

**INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII**

**Maria Gruszczyńska**

**ZASTOSOWANIE ZDJĘĆ  
MIKROFALOWYCH  
Z SATELITY ERS DO SZACOWANIA  
WILGOTNOŚCI GLEBY POD ZBOŻAMI**

Rozprawa doktorska

**Promotor:**

**Dr hab. Katarzyna Dąbrowska-Zielińska, prof. IGiK**

Warszawa, 2000 r.

## SPIS TREŚCI:

|   |    |
|---|----|
| 1. WSTĘP  | 2  |
| 2. TEZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ I PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA   | 4  |
| 3. WILGOTNOŚĆ GLEBY   | 6  |
| 3.1 Wstęp   | 6  |
| 3.2 Przegląd metod oznaczania wilgotności gleby   | 6  |
| 3.3 Podsumowanie  | 9  |
| 4. HISTORIA I WYKORZYSTANIE ZDJĘĆ RADAROWYCH  | 10 |
| 5. STAN BADAŃ NAD OKREŚLANIEM WILGOTNOŚCI GLEBY<br>POKRYTEJ ROŚLINNOŚCIĄ NA PODSTAWIE ZDJĘĆ<br>RADAROWYCH           | 20 |
| 6. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA NATĘŻENIE ODBITEGO<br>SYGNAŁU RADAROWEGO  | 28 |
| 6.1 Szorstkość powierzchni  | 28 |
| 6.2 Stała dielektryczna   | 30 |
| 7. WSPÓŁCZYNNIK ROZPRASZANIA WSTECZNEGO $\sigma^{\circ}$  | 33 |
| 8. BADANIA PROWADZONE NA OBSZARZE TESTOWYM  | 36 |
| 8.1 Opis obszaru badawczego   | 36 |
| 8.2 Pomiary przeprowadzone na obszarze badawczym  | 38 |
| 8.3 Charakterystyka warunków wegetacji zbóż w latach 1997-1999  | 40 |
| 9. WSKAŹNIK POWIERZCHNI PROJEKCYJNEJ LIŚCI – LAI  | 44 |
| 9.1 Wstęp   | 44 |
| 9.2 Pomiary wskaźnika LAI przeprowadzone na obszarze badawczym  | 44 |
| 9.3 Analiza wartości wskaźnika LAI i DIFN dla zbóż  | 49 |
| 9.4 Wskaźnik LAI-szorstkość powierzchni roślinnej   | 52 |
| 10. ZAWARTOŚĆ WODY W ROŚLINACH  | 55 |
| 11. ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY WSPÓŁCZYNNIKIEM ROZPRASZANIA<br>WSTECZNEGO $\sigma^{\circ}$ I WILGOTNOŚCIĄ GLEBY POD ZBOŻAMI | 58 |
| 11.1 Wstęp  | 58 |
| 11.2 Analiza statystyczna danych naziemnych i satelitarnych   | 58 |
| 12. SPRAWDZENIE DOKŁADNOŚCI WYPROWADZONYCH<br>ALGORYTMÓW  | 69 |
| 13. PODSUMOWANIE  | 72 |
| 14. SPIS LITERATURY   | 74 |

## 1. WSTĘP

Jednym z podstawowych czynników decydujących o rozwoju roślin uprawnych i ich plonie jest woda. W miarę rozwoju, rośliny wymagają coraz to większej ilości wody. Po osiągnięciu maksimum ich zapotrzebowanie na wodę maleje i znika w okresie pełnej dojrzałości. Zawartość wody w powierzchniowej warstwie gleby wpływa również na kształt bilansu wodnego i jest niezbędną informacją stosowaną w wielu badaniach z zakresu hydrologii i klimatologii.

Ilość wody w glebie określa wilgotność, wyrażana zwykle w procentach wagowych lub objętościowych. Wilgotność jest jedną z najbardziej zmiennych właściwości gleby. Na te zmiany wpływa wiele czynników, z których najważniejszymi są: opady atmosferyczne, transpiracja roślin i wyparowywanie wody z powierzchni gleby. Zarówno nadmiar, jak i niedobór wilgotności gleby pociąga za sobą podobne w skutkach obniżenie zdolności produkcyjnej roślin. Pomiary wilgotności gleby powinny być zatem prowadzone w sposób dynamiczny. Konieczność przeprowadzenia w stosunkowo krótkim czasie dużej liczby oznaczeń stawia metodom pomiaru wilgotności gleby duże wymagania – muszą one być proste, szybkie i dostatecznie dokładne.

Obecnie stosowane metody oznaczania wilgotności gleby nie spełniają tych oczekiwań. Są to metody punktowe, pracochłonne i kosztowne, co czyni je nieprzydatnymi w przypadku konieczności wykonywania pomiarów z dużą częstotliwością, odpowiadającą czasowej zmienności wilgotności gleby w ciągu okresu wegetacyjnego. Spośród wielu metod oznaczania wilgotności gleby, jedynie metody teledetekcji pozwalają na określenie przestrzennego rozkładu tego parametru na dowolnie dużym obszarze, w krótkim czasie i za względnie niską cenę (Idso [1969], Byrne [1981], Jackson [1983], Lo [1986], Moran [1994], Schmutge [1990]).

Metody teledetekcji oparte są na rejestracji promieniowania elektromagnetycznego z pewnej odległości od powierzchni ziemi, np. z pułapu lotniczego lub satelitarnego (Ciołkosz [1999], Olędzki [1993]). Wśród wielu zakresów promieniowania elektromagnetycznego dostępnych do prowadzenia obserwacji powierzchni ziemi z odległości, mikrofałe posiadają największy potencjał do określania wilgotności gleby, ponieważ wnikają w jej głąb (im dłuższa fala, tym większa głębokość penetracji, Ulaby [1982], [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 (koniec lat 60-tych naszego stulecia).

Z dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że współczynnik rozpraszania wstecznego tzw.  $\sigma^{\circ}$  (wyrażający natężenie odbitego od badanej powierzchni promieniowania mikrofalowego) otrzymany ze zdjęć mikrofalowych, wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności badanej powierzchni i zależy również od jej szorstkości i od typu pokrywającej ją roślinności

(Ulaby [1974]). Udział poszczególnych czynników w wartości współczynnika  $\sigma^\circ$  jest trudny do określenia. Problem ten jest ciągle tematem prac badawczych podejmowanych na całym świecie.

Jeśli chodzi o zakres C (5.3 GHz) promieniowania mikrofalowego spolaryzowanego pionowo (VV), w jakim pracuje system radarowy zainstalowany na satelicie ERS, problem określania wilgotności gleby pod zbożami (znajdującymi się w różnych fazach rozwojowych) na podstawie współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  nie został do tej pory rozwiązany. Znane są z literatury jedynie badania studialne dotyczące roślinności trawiastej, lasów czy pojedynczych zbóż (pszenica, kukurydza). Większość z nich dotyczyła szczegółowych badań podstawowych traktujących badaną powierzchnię jako składnik pojedynczych roślin, a nie w kontekście pokrycia roślinnego (np. łąków).

## 2. TEZA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ I PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA.

Wyniki dotychczas przeprowadzonych badań, znane z literatury, jak również waga problemu upoważniły mnie do podjęcia tematu i postawienia następującej tezy rozprawy doktorskiej :

**Istnieje zależność wprost proporcjonalna pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  obliczanym ze zdjęć satelitarnych ERS-2.SAR.**

W celu realizacji podjętego tematu rozprawy doktorskiej przyjęto następujące założenia, poparte wynikami badań przeprowadzonych na obszarze testowym w latach 1992-1999 (Gruszczyńska [1992], [1993], [1994], [1998a], [1998b]):

- Wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści, tzw. LAI (Leaf Area Index) odzwierciedla szorstkość powierzchni roślinnej,
- Wilgotność roślin jest stała w poszczególnych fazach rozwojowych zbóż,
- W przypadku gleb całkowicie pokrytych roślinnością na sygnał radarowy nie wpływa szorstkość powierzchni gleby oraz kierunek orania,
- Na badanym obszarze przeważa jeden typ gleby – gleby bielcowe i pseudobielcowe wytworzone na piaskach gliniastych lekkich (A pgl), zatem wpływ tekstury gleby na wartość współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  nie musi być uwzględniony,
- Badana powierzchnia rolnicza jest terenem płaskim, można więc przyjąć, że na wartość współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  nie wpływają zakłócenia związane z efektem skracania faktycznych odległości (shorthening), nakładania się różnych informacji na siebie (layover) oraz cienie (shadowing).

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 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), skompresowanymi w kierunku zasięgu i azymutu, a następnie przepróbkowanymi do układu współrzędnych określonych przez zasięg naziemny (Ciołkosz [1994], Stankiewicz [1998]). W ten sposób kwadratowe piksele odpowiadające powierzchni o boku 12,5 m nie odpowiadają przestrzennej zdolności rozdzielczej, która wynosi w przypadku produktu PRI 30 m. Wszystkie parametry niezbędne do obliczenia współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  są umieszczane w nagłówku obrazu cyfrowego.

Współczynnik rozpraszania wstecznego, tzw.  $\sigma^\circ$  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. Zatem aby móc jeden z tych czynników obliczać na podstawie współczynnika  $\sigma^\circ$  postanowiono wyeliminować lub przynajmniej ograniczyć do minimum wpływ drugiego z nich.

Przy określaniu wilgotności badanych powierzchni roślinnych wpływ szorstkości na wielkość współczynnika  $\sigma^\circ$  można ograniczyć do minimum, wykonując to zadanie dla obszarów o jednakowej szorstkości. W wyniku badań przeprowadzonych na rolniczym obszarze testowym zlokalizowanym w Wielkopolsce (okolice Grodziska Wielkopolskiego i Gościeszyna) stwierdzono, że szorstkość powierzchni zbóż może być wyrażona poprzez wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści, tzw. LAI (Leaf Area Index). Wielkość ta wyraża zarówno gęstość roślin, jak i ich geometrię oraz przybiera charakterystyczne dla danej fazy rozwojowej roślin wartości. Różnice w wartościach współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ , otrzymanych dla powierzchni o jednakowej szorstkości (wyrażonej zbliżonymi wartościami LAI), powinny być wtedy spowodowane głównie różnicami w wilgotności badanego obiektu. W przypadku gleb pokrytych roślinnością, będzie to zarówno wilgotność gleby jak i wilgotność samych roślin. Pozostaje problem ograniczenia wpływu tego drugiego czynnika. W wyniku badań przeprowadzonych w latach 1992-1999 na wspomnianym wyżej obszarze badawczym 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  $\sigma^\circ$  będzie w poszczególnych okresach wzrostu roślin również stały. Należy się zatem spodziewać, że po zapewnieniu stałych warunków szorstkości i wilgotności roślin, otrzymamy bezpośrednią korelację pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  obliczanym ze zdjęć mikrofalowych rejestrowanych przez system radarowy SAR zainstalowany na satelicie ERS.

Celem rozprawy doktorskiej jest udowodnienie postawionej tezy poprzez zbadanie wyżej wymienionej zależności, a następnie wykorzystanie otrzymanych wyników do opracowania nowej metody określania wilgotności gleby pod zbożami. Zboża są podstawową uprawą i zajmują 70% ogólnej powierzchni wszystkich zasiewów w Polsce. Istnieje potrzeba opracowania metody szacowania wilgotności gleby dla dużych obszarów, możliwej do stosowania niezależnie od warunków pogodowych. Otrzymane informacje mogą zasilać modele prognozowania plonów zbóż i ułatwiać podejmowanie decyzji związanych z właściwym gospodarowaniem wodą na danym terenie.

### 3. WILGOTNOŚĆ GLEBY

#### 3.1. Wstęp.

Zawartość wody w powierzchniowej warstwie gleby określa wilgotność, która jest przedstawiana jako stosunek masy wody zawartej w próbce gleby do masy gleby suchej. Wyraża się ją w procentach wagowych. Wilgotność określa się również jako stosunek objętości wody zawartej w próbce gleby do objętości całej próbki gleby i wtedy wyraża się ją w procentach objętościowych [% obj.]. Wiele czynników, z których najważniejszymi są: opady atmosferyczne, transpiracja roślin i wyparowywanie wody z powierzchni gleby powoduje, że wilgotność jest jedną z najbardziej zmiennych właściwości gleby. Zarówno nadmiar, jak i niedobór wilgotności gleby pociąga za sobą podobne w skutkach obniżenie zdolności produkcyjnej roślin objawiające się spadkiem plonów i ich jakości. Regulowanie zapasu wody w glebie w celu zaspokojenia potrzeb roślin jest jednym z głównych zadań wielu zabiegów agrotechnicznych. Do najczęściej stosowanych należą: drenowanie odwadniające oraz różne rodzaje nawodnień. Właściwy wybór rodzaju zabiegu i terminu jego przeprowadzenia uzależniony jest od wiedzy o aktualnej wilgotności gleby. Dlatego informacja ta jest tak ważna nie tylko przed rozpoczęciem okresu wegetacyjnego roślin ale i w ciągu całego okresu jego trwania aż do zbiorów. Jest zatem istotne, aby pomiary wilgotności gleby mogły być prowadzone w sposób dynamiczny. W poniższym rozdziale przedstawiono opis stosowanych obecnie metod pomiaru wilgotności gleby.

#### 3.2. Przegląd metod oznaczania wilgotności gleby.

Obecnie stosowane metody oznaczania wilgotności gleby można podzielić na metody bezpośrednie i pośrednie. Metody bezpośrednie polegają na bezpośrednim oznaczaniu ilości wody zawartej w próbce gleby pobranej z badanego pola. Próbkę pobiera się z określonych głębokości za pomocą świdra glebowego lub specjalnej laski i umieszcza się je w hermetycznie zamkniętych naczyniach. Do tej grupy metod zalicza się m. in. metodę suszarkowo-wagową i metodę Boyoucosa (spalanie alkoholu). Metody pośrednie polegają na oznaczaniu wilgotności gleby na podstawie pomiaru pewnych jej właściwości fizycznych, które zmieniają się w zależności od ilości wody zawartej w glebie. Pomiary wilgotności gleby za pomocą tych metod wykonuje się najczęściej bezpośrednio w polu w warunkach naturalnych. Do tej grupy zalicza się metody oparte na pomiarze przewodnictwa prądu elektrycznego (metoda elektrometryczna), na pomiarze prędkości przepływu fali elektromagnetycznej w zakresie mikrofal (metoda reflektometryczna, tzw. TDR – Time Domain Reflectometry), na pomiarze siły ssącej gleby za pomocą tensjometrów (metoda tensjometryczna), na pomiarze liczby „spowolnionych” neutronów przez atomy wodoru znajdujące się w wodzie glebowej (metoda neutronowa) i ostatnio coraz częściej na podstawie technik teledetekcji. Informacje zarejestrowane na zdjęciach lotniczych czy satelitarnych są po przetworzeniu wykorzystywane do szacowania wilgotności gleby na dowolnie dużym obszarze. W IGiK została opracowana metoda szacowania wilgotności gleby na podstawie zdjęć satelitarnych AVHRR/NOAA i danych meteorologicznych (Dąbrowska-Zielińska [1995]). Zastosowanie tej metody jest możliwe pod warunkiem otrzymania nie zachmurzonych zdjęć powierzchni ziemi. Mimo, że zdjęcia AVHRR/NOAA rejestrowane są z dużą częstotliwością (kilka razy w ciągu dnia, stacja odbiorcza zdjęć znajduje się w IGiK), w warunkach klimatycznych Polski otrzymanie zdjęć bezchmurnych nie zdarza się zbyt często. Problem ten nie istnieje w przypadku zdjęć wykonanych w zakresie mikrofal.

### **Metoda suszarkowo – wagowa.**

Oznaczanie wilgotności gleby tą metodą polega na wysuszeniu gleby do stałej wagi w temperaturze 105°C. Naczynie (o znanej wadze i objętości) z pobraną w terenie próbką gleby waży się na wadze technicznej z dokładnością do 0,01 grama, a następnie umieszcza otwarte w suszarce w temperaturze 105°C. Proces suszenia trwa dotąd, dopóki próbka gleby nie osiągnie stałego ciężaru (zwykle trwa to około 5 – 6 godzin). Po wyjęciu z suszarki, naczynie zamyka się i wstawia do ekssykatora w celu ochłodzenia, po czym ponownie waży. Procentową zawartość wody w próbce gleby oblicza się na podstawie różnicy wagi gleby przed i po wysuszeniu w stosunku do suchej masy (lub objętości) gleby według następującego wzoru:

$$W_w = \frac{G_w - G_s}{G_s} \cdot 100 (\%) \quad (3.2.1)$$

lub

$$W_o = \frac{G_w - G_s}{V} \cdot 100 (\%) \quad (3.2.2)$$

gdzie:

$W_w$  - wilgotność gleby (% wagowe),

$W_o$  - wilgotność gleby (% objętościowe),

$G_w$  - masa gleby wilgotnej (g),

$G_s$  - masa gleby suchej (g),

$V$  - objętość gleby (cm<sup>3</sup>).

Metoda suszarkowo – wagowa jest metodą konwencjonalną, bardzo dokładną. Posiada jednak wady, do których należą: długi czas potrzebny do otrzymania wyników, wysoki koszt aparatury, duży nakład pracy (Roszak [1997]).

### **Metoda Boyoucosa.**

Oznaczanie wilgotności gleby metodą Boyoucosa polega na porównaniu masy próbki gleby pobranej w terenie przed i po wyparowaniu z niej wody w czasie spalania alkoholu dodanego do gleby (Roszak [1997]). Do tego celu używa się specjalnego przyrządu wykonanego z metalu, zwanego naczyniem Boyoucosa. Do naczynia (o znanej wadze) wsypuje się 15 – 25 g gleby, następnie waży, po czym ustawia na ogniotrwałej płycie i zalewa glebę alkoholem w ilości 20 – 25 ml. Następnie alkohol zapala się i po jego wypaleniu przyrząd waży się powtórnie, otrzymując pierwszy wynik analizy. Proces ten powtarza się aż do momentu uzyskania stałej masy gleby (zwykle wykonuje się 2 – 4 spalań). Do zalet tej metody należy prostota przyrządów, z czym wiąże się mniejszy koszt uzyskania oznaczeń w porównaniu z metodą suszarkowo – wagową. Również czas wykonania pomiaru jest krótszy, wynosi 20–30 minut. Dokładność tej metody jest nieco niższa od dokładności metody wymienionej wyżej, gdyż w czasie spalania alkoholu ulega również częściowemu spalaniu substancja organiczna gleby. Stąd też nie stosuje się jej do pomiarów wilgotności gleb organicznych.



## Metody elektrometryczne.

Metody elektrometryczne polegają na pomiarze przewodnictwa elektrycznego gleby za pomocą elektrod pomiarowych umieszczonych w glebie, a ich podstawą jest odwrotna proporcjonalność wilgotności gleby do kwadratu jej oporności elektrycznej. Jedną z dokładniejszych metod w tej grupie jest metoda bloków gipsowych. W metodzie tej elektrody pomiarowe instaluje się nie bezpośrednio w glebie, lecz w bloku gipsowym, który wprowadza się do gleby. Dzięki temu elektrodom zapewnia się jednolite warunki środowiska, jakich nie stwarza gleba. Gleba zawiera różne roztwory, od których stężenia i temperatury zależy opór stawiany przepływającemu prądowi elektrycznemu. Jednocześnie w bloku znajduje się nasycony roztwór siarczanu wapnia o określonym stężeniu jonów, który redukuje zakłócenia powodowane przez jony roztworu glebowego. W ten sposób przewodnictwo bloku zależy już tylko od zawartości w nim wody pochłoniętej z otoczenia, która z kolei zależy od wartości sił utrzymujących wodę w glebie. Wyniki pomiaru opory bloku gipsowego są zwykle wyskalowane w wartościach pF od 2,5 do 4,2 (siła ssąca gleby) i odzwierciedlają wilgotność gleby (Mocek [1997]). Pomiar wilgotności gleby wykonywane tą metodą są jednak mniej dokładne od pomiarów wykonywanych metodami wymienionymi wyżej. Jest to spowodowane różnicami porowatości bloku gipsowego i otaczającej go gleby. Metoda ta stosowana jest głównie do badań dynamiki wilgotności gleby, a nie do pomiarów bezwzględnej ilości wody w glebie (Roszak [1997]).

## Metoda reflektometryczna.

Metoda reflektometryczna znana w świecie pod nazwą metody TDR (Time Domain Reflectometry) została wykorzystana w niniejszej pracy. Polega ona na określeniu prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w glebie na podstawie pomiaru czasu przejścia i powrotu wyemitowanego impulsu wzdłuż znanej drogi (długość pręta czujnika), (Fundinger [1992-1995]). Prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w danym ośrodku, (np. w glebie) określa wzór:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{2l}{t} \quad (3.2.3)$$

gdzie:

$c_0$  – prędkość światła, z jaką porusza się fala elektromagnetyczna w próżni, równa  $10^8 \text{ ms}^{-1}$ ,

$\mu_r$  – przenikalność magnetyczna, równa 1 w materiałach niemagnetycznych,

$\epsilon_r$  – stała dielektryczna danego materiału (gleby),

$t$  – czas propagacji fali elektromagnetycznej,

$l$  - długość pręta czujnika.

Czas przepływu impulsu elektromagnetycznego wzdłuż pręta czujnika, wprowadzony z powyższego wzoru po uwzględnieniu wartości  $\mu_r$  równej 1 wynosi zatem:

$$t = \frac{2l}{c_0} \sqrt{\epsilon_r} \quad (3.2.4)$$

Instrument TRIME-FM wykorzystany w niniejszej pracy do badań terenowych mierzy ten czas, a następnie oblicza stałą dielektryczną, którą z kolei zamienia na wilgotność gleby (WG) na podstawie następującej zależności wyprowadzonej przez naukowców z Kanady (Topp [1980]):

$$\varepsilon_r = 3.03 + 9.3 \times WG + 146 \times WG^2 - 76.7 \times WG^3 \quad (3.2.5)$$

Pomiary wilgotności gleby wykonywane metodą TDR są dokładne i szybkie co powoduje, że metoda ta jest często i chętnie stosowana w wielu ośrodkach krajowych i zagranicznych.

### **Metoda tensjometryczna.**

Metoda tensjometryczna polega na pomiarze wartości siły ssącej gleby za pomocą tensjometrów (Mocek [1997]). Siła ssąca gleby jest wielkością fizyczną, która określa siłę wiązania wody przez glebę. Przedstawia się ją za pomocą symbolu pF, jako logarytm dziesiętny z wysokości słupa wody wyrażonego w cm, równoważącego siłę wiązania wody przez glebę. Tensjometr składający się z porowatego naczynia połączonego z manometrem, po napełnieniu wodą umieszcza się w glebie. Ilość wody przedostającej się z naczynia do gleby zależy od siły ssącej gleby, której wartość oblicza się z różnicy wskazań manometru przed i po pomiarze. Metoda ta jest mniej dokładna od poprzednich, gdyż oparta jest na zależności między wilgotnością gleby a wskaźnikiem pF, którą wyznacza się empirycznie w zależności od składu granulometrycznego gleby.

### **Metoda neutronowa.**

Metoda neutronowa zakłada, że wodór jest jedynym pierwiastkiem zwalniającym bieg szybkich neutronów w glebie. Metoda ta polega na pomiarze liczby tych neutronów, które po zderzeniu z atomami wodoru znajdującymi się w wodzie glebowej zmniejszyły swą prędkość. Do tego celu służy specjalny przyrząd zwany sondą neutronową. Zmierzona liczba spowolnionych neutronów jest wskaźnikiem wilgotności gleby. Metoda ta nie nadaje się jednak do pomiaru gleb silnie próchnicznych i organicznych, które zawierają również wodór (Mocek [1997]).

### **3.3. Podsumowanie.**

Z podanego wyżej przeglądu metod oznaczania wilgotności gleb wynika, że jedynie metody teledetekcji pozwalają na określenie przestrzennego rozkładu tego parametru na dowolnie dużym obszarze (zdjęcie ERS-2.SAR obejmuje obszar 100x100 km), w krótkim czasie i za względnie niską cenę. Pokrycie terenu odwzorowanego na zdjęciu satelitarnym ERS-2.SAR (koszt zdjęcia wynosi około 5.000 zł) pomiarami punktowymi (około 15 zł za jeden pomiar) wykonanymi co 100 metrów wynosi około 15 mln zł, a więc około 3000 razy więcej niż koszt zdjęcia mikrofalowego. Pracochłonność i kosztowność tradycyjnych metod czyni je też nieprzydatnymi, gdy zachodzi konieczność wykonywania pomiarów z dużą częstotliwością, odpowiadającą czasowej zmienności wilgotności gleby w ciągu okresu wegetacyjnego. Istnieje zatem potrzeba opracowania nowej metody, która spełniałaby wymienione wyżej wymagania.

