okresie badawczym i przy budowie modeli nie zostały uwzględnione różne warunki wzrostu rośliny. Mogło to spowodować duży błąd obliczenia wilgotności gleby.

8. PODSUMOWANIE

Otrzymane na podstawie badań wyniki upoważniają do stwierdzenia, że wilgotność gleby pod zbożami może być obliczana na podstawie współczynnika rozpraszania wstecznego σ° otrzymywanego ze zdjęć mikrofalowych w paśmie C przy polaryzacji VV. Obecnie takie zdjęcia można otrzymać z satelity ERS-2 czy z przyszłego satelity ENVISAT, który będzie umieszczony na orbicie w 2001 roku.

Wiedząc, że sygnał rejestrowany w paśmie mikrofalowym zależy od szorstkości i wilgotności badanej powierzchni, postanowiono opracować metodę szacowania wilgotności gleby pod zbożami, oznaczając szorstkość poprzez wielkość powierzchni projekcyjnej liści LAI i zawartość wody w roślinach poprzez określenie ich fazy rozwojowej. Należy zwrócić uwagę na fakt, że dane dotyczące średnich wartości LAI oraz zawartości wody w roślinach w poszczególnych fazach rozwojowych zbóż nie były dotąd publikowane i są nowym elementem w badaniach rolniczych.

W okresie wykonywania pomiarów wilgotności gleby w latach 1997–1999, od maja do sierpnia wystąpiło sześć faz rozwojowych zbóż, począwszy od fazy krzewienia, aż do fazy ostatniej – dojrzałości pełnej. Na podstawie analizy procentowej zawartości wody w roślinach wyznaczono trzy klasy wilgotności roślin i przyporządkowano im odpowiednie fazy rozwojowe zbóż. W każdej z wyróżnionych klas zawierały się trzy klasy szorstkości reprezentowane przez różne wartości wskaźnika LAI. Uwzględniając powyższe, przygotowano bazę danych satelitarnych i naziemnych, dla której przeprowadzono analizy statystyczne w celu określenia zależności pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° . W tabeli 3 zamieszczono otrzymane równania pozwalające na szacowanie wilgotności gleby. Wysokie współczynniki korelacji, jakie otrzymano oraz wykonane sprawdzenie dokładności tych równań oznaczają, że zbudowane modele mogą być stosowane w praktyce.

Zastosowanie wyprowadzonych równań wymaga jedynie 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 K. 1995). Faza rozwojowa zbóż jest możliwa do

określenia przy znajomości daty rozpoczęcia wegetacji na wiosnę na danym obszarze na podstawie danych publikowanych przez IMGW.

Proponowana metoda oznaczania wilgotności gleby została poddana weryfikacji przeprowadzonej na podstawie losowo wybranych danych uzyskanych na obszarze badawczym w okresie wegetacyjnym roku 1999 oraz danych zebranych z innego terenu badawczego w latach 1998 i 1999. Ogólnie można stwierdzić, że otrzymane wyniki są zadowalające jeśli chodzi o badania prowadzone dla dużych powierzchni rolniczych. Średni błąd szacowania wilgotności gleby pod zbożami na podstawie zdjęć mikrofalowych ERS-2.SAR wyniósł od 8,6% do 12%.

Zestawienie kosztów uzyskania informacji o wilgotności gleby pod zbożami metodą tradycyjną i proponowaną w tym artykule wskazuje, że proponowana metoda jest około 2000 razy tańsza.

Dane dotyczące aktualnej wilgotności gleby pod zbożami, zwłaszcza w czasie największego zapotrzebowania roślin na wodę, ułatwią podejmowanie właściwych decyzji o gospodarowaniu wodą na danym obszarze. Pozwoli to na utrzymanie warunków wodnych wzrostu roślin na poziomie umożliwiającym otrzymanie potencjalnych plonów.