#### 4. HISTORIA I WYKORZYSTANIE ZDJĘĆ RADAROWYCH

Słowo RADAR jest akronimem pochodzącym od słów "Radio Detection and Ranging", (Freeman [1996]. Po raz pierwszy użyli tej nazwy w latach trzydziestych oficerowie marynarki wojennej USA F. R. Furth i S. M. Tucker. Określili w ten sposób proste urządzenie radarowe zastosowane do wykrywania statków i samolotów na podstawie pomiaru różnicy energii i czasu wysłanej i odebranej fali elektromagnetycznej poruszającej się z prędkością światła. W Polsce przyjęła się nazwa radiolokator. Należy do systemów aktywnych, ponieważ wytwarza i transmituje własną energię elektromagnetyczną, w odróżnieniu od systemów pasywnych rejestrujących promieniowanie pochodzące z innych źródeł. Radiolokatory wykorzystują wąski zakres promieniowania elektromagnetycznego oznaczany kodami literowymi. Zakresy te przedstawione są w Tabeli 4.1.

Tabela 4.1. Zakresy promieniowania mikrofalowego stosowane w radiolokatorach (Schreier [1993]).

| Kod | Częstotliwość [GHz] | Długość fali [cm] |
|-----|---------------------|-------------------|
| P   | 0.225 - 0.390       | 133 - 76.9        |
| L   | 0.390 - 1.550       | 76.9 - 19.3       |
| S   | 1.55 - 4.20         | 19.3 - 7.1        |
| C   | 4.20 - 5.75         | 7.1 - 5.2         |
| X   | 5.75 - 10.90        | 5.2 - 2.7         |
| K   | 10.9 - 36.0         | 2.7 - 0.83        |
| Q   | 36.0 - 46.0         | 0.83 - 0.65       |
| V   | 46.0 - 56.0         | 0.65 - 0.53       |
| W   | 56 - 100            | 0.53 - 0.30       |

Głównymi częściami urządzenia są: antena, nadajnik, modulator drgań, odbiornik i system rejestracji (optyczny, cyfrowy). Umieszczony na pokładzie samolotu lub satelity umożliwia w sposób ciągły obrazowanie pasa powierzchni ziemi, stąd w Polsce przyjęła się nazwa radiolokator obrazowy (imaging radar).

Właściwości promieniowania elektromagnetycznego wysłanego i odbitego od różnych obiektów metalicznych i niemetalicznych, po raz pierwszy zademonstrował w roku 1886 H. Hertz (Niemcy). W roku 1903 C. Hulsmeyer (Niemcy) przedstawił skonstruowane przez siebie proste urządzenie radarowe (telemobiloskop - w 1904 roku otrzymał na niego patent), które zastosował do określania pozycji statków. Lata dwudzieste i trzydzieste naszego stulecia przyniosły rozwój naziemnych radiolokatorów pulsacyjnych, których pionierami byli naukowcy skupieni wokół A.H. Taylora (USA) oraz wokół R. Watson-Watta (Wlk. Brytania). Zastosowali oni promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali 25 m do wykrywania odległych obiektów wojskowych, torując tym samym drogę do szybkiego rozwoju techniki radarowej dla celów militarnych. Wysokie wymagania stawiane przez wojsko doprowadziły wkrótce do stosowania fal krótszych, o długości około 10 cm w zakresie mikrofalowym.

Pierwszy radiolokator obrazujący powierzchnię ziemi użyty był podczas II Wojny Światowej. Antena radiolokatora zainstalowanego na pokładzie samolotu obracała się wokół osi o 360°, dając w rezultacie kołowy obraz powierzchni ziemi. Sygnały odbieranej energii

mikrofalowej były wyświetlane na ekranie lampy katodowej CRT (Cathode Ray Tube). Do dziś stosuje się nadane wtedy kody literowe zakresów promieniowania mikrofalowego (Tabela 1).

Po II Wojnie Światowej, w latach pięćdziesiątych nastąpił dalszy rozwój techniki radarowej. Jego efektem było skonstruowanie w roku 1953 na Uniwersytecie Michigan (USA) lotniczego radaru bocznego wybierania o nazwie SLAR (Side-Looking Airborne Radar) z anteną o rzeczywistej aperturze RAR (Real Aperture Radar), dającego ciągły obraz pasa powierzchni ziemi, równoległego do lotu samolotu. Urządzenie przeznaczone było dla celów militarnych, do rekonesansu terenu. Wymagania związane z dużą rozdzielczością obrazu ograniczały jednak zakres działania radaru z anteną rzeczywistą do niskiej wysokości nad terenem, krótkiego zasięgu rejestrowanego pasa powierzchni ziemi i użycia fal krótkich. Pierwsze dwa ograniczenia limitują wielkość obrazowanego terenu, a stosowanie fal krótkich powoduje, że są one tłumione i rozpraszane w atmosferze. Udoskonaleniem techniki RAR, która w celu otrzymania obrazów o wysokiej rozdzielczości azymutalnej (wzdłuż lotu) wymaga użycia anten o dużych rozmiarach, jest radiolokator z anteną syntetyczną SAR (Synthetic Aperture Radar) skonstruowany przez C. Wileya z Goodyear Aerospace (USA). System ten stosuje antenę krótką, lecz dzięki modyfikacji techniki zapisu i przetwarzania odbieranych sygnałów mikrofalowych syntetyzuje efekt bardzo długiej anteny. Sygnały pochodzące od tego samego obiektu, rejestrowane w czasie przesuwania się radiolokatora nad nim są zapamiętywane, a następnie sumowane koherentnie (zgodnie z fazą i amplitudą). Powoduje to zwiększenie rozdzielczości azymutalnej, która nie zależy już od odległości pomiędzy anteną i obiektem. Koncepcja ta miała również zastosowanie w latach siedemdziesiątych przy konstrukcji pierwszego satelitarnego radiolokatora obrazowego przeznaczonego dla celów cywilnych. W latach sześćdziesiątych oba systemy radarowe SLAR-RAR i SAR zostały udostępnione do celów cywilnych, a w latach siedemdziesiątych pracowały już na skalę komercyjną w wielu misjach lotniczych, głównie dla celów kartograficznych i geologicznych (Lo [1986], Werle [1988]). Dzisiaj stosuje się je również w wielu misjach (np. Topograficznych jak TOPSAR czy GeoSAR) dotyczących badań szczegółowych o dużej rozdzielczości przestrzennej (Gruszczyńska [1999]).

Sukcesy lotniczych radiolokatorów obrazowych pociągnęły za sobą prace nad budową urządzeń radarowych, które mogą być umieszczone na pokładzie satelity. W Tabelach 4.2 i 4.3 zamieszczono krótkie charakterystyki radiolokatorów satelitarnych, w tym misje planowane w najbliższej przyszłości (Koopmans [1993], Evans [1995], Simonett [1983], Trevett [1986], Werle [1988], Winokur [1996]).

Pierwszy satelita operacyjny wyposażony w radiolokator obrazowy typu SAR został skonstruowany w USA przez naukowców z NASA i JPL i wystrzelony 28 czerwca 1978 roku i pracował do października 1978 r. (awaria zasilania). Jego nazwa **SEASAT** wskazuje, że przeznaczony był do badania mórz i oceanów, jednak jako satelita orbitalny rejestrował również powierzchnię lądu. Radiolokator pracował w paśmie L i obrazował pod kątem  $20^\circ$  100-tu kilometrowy pas powierzchni ziemi, znajdujący się po prawej stronie, wzdłuż kierunku lotu satelity. Zdjęcia otrzymane z satelity SEASAT okazały się użyteczne w wielu dziedzinach nauki, co pociągnęło za sobą dalszy rozwój radarowej techniki satelitarnej. Stosowano je między innymi do określania kierunku rozprzestrzeniania się fal oceanicznych, ruchu lodów polarnych, kartowania struktur geologicznych, wilgotności gleby, charakterystyki roślinności i w innych dziedzinach nauki o ziemi. Zdjęcia te cieszą się ciągle

dużą popularnością i są wykorzystywane przez naukowców jako źródło historyczne lub dla celów porównawczych z obecnie działającymi systemami.

Tabela 4.2. Wahadłowce kosmiczne wyposażone w radiolokator obrazowy

| Parametry                         | SIR-A<br>(USA) | SIR-B<br>(USA) | SIR-C<br>(USA)                   | SIR-C/X-SAR<br>(USA,Niemcy,<br>Włochy) | SRTM<br>(USA)       |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------------------------|--|---------------------|
| Rok                               | 1981           | 1984           | 1991, 1992                       | 1994-dwukrotnie                        | 2000                |
| Rozdzielczość<br>terenowa [m]     | 40             | 25*            | 15*                              | 10 - 200                               | 10 - 200            |
| Szerokość [km]<br>pasa wybierania | 50             | 20 – 50        | 30 - 100                         | 15-90 - L,C<br>15-40 - X               | 15 - 90             |
| Częstotliwość,<br>kod [GHz]       | 1.28<br>L      | 1.28<br>L      | 1.28, 5.3<br>L, C                | 1.28, 5.3, 9.6<br>L, C, X              | 1.28, 5.3<br>L,C, X |
| Rodzaj polaryzacji                | HH             | HH             | HH,VV,HV,<br>VH                  | HH,VV,HV,<br>VH - L,C VV - X           | HH,VV,HV,VH         |
| Kąt widzenia [°]                  | 47             | 15 - 60*       | 15 - 60*                         | 20 - 65                                | 20 - 65             |
| Zapis danych                      | optyczny       | Cyfrowy        | cyfrowy                          | cyfrowy                                | cyfrowy             |
| Wymiary anteny<br>[m]             | 9.4 x 2.16     | 10.7 x 2 16    | 12.1 x 2.8 (L)<br>12.1 x 0.8 (C) | 12 x 4                                 | 12 x 4              |
| Wysokość orbity                   | 259 km         | 225 km         | 225 km                           | 225 km                                 | 225 km              |

Objaśnienia:

\* - zależy od kąta padania wiązki promieniowania na powierzchnię ziemi.

SIR - Shuttle Imaging Radar

H - polaryzacja pozioma

V - polaryzacja pionowa

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

W latach osiemdziesiątych rozpoczęła się seria amerykańskich wahadłowców kosmicznych (JPL, NASA) wyposażonych w radiolokatory obrazowe SAR, które pracowały na orbicie okołoziemskiej około tygodnia każdy. Pierwszy z nich, **SIR-A**, został umieszczony w listopadzie 1981 roku na wahadłowcu Columbia, na orbicie odległej od powierzchni Ziemi o 259 km. Podobnie jak SEASAT, SIR-A posiadał radiolokator boczno-wybiegający pracujący w paśmie L. Różnił się natomiast kątem wysyłania wiązki promieniowania mikrofalowego, który w przypadku satelity SIR-A był większy – wynosił 50°. Dzięki temu zdjęcia wykonane w terenach górzystych były pozbawione dystorsji spowodowanych odwróceniem rzeczywistego kształtu obiektu (layover-na zdjęciu najpierw zarejestrowany jest np. szczyt góry, potem jej podstawa). Odbierane sygnały rejestrowane były metodą optyczną na filmie umieszczonym w kasecie, który po zakończeniu misji przetwarzany był w laboratorium w Pasadenie (JPL,USA). Zdjęcia radarowe SIR-A były wykorzystywane głównie do badań geologicznych i do celów kartograficznych. Wykazały możliwość penetracji promieniowania L nawet do kilkunastu metrów w terenach pustynnych. W celu kontynuacji badań geologicznych w październiku 1984 roku został umieszczony na orbicie

okołoziemskiej wahadłowiec kosmiczny Challenger, który wyniósł tam następny system radarowy **SIR-B**. W odróżnieniu od swego poprzednika, SIR-B wyposażony był w urządzenia pozwalające zarówno na optyczny jak i cyfrowy zapis odbieranych sygnałów. Poza tym antena posiadała mechanizm pozwalający na zmianę kąta wysyłanej wiązki promieniowania (od 20° do 50°). Dzięki temu, ten sam obiekt po raz pierwszy (z kosmosu) mógł być obrazowany pod różnymi kątami padania wiązki mikrofalowej. Kluczowym efektem misji wahadłowca SIR-B było otrzymanie radarowych zdjęć stereoskopowych dynamicznych zjawisk oceanicznych oraz zbadanie wpływu kąta padania wiązki promieniowania mikrofalowego (pasmo L) na wielkość sygnału odbitego od powierzchni odsłoniętych i pokrytych roślinnością. Zdjęcia otrzymane z SIR-B okazały się też niezwykle przydatne do kartowania lasów i do wykonywania map topograficznych jak również do oceny wilgotności gleb. Następny system radarowy tej serii, **SIR-C**, został umieszczony na takiej samej orbicie okołoziemskiej co SIR-B (225 km) dwukrotnie, w 1991 i 1992 roku. Jego prototypem był lotniczy radiolokator obrazowy AIRSAR (NASA, 1987). W odróżnieniu od swych poprzedników, SIR-C miał możliwość transmisji i odbioru fali elektromagnetycznej spolaryzowanej poziomo lub pionowo we wszystkich kombinacjach (HH, VV, HV, VH), w dwu zakresach spektralnych, tj. L i C. To nowe narzędzie dostępne z pułapu satelitarnego wniosło duży wkład do badań powierzchni Ziemi.

Następny radarowy system satelitarny **SIR-C/X-SAR** był wspólnym przedsięwzięciem NASA (USA), DARA (Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten, Niemcy) i ASI (Agenzia Spaziale Italiana, Włochy). Został umieszczony na wahadłowcu Endeavour dwukrotnie: 9 kwietnia i 30 września 1994 roku. Jego dziesięciodniowe misje dostarczyły setek zdjęć powierzchni ziemi wykonanych w trzech zakresach L, C i X, we wszystkich kombinacjach polaryzacji i pod różnymi kątami padania wiązki mikrofalowej. Zdjęcia te były wykorzystywane głównie do badania zmian klimatu i środowiska, w tym ruchu lądów i wód. Dostępność różnych typów polaryzacji pozwoliła na dokładniejsze pomiary wilgotności gleb obszarów nie pokrytych roślinnością, biomasy, na wykonanie dokładnych map pokrywy śniegowej, zasięgu powodzi, map litograficznych. Zastosowanie techniki interferometrii do badania obszarów wulkanicznych okazało się niezwykle przydatne do wykonywania prognoz wybuchów czy trzęsień ziemi oraz map szkód powstałych w skutek erupcji wulkanów czy trzęsienia ziemi.

Podobny system radarowy (SIR-C/X-SAR) został wykorzystany w misji **SRTM** (Shuttle Radar Topography Mission). Umieszczony 11 lutego 2000 r. na wahadłowcu Endeavour pracował przez 11 dni. Głównym zadaniem tej misji było wykonanie map topograficznych powierzchni ziemi o dokładności, do tej pory niemożliwej do osiągnięcia na taką skalę. Radar ten wykonał zobrazowanie prawie 80% powierzchni ziemi (z wyjątkiem obszarów okołobiegunowych) o rozdzielczości przestrzennej 30 metrów i z dokładnością pomiarów wysokościowych 9-12 metrów. W celu wykonania trójwymiarowych zdjęć topograficznych, system został dodatkowo wyposażony w maszt o długości 60 metrów, na którym była zamontowana antena odbiorcza sygnałów mikrofalowych w paśmie C, jak również w dodatkowe anteny, umożliwiające otrzymywanie obrazów podobnych do stereoskopowych przez zastosowanie techniki interferometrii. Z uwagi na fakt, że aż 40% powierzchni ziemi do tej pory nie posiadało żadnych map (ciągle zachmurzenie, np. rejon tropikalne), misja ta miała olbrzymie znaczenie naukowe, cywilne i wojskowe.

Tabela 4.3. Satelity operacyjne wyposażone w radiolokator obrazowy (wybrane).

| Parametry                                  | SEASAT         | ERS-1<br>ERS-2    | ALMAZ 1            | ALMAZ-1B                   | JERS-1   | RADARSAT                   | ENVISAT    | LightSAR           |
|--|----------------|-------------------|--------------------|----------------------------|----------|----------------------------|------------|--------------------|
| Kraj                                       | USA            | ESA               | ZSRR               | Rosja                      | Japonia  | Kanada                     | ESA        | USA                |
| Rok<br>wystuzelenia                        | 1978           | 1991<br>1995      | 1991               | 1998                       | 1992     | 1995                       | 2001       | 2002               |
| Rozdzielczość<br>azymutalna<br>zasięgu [m] | 25<br>25       | 7 - 30<br>11 - 33 | 10 - 30<br>12 - 30 | 5/7-30<br>4/7-22/40        | 18<br>18 | 28 (10-100)<br>28 (10-100) | 30<br>30   | 3 - 100<br>3 - 100 |
| Szerokość pasa<br>wybierania<br>[km]       | 100            | 100               | 40                 | 20-450                     | 75       | 35 - 500                   | 100-400    | 15-250             |
| Częstotliwość,<br>kod [GHz]                | 1.28<br>L      | 5.3<br>C          | 3.1<br>S           | X, S, L                    | 1.2<br>L | 5.3<br>C                   | 5.331<br>C | 1.26<br>L          |
| Rodzaj<br>polaryzacji                      | HH             | VV                | HH                 | X,S-VV<br>L-HH,VV<br>HV,VH | HH       | HH                         | HH,VV      | HH,VV,<br>HV,VH    |
| Kąt widzenia<br>[°]                        | 20 - 26        | 23                | 20-65              | 20-65                      | 35       | 20 -59                     | 13 - 39    | 20 - 52            |
| Wymiary<br>anteny [m]                      | 10.74x2.1<br>6 | 10 x 1            | 15 x 1.5           | 15x1.5                     | 12x2.2   | 15 x 1.5                   | 10 x 1.3   | 10.8x2.9           |
| Wysokość<br>orbity [km]                    | 795            | 785               | 295                | 405                        | 568      | 798                        | 800        | 600                |

Objaśnienia:

H - polaryzacja pozioma

V - polaryzacja pionowa

ERS - European Remote Sensing satellite

JERS - Japanese Earth Resources Satellite

EOS - Earth Observation System

ENVISAT - Environment Satellite

ESA - European Space Agency

Pierwszy europejski satelita operacyjny przeznaczony do badań środowiska **ERS-1** (Tabela 4.3) był wyposażony między innymi w radiolokator obrazowy typu SAR. Satelita ten został wystuzelony w lipcu 1991 roku przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA), (ERS-1... [1989]). Znajdował się na orbicie okołobiegunowej zsynchronizowanej ze Słońcem, co umożliwiło obserwację całej kuli ziemskiej o jednakowej porze dnia (średni czas słoneczny przecięcia równika na orbicie zstępującej przypadał na godz. 10:30 GMT). Jako system operacyjny pracował od stycznia 1992 roku i choć czas jego pracy wyznaczono na 2-3 lata, jego misja zakończyła się dopiero w marcu 2000 (od sierpnia 1995 ERS-1 pracował wspólnie z satelitą ERS-2). Zainstalowany na pokładzie satelity aktywny system mikrofalowy AMI (Active Microwave Instrument) pracował w trzech różnych trybach: jako radiolokator SAR z wysoką rozdzielczością obrazów (30 m) - tryb obrazowy (SAR Image Mode), jako

radiolokator SAR z mniejszą rozdzielczością obrazów (5x5 km) - tryb falowy (SAR Wave Mode) oraz jako skaterometr wiatrowy (rozdzielczość 50 km). Mimo, że misja satelity ERS-1 skierowana była głównie do badania oceanów i strefy przybrzeżnej oraz zlodzień, to podobnie jak w przypadku satelity SEASAT, zdjęcia radarowe wykorzystywane były do badania lądów. Kompozycje barwne utworzone ze zdjęć wykonanych w różnych terminach okazały się cennym materiałem do badania roślin uprawnych i lasów. Zniekształcenia terenu (layover), spowodowane małym kątem ( $23^{\circ}$ ) padania promieniowania mikrofalowego okazały się jednak poważnym ograniczeniem stosowania tych zdjęć w terenach górskich. W kwietniu 1995 roku ESA wystrzeliła drugiego satelitę tej serii **ERS-2**, który okrążał Ziemię po tych samych orbitach następnego dnia, po działającym jeszcze satelicie ERS-1 (Duchossois [1996]). Na jego pokładzie znajdują się takie same urządzenia radarowe co na ERS-1. Wspólna praca obu systemów radarowych (tandem mode) umożliwiła maksymalne pokrycie powierzchni ziemi, jak również zebranie par zdjęć wykorzystywanych w technice interferometrii do badania lądów i wód, a także do wykonywania map topograficznych. Misja satelity ERS-2 przekroczyła również planowany czas i według ESA potrwa jeszcze conajmniej do końca roku 2000. W 2001 roku ESA wystrzeliła następnego satelitę - **ENVISAT**, wyposażonego w unowocześniony radiolokator obrazowy ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar). W porównaniu do instrumentu AMI znajdującego się na satelitach ERS1/2, ASAR jest urządzeniem o nowej, rozbudowanej technologii. Zastosowanie techniki skanowania (ScanSAR) pozwoli na obrazowanie 400 kilometrowego pasa powierzchni ziemi, a możliwość zmiany polaryzacji wiązki mikrofalowej umożliwi równoczesną rejestrację danego obszaru w polaryzacji pionowej i poziomej. Instrument ASAR będzie działał w pięciu różnych trybach: obrazowy (rozdzielczość 30 m), falowy (rozdzielczość 5x5 km), szerokiego zasięgu (rozdzielczość 150 m), zmiennej polaryzacji (rozdzielczość 30 m) oraz globalnego monitoringu (niska rozdzielczość, poniżej 1000 m). Satelita ten zapewni: całkowite pokrycie powierzchni ziemi zdjęciami radarowymi, dużą powtarzalność zobrazowań tego samego obszaru, ciągłość pomiarów w sezonie i roku oraz stabilność i wielokrotność pomiarów. Misja ENVISAT-a ma na celu kontynuację badań Ziemi i jej środowiska w ramach międzynarodowych programów dotyczących geosfery, biosfery, hydrosfery i klimatu oraz poprawę dokładności pomiarów zapoczątkowanych przez jego europejskich poprzedników ERS-1 i ERS-2. Praca satelity planowana jest na pięć lat.

Pierwszy radziecki satelita wyposażony w radar typu RAR – **KOSMOS-1500**, został skonstruowany przez naukowców z NPO Mashinostroyenia i wystrzelony w grudniu 1983 roku. Pracował w zakresie X, a rozdzielczość wykonywanych przez niego zdjęć wynosiła 1 km. Radar rejestrował pas powierzchni ziemi o szerokości 450 km. Zdjęcia te były wykorzystywane głównie do rozpoznawania zlodzień wzdłuż pasa arktycznego w celu prawidłowego kierowania ruchem statków. W lipcu 1987 wystrzelony był następny satelita tej serii pod nazwą **KOSMOS-1870**, wyposażony w radar typu SAR. Satelita ten pracował ponad dwa lata. Informacje, które zbierał z różnych obszarów lądowych i oceanicznych (rozdzielczość 25-30 m, długość fali 9.6 cm) były transmitowane drogą radiową do centrum przetwarzania w Moskwie. W marcu 1991 roku ZSRR wystrzelił następnego satelitę z unowocześnionym urządzeniem radarowym i systemem przekazywania danych o nazwie **ALMAZ-1**. Rozdzielczość zdjęć radarowych również zwiększyła się do 10-12 m. Dzięki dwóm antenom możliwe było jednoczesne skanowanie terenu po lewej i prawej stronie wzdłuż kierunku lotu. Sygnały rejestrowane metodą cyfrową (na taśmie magnetycznej) na pokładzie satelity, były następnie przekazywane do stacji odbiorczej, gdzie przetwarzano je



na fotonegatywy i zdjęcia w skali 1:150 000. Satelita pracował do października 1992 roku. Na bazie doświadczeń zdobytych przy budowie KOSMOS-1870 i ALMAZ-1, naukowcy z NPO Mashinostroyeniya skonstruowali nowoczesnego satelitę **ALMAZ-1B**, który został wystrzelony w roku 1998 a jego czas pracy wyniesie 3 lata. Na pokładzie satelity znajduje się system urządzeń radarowych składający się z trzech niezależnych radarów (SAR/SLR-3, SAR-10 i SAR-70), połączonych w celu umożliwienia jednoczesnych, wielozakresowych (3.49, 9.58 i 70 cm) obserwacji tego samego obszaru na powierzchni ziemi. Urządzenia te mogą pracować w wielu trybach dostarczając zdjęć o różnej rozdzielczości (SAR od 5 do 40 m, SLR 1200-2000 m). Instrumenty SAR-3 i SAR-10 transmitują i odbierają fale spolaryzowane pionowo, natomiast SAR-70 posiada wszystkie możliwe kombinacje polaryzacji.

Japoński satelita operacyjny przeznaczony do badań środowiska **JERS-1** (Japanese Earth Resource Satellite), wyposażony w radiolokator obrazowy, został wystrzelony przez NASDA (National Space Development Agency) 11 lutego 1992 roku. Instrument SAR znajdujący się na pokładzie satelity wykorzystywał zakres L promieniowania mikrofalowego spolaryzowanego poziomo (HH). Zastosowanie fali dłuższej od tej znajdującej się w systemie ERS-1/2.SAR, umożliwiło głębszą penetrację roślinności czy gleby, natomiast względnie duży kąt padania promieniowania mikrofalowego pozwalał na zminimalizowanie zniekształceń terenu w obszarach górzystych. Cykl obrazowania był dłuższy niż w przypadku satelitów ERS czy ENVISAT (35 dni) i wynosił 44 dni. Szerokość rejestrowanego pasa na powierzchni ziemi wynosiła 75 km (w przypadku ERS – 100 km). Przeznaczony był do dostarczania informacji dla rolnictwa, leśnictwa, rybołówstwa i ochrony środowiska. Choć jego czas pracy planowano na dwa lata, JERS-1 zakończył pracę dopiero 12 października 1998 roku. Japończycy planują w 2003 roku wystrzelenie nowego satelity operacyjnego o nazwie **ALOS** (Advanced Land Observing Satellite) wyposażonego w unowocześniony radar działający również w zakresie L (PALSAR-Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) z możliwością zmiany kąta wysyłania wiązki promieniowania (20-50°). Urządzenie będzie pracować zarówno w trybie o wysokiej rozdzielczości dla szczegółowych obserwacji regionalnych (10 m) jak i w trybie skanowania (ScanSAR mode-rozdzielczość 100 m). Tryb skanowania pozwoli na otrzymanie zdjęć o zasięgu 250-350 km (kosztem rozdzielczości), niezwykle przydatnych do badania lodów i lasów tropikalnych. Cykl obrazowania wyniesie 45 dni. Satelita ten będzie przeznaczony głównie dla celów kartograficznych oraz do monitorowania środowiska i klęsk żywiołowych (Wakabayashi [1996]). Japończycy planują wystrzelenie następnych satelitów tej serii: ALOS-A1 (2004 r.), ALOS-B1 (2006 r.), ALOS-A2 (2007 r.), ALOS-B2 (2009 r.).

W listopadzie 1995 został wystrzelony przez Kanadę satelita operacyjny **RADARSAT-1**, na którego pokładzie znajduje się radar typu SAR (C,HH). Jest to pierwszy w świecie wyłącznie radarowy system satelitarny, pracujący w 6 różnych trybach (w każdym możliwość wyboru kąta padania wiązki promieniowania od 20 do ponad 50 stopni) dostarczający zdjęć o rozdzielczości od 10 do 100 m, przy szerokości rejestrowanego pasa powierzchni Ziemi wynoszącej od 35 do 500 km. Cykl obrazowania wynosi 24 dni, a więc jest znacznie krótszy niż w przypadku satelitów ERS czy JERS. Przy zastosowaniu trybu skanowania (ScanSAR-rejestrowany pas powierzchni Ziemi wynosi wtedy 500 km) obszary arktyczne obrazowane są codziennie, a tereny wokół równika co sześć dni (Polska co 3 dni). Tak duża powtarzalność obserwacji jest niezwykle przydatna dla celów monitorowania ruchu statków, przemieszczania się plam ropy na wodzie, rozwoju roślinności oraz rozwoju i

zasięgu powodzi. Satelita RADARSAT-1 ma pracować pięć lat (RADARSAT [1995]). Następny satelita tej serii RADARSAT-2 zostanie wystrzelony w roku 2001.

**LightSAR** to część amerykańskiej misji MTPE (Mission to Planet Earth) NASA zaplanowanej na rok 2002. Projektowany satelita będzie mniejszy i tańszy od dotychczasowych. Na jego pokładzie znajdzie się radar nowej generacji, działający w trzech różnych zakresach L, X, C oraz wszystkich możliwych kombinacjach polaryzacji fali. Urządzenie to osiągnie rozdzielczość przestrzenną od 3 do 100 m w zależności od zastosowanego trybu pracy, których ma być sześć. Cykl obrazowania wyniesie 8-10 dni, a więc znacznie przewyższy pod tym względem istniejące satelitarne systemy radarowe. Będzie przeznaczony głównie do: mierzenia ruchów skorupy ziemskiej w celu lepszego poznania zjawisk trzęsienia ziemi i erupcji wulkanów, badania ruchu lodowców, wykonania szczegółowych map wysokościowych, monitoringu rozwoju powodzi, oceny zdrowotności upraw rolnych i lasów, badania zmian pokrycia i użytkowania terenu, oraz do celów planowania przestrzennego.

Z innych planowanych satelitów wyposażonych w system radarowy należy wymienić satelitę indyjskiego **IRS-3**, który zostanie wystrzelony w roku 2004, satelity rosyjskie **ALMAZ 1C** (2001 r.) i **ALMAZ 2** (2004 r.) oraz satelity japońskie **ALOS** (2002 r.), **ALOS-A1** (2004 r.), **ALOS-B1** (2006 R.) i **ALOS-B2** (2009). Planowane przez Rosję urządzenia radarowe umieszczane na satelitach serii **ALMAZ** będą pracowały w zakresie S promieniowania mikrofalowego, natomiast urządzenia japońskie w zakresie L.

Spośród wielu zakresów promieniowania elektromagnetycznego stosowanych w teledetekcji satelitarnej, mikrofałe wykazują największą skuteczność, dzięki możliwości ich wykorzystania niezależnie od warunków pogodowych i pory dnia. Główne dziedziny, w których wykorzystuje się zdjęcia radarowe to: ekologia i leśnictwo, hydrologia, rolnictwo, oceanografia, glaciologia, geologia i topografia (Institute... [1995], Dallemand [1993]). Zdjęcia SAR dostarczają unikalnych informacji o naszej planecie, włączając dane o kłeskach żywiolowych czy zasobach naturalnych. Pomiar interferometryczny wykonywane dzięki systemom radarowym są dziś stosowane do generowania globalnych map topograficznych, do monitorowania zmian topografii terenu, do śledzenia ruchu lądolodów, a także różnych zjawisk oceanicznych. Wieloterminowe kompozycje zdjęć mikrofalowych są cennym źródłem informacji służącym do klasyfikacji różnych form pokrycia terenu, szacowaniu biomasy, pomiaru wilgotności śniegu i gleby, monitoringu grubości pokrywy lodowej i przemieszczania się plam ropy na wodzie. Poniżej przedstawiono zakres wykorzystania danych radarowych w wymienionych wyżej dziedzinach.

W ciągu ostatnich dziesięciu lat zaobserwowano wzrost badań nad wykorzystaniem zdjęć radarowych w ekologii i leśnictwie (Kasischke [1997], Pulliainen [1995]). Przełomem w rozwoju satelitarnych radiolokatorów obrazowych okazała się misja SIR-C/X-SAR, dzięki której otrzymano dane mikrofalowe w różnych zakresach spektralnych i typach polaryzacji, niezwykle przydatne do oceny wielu zjawisk powierzchniowych wpływających na zachodzące w przyrodzie procesy ekologiczne. Obecnie istniejące systemy radarowe ekolodzy (Kasischke [1997]) wykorzystują w badaniach ekosystemów, głównie w celu:

- klasyfikacji i wykrywania zmian pokrycia terenu,
- szacowania biomasy ekosystemów leśnych, zawartości wody w koronach drzew i w glebie, monitorowania wylesień,

- monitorowania zasięgu i kierunku rozprzestrzeniania się powodzi, pożarów i innych klęsk żywiołowych,
- monitorowania innych procesów dynamicznych np. zamarzanie i topnienie lodów czy rozwój lub zarastanie bagien.

Klasyfikacja form pokrycia terenu daje najlepsze rezultaty przy zastosowaniu systemów wielozakresowych, szacowanie biomasy ekosystemów leśnych przez zastosowanie fal o niskiej częstotliwości np. P czy L i polaryzacji krzyżowej (HV lub VH), do wykrywania zalanych obszarów leśnych optymalne są zakresy P i L a zalanych łąk – C, przy polaryzacji podłużnej (HH lub VV). Monitorowanie różnych procesów dynamicznych (np. wylesienia, pożary, zalewy powierzchniowe, wilgotność gleb) okazało się możliwe dzięki zastosowaniu danych w paśmie C przy polaryzacji VV (np. z ERS-1/2.SAR), (Holz [1982], French [1996]).

Jednym z głównych zainteresowań hydrologów jest kriosfera - część hydrosfery, ważnego elementu ziemskiego systemu klimatycznego. Około 10% powierzchni Ziemi jest stale pokryta lodem lub śniegiem, a ponad 30% sezonowo. Hydrologowie stosują wieloparametrowe systemy radarowe do kartowania tych obszarów, jak również do szacowania zapasów wody zmagazynowanej w śniegach i lodach. Znajomość zapasów wody oraz wilgotności gleby ułatwia kontrolę cyklu hydrologicznego oraz pozwala na modelowanie zjawisk zachodzących w zlewni. Zdjęcia radarowe wykorzystywane są również do wykonywania map śródlądowych wód powierzchniowych i monitoringu powodzi. Otrzymana na podstawie zdjęć radarowych informacja o zasięgu zlodzenia wód słodkich (rzek, jezior) wykorzystywana jest do prognozowania możliwości wystąpienia powodzi.

Kontrola zasobów rolnictwa za pomocą metod teledetekcji odbywa się tradycyjnie przy wykorzystaniu systemów optycznych. Ostatnie dziesięciolecie wykazało możliwość stosowania w rolnictwie również systemów radarowych dzięki zaletom, jakie posiadają zdjęcia radarowe. Są to: możliwość ich wykonywania niezależnie od warunków pogodowych i pory dnia, a także fakt, że odzwierciedlają geometrię, wilgotność i szorstkość rejestrowanych obiektów, jak również uwzględniają głębokość penetracji fali mikrofalowej w głąb gleby czy roślinności. Ze zdjęć radarowych można otrzymać informacje dotyczące: rodzaju uprawy (różnice szorstkości i wilgotności roślin wpływają na zróżnicowane wartości współczynnika wstecznego rozpraszania), uszkodzeń roślin (różna jest geometria zdrowych i chorych roślin), rodzaju uprawy roli (szorstkość gleby) i wilgotności gleby (różnice wilgotności powodują zmianę właściwości dielektrycznych gleb), (Lichtenegger [1993], Ulaby [1982], Van Genderen [1993]).

Głównym celem wykorzystania zdjęć radarowych w oceanografii jest określenie: kierunku oceanicznych prądów powierzchniowych (wpływają one na klimat, żeglugę, kształt wybrzeży, życie biologiczne w wodzie, kształt lodów), kierunku przepływu wód w morzach pokrytych lodem, wysokości fal, lokalizacji i natężenia ruchu statków, zmian linii brzegowych, obszarów pokrytych lodem z podaniem typu lodu, topografii dna, lokalizacji plam ropy na wodzie. Wiele z nich wymaga zastosowania techniki interferometrii czy systemów wieloparametrowych (np. SIR-C/X-SAR) jak również zależy od prędkości wiatru w czasie rejestracji zdjęć.

Systemy radarowe SAR, okazały się niezastąpionym narzędziem dla glaciologów, między innymi dzięki możliwości rejestrowania obszarów podbiegunowych nawet w czasie trwania nocy polarnych. W odróżnieniu od systemów optycznych, promieniowanie mikrofalowe wnika w głąb lodu czy śniegu umożliwiając zbadanie jego właściwości, stąd zdjęcia radarowe stosuje się między innymi do klasyfikacji typologicznej lodów. Informacja o

wieku lodu (nowy, roczny, wieloletni), określana na podstawie zdjęć radarowych wspartych danymi historycznymi i aktualnymi danymi meteorologicznymi ma kapitalne znaczenie dla prawidłowej nawigacji. Zastosowanie techniki interferometrii (pomiaru fazy odbitego impulsu na kolejnych zdjęciach, wykonywanych zwykle co 3-5 dni, a następnie stworzenie obrazu będącego ich różnicą, zwanego interferogramem) pozwala określić kierunek i prędkość przemieszczania się lodów a także ich wysokość względną, oraz ruch gór lodowych. Informacje te są niezbędne między innymi do ukierunkowywania pracy lodolamaczy. W wielu przypadkach ważna jest również częstotliwość wykonywania zdjęć. Dużą częstotliwość rejestracji obszarów arktycznych umożliwia technika ScanSAR, zastosowana np. na satelicie RADARSAT (niestety kosztem rozdzielczości przestrzennej, która w tym przypadku wynosi 100 m). Dzięki niej obszary leżące powyżej 75<sup>0</sup> szerokości geograficznej rejestrowane są codziennie, między 65<sup>0</sup> a 70<sup>0</sup> co drugi dzień, a między 45<sup>0</sup> i 55<sup>0</sup> co trzeci/czwarty dzień. Do określania granicy pomiędzy lodem i wodą najlepsze efekty daje zastosowanie fali spolaryzowanej poziomo (HH).

Geolodzy najwcześniej stosowali zdjęcia radarowe do swoich badań, początkowo do wykrywania i kartowania lineamentów oraz eksploracji ropy naftowej czy minerałów. Obecnie wykorzystuje się je do wykonywania map struktur geologicznych i złóż powierzchniowych, wykrywania stref sejsmicznych, uszkodzeń spowodowanych erupcją wulkanów, obsunięć ziemi, przesunięć płyt tektonicznych i innych ruchów skorupy ziemskiej czy monitoringu erozji linii brzegowej. Większość tych aplikacji wymaga zastosowania systemów wieloparametrowych, posiadających kilka zakresów spektralnych, typów polaryzacji, kątów padania wiązki mikrofalowej oraz danych interferometrycznych. Należą do nich np. systemy JPL AIRSAR oraz SIR-C/X-SAR.

Duża część aplikacji wymaga zastosowania map topograficznych o dokładności zależnej od celu, jakiemu ma służyć. W większości przypadków wystarczająca jest rozdzielczość przestrzenna rzędu 25-30m i pionowa rzędu 2-5 m. Pomiar topografii terenu wykonywane na podstawie zdjęć radarowych są ciągle w stadium rozwoju. Pomiar te możliwe są do przeprowadzenia za pomocą urządzeń wykorzystujących technikę interferometrii. Dane interferometryczne z ERS-1.SAR (cykl 3-dniowy) wykorzystywane były między innymi do oceny deformacji powierzchni w wyniku trzęsienia ziemi (Kalifornia, 1992) oraz do kartowania lądolodów. Na podstawie danych z SIR-C/X-SAR (z obu misji), obejmujących wyspy hawajskie, możliwe było uchwycenie zmian morfologicznych wulkanów. Dane interferometryczne dostępne dzięki lotniczemu systemowi TOPSAR są obecnie najlepszym źródłem pomiarów topograficznych. Dzięki zainstalowaniu dwóch anten odbiorczych dane te są zebrane jednocześnie z tego samego pasa powierzchni ziemi, dzięki czemu unika się rozbieżności wynikających z różnic czasowych. Obecnie dostępne są już dane z systemu STRM specjalnie stworzonego do wykonywania map topograficznych, a w przyszłości będą również dostępne dane z systemów – GeoSAR i LightSAR.

Jak wynika z powyższego opisu, zdjęcia radarowe są dziś stosowane w wielu dziedzinach gospodarki a ich wielka przydatność powoduje ciągły rozwój techniki radarowej. Wymagania związane z wysoką rozdzielczością czasową i przestrzenną oraz zastosowaniem wielu zakresów spektralnych, typów polaryzacji i kątów padania wiązki promieniowania, niezbędnych w badaniach ziemi, są motorem ciągłego rozwoju technik wykorzystujących zakres mikrofalowy promieniowania elektromagnetycznego.

## 5. STAN BADAŃ NAD OKREŚLANIEM WILGOTNOŚCI GLEBY POKRYTEJ ROŚLINNOŚCIĄ NA PODSTAWIE ZDJĘĆ RADAROWYCH

Wśród wielu zakresów promieniowania elektromagnetycznego dostępnych do prowadzenia obserwacji powierzchni ziemi z pułapu satelitarnego, mikrofałe posiadają największy potencjał do określania wilgotności gleby, ponieważ przenikają przez warstwę roślinności wnikając w głąb gleby (im dłuższa fala, tym większa głębokość penetracji, Ulaby [1982]), a poza tym są niezależne od warunków pogodowych i pory dnia (systemy aktywne). Jest to szczególnie ważne w przypadku wykonywania pomiarów wielokrotnych w ściśle określonych terminach okresu wegetacyjnego roślin. Jednak podstawową cechą, dzięki której możliwe jest stosowanie mikrofal do oceny wilgotności gleby jest ich reakcja na wielkość stałej dielektrycznej gleby, która jest w ścisłym związku z ilością zawartej w nich wody. Właściwość ta spowodowała zainteresowanie naukowców badaniami wilgotności gleby za pomocą mikrofal już od momentu udostępnienia techniki radarowej do celów cywilnych (lata sześćdziesiąte naszego stulecia). Z wielu dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że współczynnik wstecznego rozpraszania tzw.  $\sigma^0$ , (wyrażający natężenie promieniowania mikrofalowego odbitego od badanej powierzchni), otrzymany ze zdjęć radarowych, wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności gleby i zależy również od szorstkości badanej powierzchni i typu pokrywy roślinnej.

Pionierem badania wilgotności gleby za pomocą mikrofal jest Fawwaz T. Ulaby z Uniwersytetu w Kansas, Lawrence, USA. Jego pierwsze badania (Ulaby [1974], Cihlar [1974]) dotyczyły gleb nie porośniętych roślinnością, lecz o różnej szorstkości, a wykonane były za pomocą systemu radarowego FM-CW, zamontowanego na maszynie. System oferował 10 różnych zakresów promieniowania mikrofalowego od 4 do 8 GHz, 8 kątów padania wiązki (od  $0^\circ$  do  $70^\circ$ ) oraz wszystkie możliwe typy polaryzacji fali. Analizowany zakres wilgotności gleby wynosił 4%-36% (wilgotność w procentach 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 otrzymał zależność wprost proporcjonalną pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem  $\sigma^0$ , im większa wilgotność gleby tym większy współczynnik  $\sigma^0$ . Autor kontynuował badania wilgotności gleb nie pokrytych roślinnością w roku 1975 stosując ten sam system radarowy (Ulaby [1976a], [1978a]). Stwierdził, że odpowiedni dobór parametrów systemu pozwoli na zminimalizowanie wpływu szorstkości badanej powierzchni na odbierany sygnał. Sugerował następującą konfigurację: zakres-4GHz, kąt padania wiązki  $0^\circ$  -  $15^\circ$ , polaryzacja podłużna - HH lub VV. Późniejsze badania (Ulaby [1976b]) zweryfikowały nieznacznie te zalecenia (zakres - 4.25, kąt  $0^\circ$  -  $17^\circ$ , polaryzacja – HH). Naukowcy z Uniwersytetu w Kansas zajmowali się również badaniem wilgotności gleb nie pokrytych roślinnością lecz zróżnicowanych pod względem uziarnienia (Ulaby [1978a], Dobson [1978]) oraz wilgotnością gleb pod różnymi roślinami (Ulaby [1978b]). Nie stwierdzili znaczącego wpływu uziarnienia gleby na zależność pomiędzy wilgotnością gleby wyrażoną w procentach pojemności polowej i współczynnikiem wstecznego rozpraszania. Pod nazwą uziarnienie lub skład granulometryczny gleby rozumie się podział i oznaczanie części składowych gleby według średnic ziarna. (Kuźnicki [1979]). 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  $20^\circ$ ,

otrzymali dla warstwy gleby 0-5 cm silną zależność o współczynniku korelacji  $r=0.92$ . Tak wysoką korelację motywowali brakiem wpływu szorstkości gleby (przy całkowitym pokryciu jej przez rośliny) na rejestrowany sygnał radarowy.

Podsumowanie stanu badań nad określaniem wilgotności gleby nie pokrytej roślinnością za pomocą aktywnych mikrofal zamieścił w swoim artykule Andre Chanzy (Chanzy [1993]). Przeanalizował dotychczasowe osiągnięcia zwracając uwagę na niedoskonałość dostępnych systemów radarowych. Wymienił następujące czynniki wpływające na sygnał mikrofalowy (według malejącego znaczenia): wilgotność gleby i szorstkość powierzchni badanej, uziarnienie gleby, temperatura gleby i zasolenie. Za podstawowy problem do rozwiązania uważa oddzielenie wpływu wilgoci zawartej w glebie od wpływu innych czynników takich jak szorstkość czy uziarnienie gleby. Autor stwierdził, że problem ten został częściowo rozwiązany przez Ulaby i jego współpracowników (Ulaby [1978a]), którzy podali konfigurację systemu radarowego optymalną do badania wilgotności gleby nie pokrytej roślinnością.

Szczegółowe badania wilgotności gleby obsianej prosem afrykańskim (sorgo) były głównym zadaniem eksperymentu (Joint Soil Moisture Experiment) przeprowadzonego w roku 1974 za pomocą radaru FM-CW (skonstruowanego na Uniwersytecie w Kansas) zamontowanego na maszcie (wys. 20 m) w Rolniczej Stacji Badawczej Uniwersytetu A&M w Teksasie, sponsorowanego przez NASA (Ulaby [1976b]). Zebrane wtedy dane współczynnika wstecznego rozpraszania  $\sigma^0$  obejmowały osiem zakresów spektralnych (od 2 do 8 GHz), dwa typy polaryzacji fali elektromagnetycznej (HH, VV) oraz sześć kątów padania wiązki radarowej (od  $0^\circ$  do  $50^\circ$ , co  $10^\circ$ ). Analiza danych wykazała, że w przypadku gleb pokrytych prosem nie ma istotnej zależności pomiędzy współczynnikiem  $\sigma^0$  a wilgotnością gleby, która według autorów miała decydujący wkład w wielkość powracającego sygnału radarowego. Zasugerowali oni zastosowanie dłuższych fal, przenikających przez pokrywę roślinną oraz małych kątów padania wiązki mikrofalowej (pomiędzy  $10^\circ$  a  $20^\circ$ ), zbliżonych do nadiru (według autorów, obrazowanie zbliżone do pionowego daje większą szansę na udział gleby - prześwity). Nie stwierdzili istotnego wpływu typu polaryzacji na zależność pomiędzy współczynnikiem  $\sigma^0$  a wilgotnością gleby. Badania te wykazały konieczność kontynuowania prac nad problemem określania wilgotności gleby pod roślinnością.

Po umieszczeniu przez NASA na orbicie satelity SEASAT, wyposażonego między innymi w urządzenie radarowe typu SAR, hydrołody z NASA (Blanchard [1983]) przeprowadzili w roku 1978 badania nad możliwością stosowania danych mikrofalowych (zakres L, kąt padania wiązki  $20.5^\circ$ , rozdzielczość przestrzenna 20 m przy uśrednianiu z czterech pomiarów) do szacowania wilgotności gleby. Zajmowali się również badaniem wpływu rodzaju zabiegów uprawowych gleby (np. bronowania, kultywatorowania, orki – Roszak [1997]), szorstkości gleby i pokrycia roślinnego na wielkość powracającego sygnału radarowego. Stwierdzili, że wpływ tych czynników jest tak wielki, że przy szacowaniu wilgotności gleby bezpośrednio z danych radarowych musi być on wzięty pod uwagę. Autorzy nie zaproponowali jednak takiej metody, która uwzględniałaby udział poszczególnych czynników, gdyż otrzymanie takich danych uznali za bardzo skomplikowane i kosztowne. W roku 1979 naukowcy z Uniwersytetu w Bernie (Schanda [1979]) przeprowadzili eksperyment mający na celu między innymi zbadanie możliwości stosowania radarowych zdjęć satelitarnych SEASAT (rejestracja metodą optyczną) do określania wilgotności gleby. W tym celu w czasie przelotu satelity nad wybranym obszarem badawczym przeprowadzili szereg badań naziemnych, łącznie z pomiarami wilgotności gleby.