LITERATURA

- [1] Attema E.P.W., Ulaby F.T., 1978, *Vegetation modeled as a water cloud*. Radio Science, Vol. 13, No 2, s. 357–364.
- [2] Beaudoin A., Le Toan T., Gwyn Q.H.J. 1990: *SAR observations and modeling of the C-band backscatter variability due to multiscale geometry and soil moisture*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 5, s. 886–895.
- [3] Benallegue M., Taconet O., Vidal-Madjar D., Normand M., 1995, *The use of radar backscattering signals for measuring soil moisture and surface roughness*. Remote Sens. Environ., no. 53, s. 61–68.
- [4] Byrne G.F., Dąbrowska-Zielińska K., Goodrick G.N., 1981, *Use of visible and thermal satellite data to monitor an intermittently flooding marshland*. Remote Sens. Environ. 11, s. 393–399.
- [5] Cihlar J., Ulaby F.T., 1974, *Dielectric properties of soils as a function of moisture content*. CRES Technical Report 177–47, Kansas.
- [6] 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, Warszawa.
- [7] Cravey R.L., Jackson T.J., Hsu A.Y., 1998, *ERS-2 SAR backscattering coefficient and soil moisture for Southern Great Plains, 1997 Hydrology Experiment*. Proc. of the Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, The Netherlands, s. 439-444.

-
- [8] Dąbrowska-Zielińska K., 1995, *Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA*. PAN, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Prace Geograficzne Nr 165, Continuo, Wrocław.
 - [9] Demircan A., Rombach M., Mauser W., 1992, *Extraction of plant – and soil – parameters from multitemporal ERS-1 SLC – data of the Freiburg test site*. Proc. of First ERS-1 Symposium, s. 631–635, Cannes, France.
 - [10] Dobson M.C., Ulaby F.T., 1978, *Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part III-Soil tension*. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-17.
 - [11] Dubas A., Gładysiak St., 1997, *Szczegółowa uprawa roślin rolniczych*. Wyd. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu.
 - [12] Gruszczyńska M., 1992, *Pomiary użytków zielonych systemem LAI i ich zastosowanie*. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, 3, s. 114–115.
 - [13] Gruszczyńska M., Dąbrowska-Zielińska K., Janowska M., Wielogórska A., 1993, *Application of ERS-1 SAR data for hydrological studies*. From Optics to Radar, SPOT and ERS Applications, CEPADUES-EDITIONS, France, s. 365–369.
 - [14] Gruszczyńska M., 1994, *Zastosowanie zdjęć satelitarnych ERS-1 SAR w badaniach rolniczych*. Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji, 24, Warszawa, s. 53–57.
 - [15] Gruszczyńska M., 1998a, *Zastosowanie zdjęć mikrofalowych z satelitów ERS-1 i ERS-2 do określania wilgotności gleb pod zbożami*. Prace IGiK, T. XLV, z. 97, s. 117–136.
 - [16] Gruszczyńska M., Dąbrowska-Zielińska K., 1998b, *Application of microwave images from European Remote Sensing Satellites (ERS-1/2) for soil moisture estimates*. Journal of Water and Land Development, No 2, s. 7–18.
 - [17] Gruszczyńska M., 1999, *Historia i wykorzystanie zdjęć radarowych*. Fotointerpretacja w Geografii, Nr 29 Problemy Telegeoinformacji, PTG, Warszawa, s. 23–33.
 - [18] Gruszczyńska M., 2000, *Zastosowanie zdjęć mikrofalowych z satelity ERS do szacowania wilgotności gleby pod zbożami*. Rozprawa doktorska, IGiK.
 - [19] GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, 1997a, *Wstępny szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich*. Informacje sygnałne nr 7/97, Warszawa.
 - [20] GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, 1997b, *Przedwinykowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich w 1997 roku*. Informacje sygnałne nr 8, Warszawa.
 - [21] GUS, Wyniki produkcji roślinnej 1997, 1998a, *Powierzchnia, plony i zbiory roślin uprawnych*. Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa.