Niestety z przyczyn technicznych udało im się dokonać tylko oceny jakościowej – metodą wizualną wyróżnili kilka klas wilgotności gleby (zdjęcia zarejestrowane metodą optyczną, na błonie fotograficznej nie dały możliwości oceny ilościowej).

W roku 1987 na ukowcy z Francji (Beaudoin [1990]) przeprowadzili badania wilgotności gleb pod różnymi uprawami na rolniczym obszarze testowym w Kanadzie (Quebec) stosując system radarowy SAR (pasmo C, polaryzacja HH lub VV, kąt padania wiązki  $10^{\circ}$ - $70^{\circ}$ ) zainstalowany na pokładzie samolotu. W czasie lotu wykonane zostały pomiary wilgotności, uziarnienia i ciężaru właściwego gleb w warstwie 0-5 cm. Badania były symulacją przyszłego kanadyjskiego satelity RADARSAT oraz europejskiego ERS-1. Potwierdziły wpływ szorstkości badanej powierzchni na zależność pomiędzy współczynnikiem  $\sigma^{\circ}$  a wilgotnością gleby - minimalny wyniósł 2 dB, maksymalny 10 dB (uprawy rządowe). Autorzy uznali, że wpływ ten jest najmniejszy przy małych kątach padania wiązki radarowej, a takie przewidziano w systemach zainstalowanych na satelitach RADARSAT i ERS-1. Szacowanie wilgotności gleby bezpośrednio ze współczynnika rozpraszania wstecznego otrzymanego na podstawie tych danych satelitarnych uznali za możliwe, wiązali jednak większe nadzieje z systemami radarowymi o wielu konfiguracjach zakresów, polaryzacji czy kątów padania wiązki mikrofalowej.

Inna francuska kampania badawcza o nazwie Orgeval'89 (Benallegue [1995]) została przeprowadzona w regionie rolniczym Brie w celu określenia możliwości stosowania danych lotniczych SAR oraz przyszłych satelitarnych ERS-1.SAR do szacowania wilgotności gleby nie pokrytej roślinnością i szorstkości powierzchni badanych. Wykorzystano 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  $15^{\circ}$  –  $30^{\circ}$ . W trakcie przelotów, na wybranych 12 polach testowych wykonane zostały pomiary wilgotności gleby (w warstwie 0-5 cm), szorstkości (dwa metrowe 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 danych radarowych od wilgotności gleby. Tłumaczyli to przeważającym wpływem szorstkości na rejestrowany sygnał radarowy. Jednak wyniki eksperymentu, to jest spadek wilgotności, jaki zanotowano w ciągu okresu wegetacyjnego i towarzyszący mu spadek wartości współczynnika  $\sigma^{\circ}$  obliczanego jako średnia z całego pola, pozwoliły autorom na stwierdzenie, że przyszłe dane z satelity ERS-1 mogą być stosowane do monitorowania uwilgotnienia gleby lecz jedynie na skalę regionalną (a nie dla pojedynczych pól).

W ramach europejskiej kampanii badawczej MAC (Multi-sensor Airborne Campaign) przeprowadzonej w lipcu 1991 roku (Wever [1995]) na obszarze testowym w Oberpfaffenhofen (Niemcy) zostały wykonane prace mające na celu zbadanie możliwości określania wilgotności gleb pokrytych roślinnością na podstawie danych otrzymanych z wieloparametrowego systemu radarowego AIRSAR należącego do NASA/JPL (USA), umieszczonego na pokładzie samolotu. System oferował trzy zakresy promieniowania mikrofalowego – C, L i P oraz wszystkie możliwe kombinacje polaryzacji fali. Szczegółowe badania przeprowadzono dla pól o różnych typach gleby obsianych kukurydzą. Wyniki badań wskazały, że jedynie w paśmie P dominującym parametrem wpływającym na wielkość współczynnika rozpraszania wstecznego jest wilgotność gleby (w zakresach L i C dominującą rolę odgrywa roślinność i według autorów nadają się one bardziej do klasyfikacji form

pokrycia terenu niż do określania wilgotności gleby). Najkorzystniejszą kombinacją polaryzacji do określania wilgotności gleby pod kukurydzą ze współczynnika rozpraszania wstecznego otrzymanego w tym zakresie (P) okazała się polaryzacja podłużna typu HH (współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.83$ ) oraz różnica natężeń promieniowania między falą spolaryzowaną poziomo HH i poprzecznie HV ( $r=0.85$ ). Opracowany model obliczania wilgotności gleby na podstawie danych radarowych w zakresie P nie wymaga wprowadzenia dodatkowych parametrów dotyczących geometrii roślin. Badania te potwierdził H. T. Chuah (Chuah [1994]), który również stwierdził, że stosując pasma L i C nie można pominąć wpływu roślinności przy ocenie wilgotności gleby.

Lotnicze zdjęcia radarowe AIRSAR wykonane w roku 1991 w ramach kampanii badawczej MAC nad polem testowym w Montespertoli (Włochy) zostały również wykorzystane przez S. Barontiego i jego współpracowników (Baronti [1995]) w badaniach wilgotności gleby. Badaniami objęto zarówno gleby nie pokryte roślinnością jak i gleby pod wybranymi uprawami rolnymi (lucerna, słonecznik, pszenica). W czasie przelotu samolotu wykonane zostały pomiary wilgotności wagowej gleby (0-5 cm), LAI, zawartości wody w roślinach, szorstkości oraz wymiarów liści i łodyg. Najwyższa korelacja pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^0$  a wilgotnością gleby pokrytej roślinnością wystąpiła dla danych radarowych zarejestrowanych w zakresie L, przy kącie padania wiązki równym  $20^\circ$  i polaryzacji poziomej HH – współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.65$ . Wyższą korelację osiągnięto jedynie dla gleb odsłoniętych – współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.91$ .

Naukowcy z Belgii (Su [1995]) wykorzystali lotnicze zdjęcia radarowe (system ESAR – X,C,L i P, polaryzacja HH lub VV, kąt padania wiązki  $52^\circ$ ) wykonane w ramach kampanii EMAC (European Multi-sensor Airborne Campaign) przeprowadzonej w roku 1994, oraz zdjęcia satelitarne ERS-1 do badania wilgotności gleby w zlewni rzeki Zwalm. W czasie przelotu satelity i samolotu nad obszarem badawczym wykonane zostały pomiary wilgotności gleby w warstwach 0-5 cm i 5-10 cm, szorstkości powierzchni, wysokości roślin i różnych parametrów meteorologicznych. Do określania wilgotności gleby nie pokrytej roślinnością na podstawie danych radarowych zastosowano uproszczony model IEM (Integral Equation Model, Dawson [1995]). Model przedstawia współczynnik rozpraszania wstecznego w funkcji konfiguracji systemu (częstotliwość, polaryzacja i kąt padania wiązki), stałej dielektrycznej gleby i parametrów szorstkości (odchylenie standardowe wysokości od płaskiej powierzchni referencyjnej tzw.  $h_{RMS}$ , długość korelacji L i funkcja korelacji  $\rho(\xi,\zeta)$ ). Wyznaczona na podstawie tego modelu stała dielektryczna gleby jest następnie zamieniana odpowiednim algorytmem na wilgotność gleby, sprawdzonym na wielu próbach gleb mineralnych w różnych warunkach wilgotnościowych (Hallikainen [1985], Brisco [1992]). Największym problemem w proponowanej metodzie jest dokładne wyznaczenie parametrów szorstkości. Autorzy uważają, że jeśli się pokona wszystkie trudności z tym związane, model można z powodzeniem stosować do określania wilgotności gleb nie pokrytych roślinnością na podstawie danych radarowych lotniczych i satelitarnych. Podobny algorytm został wcześniej zastosowany przez naukowców amerykańskich (Dubois [1995]) do obliczenia wilgotności gleb nie pokrytych roślinnością za pomocą danych radarowych lotniczych AIRSAR i satelitarnych SIR-C (w obu wypadkach zastosowano zakres L i polaryzację HH), dla kilku pól testowych, w ramach wspomnianej wcześniej kampanii MAC (1992). Wartości stałej dielektrycznej zostały zamienione na wartości wilgotności gleby za pomocą równania empirycznego wyprowadzonego przez Hallikainena (Hallikainen [1985]). W wyniku



porównania tych danych z wartościami zmierzonymi *in situ* otrzymano dokładność obliczeń wilgotności gleby równą 3.5%.

Na Uniwersytecie w Waszyngtonie przeprowadzone zostały badania, których efektem było stworzenie filtrów o nazwie FIR (finite impulse response filters, Smith [1995]) umożliwiających szacowanie szorstkości i wilgotności gleby ze zdjęć SAR przy minimalnym wpływie innych czynników mających swój udział w wielkości powracającego sygnału radarowego (np. nachylenie badanej powierzchni, pokrycie roślinne, kalibracja instrumentu). Algorytm opisujący te filtry wymaga wprowadzenia danych technicznych (ilość zakresów pomiarowych SAR zastosowanych do analizy tj. długości fal czy polaryzacji), wartości zarejestrowanych na zdjęciu sygnałów SAR, wektora rozkładu pojedynczych wartości, stałej zabezpieczającej przed wartościami zerowymi wilgotności czy szorstkości gleby w przypadku współczynnika  $\sigma$  równego 0, oraz poprawki wynikającej z dostosowania pomiarów SAR do obliczonych parametrów – odchylenie standartowe. Działanie filtru służącego do obliczania wilgotności gleby zostało sprawdzone na polu testowym w Trafalgar (Australia), będącym półpustynią ze stanowiskami drzew eukaliptusowych i łąk, miejscami o wysokim poziomie wód gruntowych. Zdjęcia radarowe wykonane zostały systemem lotniczym AIRSAR (L,C,P) należącym do NASA (USA). Po zastosowaniu filtru otrzymano mapy przedstawiające rozkład wilgotności gleb na badanym obszarze. Niestety nie otrzymano wysokiej zależności pomiędzy wartościami SAR FIR a danymi referencyjnymi pochodzącymi z pomiarów bezpośrednich wykonanych w terenie podczas przelotu. Autorzy tłumaczą ten fakt zbyt małą rozdzielczością przestrzenną i czułością obrazów (tzw. obrazów gamma) powstałych w wyniku interpolacji licznych profili, przedstawiających wstępny szacunek wilgotności gleby, niezbędny do zdefiniowania algorytmu filtrów FIR dla danych AIRSAR. Zdjęcia lotnicze AIRSAR zostały również wykorzystane przez badacza biosfery N. S. Chauhana z NASA do szacowania wilgotności gleby pokrytej roślinnością.

Jedne z pierwszych zdjęć radarowych, otrzymanych w lecie 1991 roku z satelity ERS-1 (zakres C, polaryzacja VV, kąt padania wiązki  $23^{\circ}$ ) pracującego jeszcze w trakcie fazy ukonstytuowywania (cykl obrazowania - 3 dni) stały się przedmiotem badań naukowców angielskich (Wooding [1992]). W trakcie przelotów satelity nad obszarem badawczym znajdującym się w Romney Marsh (Kent) wykonali oni szczegółowe pomiary wilgotności i szorstkości gleb nie pokrytych roślinnością (3 stanowiska) oraz gleb pod łąkami (3 stanowiska). Zarejestrowali również typ upraw na ponad 150 polach. Dysponowali osiemnastoma zdjęciami ERS-1.SAR.PRI, z których obliczyli współczynniki  $\sigma^{\circ}$ . Przeprowadzili badania dotyczące wpływu ilości pikseli, wziętych do obliczenia wartości współczynnika rozpraszania wstecznego dla danego stanowiska badawczego, na dokładność pomiaru. W wyniku tych badań autorzy stwierdzili, że wymagana liczba pikseli wynosi 60 - przy takiej próbie otrzymali najmniejsze wahania współczynnika  $\sigma^{\circ}$  - poniżej  $\pm 0.25$  dB. Stosując te wymagania otrzymali wysoką korelację wprost proporcjonalną między wartościami współczynnika  $\sigma^{\circ}$  a wilgotnością (w procentach 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 pod 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 [1993]) na różnych uprawach rolnych, i choć jego głównym celem była tym razem klasyfikacja upraw, autorzy wykonali kilka badań dotyczących wilgotności gleby. Współczynnik  $\sigma^{\circ}$  obliczany był jako wartość

średnia z całego badanego pola. Autorzy nie otrzymali istotnych zależności, za wyjątkiem jednego stanowiska pszenicy ozimej na glebach torfowych charakteryzujących się dużą wilgotnością tj. od 70% do 120% (w procentach wagowych). Zbyt mała próba statystyczna nie pozwoliła autorom na wyciągnięcie pozytywnych wniosków.

Naukowcy z Uniwersytetu w Monachium (Demircan [1992]) również wykorzystali jedne 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 w profilu 0-2 cm oraz powierzchni projekcyjnej liści (LAI-Leaf Area Index), biomasy i wysokości kukurydzy. Ze zdjęć radarowych typu SLC (Single Look Complex) obliczyli wartości natężenia promieniowania radarowego (grey value) jako średnie z całego badanego pola. Pomiędzy 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.

W Finlandii, na polu testowym Porvoo (Pulliainen [1995]) w latach 1993-1994 przeprowadzono eksperyment dotyczący wykorzystania zdjęć radarowych otrzymanych z satelity ERS-1 do obliczania wilgotności gleby pod lasami i zawartości wody w koronach drzew. Wilgotność gleby dla badanego obszaru szacowana była na podstawie modelu hydrologicznego (opady i inne parametry meteorologiczne stanowiły dane wejściowe) i poprzez bezpośrednie pomiary w wybranych punktach (w warstwie 0-10 cm) oraz na podstawie opracowanego przez J. Pulliainen modelu (forest backscattering model) wykorzystującego współczynnik  $\sigma^0$  obliczany ze zdjęć wieloterminowych ERS-1 SAR. Model przebiega w dwóch etapach i wymaga zastosowania prób referencyjnych. W pierwszym etapie wprowadzane są wartości współczynnika rozpraszania wstecznego otrzymane ze zdjęcia ERS-1 dla stanowisk referencyjnych, na podstawie których model oblicza wilgotność gleby i zawartość wody w koronach drzew. Procedura ta została przeprowadzona dla każdego zdjęcia oddzielnie. W drugim etapie wprowadzane są średnie wartości współczynnika  $\sigma^0$  obliczone ze wszystkich terminów, które model wykorzystuje do szacowania masy drewna. Wyniki otrzymane na podstawie modelu były zbliżone do danych referencyjnych jedynie dla terminów letnich. Dane jesienne różniły się znacznie, model dostarczał wartości zaniżone – autorzy tłumaczą to spadkiem wartości  $\sigma^0$  spowodowanym więdnieniem roślin.

Badaniami nad zastosowaniem satelitarnych zdjęć radarowych ERS-1 do szacowania wilgotności gleby pod użytkami zielonymi (łąki, parki, place zabaw, pola golfowe) zajmowali się Kanadyjczycy (Soulis [1995]), w ramach eksperymentu Grand River przeprowadzonego w 1993 roku w Ontario. Pomiary wilgotności objętościowej gleby (głina ilasta, il) wykonane zostały na wybranych stanowiskach (na każdym pobrano 10 prób) trawiastych, o wysokości roślin nie przekraczającej 25 cm. Zdjęcie satelitarne Landsat TM wykorzystano do lokalizacji punktów pomiarowych na scenach ERS-1. Bezpośrednia korelacja między współczynnikiem  $\sigma^0$  (wartości średnie dla całego pola) a wilgotnością gleby była istotna tylko dla wartości wilgotności mniejszych od 30% - współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.85$ . Brak korelacji dla gleb wilgotniejszych (wystąpiły zbyt małe wartości  $\sigma^0$ ) autorzy tłumaczą zjawiskiem lustrzanego odbicia fal radarowych od niektórych powierzchni nadmiernie przesyconych wodą lub różnicą między poziomem pobrania próbki (0-5 cm) a głębokością penetracji fali radarowej (1 cm w zakresie C) - wierzchnia warstwa gleb, zwłaszcza gliniastych i ilastych, jest bardziej wyschnięta od warstw głębszych.

Naukowcy z Uniwersytetu w Monachium (Rombach [1997]) zajmowali się badaniami wilgotności gleby na podstawie danych ERS-1.SAR pod następującymi uprawami: kukurydza, jęczmień, owies, łąka. W czasie sezonów wegetacyjnych od 1991 do 1994 roku wykonywali oni pomiary wilgotności gleby oraz innych parametrów glebowych (porowatość, ciężar objętościowy, krzywa pF, skład granulometryczny) na 30 wybranych polach o zróżnicowanym pokryciu roślinnym. Mierzili również wysokość, LAI, biomasę i gęstość roślin, jak również notowali ich aktualną fazę fenologiczną. W celu szacowania wilgotności gleby na podstawie danych radarowych postanowili wyeliminować wpływ innych czynników na rejestrowany sygnał, takich jak: typ gleby, stan rozwojowy roślin, wilgotność roślin, szorstkość powierzchni badanej. W związku z tym analizowali zależności pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  a każdym z tych parametrów oddzielnie. Następnie każdy sygnał radarowy poddali korekcji na podstawie znajomości danych naziemnych i ich wkładu w wartość tego sygnału. Zdaniem autorów na pozostałą część sygnału radarowego miała zatem wpływ już tylko wilgotność gleby. W celu wyeliminowania wpływu typu gleby na wielkość sygnału radarowego, autorzy zamienili wartości wilgotności gleby na wartości stałej dielektrycznej stosując dla gleb mineralnych algorytm opracowany przez Hallikainena (Hallikainen [1985]), a dla gleb organicznych funkcję opracowaną przez Rotha (Roth [1992]). Pomiedzy wartościami współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  a wartościami stałej dielektrycznej otrzymali zależność nieliniową. Na podstawie tej zależności i w oparciu o empiryczny model symulacyjny (Michigan Microwave Canopy Scattering Model) opracowany przez Ulaby (Ulaby [1990]) dla konfiguracji radaru zainstalowanego na satelicie ERS, szacowali szorstkość każdej z klas użytkowania ziemi oddzielnie na podstawie pomiaru tzw. RMS (odchylenie standardowe wysokości od płaskiej powierzchni referencyjnej). W celu wyeliminowania jej wpływu na sygnał radarowy, wartości współczynników rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  otrzymane przy danej szorstkości na podstawie modelu zostały zamienione na wartości odpowiadające tzw. nieefektywnym klasom szorstkości charakteryzującym się  $RMS > 2.4$  cm. Dopiero dla tak poprawionych wartości współczynników  $\sigma^\circ$  przeprowadzono 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 upraw oraz przy znajomości następujących parametrów: typu roślinności, jej fazy rozwojowej i biomasy, typu gleby i jej uziarnienia.

Badacze niemieccy z Instytutu Hydrologicznego w Koblenz (Portmann [1997]) również wykorzystali zdjęcia satelitarne ERS.SAR do badania wilgotności gleby nie pokrytej roślinnością. Otrzymali wysoki współczynnik korelacji liniowej  $r$  równy 0.84. Po zastosowaniu danych otrzymanych dla terenu pokrytego roślinnością, współczynnik korelacji spadł do wartości równej 0.45. Uznali, że w tym przypadku niezbędne jest stosowanie empirycznych modeli wzrostu roślin, których to modeli jednak nie zaproponowali.

Naukowcy z INRA (Prevot [1998]) zajmowali się w ramach eksperymentu Alpilles-ReSeDA przeprowadzonego w okresie od października 1996 r. do listopada 1997 r. na obszarze rolniczym w okolicy Avignon (Francja) badaniami pszenicy ozimej na podstawie zdjęć radarowych ERS i RADARSAT. Do bezpośredniego modelowania sygnału radarowego zastosowali półempiryczny model stworzony przez Attema i Ulaby (Attema [1978]), znany powszechnie pod nazwą „water-cloud”. W modelu uwzględniony jest wpływ zawartości wody w roślinach oraz wpływ szorstkości i wilgotności gleby. Parametry występujące przy

wymienionych zmiennych zostały określone na podstawie najlepszych korelacji jakie uzyskano pomiędzy pomiarami terenowymi a danymi satelitarnymi (wartościami współczynników rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ ). Mniejsze różnice pomiędzy wartościami współczynnika  $\sigma^\circ$  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.

Badanie wilgotności gleby pokrytej roślinnością (zboża, użytki zielone) na podstawie zdjęć radarowych ERS-2 i RADARSAT było jednym z zadań eksperymentu Thames 1997 przeprowadzonego w Wlk. Brytanii (Stuttard [1998]). Pomiedzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  otrzymanym ze zdjęć satelitarnych ERS-2 a wilgotnością gleby pod zbożami (w warstwie 0-5 cm) autorzy otrzymali bezpośrednią zależność o współczynniku korelacji  $r=0.79$ , którą opisuje wielomian stopnia drugiego. Nie został tu uwzględniony wpływ szorstkości badanej powierzchni na sygnał radarowy. Autorzy twierdzą, że stosując otrzymane równanie można szacować wilgotność powierzchniowej warstwy gleby z dokładnością do 7%, która ich zdaniem jest zbliżona do błędu popełnianego przy wykorzystywaniu innych metod.

Naukowcy z USA (Cravey [1998]) przeprowadzili eksperyment dotyczący między innymi zastosowania danych radarowych z satelity ERS-2 do badań wilgotności gleby pokrytej roślinnością (pszenica ozima, użytki zielone) w południowej części Wielkich Równin w Oklahomie (SGP97 Experiment). Dane terenowe (wilgotność objętościowa gleby) i satelitarne (współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ ) pochodziły z 6 maja, 7 czerwca i 17 lipca 1997 roku. Badane pola podzielono 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  $\sigma^\circ$  i wilgotnością gleby. Otrzymano zależność wprost proporcjonalną o modelu liniowym, najsilniejszą dla ostatniej z wyżej wymienionych kategorii (pastwiska o gęstym pokryciu roślinnym) – współczynnik korelacji wyniósł  $r=0,84$ . Najslabszą zależność autorzy otrzymali dla pól pszenicy znajdującej się w fazie krzewienia. W tej fazie rozwojowej powierzchnia łanu pszenicy charakteryzuje się dużą szorstkością i dużą wilgotnością, które to cechy miały silniejszy niż wilgotność gleby wpływ na odbierany sygnał radarowy.

Jak można zauważyć na podstawie przeglądu literatury, problem szacowania wilgotności gleby pod zbożami (niezależnie od typu zboża) na podstawie współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  jest ciągle 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 metody eliminacji wpływu szorstkości i ilości wody zawartej w biomacie na sygnał radarowy.

## 6. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA NATĘŻENIE ODBITEGO SYGNAŁU RADAROWEGO

Na wartość odbitego od badanego obiektu sygnału mikrofalowego mają wpływ czynniki związane z konfiguracją systemu oraz czynniki związane z samym obiektem. Do tych pierwszych należą:

- częstotliwość generowanej fali elektromagnetycznej,
- typ polaryzacji fali (podłużna pionowa lub pozioma – VV, HH, poprzeczna - HV, VH),
- kąt padania emitowanej wiązki mierzony od prostopadłej do badanej powierzchni.

Czynniki związane z badaną powierzchnią są:

- szorstkość powierzchni,
- właściwości dielektryczne ściśle związane z zawartością wody.

Ponieważ czynniki związane z konfiguracją systemu radarowego zainstalowanego na satelicie ERS-2 są stałe, natężenie odbitego promieniowania mikrofalowego, a więc i wartość współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ , zależy od szorstkości i stałej dielektrycznej powierzchni odbijającej.

### 6.1. Szorstkość powierzchni

Wyróżnia się trzy rodzaje szorstkości badanej powierzchni w zależności od skali badań: mikroskalową, mezoskalową i makroskalową (Henderson [1998]). Szorstkość mikroskalowa (A na rys. 6.1.2, odpowiedzialna za ton na zdjęciu radarowym) jest funkcją długości fali  $\lambda$  i kąta padania wiązki na obiekt  $\theta$ . Wyrażana jest jako odchylenie standardowe wysokości od płaskiej powierzchni referencyjnej, tzw.  $h_{\text{RMS}}$ . W tej skali według Kryterium Rayleigha powierzchnia jest *gładka* gdy:

$$h_{\text{RMS}} < \frac{\lambda}{8\cos\theta} \quad (6.1.1)$$

natomiast *szorstka* gdy:

$$h_{\text{RMS}} > \frac{\lambda}{8\cos\theta} \quad (6.1.2)$$

Istnieją również inne kryteria oceny szorstkości mikroskalowej powierzchni, do których należą: kryterium ogólne, kryterium Peaka i Olivera i kryterium Fraunhofera. Poniżej podane są warunki, jakie spełnia powierzchnia *gładka* w tej skali szorstkości dla systemu radarowego pracującego w paśmie C (długość fali 5.7 cm) i kąta padania wiązki na środek rejestrowanej sceny ( $23^\circ$ ).

Kryterium ogólne:

$$h_{\text{RMS}} \frac{\lambda}{10} < 0.57\text{cm} \quad (6.1.3)$$

Kryterium Rayleigha:

$$h_{\text{RMS}} < \frac{\lambda}{8\cos\theta} < 0.71\text{cm} \quad (6.1.4)$$

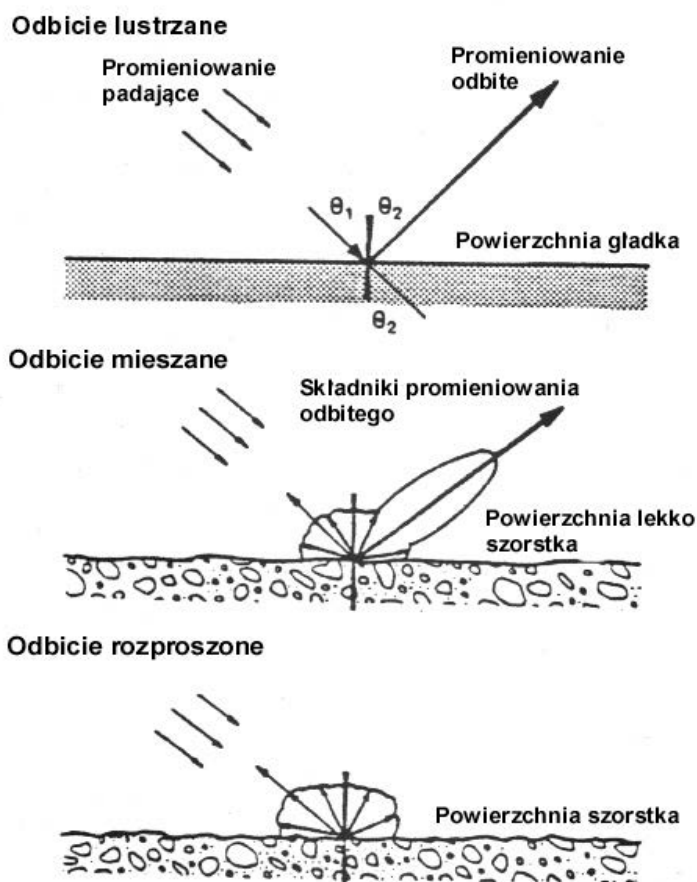
Kryterium Peaka i Olivera:

$$h_{\text{RMS}} < \frac{\lambda}{25 \cos \theta} < 0.23 \text{cm} \quad (6.1.5)$$

Kryterium Fraunhofera:

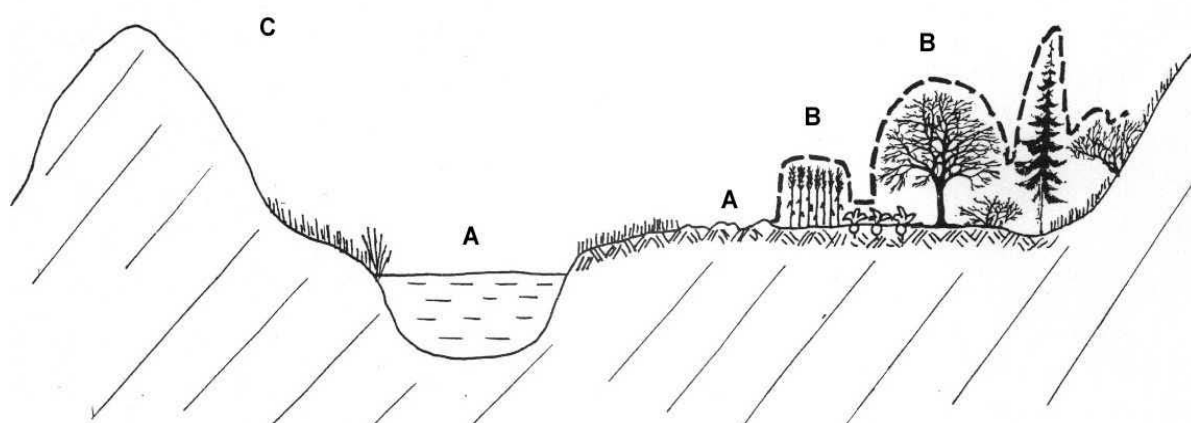
$$h_{\text{RMS}} < \frac{\lambda}{32 \cos \theta} < 0.18 \text{cm} \quad (6.1.6)$$

Szorstkość powierzchni jest jednym z głównych czynników decydujących o wielkości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ . Gdy powierzchnia jest szorstka, odbija (w kierunku anteny odbiorczej) padające na nią promieniowanie pod różnymi kątami, co powoduje, że większa jego część powraca do odbiornika. Obiekty o takich powierzchniach są jasne na zdjęciach radarowych. Powierzchnie gładkie odbijają promieniowanie padające w sposób lustrzany, co powoduje, że znikoma jego część wraca do odbiornika (Rys.6.1.1). Obiekty o takich powierzchniach są ciemne na zdjęciach radarowych. W praktyce bardzo rzadko spotyka się na zdjęciach radarowych wykonanych w zakresie C promieniowania mikrofalowego powierzchnie idealnie gładkie. Do nich można zaliczyć spokojną, nie zafalowaną powierzchnię wody. Powierzchnia taka jest na zdjęciu mikrofalowym czarna. Najczęściej jednak mamy do czynienia z powierzchniami o różnym stopniu szorstkości, stąd zdjęcia radarowe są w różnych odcieniach szarości.



Rys. 6.1.1. Wpływ szorstkości badanej powierzchni na rodzaj i wielkość promieniowania odbitego (Trevett [1986]).

Obiektem będącym przedmiotem prac badawczych jest łąk złoza. Czynnikiem wpływającym na wartość współczynnika  $\sigma^\circ$  jest w tym przypadku szorstkość powierzchni roślinnej rozpatrywana w mezoskali. Szorstkość mezoskalowa (B na rys. 6.1.2), odpowiedzialna za teksturę zdjęcia radarowego, zależy od rozdzielczości systemu radarowego i związana jest z elewacją i spadkiem powierzchni, a w przypadku pokrycia roślinnego z jego strukturą (wysokość, gęstość, i geometria roślin). Szorstkość makroskalowa (C na rys. 6.1.2), odpowiedzialna za odwzorowanie rzeźby terenu, jest funkcją nachylenia terenu i znacznie przekracza rozdzielczość zastosowanego systemu radarowego. Wyraża ona zmiany topografii regionalnej.



Rys. 6.1.2. Skale szorstkości: A-mikroskala, B-mezoskala, C-makroskala.

## 6.2. Stała dielektryczna

Oprócz szorstkości badanej powierzchni, na wielkość sygnału radarowego ma również wpływ wielkość stałej dielektrycznej (in. przenikalność dielektryczna). Stała dielektryczna określa zdolność danego ośrodka do przewodzenia prądu elektrycznego. Wyrażana jest następującym wzorem:

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' \quad (6.2.1)$$

gdzie:

$\epsilon'$  – część rzeczywista,

$\epsilon''$  – część urojona

Część rzeczywista  $\epsilon'$  dotyczy względnej przenikalności dielektrycznej ośrodka, część urojona - współczynnika stratności dielektrycznej (np. straty powstałe w wyniku pokonywania oporów stawianych przez ośrodek). Wielkość części urojonej  $\epsilon''$  zależy od ośrodka i jest niewielka w porównaniu do części rzeczywistej. Metody pomiaru części rzeczywistej stałej dielektrycznej są różne dla różnych zakresów częstotliwości prądu. Przy małych częstotliwościach (od 0 do 10 GHz)  $\epsilon'$  określa się za pomocą pomiaru prądu ładowania lub rozładowania kondensatora z dielektrykiem (Encyklopedia Fizyki [1972]).

Poniżej podane są wartości względne stałej dielektrycznej w paśmie mikrofalowym dla wybranych ośrodków:

powietrze  $\cong 1$

papier suchy 2-3

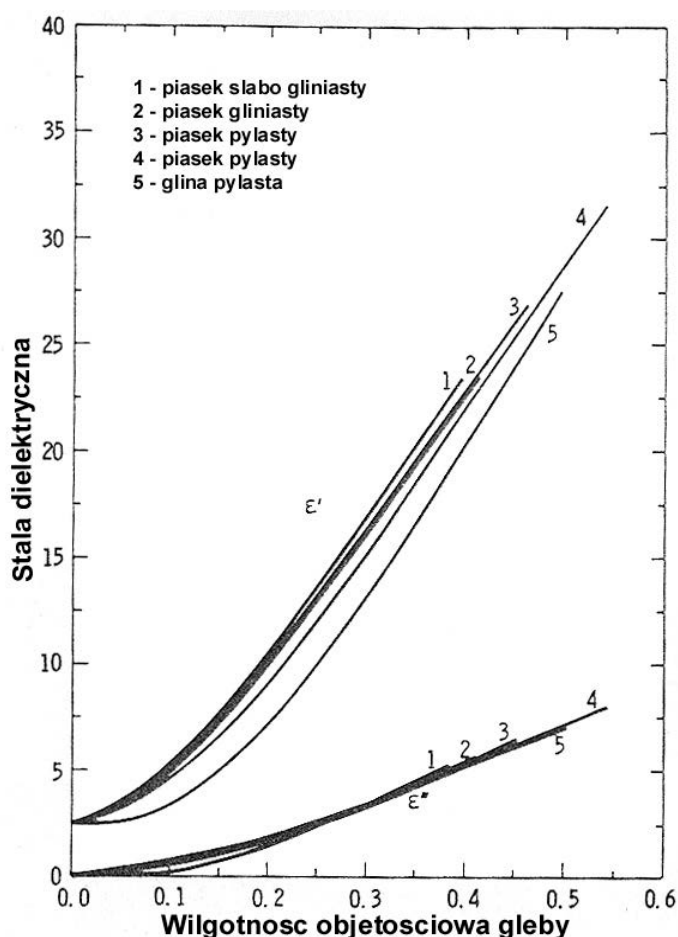
papier mokry 9

gleba sucha 3-5

gleba mokra 15-30

woda 80

Stała dielektryczna gleby zależy silnie od zawartości w niej wody i w mniejszym stopniu od tekstury gleby. Zależność tę, dla zakresu w jakim pracuje urządzenie radarowe zainstalowane na satelicie ERS (5.3 GHz) przedstawia rys.6.2.1 (Ulaby [1986]). Krzywe od 1 do 5 odpowiadające glebom o różnych grupach mechanicznych (Kuźnicki, 1979), począwszy od wilgotności gleby równej 0,1 mają na rysunku przebieg niemal równoległy. Oznacza to, że wpływ tekstury gleby na zależność pomiędzy stałą dielektryczną i wilgotnością gleby jest stały (takie samo nachylenie krzywych). Zmiana stałej dielektrycznej o 1 powoduje zmianę wilgotności gleby o 0,01. Różnice wilgotności gleb (1-4) przy tej samej wartości stałej dielektrycznej są niewielkie (wynoszą według rysunku około 0,03) i maleją w miarę wzrostu wartości wilgotności gleby.



Rys.6.2.1. Wartości stałej dielektrycznej gleby zmierzone w zakresie 5 GHz i odpowiadające im wartości wilgotności gleby (3 i 4 różnią się procentowym udziałem frakcji pylastej), (Ulaby [1986]).



Z rysunku 6.2.1 można odczytać, że wyżej wymieniona zależność jest wprost proporcjonalna - im większa jest wilgotność gleby tym większa jest jej stała dielektryczna. Według badań przeprowadzonych przez Ulaby (Ulaby [1974], [1978a], [1978b], [1986]), wysoka wartość stałej dielektrycznej oznacza dużą wilgotność badanego ośrodka, jego dużą zdolność odbijającą promieniowanie mikrofalowe i w efekcie duże natężenie promieniowania powracającego do anteny odbiornika. Duża jest wtedy również, obliczona na podstawie zarejestrowanego na zdjęciu natężenia mikrofalowego, wartość współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (jasny ton na zdjęciu). Mała wartość stałej dielektrycznej oznacza małą wilgotność ośrodka i małe natężenie promieniowania powracającego do anteny odbiornika. Mała jest wtedy również, obliczona na podstawie zarejestrowanego na zdjęciu natężenia mikrofalowego, wartość współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (ciemny ton na zdjęciu).

W literaturze można spotkać różne algorytmy opisujące zależność pomiędzy stałą dielektryczną i wilgotnością gleby. Roth opisuje ją oddzielnie dla gleb mineralnych i organicznych za pomocą następujących wzorów (Roth [1992]):

dla gleb mineralnych:

$$\varepsilon = 2.87 - 11.1WG + 276WG^2 - 272WG^3 \quad (6.2.2)$$

dla gleb organicznych:

$$\varepsilon = 0.97 - 10.9WG + 87.4WG^2 - 28WG^3 \quad (6.2.3)$$

gdzie:

$\varepsilon$  – stała dielektryczna gleby,

WG – wilgotność gleby.

Zależność pomiędzy stałą dielektryczną i wilgotnością gleby jest również wykorzystywana w metodzie reflektometrycznej TDR pomiaru wilgotności gleby. Metoda ta została zastosowana w niniejszej pracy do pomiaru wilgotności gleby na obszarze badawczym. W tym celu wykorzystano przyrząd TRIME-FM. Urządzenie to stosuje wzór opisujący wyżej wymienioną zależność, który podany jest w rozdziale 3.2.

## 7. WSPÓŁCZYNNIK ROZPRASZANIA WSTECZNEGO $\sigma^{\circ}$

Współczynnik rozpraszania wstecznego tzw.  $\sigma^{\circ}$  wyraża natężenie promieniowania mikrofalowego odbitego od badanej powierzchni. Oblicza się go z wartości liczbowych przypisanych poszczególnym pikselom zdjęcia radarowego przedstawiającego amplitudę sygnałów odbitych. Na rysunku 7.1 zamieszczony jest fragment zdjęcia mikrofalowego pokrywającego badany teren (widoczna w lewym górnym rogu jasna plama obrazuje miasto Wolsztyn), otrzymanego z satelity ERS-2.

Współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  dla zdjęć satelitarnych ERS-2.SAR.PRI wykorzystanych w niniejszej pracy (produkt PRI jest obrazem precyzyjnym po wprowadzeniu korekcji systemowych, ze zredukowanymi szumami i jednakową wielkością pikseli o wymiarach 12,5x12,5m) oblicza się za pomocą następującego wzoru (Laur [1992]):

$$\sigma^{\circ} = \frac{\langle I \rangle}{K} \times \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{ref}} \quad (7.1)$$

gdzie:

$\langle I \rangle$  - średnia wartość natężenia promieniowania odbitego od obiektu,

$K$  - stała kalibracyjna podawana w nagłówku zdjęcia,

$\alpha_{ref}$  - kąt padania wiązki na piksel centralny równy  $23^{\circ}$ ,

$\alpha$  - lokalny kąt padania wiązki,  $19.5^{\circ}$ - $26.6^{\circ}$ , obliczany (przy założeniu, że Ziemia ma w przybliżeniu kształt elipsoidy obrotowej) na podstawie danych zawartych w nagłówku zdjęcia takich jak: szerokość geograficzna w pikselu centralnym, czas jaki upływa od nadania sygnału do jego odbioru po odbiciu od piksela znajdującego się najbliżej orbity, kąt padania wiązki na piksel leżący najbliżej orbity satelity.

Natężenie odbitego sygnału radarowego jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy fali (wartości liczbowej piksela oznaczanej jako DN) i wyraża się wzorem:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^{i=N} DN_i^2 \quad (7.2)$$

Współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  jest wielkością bezwymiarową, jednak ze względu na duże wartości jakie przyjmuje (rzędu  $10^5$ ) wyraża się go w dB:

$$\sigma^{\circ}_{dB} = 10 \log_{10} \sigma^{\circ} \quad (7.3)$$

Po uwzględnieniu powyższego równania, wzór na współczynnik  $\sigma^{\circ}$  przyjmie następującą postać:

$$\sigma^{\circ}_{dB} = 10 \log_{10} \left( \frac{\langle I \rangle}{K} \times \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_{ref}} \right) \quad (7.4)$$

skąd:

$$\sigma_{dB}^{\circ} = 10\log_{10}\left(\frac{\langle I \rangle}{K}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_{ref}}\right) = 10\log_{10}\langle I \rangle - 10\log_{10}K + 10\log_{10}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_{ref}}\right) \quad (7.5)$$

Przyjmując następujące oznaczenie:

$$\beta_{dB} = 10\log_{10}\left(\frac{\sin\alpha}{\sin\alpha_{ref}}\right) \quad (7.6)$$

otrzymujemy:

$$\sigma^{\circ} = \langle I \rangle_{dB} - K_{dB} + \beta_{dB} \quad (7.7)$$

gdzie:

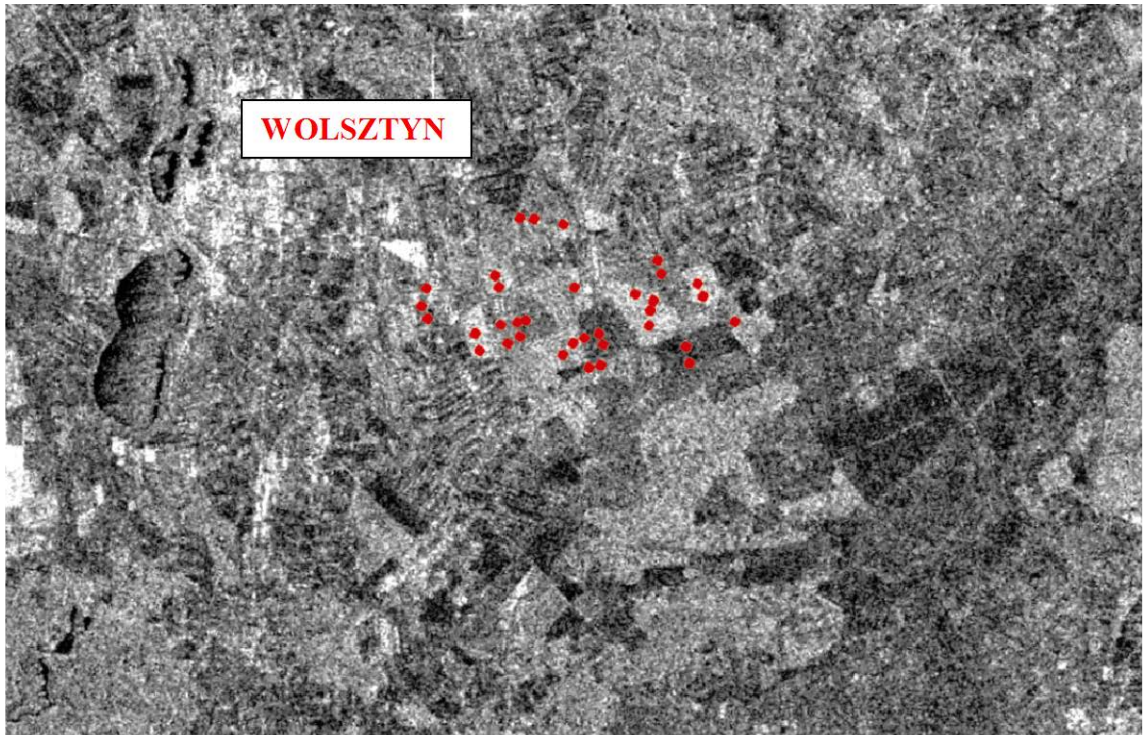
DN-amplituda fali w pikselu i-tym,

N-liczba pikseli wzięta do obliczeń,

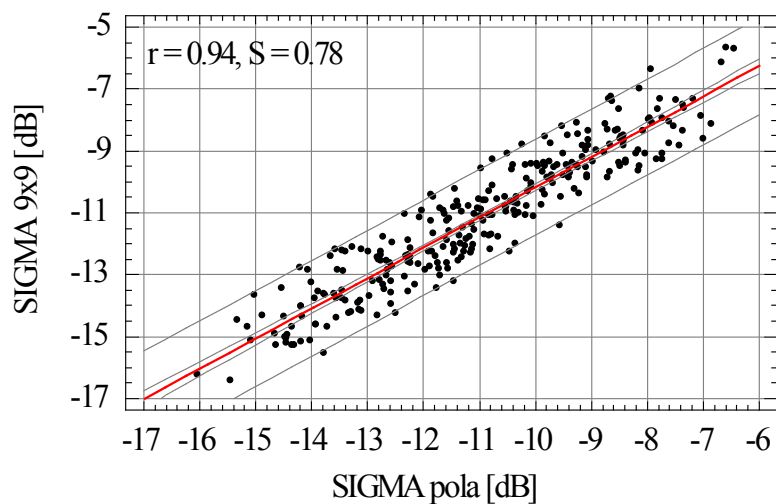
$\beta$ - współczynnik korekcji wynoszący:  $-0.7 \text{ dB} < \beta < +0.6 \text{ dB}$  dla  $19.5^{\circ} < \alpha < 26.6^{\circ}$  i  $\alpha_{ref}=23^{\circ}$

W niniejszej pracy, do obliczeń współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  łąn zbóż wzięto liczbę 81 pikseli (9x9), co odpowiada wielkości badanej w terenie powierzchni roślinnej (112m x 112m), jednorodnej pod względem właściwości rozpraszających. Wpływ efektu plamkowania (zwany zjawiskiem „pieprzu i soli”) na wartości współczynnika  $\sigma^{\circ}$ , który to efekt zawsze towarzyszy rozpraszaniu promieniowania koherentnego, jest w wyniku tego uśredniania usunięty. Obliczono również wartości współczynnika  $\sigma^{\circ}$  dla obszaru pól, na których znajdowały się punkty pomiarowe. Otrzymano wysoką korelację pomiędzy wartościami współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  otrzymanymi dla bloku pikseli 9x9 a wartościami  $\sigma^{\circ}$  otrzymanymi dla całego pola ( $r = 0.94$ , S- odchylenie standardowe średniej, będące miarą odchylenia wartości zmiennej losowej od jej wartości przeciętnej), poziom ufności 99%). Zależność ta pokazana jest na rysunku 7.2. Tak wysoka korelacja świadczy o właściwym doborze punktów pomiarowych jako reprezentantów całego badanego łąn zbóż, jak również o właściwej ilości pikseli (81) wziętych do obliczania wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$ .

Zdjęcia ERS-2.SAR.PRI otrzymane z Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) zostały przetworzone (wizualizacja, geometryzacja, kalibracja) przy zastosowaniu oprogramowania systemu komputerowego ERDAS IMAGINE oraz programów własnych IGiK. Do wykonania obliczeń współczynnika  $\sigma^{\circ}$  wykorzystane zostały programy komputerowe opracowane w IGiK (Stankiewicz [1998]), pracujące również w wyżej wymienionym systemie komputerowym. Otrzymane wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  zgromadzono w bazach danych typu STATGRAPHIC PLUS i EXCEL, wraz z pomiarami naziemnymi parametrów glebowo-roślinnych uwzględnionych w realizacji pracy doktorskiej.



Rys.7.1. Zdjęcie mikrofalowe ERS-2.SAR.PRI z zaznaczonymi punktami pomiarowymi na polu testowym *Gościeszyn*.



Rys.7.2. Zależność pomiędzy wartościami współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^0$  obliczonymi dla bloku 9x9 pikseli a wartościami obliczonymi dla całego badanego pola.

## 8. BADANIA PRZEPROWADZONE NA OBSZARZE TESTOWYM

### 8.1. 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 (regionalizacja fizyczno-geograficzna, Kondracki [1978]). Geneza tego terenu związana jest z odpływem wód polodowcowych zlodowacenia Bałtyckiego. Obszar badawczy zajmuje część rolniczej powierzchni Wielkopolski pomiędzy 52° a 52°20' szerokości geograficznej północnej oraz pomiędzy 16°05' a 16°25' długości geograficznej wschodniej. Na obszarze tym wybrane zostały dwa pola testowe, jeden zlokalizowany w okolicy Gościeszyna (na wschód od Wolsztyna, dawne woj. zielonogórskie, rys. 7.1), drugi w okolicy Grodziska Wielkopolskiego (na wschód od Grodziska Wlk., dawne woj. poznańskie, rys.8.1.1). 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. 8.1.2).