- [22] GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, 1998b, *Wiosenna ocena stanu upraw rolnych i ogrodnich w połowie maja 1998 roku*. Informacje sygnałowe, nr 6/98, Warszawa.
- [23] GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, 1998c, *Badanie produkcji roślinnej, Przedwiniowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich*. Informacja sygnałowa, Warszawa.
- [24] GUS, 1999a, *Wyniki produkcji roślinnej w 1998*, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa.
- [25] GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, 1999b, *Badanie produkcji roślinnej: Wstępny szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich oraz Przedwiniowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich*, Informacja sygnałowa, Warszawa.
- [26] Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.C., El-Rayes M.A., Wu L., 1985, *Microwave dielectric behavior of wet soil – Part 1: Empirical models and experimental observations*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-23, No. 1, s. 25–34.
- [27] Henderson F.M., Lewis A.J. 1998, *Principles and Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*. Third Edition, volume 2, ed. R.A. Ryerson, John Wiley and Sons, New York.
- [28] Idso S.B., Jackson R.D., 1969, *Thermal radiation from the atmosphere*. J. Geophys. Res., 74, s. 5397–5403.
- [29] Jackson R.D., 1983, *Canopy temperature and crop water stress*. Adv. Irrig., 1, s. 43–85.
- [30] Kondracki J., 1978, *Geografia fizyczna Polski*. Warszawa PWN.
- [31] Kuźnicki F., Białousz St., Skłodowski P., 1979, *Podstawy gleboznawstwa z elementami kartografii i ochrony gleb*. Warszawa PWN.
- [32] LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, 1991, Operating Manual, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska.
- [33] Laur H., 1992, *Derivation of backscattering coefficient σ^0 in ERS-1.SAR.PRI products*. ESA Bulletin, Issue 1, Rev.0.
- [34] Lo C.P., 1986, *Applied remote sensing*, Longman Inc., New York.
- [35] Łomnicki A., 1995, *Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników*. Warszawa Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [36] Mapa glebowo-rolnicza w skali 1:100 000, IUNG, Puławy, 1989.
- [37] Mocek A., Drzymała St., Maszner P., 1997, *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb*. Poznań Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu.
- [38] Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A., 1994, *Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index*. Remote Sens. Environ., 49, s. 246–263.
- [39] Olędzki J.R., 1993, *Rozwój teledetekcji satelitarnej i jej zastosowania w badaniach środowiska geograficznego*. Przegląd Geofizyczny T. 38 z. 2 s. 137–150, z. 3–4, s. 223–242.

-
- [40] Podgórski J., 1995, *Statystyka z komputerem*. Warszawa Zakład Nauczania Informatyki „MIKOM”.
- [41] Portmann F., Mendel H.G., 1997, *Soil moisture estimation in hydrological mesoscale modelling using ERS SAR data*. Proc. of the Third ERS Symposium on Space at the service of our Environment, Vol. I, s. 85–88, Florence, Italy.
- [42] Prevot L., Chauki H., Remond A., King C., Wigneron J.P., Chanzy A., Calcagno P., Desprats J.F., 1998, *Comparison of ERS and multi-angular RadarSat measurements over agricultural canopies: first results of the Alpilles-ReSeDA campaign*. Proc. of the Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, The Netherlands, s. 101–106.
- [43] Rombach M., Mauser W., 1997, *Multi-annual analysis of ERS surface soil moisture measurements of different land uses*. Proc. of the Third ERS Symposium on Space at the service of our Environment, Vol. I, s. 27–34, Florence, Italy.
- [44] Roszak Wł., 1997, *Ogólna uprawa roli i roślin*. Warszawa Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [45] Roth C.H., Malicki M.A., Plagge R., 1992, *Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR*. Journal of Soil Science, 43, s. 1–13.
- [46] Schmugge T., 1990, *Measurements of Surface Soil Moisture and Temperature*. Remote Sensing of Biosphere Functioning, Ecological Studies 79, Editors: Hobbs R.J., Mooney H.A., Springer-Verlag New York Inc.
- [47] Soulis E.D., Rotunno Filho O.C., Kouwen N., Seglenieks F., Pultz T., Crevier Y., 1995, *Spatial variability in soil moisture in pasture fields using ERS-1 SAR: implications for distributed rainfall-runoff models*. ACTES/Proceedings of the Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, s. 361–364.
- [48] Stankiewicz K., 1998, *Metoda przetwarzania mikrofalowych zdjęć satelitarnych terenów o urozmaiconej rzeźbie z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu*. Prace IGiK T. XLV z. 97 s. 7–80, Warszawa.
- [49] Statgraphic Plus User Manual, 1997, Manugistics Inc.
- [50] Ślusarczyk E., 1978, *Wpływ wielkości biomasy na pobieranie wody z gleby*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych z. 205 s. 115–126.
- [51] Ulaby F.T., 1974, *Radar Measurement of Soil Moisture Content*. IEEE Transactions on Antennas and propagation, vol. AP-22, No. 2.
- [52] Ulaby F.T., Batlivala P.P., 1976a, *Optimum radar parameters for mapping soil moisture*. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-14, No. 2.