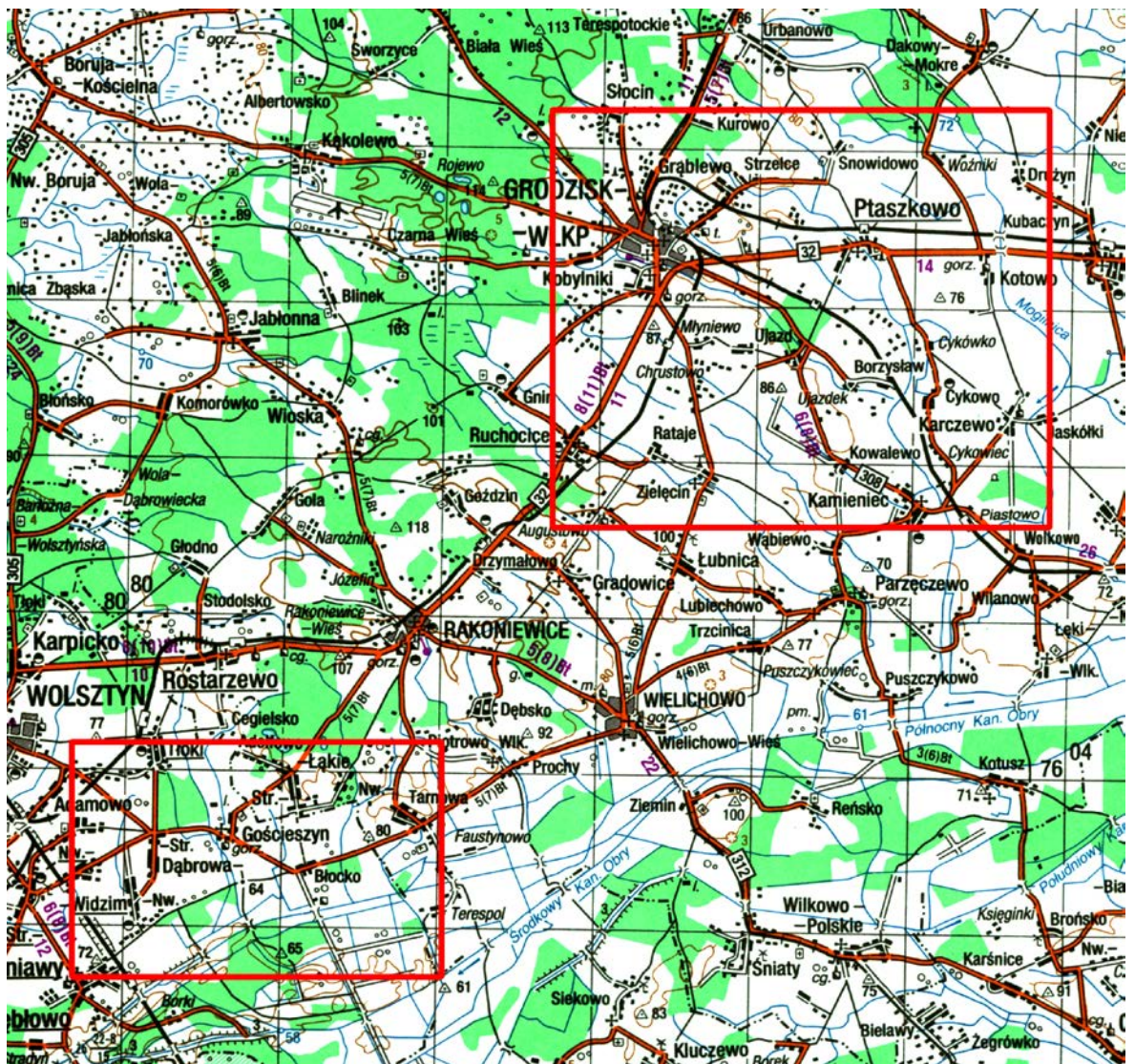
Rys. 8.1.1. Zdjęcie mikrofalowe ERS-2.SAR.PRI z zaznaczonymi punktami pomiarowymi na polu testowym *Grodzisk Wielkopolski*.

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 (temperatura powietrza powyżej 5° C) 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, PTG [1989], Mocek [1997]). Na terenie tym uprawia się głównie zboża (pszenica, pszenżyto, jęczmień, żyto, owies, kukurydza), rośliny okopowe (buraki cukrowe i pastewne, ziemniaki) a z roślin oleistych rzepak.



Rys. 8.1.2. Mapa topograficzna obszaru badawczego z zaznaczonymi polami testowymi. (skala 1:200 000).

## 8.2. Pomiary przeprowadzone na obszarze badawczym

W latach 1992-1999, od maja do sierpnia prowadzone były badania terenowe dotyczące realizacji projektów badawczych zatwierdzonych przez ESA. Terminy tych badań związane były z przelotem satelitów ERS-1 i ERS-2 nad obszarem badawczym. Badania te wykonywane były wokół wybranych punktów (ok. 3 pomiarów wokół każdego), znajdujących się na gruntach ornych. Punkty te reprezentowały obszar jednorodny pod względem szorstkości badanej powierzchni roślinnej. Do realizacji niniejszej pracy zostały wykorzystane pomiary parametrów glebowo-roślinnych przeprowadzone na polach obsianych zbożami.

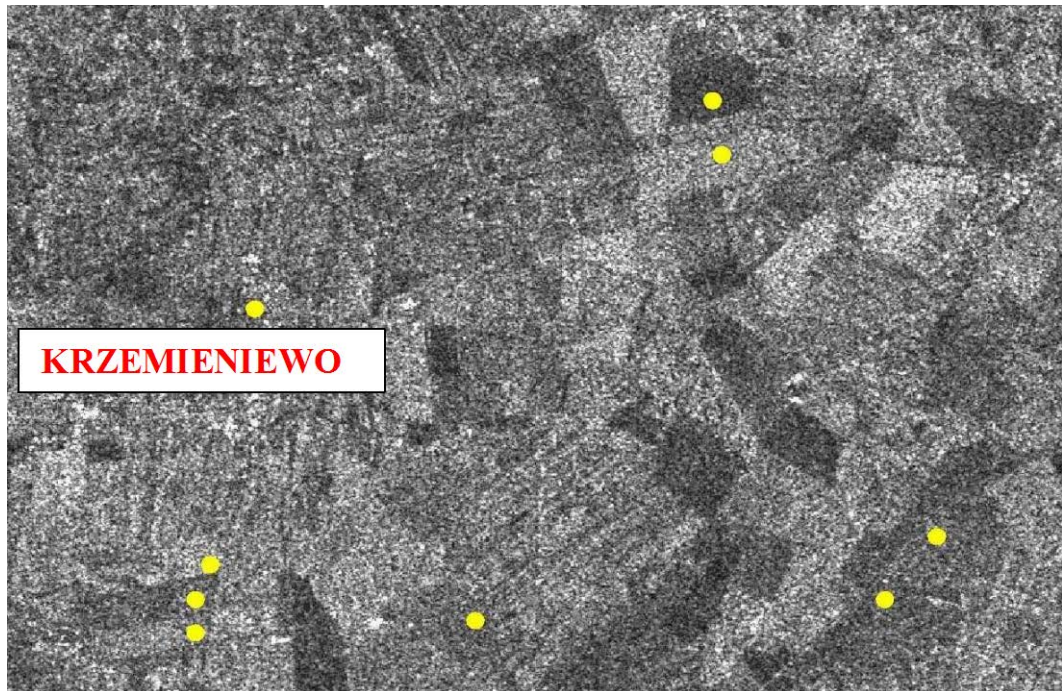
W latach 1992-1999 wykonywane były pomiary powierzchni projekcyjnej liści (LAI, [bezwymiarowe]), biomasy świeżej (Bw [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]) oraz procentowej zawartości wody w roślinach (WR [%]). Wyniki tych pomiarów zostały wykorzystane w niniejszej pracy. Pomiary powierzchni projekcyjnej liści (LAI) wykonywane były instrumentem LAI-2000 Plant Canopy Analyzer produkcji amerykańskiej firmy LI-COR (szczegółowy opis wykonywania pomiarów tym instrumentem znajduje się w rozdziale 9.2). Oznaczenia biomasy świeżej (Bw) i procentowej zawartości wody w roślinach (WR) wykonywane były w laboratorium Farm Obra (w Powodowie) na podstawie prób zebranych w terenie z powierzchni  $1 \text{ m}^2$ .

W latach 1997-1999 prowadzone były pomiary wilgotności objętościowej gleby [%] w profilu 0-15 cm instrumentem TRIME-FM (opis wykonywania pomiarów tym instrumentem znajduje się w rozdziale 3.2). Pomiary te wykonywane były w kilku miejscach wokół punktu pomiarowego (w zależności od stopnia zróżnicowania ładu), a następnie uśredniane do jednej wartości reprezentującej powierzchnię badanego ładu zboża. Wartości średnie otrzymane w wyniku przeprowadzonych pomiarów zostały wykorzystane w niniejszej rozprawie.

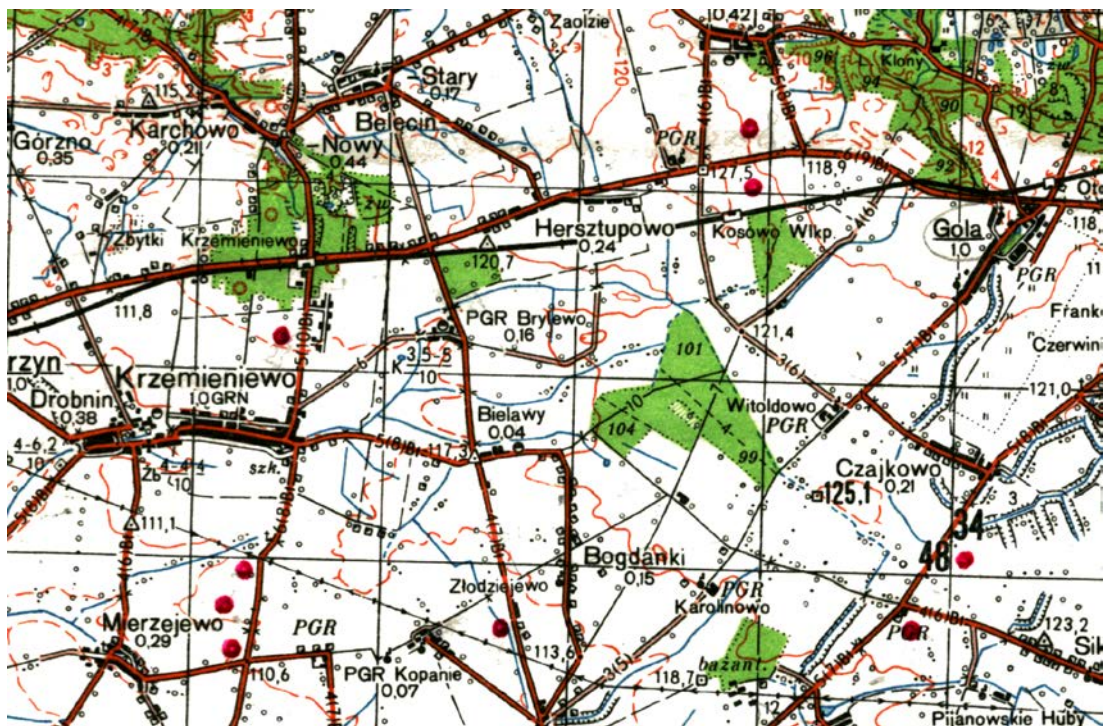
W pracy wykorzystano również pomiary wilgotności gleby i LAI wykonane w dniach 30.06.1998 i 20.07.1999 na polu testowym *Gostyń* leżącym na południe od badanego obszaru (na wschód od miasta Gostyń). Celem wykonania tych pomiarów było sprawdzenie dokładności wyprowadzonych algorytmów. Rozmieszczenie badanych na polu testowym *Gostyń* punktów pomiarowych pokazane jest na rysunku 8.2.1, przedstawiającym zdjęcie radarowe ERS-2.SAR wykonane w dniu 20.07.1999 r. Na rysunku 8.2.2. 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, PTG [1989], Mocek [1997]).

Oprócz wyżej 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 przeprowadzono 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 w danym roku zdjęć satelitarnych. Wyniki wykonanych pomiarów terenowych zostały wprowadzone do baz danych typu EXCEL i STATGRAPHIC-PLUS (zawierających dane satelitarne), gdzie wykonywano wszystkie analizy statystyczne.





Rys. 8.2.1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na polu testowym *Gostyń* na tle zdjęcia mikrofalowego ERS-2.SAR PRI wykonanego w dniu 20.07.1999 r.



Rys.8.2.2. Mapa topograficzna pola testowego *Gostyń* (skala 1:100 000) z naniesionymi punktami pomiarowymi.



### 8.3. Charakterystyka warunków wegetacji zbóż w latach 1997-1999

Rok 1997 charakteryzował się występowaniem znacznych anomalii pogodowych i bardzo zróżnicowanymi warunkami agrometeorologicznymi, często niekorzystnymi dla rolnictwa. Po mroźnej i bardzo skąpej w opady zimie, ocieplenie w trzeciej dekadzie lutego i pierwszej połowie marca spowodowało ruszenie wegetacji zbóż ozimych i rozpoczęcie wiosennych prac polowych średnio o 3 tygodnie wcześniej w porównaniu do roku poprzedniego. Nawrót zimy w połowie marca zahamował jednak rozwój roślin. Ponowne ocieplenie pod koniec marca pobudziło wegetację i umożliwiło siewy zbóż jarych. Od 4 kwietnia nastąpiło kolejne ochłodzenie z przymrozkami i opadami śniegu, co spowolniło wegetację i opóźniło wiosenne prace polowe. Wzrost temperatury nastąpił dopiero na przełomie kwietnia i maja, który przy dostatecznym uwilgotnieniu gleby spowodował intensywny wzrost i rozwój ozimin oraz przyspieszył wschody zbóż jarych. Bardzo ciepła słoneczna pogoda w drugiej dekadzie maja powodowała szybkie wyczerpywanie się niewielkich zasobów wilgoci, w wyniku czego w wielu rejonach, zwłaszcza południowo-wschodniej Polski, nastąpiło nadmierne przesuszenie wierzchniej warstwy gleby. Na obszarze badawczym w trzeciej dekadzie maja średnia wilgotność gleby pod zbożami wyniosła 5,5% obj. 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 zbóż na wodę tj. w drugiej połowie maja i w czerwcu występowała dostateczna ilość wilgoci w glebie, co zrównoważyło ujemne skutki prawie beżśnieżnej zimy. W końcu czerwca zboża ozime rozpoczęły fazę dojrzewania, natomiast zboża jare weszły w fazę kwitnienia. Na obszarze badawczym zboża ozime rozpoczynały fazę dojrzałości woskowej, jare fazę dojrzałości mlecznej, a średnia wilgotność gleby pod zbożami była niedostateczna i wyniosła zaledwie 4,5% obj. Dobrze zapowiadające się plonowanie roślin udaremniły jednak ulewne deszcze w lipcu, które w południowej i zachodniej części kraju spowodowały powódzie o nienotowanych rozmiarach. Na obszarach nie objętych powodzią ulewne deszcze w wielu rejonach spowodowały nadmierne uwilgotnienie gleby i silne wylegnięcie łąnów zbóż. Na terenie objętym badaniami średnia wilgotność gleby pod zbożami wyniosła na początku sierpnia 12% obj., dwukrotnie więcej niż miesiąc wcześniej, a zboża zarówno ozime jak i jare osiągnęły już dojrzałość pełną. W drugiej dekadzie sierpnia nastąpiła poprawa warunków agrometeorologicznych. Bardzo ciepła, słoneczna i bezdeszczowa pogoda spowodowała szybkie obsychanie pól i stworzyła sprzyjające warunki dla przeprowadzenia żniw, co wpłynęło dodatnio na wielkość zbiorów zbóż. Najwyższe plony zbóż podstawowych wraz z mieszankami zbożowymi uzyskano m. in. w woj. poznańskim - 36,9 dt/ha, gdzie znajduje się pole testowe *Grodzisk Wielkopolski*, a w woj. zielonogórskim, gdzie znajduje się drugie z badanych pole testowe – *Gościeszyn* - 26,8 dt/ha (GUS [1997a], [1997b], [1998a]).

Warunki agrometeorologiczne w roku 1998 na przeważającym obszarze kraju oceniono jako korzystne dla rolnictwa, mimo dużej zmienności pogody. Okresy niepomyślnych warunków termiczno-wilgotnościowych, które trwały krótko, przeplatały się z korzystnymi warunkami i w efekcie nie miały znaczącego wpływu na wegetację roślin. Wysokie temperatury w lutym (średnio 6° C) spowodowały, że w trzeciej dekadzie miesiąca na dużym obszarze Polski ruszyła wegetacja zbóż ozimych, które dobrze przezimowały. W

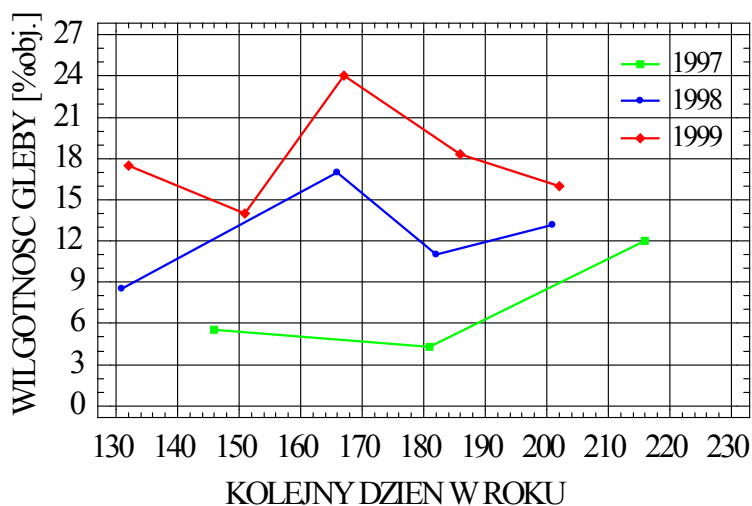
porównaniu do roku ubiegłego wegetacja ruszyła średnio o ponad 3, a na znacznym obszarze kraju o ponad 5 tygodni wcześniej. W końcu marca, mimo chłodnej pogody (średnia temperatura 2,6° C) wegetacja roślin i wiosenne prace polowe trwały już prawie w całym kraju. Tylko w rejonach północno-wschodnich i podgórskich wegetacja i wiosenne prace polowe rozpoczęły się w pierwszej dekadzie kwietnia. Warunki agrometeorologiczne w kwietniu na ogół sprzyjały wegetacji, jednak obfite opady, szczególnie intensywne w drugiej dekadzie kwietnia, w wielu rejonach kraju spowodowały wystąpienie na polach nadmiernego uwilgotnienia gleby, a w kilku województwach południowo-wschodnich wezbranie rzek i zalanie części pól. Bardzo ciepła i sucha pogoda w trzeciej dekadzie kwietnia sprzyjała szybkiemu obsychaniu pól, dzięki czemu w końcu miesiąca nadmiar wilgoci występował jedynie miejscami na terenach objętych powodzią. Na pozostałym obszarze, w tym na terenie objętym badaniami, wilgotność gleby była dostateczna. Także w pierwszej połowie maja przebieg pogody był bardzo korzystny dla wschodów, wzrostu i rozwoju zbóż. 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. Podobnie było na obszarze całego kraju. Są to okresy zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę i mimo iż w wielu rejonach na skutek niedoboru opadów zaobserwowano przesuszenie wierzchniej warstwy gleby (średnia wilgotność gleby pod zbożami na terenie objętym badaniami wyniosła 8,5% obj.) stan zbóż oceniono jako dość dobry, znacznie lepszy niż w analogicznym okresie ubiegłego roku. Opady deszczu, które wystąpiły pod koniec maja poprawiły stan uwilgotnienia gleby. Pod koniec czerwca wilgotność wierzchniej warstwy gleby przeważnie była zadawalająca na obszarze całego kraju. Na terenie objętym badaniami wyniosła średnio 11% obj. W tym czasie trwało dojrzewanie zbóż ozimych (na obszarze badawczym zboża ozime znajdowały się w fazie dojrzałości woskowej) a zboża jare przeważnie znajdowały się w fazie kwitnienia lub miejscami w początkach dojrzewania (na obszarze badawczym w fazie dojrzałości mlecznej). Chłodna i deszczowa pogoda w pierwszej dekadzie lipca opóźniła proces dojrzewania ziarna zbóż. W wielu rejonach, głównie południowo-wschodnich i północnych 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 zniwnym. Plony zbóż podstawowych wraz z mieszankami zbożowymi w porównaniu do osiągniętych w 1997 r. były wyższe średnio o 7,4%, na co wpłynął długi okres wegetacji (bardzo wczesna wiosna) i korzystny układ warunków termiczno-wilgotnościowych w całym jego okresie. W woj. poznańskim średnie plony wyniosły 39,3 dt/ha, natomiast w woj. zielonogórskim 28,6 dt/ha (GUS [1998b], [1998c]).

W 1999 roku bardzo ciepła pogoda w ostatnich dniach lutego i w pierwszej dekadzie marca spowodowała w wielu rejonach Polski wczesne ruszenie wegetacji. Na terenie całego kraju ruszenie wegetacji nastąpiło w trzeciej dekadzie marca - średnio dwa tygodnie później niż w 1998 r., w którym z kolei zanotowano wyjątkowo wczesne ruszenie wegetacji. Korzystny układ warunków agrometeorologicznych (ciepła pogoda i dostatek wilgoci w

glebie) trwający do połowy kwietnia przyczynił się do znacznego przyspieszenia wegetacji. Przejściowe krótkotrwałe ochłodzenie, któremu towarzyszyły opady śniegu w drugiej dekadzie kwietnia nie stwarzało zagrożenia dla upraw, jedynie tylko spowolniło procesy życiowe roślin. Niekorzystne dla roślin były natomiast obfite opady deszczu w drugiej połowie kwietnia, które w wielu rejonach kraju, zwłaszcza w Wielkopolsce, na Dolnym Śląsku i na Podkarpaciu spowodowały powstanie nadmiernego uwilgotnienia gleby. Na polach niżej położonych utworzyły się zastoiska wody, powodujące wymakanie roślin. Nadmiar wody w glebie niekorzystnie wpłynął na stan upraw, jednak mimo to był lepszy od dość dobrego stanu zasiewów w 1998 r. Dość zróżnicowana pogoda w maju i czerwcu powodowała 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 wyniosła 17,5% obj., zboża ozime weszły w fazę strzelania w źdźbło a zboża jare znajdowały się w fazie krzewienia. W trzeciej dekadzie maja występujące na przeważającym obszarze kraju 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, głównie na Dolnym i Górnym Śląsku, w Małopolsce i na Mazowszu 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% obj. Zboża ozime były w tym czasie w fazie dojrzałości mleczej, natomiast zboża jare pod koniec fazy kłoszenia lub rozpoczęły fazę zapełniania ziarnem, które przebiegały w niepomyślnych dla tych faz warunkach pogodowych. W pierwszej i drugiej dekadzie lipca warunki agrometeorologiczne na przeważającym obszarze kraju były dobre dla wegetacji roślin. W tym czasie w całym kraju trwało dojrzewanie zbóż ozimych i na znacznym obszarze zbóż jarych, na ogół przy dobrze wypełnionym ziarnie. Na początku lipca średnia wilgotność gleby pod zbożami na terenie objętym badaniami wyniosła 18,3%, zboża ozime osiągnęły fazę dojrzałości woskowej a jare dojrzałości mleczej. 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. Pod koniec drugiej dekady lipca w wielu rejonach rozpoczęto żniwa zbóż ozimych. Jednak bardzo wysokie temperatury i niedobór opadów pod koniec lipca i w sierpniu wpłynęły niekorzystnie na rozwój roślin, powodując obniżenie ich plonowania. U zbóż nastąpiło przyspieszenie i skrócenie fazy dojrzewania ziarna, przez co nie zostało ono w pełni wykształcone. Plony zbóż podstawowych z mieszankami zbożowymi oceniono na 3-4,3% niższe niż w 1998 r. (GUS [1999a], [1999b]).