- [53] Ulaby F.T., Batlivala P.P., 1976b, *Diurnal Variation of Radar Backscatter from Vegetation Canopy*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-24, No. 1, s. 11–17.
- [54] Ulaby F.T., Batlivala P.P., Dobson M.C., 1978a, *Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part I-Bare soil*. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-16, No. 4.
- [55] Ulaby F.T., Bradley G.A., Dobson M.C. 1978b, *Microwave dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part II-Vegetation-covered soil*. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-17.
- [56] Ulaby F.T., 1982, *Radar Signatures of Terrain: Useful Monitors of Renewable Resources*. Proc. of the IEEE, vol. 70, No. 12.
- [57] Ulaby F.T., Moore M.K., Fung A.K., 1986, *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*. Vol. 3, Artech House, Norwood, MA.
- [58] Ulaby F.T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M., Dobson M.C., 1990, *Michigan microwave canopy scattering model*. International Journal of Remote Sensing, Vol. 11, No 7, s. 1223–1253.
- [59] 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, s. 19–25.
- [60] Welles J.M., 1990, *Some indirect methods of estimating canopy structure*. Remote Sensing Reviews, Vol. 5(1), s. 31–43.
- [61] Wooding M.G., Griffiths G.H., Evans R., Bird P., Kenward D., Keyte G.E., 1992, *Temporal monitoring of soil moisture using ERS-1 SAR data*. Proc. of First ERS-1 Symposium, s. 641–647, Cannes, France.
- [62] Wooding M.G., Zmuda A.D., Griffiths G.H., 1993, *Crop discrimination using multi-temporal ERS-1 SAR data*. Proc. of the Second ERS-1 Symposium – Space at the Service of our Environment, s. 51-56, Hamburg, Germany.

Recenzował: dr hab. Jan Olędzki

MARIA GRUSZCZYŃSKA

**ESTIMATION OF SOIL MOISTURE UNDER CEREALS
ON THE BASIS OF ERS-2 SAR IMAGES RECORDED IN C (VV)
BAND**

S u m m a r y

Among numerous methods only remote sensing offers a potential means of determining the spatial distribution of soil moisture over large areas within short time and at a reasonable cost. Among various electromagnetic bands

available for remote sensing observations from satellite platforms, the microwave region offers the greatest potential in terms of penetration through soil to the depth dependent on spectral band - the longer band, the deeper penetration. Microwaves can penetrate clouds, which is important for regularity of observations. The main physical factors, which affect radar backscatter response, are surface roughness and dielectric properties of target, which closely correspond with the moisture content. The possibility to determine soil moisture using active microwaves draws the attention of scientists since the radar techniques have been open to civilians. It is obvious from the recent studies, that radar backscattering coefficient σ^0 increases with the increase of soil moisture and surface roughness (Ulaby F.T. 1974). For soil moisture determination from radar measurements the effect of surface roughness should be separated from the effect of moisture (soil and vegetation moisture) of the target. It was found that vegetation surface roughness could be expressed by Leaf Area Index (LAI) values. LAI can be measured during field surveys or calculated from images obtained in optical bands of electromagnetic spectrum (Dąbrowska-Zielińska K. 1995). In this article author proposes the assessment of soil moisture for the stable vegetation surface roughness conditions characterised by LAI. and for the stable vegetation moisture conditions characterised by growth stage of crops. The method has been verified using the developed algorithms and ground truth data. The results show that the differences in measured and calculated soil moisture values are not significant and can be accepted in most of agricultural applications. In this article the results obtained for cereals from the study carried out from 1992 to 1997 at the test site in Wielkopolska region are presented.

Verification: Zbigniew Bochenek

МАРИЯ ГРУЩИНЬСКА

ОЦЕНКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ПОД ЗЕРНОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ
НА ОСНОВЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СНИМКОВ ERS-2.SAR ,
РЕГИСТРИРУЕМЫХ В ПОЯСЕ C (VV)

Р е з ю м е

Среди многих методов определения влажности почв только методы дистанционного зондирования разрешают определять пространственное распределение этого параметра на любом большом пространстве, в короткое время и за относительно низкую цену. Среди многих диапазонов электромагнитного излучения, доступных для проведения наблюдения поверхности Земли со спутниковой высоты,

микроволны имеют самый большой потенциал для определения влажности почв, ибо проникают вглубь их на глубину, зависимую от длины волны – чем длиннее волна, тем большая глубина обследования. Кроме того, микроволновое излучение проникает через облака, что особенно важно в случае проведения многократных измерений в точно определённый срок вегетативного периода. Однако основной чертой, благодаря которой возможно применение микроволн для оценки влажности почв, является их реакция на величину диэлектрической постоянной почв, которая находится в тесной связи с количеством содержащейся в них воды. Это свойство вызвало заинтересованность учёных исследованиями влажности почв с помощью микроволн уже с момента предоставления радиолокационной техники для гражданских целей (шестидесятые годы нашего столетия). Из многих проводимых до сих пор исследований вытекает, что коэффициент предварительного рассеивания (выражающий интенсивность отражённого от исследуемой поверхности микроволнового излучения), полученный на основе радиолокационных снимков, т.н. σ^0 , возрастает вместе с ростом влажности почвы и зависит также от шероховатости исследуемой поверхности (Ulaby F.T. 1974). При определении влажности исследуемой поверхности (в случае почв покрытых растительностью – это как влажность почвы, так и влажность самих растений) влияние шероховатости на величину коэффициента σ^0 можно ограничить до минимума, выполняя эту задачу для территорий с постоянной шероховатостью. В результате исследований, проведённых на сельскохозяйственном тестовом пространстве, расположенном в Великой Польше, оказалось, что шероховатость поверхности зерновых культур может быть выражена с помощью показателя проекционной поверхности листьев, т.н. LAI (Leaf Area Index). Величины LAI можно измерять непосредственно на местности или определять на основе спутниковых снимков, выполненных в оптическом диапазоне электромагнитного излучения (Домбровска-Зелиньска К. 1995). В представленной статье автор предлагает определять влажность почв в неизменных условиях шероховатости растений, выраженной величиной LAI, а также в неизменных условиях влажности растений, выраженных их фазой развития. Были получены высокие коэффициенты корреляции, а также высокая точность вычислений, это обозначает, что созданные модели могут быть применены на практике. В данной статье представлены результаты, полученные для зерновых культур, исследуемых в 1992–1997 годах.

Перевод: Роза Толстикова