Wilgotność gleby pod zbożami w ciągu trzech lat wykonywania badań terenowych zmieniała się począwszy od wartości najmniejszych, które wystąpiły po koniec czerwca 1997 roku, (średnio 4.5% obj.) a skończywszy na wartościach największych, które zanotowano w połowie czerwca 1999 r. (średnio 24% obj.). Ogólnie można stwierdzić, że na obszarze badawczym 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 (średnio 5% obj.). Warunki wilgotnościowe gleby poprawiły się dopiero pod koniec okresu wegetacyjnego zbóż (średnio 12% obj.), co jednak nie miało już wpływu na ich plonowanie, najniższe spośród lat 1997-1999. W okresie zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę w roku 1998 warunki wilgotnościowe były dostateczne (średnio 15% obj.) i takie utrzymywały się już przez pozostałą część okresu wegetacyjnego zbóż. Natomiast w roku 1999 zanotowano dostateczną wilgotność gleby w maju (średnio 17.5-14% obj.) i nadmierną w czerwcu (średnio 24%). Spowodowało to wspomniane wyżej obniżenie plonowania roślin. Na rysunku 8.3.1 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 tego rysunku badania zostały wykonane w różnych warunkach uwilgotnienia i obejmują szerokie spektrum wartości wilgotności gleby.



Rys.8.3.1. Przebieg średnich wartości wilgotności gleby pod zbożami w latach 1997-1999 w dniach rejestracji satelitarnej ERS-2.SAR.

## 9. WSKAŹNIK POWIERZCHNI PROJEKCYJNEJ LIŚCI - LAI

### 9.1. Wstęp

Wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści LAI (Leaf Area Index) jest wielkością bezwymiarową, charakteryzująca stosunek powierzchni liści do jednostkowej powierzchni gleby (zwykle jest nią  $1 \text{ m}^2$ ), 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 coraz częściej oparte są na pomiarach ilości promieniowania słonecznego przechodzącego przez roślinność. Mierzą one powierzchnię całej masy roślinnej, zachowując przyjętą powszechnie terminologię wskaźnika LAI. Wówczas wielkość ta wyraża zarówno gęstość roślin, jak i ich geometrię (Welles [1990]).

Jest szereg metod pomiarów powierzchni projekcyjnej liści LAI. Wskaźnik LAI można mierzyć np. w następujący sposób: zebraną z powierzchni  $1 \text{ m}^2$  masę roślinną dzieli się na części o różnych kształtach (np. liście czy łodygi) cechujące się podobną powierzchnią, wybiera jej reprezentanta, a następnie oblicza jego powierzchnię przy użyciu fotokopiarki i planimetru. Znając powierzchnię każdego elementu rośliny i ilość poszczególnych elementów, można już obliczyć wartości wskaźnika LAI. Istnieje również metoda wagowa pomiaru LAI, którą wykorzystuje się w przypadku liści o dużej powierzchni (np. fikusów). Polega ona na zważeniu liścia (otrzymuje się wagę  $X$ ), następnie wycięciu w nim kilku krążków o znanej powierzchni równej  $a$  i wadze  $x$ . Powierzchnię liścia  $A$  można wtedy obliczyć według wzoru:  $A = a(X/x)$ , (Czarnowski [1989]). Obie te metody są pracochłonne i mało dokładne. Obecnie wykorzystuje się różne urządzenia oparte na pomiarach ilości promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni gleby przez roślinność (Line Quantum Sensors, DEMON, Fisheye Photography, CROWNMETER, CEPTOMETER), (Welles J.M., 1990). Jednym z nich jest przyrząd LAI-2000 Plant Canopy Analyzer produkcji amerykańskiej firmy LI-COR, który został wykorzystany w prezentowanej pracy. Wartości LAI można również określać na podstawie zdjęć satelitarnych wykonanych w optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego (Dąbrowska-Zielińska [1995]). Odnoszą się one wtedy do powierzchni reprezentowanej przez piksel na zdjęciu satelitarnym.

### 9.2. Pomiary wskaźnika LAI przeprowadzone na obszarze badawczym

Pomiary wskaźnika LAI wykonywane były w latach 1992-1999 za pomocą instrumentu LAI-2000 Plant Canopy Analyzer składającego się z logera (mikrokomputerowy rejestrator danych) oraz podłączonego do niego czujnika optycznego. Na podstawie pomiarów wykonywanych czujnikiem, specjalne oprogramowanie zainstalowane w komputerze pozwala na natychmiastowe otrzymanie wartości LAI, wartości MTA (Mean Tip Angle - średni kąt nachylenia liści do poziomu) oraz wartości DIFN (Diffuse Non-interceptance - część powierzchni gleby nie zasłoniętej przez rośliny). Wielkość MTA może teoretycznie przyjmować wartości od  $0^\circ$  (liście ułożone poziomo) do  $90^\circ$  (liście ułożone pionowo). W praktyce waha się od  $30^\circ$  do  $60^\circ$ . Wielkość DIFN waha się od 0 (gleba całkowicie przykryta przez roślinność) do 1 (gleba nie pokryta roślinnością) i w istocie przedstawia strukturę roślinności, gdyż zawiera zarówno wartości LAI jak i wartości MTA. Choć dla mierzonego wskaźnika zastosowano tu nazwę LAI, praktycznie instrument ten mierzy powierzchnię całej masy zielonej (LAI-2000

Plant Canopy Analyzer, Operating Manual [1991]), włączając powierzchnię łodyg, kwiatów, owoców itd. Wszystkie te części roślin wpływają na szorstkość badanej powierzchni.

Pomiary LAI, MTA i DIFN wykonywane były w trakcie przelotu satelitów ERS-1 i ERS-2, od maja do sierpnia każdego roku badawczego, w 30 punktach pomiarowych, rozmieszczonych na gruntach ornych (średnio trzy pomiary wokół punktu pomiarowego). W tym czasie zboża ozime znajdowały się już w fazie kłoszenia, natomiast zboża jare w fazie krzewienia lub strzelania w źdźbło. W tabeli 9.2.1 zamieszczone są wartości wskaźnika LAI, które otrzymano w latach 1992-1999 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 9.2.1. 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 |
|       | Max               | 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,

Max – 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 z powyższej tabeli największe wartości wskaźnika LAI wystąpiły w fazie kłoszenia, a najmniejsze w pierwszej z analizowanych faz rozwojowych zbóż, to jest w fazie krzewienia. Poczynając od fazy kłoszenia wartości wskaźnika LAI zaczynają maleć, co jest związane z obsychaniem roślin w następujących po tej fazie 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 (skala B na rys. 6.1.2) jest najbardziej szorstka. Szczegółowe omówienie danych zawartych w tabeli 9.2.1 znajduje się w następnym rozdziale. Na poniższych fotografiach (rys. 9.2.1-9.2.7) zamieszczono zdjęcia łąnów zbóż wykonane na obszarze badawczym w analizowanych fazach rozwojowych roślin (fazy 0-6, tab.9.2.1). Jak można zauważyć wygląd powierzchni łąnów na zdjęciach, rozpatrywany pod kątem ich szorstkości związany jest z wartościami LAI. Przy dużych wartościach LAI powierzchnia gleby jest przykryta przez zboża, które tworzą w rozpatrywanej skali szorstkości niemal jednolitą powierzchnię masy roślinnej.





Rys.9.2.1. Zdjęcie łąnu pszenicy jarej znajdującej się w fazie krzewienia (faza 0 w tabeli 9.2.1).



Rys.9.2.2. Zdjęcie łąnu pszenicy jarej znajdującej się w fazie strzelania w źdźbło (faza 1 w tabeli 9.2.1).





Rys.9.2.3. Zdjęcie łąnu pszenicy jarej znajdującej się w fazie kłoszenia (faza 2 w tabeli 9.2.1).



Rys.9.2.4. Zdjęcie łąnu pszenicy jarej znajdującej się w fazie zapelniania ziarnem (faza 3 w tabeli 9.2.1).





Rys.9.2.5. Zdjęcie łąnu pszenicy jarej znajdującej się w fazie dojrzałości mleczonej (faza 4 w tabeli 9.2.1).



Rys.9.2.6. Zdjęcie łąnu pszenicy jarej znajdującej się w fazie dojrzałości woskowej (faza 5 w tabeli 9.2.1).





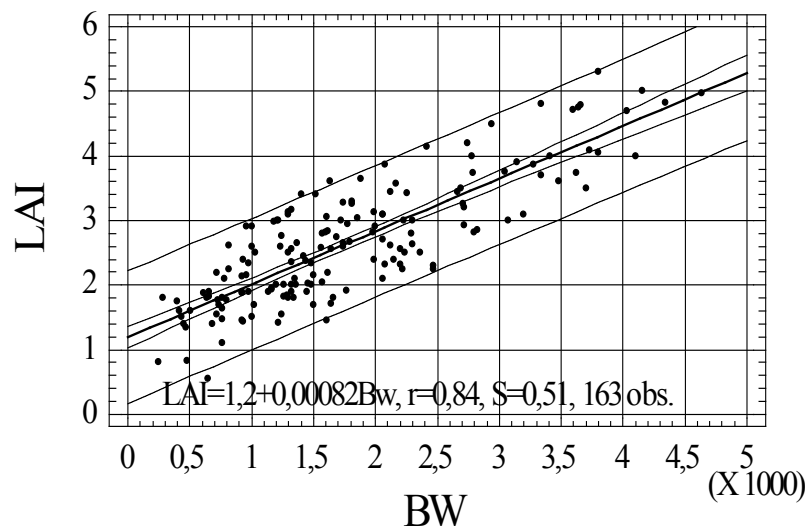
Rys.9.2.7. Zdjęcie łąnu pszenicy ozimej znajdującej się w fazie dojrzałości pełnej (faza 6 w tabeli 9.2.1).

Na podstawie powyższych fotografii można stwierdzić, że w fazie krzewienia (jak również w poprzednich fazach nie rozpatrywanych w pracy) oraz w końcowych fazach dojrzewania zbóż, kiedy wartości wskaźnika LAI są najmniejsze, powierzchnia wystawiona na promieniowanie mikrofalowe jest najbardziej szorstka.

### 9.3. Analiza wartości wskaźnika LAI i DIFN dla zbóż

Analizując dane zebrane w tabeli 9.2.1 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 stopniowy spadek wartości LAI, związany z wysychaniem roślin (żółknięciem). 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 biomasa. Badania przeprowadzone na obszarze testowym w latach 1992-1999 potwierdziły, że istnieje silna zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI i biomasa (Bw) zbóż o współczynniku korelacji  $r=0,84$ . Rysunek 9.3.1 przedstawia tę zależność otrzymaną (przy wykorzystaniu jednego z pakietów programu komputerowego STATGRAPHIC PLUS) w wyniku przeprowadzenia analizy regresji liniowej z jedną zmienną niezależną na poziomie ufności 99%. Analiza regresji jest jedną z ważniejszych metod statystycznych badania współzależności zjawisk. W ramach analizy regresji wartości zmiennej zależnej (w tym wypadku LAI) tłumaczy się za pomocą modelu matematycznego zwanego modelem regresji. Jego podstawową częścią jest tzw. funkcja regresji, która przedstawia zależność wartości średnich warunkowych zmiennej zależnej względem jednej (lub wielu) zmiennej niezależnej (w tym wypadku Bw), (Podgórski [1995]).

Rozpatrując każdy z badanych rodzajów zbóż oddzielnie, otrzymano korelacje najsilniejsze. Wyniki tych korelacji przedstawione są w tabeli 9.3.1.



Rys.9.3.1. Zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI i biomasa świeżą Bw dla zbóż.

Tabela 9.3.1. Wyniki korelacji pomiędzy wartościami LAI i biomasy świeżej Bw dla zbóż.

| RODZAJ ZBOŻA    | r    | N  | S    | RÓWNANIE                |
|-----------------|------|----|------|-------------------------|
| JĘCZMIENŃ JARY  | 0,93 | 15 | 0,46 | $LAI = 0,06 + 0,0025Bw$ |
| OWIES JARY      | 0,91 | 6  | 0,45 | $LAI = 0,116 + 0,002Bw$ |
| PSZENICA JARA   | 0,88 | 37 | 0,38 | $LAI = 1,04 + 0,0097Bw$ |
| PSZENICA OZIMA  | 0,96 | 7  | 0,36 | $LAI = 0,55 + 0,001Bw$  |
| PSZENŻYTO JARE  | 0,85 | 8  | 0,35 | $LAI = 0,4 + 0,0027Bw$  |
| PSZENŻYTO OZIME | 0,89 | 35 | 0,63 | $LAI = 0,09 + 0,0014Bw$ |
| ŻYTO            | 0,89 | 8  | 0,35 | $LAI = 1,75 + 0,0006Bw$ |

Objaśnienia:

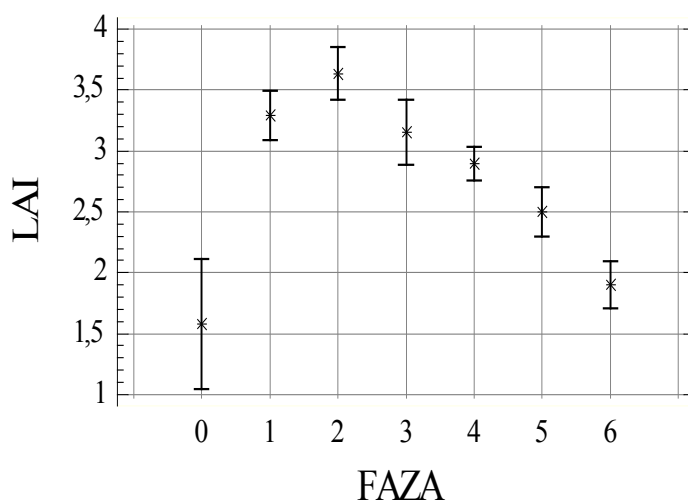
r - współczynnik korelacji,

S - odchylenie standardowe,

N - liczba obserwacji.

Bujna roślinność stosunkowo szybciej i głębiej wyczerpuje wodę z gleby, wcześniej i ostrzej reaguje też na jej brak (Ślusarczyk [1978]). Fazy charakteryzujące się największymi wartościami LAI (od fazy strzelania w źdźbło do fazy zapełniania ziarnem) są zatem jednocześnie okresami zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę. Brak odpowiedniej ilości wody w glebie w tym czasie spowoduje spadek plonowania roślin.

W tym czasie, gdy wystąpiły największe wartości wskaźnika LAI (faza kłoszenia), średnie wartości DIFN dla wszystkich zbóż były najmniejsze, co oznacza, że 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. Potwierdza to wykres zamieszczony na rysunku 9.3.2 przedstawiający średnie wartości wskaźnika LAI dla zbóż (wraz z przedziałami ufności) w rozpatrywanych różnych fazach rozwojowych, otrzymane na podstawie pomiarów wykonywanych w latach 1992-1999. Wykres ten powstał w wyniku przeprowadzenia jednokierunkowej analizy wariancji (ONE-WAY ANOVA), w której czynnikiem klasyfikacyjnym wartości LAI była faza rozwojowa zbóż. Analiza ta służy do badania wpływu jednego czynnika klasyfikacyjnego na poziom pewnego zjawiska (zmiennej) i jest dostępna w pakiecie programu STATGRAPHIC PLUS (Podgórski [1995]). Szczegółowe dane dotyczące wykresu zamieszczone są w tabeli 9.2.1. Kierując się wynikami przeprowadzonej analizy statystycznej dokonano podziału wartości LAI dla zbóż na następujące trzy klasy: <2, 2-3, >3.

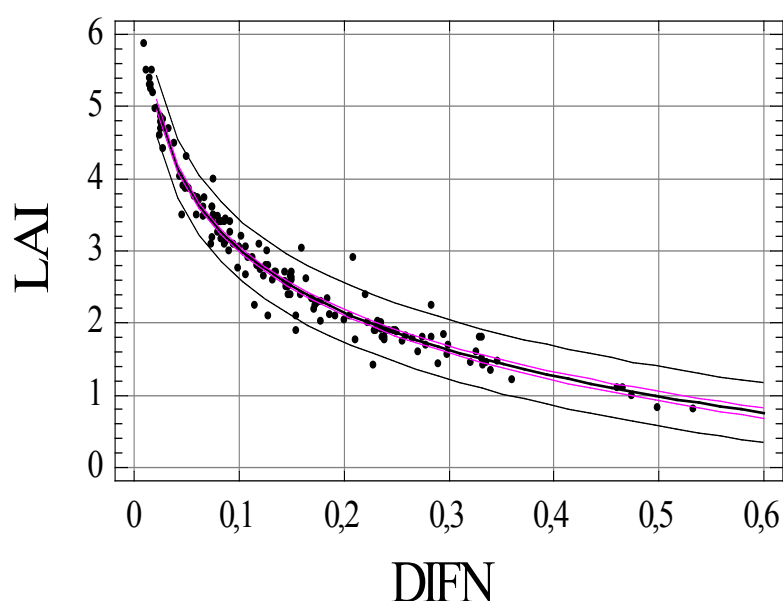


Rys.9.3.2. Wartości średnie wskaźnika LAI dla zbóż w latach 1992–1997 wraz z przedziałami ufności wyznaczonymi na poziomie ufności 95% metodą najmniejszej istotnej różnicy (LSD). 0-krzewienie, 1-strzelanie w źdźbło, 2-kłoszenie, 3-zapełnianie ziarnem, 4-dojrzałość mleczna, 5-dojrzałość woskowa, 6-dojrzałość pełna.

W rozpatrywanym okresie sezonu wegetacyjnego zbóż (pierwsze pomiary wykonywane były w maju) najmniejsze wartości wskaźnika LAI wystąpiły w fazie krzewienia (0) oraz pod koniec okresu wegetacyjnego zbóż, w fazie dojrzałości pełnej (6), kiedy rośliny były już żółte i suche. W tym samym czasie średnie wartości DIFN były największe i wyniosły odpowiednio 0,335 i 0,242. W pierwszym przypadku aż 33,5% powierzchni gleby było odsłoniętej, a w drugim 24,2%, stąd małe wartości LAI. Pomiędzy wartościami LAI i DIFN dla zbóż, począwszy od fazy krzewienia, istnieje silna zależność opisana modelem logarymicznym (współczynnik korelacji wyniósł  $r = -0,99$ ), którą przedstawia wykres na rysunku 9.3.3 i poniższe równanie:

$$LAI = 0,102 - 1,27 * \ln(DIFN) \quad (9.3.1)$$

Z rysunku 9.3.3 można odczytać, że wartości LAI rosną powoli do wartości 2 przy szybkim spadku wartości DIFN do 0,2, kiedy gleba jest w 80% pokryta przez rośliny. Poniżej wartości DIFN równej 0,1 (gleba w 90% pokryta przez rośliny) wskaźnik LAI gwałtownie rośnie (począwszy od wartości 3), osiągając wartości maksymalne przy 100% pokryciu gleby przez rośliny. Okres gwałtownego wzrostu wartości LAI zaczyna się zatem pod koniec fazy strzelania w źdźbło i kończy wtedy, gdy kłosa zaczynają wypełniać się ziarnem. Potwierdzają to dane zebrane w tabeli 9.2.1.



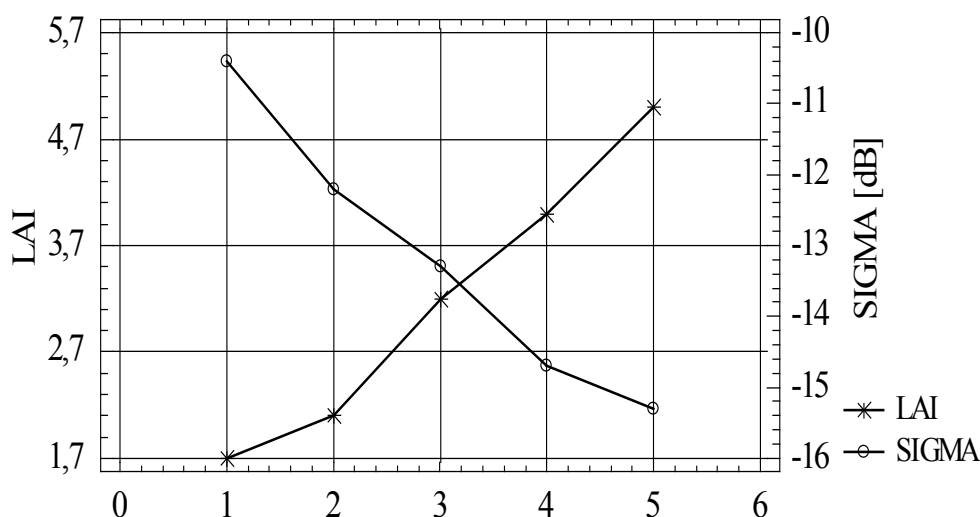
Rys.9.3.3. Zależność pomiędzy wartościami LAI i DIFN dla zbóż począwszy od fazy krzewienia do fazy dojrzałości pełnej ( $r=-0.99$ ,  $S=0.2$ , 148 obserwacji).

#### 9.4. Wskaźnik LAI – szorstkość badanej powierzchni roślinnej

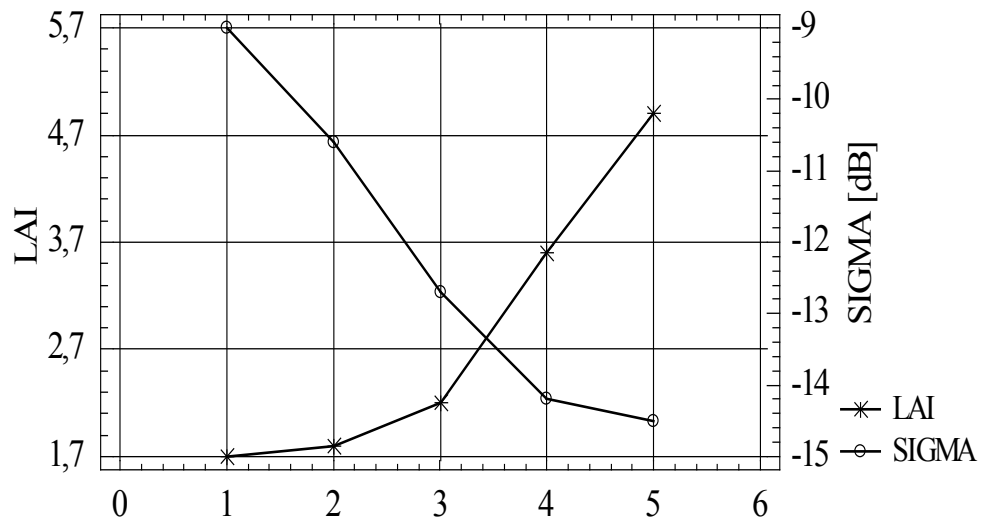
W okresie gwałtownego wzrostu wartości LAI, który zaczyna się pod koniec fazy strzelania w źdźbło i trwa do fazy zapelniania się kłosów ziarnem (maj-czerwiec), powierzchnia gleby jest przykryta przez rośliny, które osiągają swoją największą biomasę. Górna powierzchnia roślin staje się jednolita, o niewielkiej szorstkości (prawie gładka) mezoskalowej. Wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  są w tym czasie najmniejsze, gdyż padające na powierzchnię roślin promieniowanie mikrofalowe ulega częściowo lustrzanemu odbiciu (nie powraca do odbiornika), a ta część, która wniknie w głąb roślin, podlega silnemu rozpraszaniu i tłumieniu przez tak dużą masę roślinną, w związku z czym również niewiele powraca do odbiornika. Natomiast przy niewielkich wartościach LAI, które występują w początkowych i końcowych fazach rozwojowych zbóż, wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  są

największe. Jest to związane z dużą szorstkością powierzchni roślinnej (fazy początkowe - gleba częściowo przykryta roślinami, nierównomierny rozwój roślin, fazy końcowe - obsychanie roślin, wyłożenia), na którą pada promieniowanie mikrofalowe. Wtedy też tłumienie promieniowania mikrofalowego jest najmniejsze. Im większa jest szorstkość badanej powierzchni tym większy jest współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ .

Zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI a współczynnikiem  $\sigma^\circ$ , jaką otrzymano przy wyeliminowaniu wpływu wilgotności gleby na odbity sygnał radarowy, jest odwrotnie proporcjonalna. W miarę wzrostu wartości LAI wartości  $\sigma^\circ$  maleją, osiągając wartości minimalne przy maksymalnych wartościach wskaźnika LAI. Jest to spowodowane wzrostem tłumienia promieniowania mikrofalowego (powracającego do odbiornika) przez coraz to większą masę roślinną. Potwierdzają to poniższe wykresy (rysunki 9.4.1 i 9.4.2) przedstawiające wpływ wskaźnika LAI na wartości współczynnika  $\sigma^\circ$  przy zachowaniu stałej wilgotności gleby. Wykresy przedstawiają dwa przypadki, pierwszy odzwierciedla wpływ wskaźnika LAI na wartość współczynnika  $\sigma^\circ$  przy stałej wilgotności objętościowej gleby wynoszącej ok. 5% i stałej wilgotności roślin wynoszącej 80-90%, drugi przy stałej wilgotności gleby wynoszącej ok. 15% i stałej wilgotności roślin równej 72-84%. W obu przypadkach zależność jest odwrotnie proporcjonalna – im większe wartości wskaźnika LAI tym mniejsze wartości współczynnika  $\sigma^\circ$ . Wykresy zostały wykonane przy wykorzystaniu pakietu PLOT zawartego w programie komputerowym STATGRAPHIC PLUS. 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 rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ .



Rys.9.4.1. Wpływ wskaźnika LAI na wartość  $\sigma^\circ$  przy zachowaniu stałej wilgotności gleby wynoszącej 5% obj.:1-jęczmień jary (30.06.98), 2-jęczmień jary (10.05.98), 3-jęczmień jary (25.05.97), 4-pszenżyto ozime (25.05.97), 5-pszenżyto ozime (25.05.97).



Rys.9.4.2. Wpływ wskaźnika LAI na wartość  $\sigma^\circ$  przy zachowaniu stałej wilgotności gleby wynoszącej 15% obj.: 1-jęczmień jary (14.06.98), 2-pszenżyto ozime (19.07.98), 3-pszenica ozima (14.06.98), 4-pszenica ozima (30.06.98), 5-pszenżyto ozime (10.05.98).

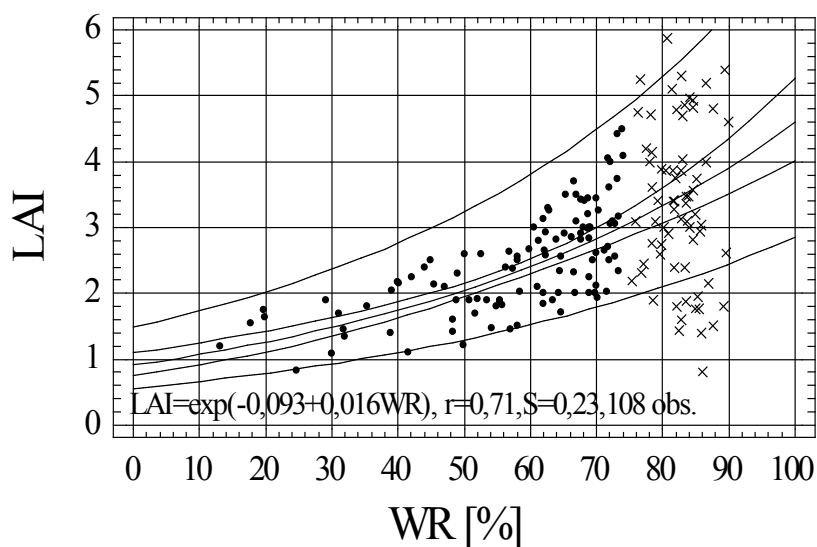
Przy zachowaniu stałej wilgotności gleby i stałej wilgotności roślin na wartość współczynnika  $\sigma^\circ$  wpływa głównie szorstkość badanej powierzchni. Zatem przy zachowaniu wyżej wymienionych warunków zmiana wartości współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  wywołana zmianą wartości wskaźnika LAI świadczy o tym, że wskaźnik ten wyraża szorstkość badanej powierzchni roślinnej. Wyniki te upoważniły mnie do przyjęcia założenia, że wskaźnik LAI odzwierciedla szorstkość badanej powierzchni roślinnej.

## 10. 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 1m<sup>2</sup>, a następnie ważono. W laboratorium określana była sucha masa roślin oraz procentowa zawartość wody w roślinach (różnica pomiędzy biomasa świeżą i suchą).

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. 10.1) przy małych wartościach wskaźnika LAI (średnio 1.6 – tab. 9.2.1). Zawartość wody w roślinach wzrosła już niewiele osiągając wartości 90% w następnej fazie rozwojowej zbóż (1-strzelanie w źdźbło), przy jednoczesnym dużym wzroście wartości LAI. Od fazy kłoszenia (2) do początku fazy zapełniania ziarnem (3) 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 mleczej (4), 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.

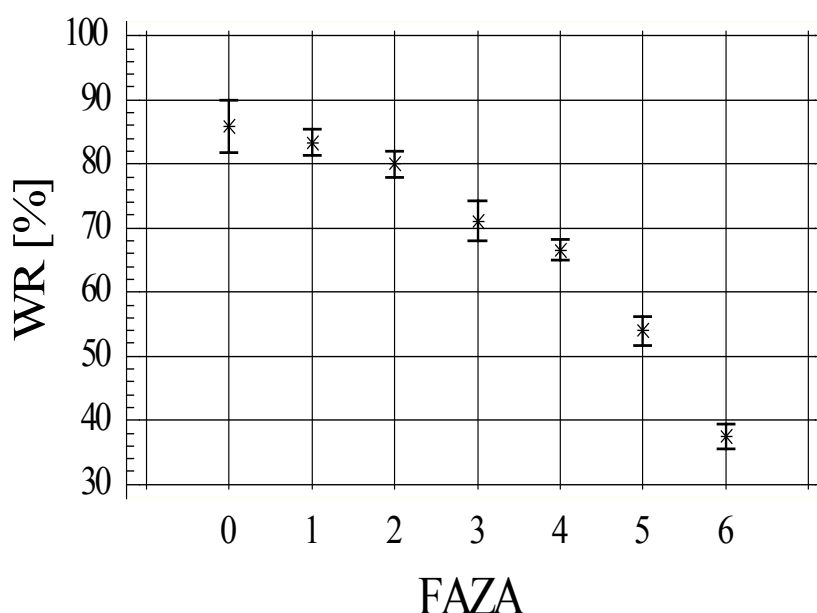
Najsilniejszą zależność pomiędzy wilgotnością roślin a wartościami LAI dla zbóż otrzymano dla wilgotności roślin <75% przy zastosowaniu modelu wykładniczego (na poziomie ufności 99%). Zależność tę przedstawia rysunek 10.1. Potwierdza on podane wyżej obserwacje – silne zróżnicowanie wartości LAI (od 0,8 do 5,88) występowało przy praktycznie stałej wilgotności roślin (ok. 80-90%) co miało miejsce od fazy krzewienia do fazy zapełniania ziarnem. Objawiło się to brakiem korelacji między wskaźnikiem LAI a WR dla wartości wilgotności roślin powyżej 75%.



Rys.10.1. 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 na obszarze badawczym.



Zależność pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  należy zatem zbadać w obrębie stałych warunków szorstkości i wilgotności roślin. Oba warunki mogą być spełnione jednocześnie 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 9.3.2 wyróżniono następujące klasy LAI dla zbóż: < 2, 2-3, > 3. Klasy wilgotności roślin wyróżnione zostały na podstawie podziału na fazy rozwojowe zbóż, gdyż zawartość wody w roślinach jest z nimi związana (tab. 10.1). Rysunek 10.2 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 10.1. Przeprowadzona analiza wariancji pozwoliła na właściwy wybór klas wilgotności roślin. Klasa pierwsza obejmowała fazy od krzewienia do fazy kłoszenia charakteryzujące się dużą wilgotnością roślin tj. >80% średnio (0-2 według oznaczeń z tab. 10.1), klasa druga fazę zapełniania ziarnem i dojrzałości mleczej (3-4) tj. średnio 65%-75%, klasa trzecia fazę dojrzałości woskowej i pełnej tj. średnio <55% (5-6). 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  $\sigma^\circ$ .



Rys.10.2. Wartości średnie procentowej zawartości wody w roślinach (WR) dla zbóż (otrzymane w wyniku pomiarów terenowych przeprowadzonych w latach 1992–1998 na obszarze testowym) wraz z przedziałami ufności wyznaczonymi na poziomie ufności 95% metodą najmniejszej istotnej różnicy (LSD). 0-krzewienie, 1-strzelanie w źdźbło, 2-kłoszenie, 3-zapełnianie ziarnem, 4-dojrzałość mleczna, 5-dojrzałość woskowa, 6-dojrzałość pełna.

Tabela 10.1. Wartości procentowej zawartości wody dla zbóż otrzymane w latach 1992 – 1999 na obszarze badawczym.

| 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 |
|                            | Max               | 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,

Max – wartość maksymalna,

0 – krzewienie,

1 – strzelanie w źdźbło,

2 – kłoszenie,

3 – zapełnianie ziarnem,

4 – dojrzałość mleczna,

5 – dojrzałość woskowa,

6 – dojrzałość pełna.

## 11. ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY WSPÓŁCZYNNIKIEM ROZPRASZANIA WSTECZNEGO $\sigma^\circ$ I WILGOTNOŚCIĄ GLEBY POD ZBOŻAMI

### 11.1 Wstęp

Współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ , przy zachowaniu stałych parametrów systemowych (długość generowanej fali, typ polaryzacji, kąt padania wiązki na badany obiekt) zależy głównie od dwóch czynników - szorstkości i wilgotności badanej powierzchni (zależność wprost proporcjonalna), których poszczególny udział w przypadku gleb pokrytych roślinnością jest trudny do określenia. Zatem aby móc jeden z tych czynników obliczać na podstawie wartości  $\sigma^\circ$ , należało wyeliminować lub ograniczyć do minimum wpływ drugiego z nich.

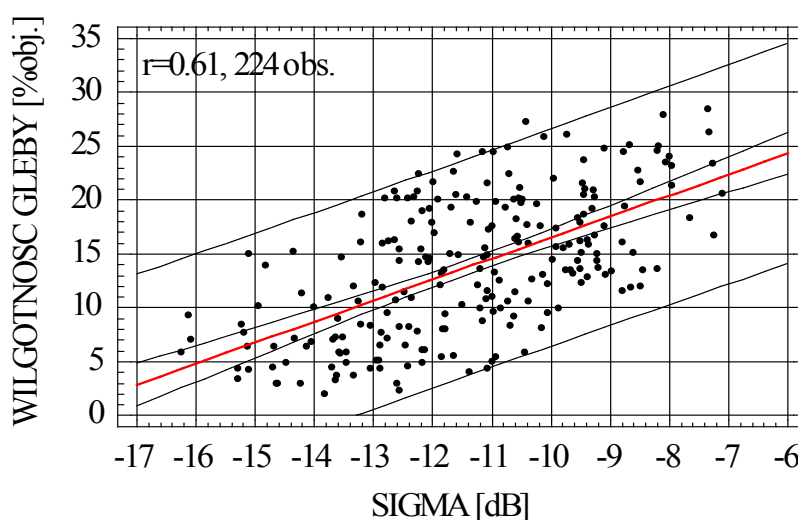
Przeprowadzone badania upoważniają do stwierdzenia, że szorstkość powierzchni roślinnej można wyrazić za pomocą wskaźnika LAI (lub związanej z nim wielkości DIFN), który przybiera charakterystyczne dla danej fazy rozwojowej roślin wartości. Postanowiono zatem zbadać zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby a wartościami współczynnika  $\sigma^\circ$  w poszczególnych klasach szorstkości wyrażonych za pomocą wskaźnika LAI (wybrano trzy klasy: LAI<2, LAI 2-3, LAI>3). Różnice w wartościach współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ , otrzymanych dla powierzchni o jednakowej szorstkości (wyrażonej zbliżonymi wartościami LAI), powinny być wtedy spowodowane głównie różnicami w 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 procentowa zawartość wody w roślinach jest prawie stała, a więc wpływ i tego czynnika na sygnał mikrofalowy będzie w tym okresie wzrostu roślin niewielki. Należy się zatem spodziewać, że po spełnieniu wyżej wymienionych warunków, tj. po wyeliminowaniu wpływu szorstkości i wilgotności roślin na sygnał radarowy (poprzez odpowiednio przeprowadzoną klasyfikację danych dotyczących badanych łąk i łąk), otrzymamy bezpośrednią korelację pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  otrzymywanym ze zdjęć mikrofalowych ERS-2.

### 11.2. Analiza statystyczna danych naziemnych i satelitarnych.

Analizę statystyczną danych naziemnych (wilgotność objętościowa gleby mierzona metodą TDR) i satelitarnych (współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  obliczony ze zdjęć ERS-2.SAR.PRI) otrzymanych w latach 1997-1999 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 (wysoki współczynnik korelacji) wykorzystuje się do przewidywania wartości zmiennej zależnej przy znanych wartościach zmiennej (lub wielu zmiennych – regresja wieloraka) niezależnej (regresja z jedną zmienną niezależną), (Podgórski [1995]).

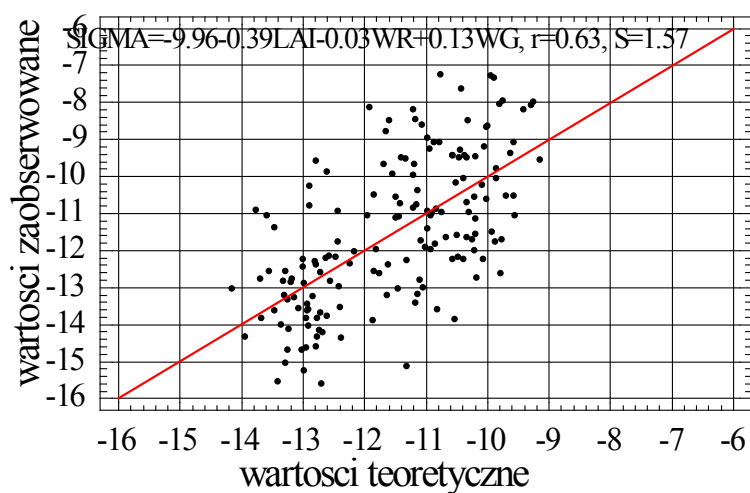
Jak już wspomniano, zależność pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  należy zbadać w obrębie stałych warunków szorstkości i wilgotności roślin. Nie zapewnienie tych warunków daje słabą korelację między wymienionymi wielkościami. Współczynnik korelacji (stopień współzależności badanych wielkości, Podgórski [1995]) otrzymany w wyniku przeprowadzenia analizy regresji z jedną zmienną niezależną (model liniowy) był niski i wyniósł  $r = 0.61$ . Wykres otrzymanej zależności przedstawiony jest na rysunku 11.2.1. Mimo tak słabego związku pomiędzy badanymi wielkościami można jednak zauważyć, że otrzymana tendencja jest zgodna z teorią – im większa wilgotność gleby tym większy współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (rozdział 6.2).



Rys.11.2.1. Zależność pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) bez uwzględnienia szorstkości i wilgotności badanych powierzchni łąnów zbóż.

W celu zbadania współzależności pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  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  $\sigma^\circ$  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 11.2.2. Wykres przedstawia wartości teoretyczne współczynnika  $\sigma^\circ$ , obliczone według zamieszczonego na rysunku równania, względem wartości zaobserwowanych na zdjęciu satelitarnym. W zbudowanym modelu regresji poziomy istotności (maksymalne dopuszczalne prawdopodobieństwo ryzyka popełnienia błędu, że wynik jest dziełem przypadku, przyjmowane zwykle jako 0.05, Łomnicki [1995]) 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  $\sigma^\circ$  (0.01 określa, że dopuszczalna pomyłka może zdarzyć się raz na 100 razy, Łomnicki [1995]). Miarą tego wpływu są wartości poziomów istotności (im większy poziom istotności tym mniejszy

wpływ danej zmiennej niezależnej na zmienną zależną), 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  $\sigma^\circ$  jest istotny i podobny. Dodatnia wartość współczynnika regresji przy zmiennej niezależnej jaką jest wilgotność gleby (WG) świadczy o dodatniej (wprost proporcjonalnej) zależności współczynnika  $\sigma^\circ$  od tej zmiennej, co jest zgodne z teorią (Ulaby [1974]). Natomiast wartość ujemna współczynnika regresji przy pozostałych dwóch zmiennych (LAI i WR) oznacza ujemną zależność (odwrotnie proporcjonalną) współczynnika  $\sigma^\circ$  od wskaźnika LAI i wilgotności roślin (Podgórski [1995]). Zależność odwrotnie proporcjonalna pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  a wskaźnikiem LAI została wykazana w rozdziale 9.4. Im większe są wartości wskaźnika LAI (mniejsza szorstkość badanej powierzchni) tym mniejsza jest wartość współczynnika  $\sigma^\circ$ .

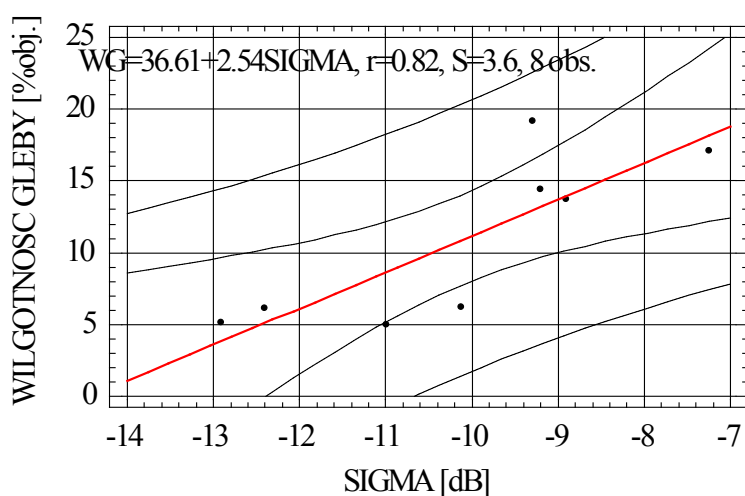


Rys.11.2.2. Zależność wieloraka pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  a trzema zmiennymi niezależnymi: LAI, wilgotnością roślin (WR) i wilgotnością gleby (WG).

Powyższa analiza potwierdza proponowane założenie, że po wyeliminowaniu wpływu szorstkości (reprezentowanej tu poprzez wskaźnik LAI) i wilgotności roślin otrzymamy bezpośrednią korelację pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ . Oba wymienione warunki mogą być 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 10. Klasa pierwsza obejmowała fazy od krzewienia do kłoszenia (0-2 według oznaczeń z tab. 10.1), klasa druga fazę zapełniania ziarnem i dojrzałości mleczej (3-4), klasa trzecia fazę dojrzałości woskowej i pełnej (5-6). Odpowiadające im średnie wartości procentowej zawartości wody w roślinach są następujące: klasa pierwsza >80%, klasa druga 65%-75%, klasa trzecia <55% (tab. 10.1).

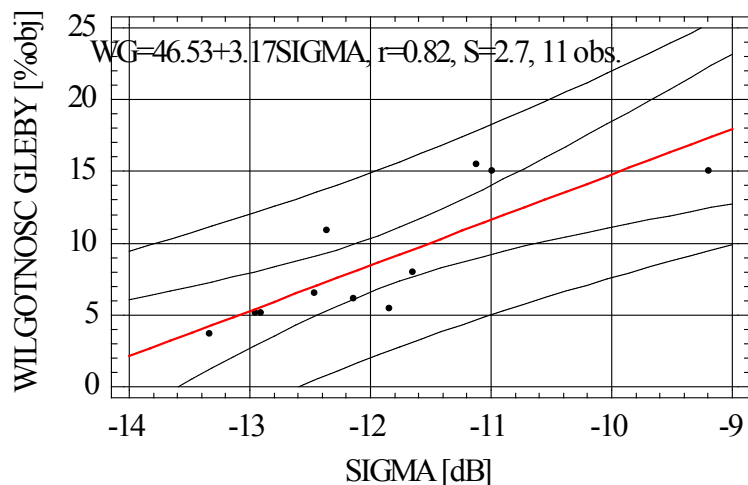
W obrębie każdej klasy wilgotności roślin znajdowały się występujące tu wyróżnione wcześniej klasy wskaźnika LAI. W ramach tak przygotowanego podziału danych postanowiono szukać relacji pomiędzy wilgotnością gleby zmierzoną w terenie metodą TDR (w % obj.) i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (w dB) obliczonym dla bloku pikseli 9x9 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. W pierwszej kolejności rozpatrywano liniowy model regresji ( $Y=a+bx$ ), w następnej modelu nieliniowe. Poniżej przedstawiono wyniki wykonanych analiz statystycznych.

Rysunek 11.2.3 przedstawia zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla klasy pierwszej wilgotności roślin (fazy 0-2) i klasy pierwszej szorstkości (LAI<2). Jak widać z wykresu istnieje silna korelacja ( $r=0.82$ ) pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem  $\sigma^\circ$ . Klasa pierwsza szorstkości (LAI<2) 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 ( $S=3.6$  %obj., poziom ufności 95%). Zastosowanie różnych modeli nieliniowych nie poprawiło stopnia współzależności obu parametrów.



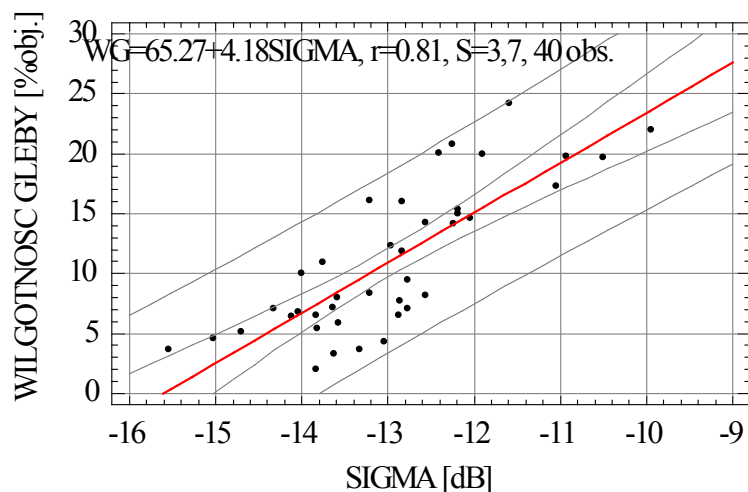
Rys.11.2.3. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 0-2 i wartości LAI <2.

Na rysunku 11.2.4 pokazana jest zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla pierwszej klasy wilgotności roślin (fazy 0-2) i drugiej klasy szorstkości (LAI 2-3). Jak widać na tym rysunku, otrzymano silną zależność pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$ . Współczynnik korelacji wyniósł  $r=0,82$  ( $S=2.7$ , poziom ufności 99%). Spośród modeli nieliniowych podobną zależność otrzymano jedynie po zastosowaniu funkcji o modelu wykładniczym ( $Y=\exp(a+bx)$ ) – współczynnik korelacji wyniósł również  $r=0,82$ ,  $S=0,3$ , poziom ufności 99%). Pozostałe modele nieliniowe (Statgraphic Plus User Manual [1997]) opisywały zależność pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  z mniejszym współczynnikiem korelacji.



Rys.11.2.4. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 0-2 i wartości LAI w przedziale 2-3.

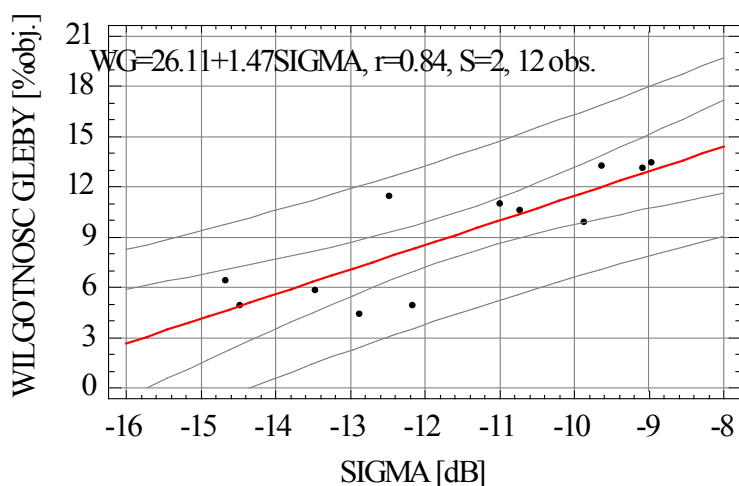
Analogiczne analizy statystyczne służące do zbudowania zależności pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  wykonano dla pozostałych wyznaczonych klas wilgotności i szorstkości łąnów zbóż. Kolejne rysunki od 11.2.5 do 11.2.11 przedstawiają otrzymane wyniki przeprowadzonych analiz regresji z jedną zmienną niezależną (dla funkcji o modelu liniowym).



Rys.11.2.5. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 0-2 i wartości LAI >3.

Na rysunku 11.2.5 (powyżej) 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  $\sigma^\circ$  jest silna ( $r=0.81$ , poziom ufności 99%). Zastosowanie różnych modeli nieliniowych nie wpłynęło na poprawę wyników korelacji. Najsilniejszą korelację otrzymano dla modelu wykładniczego - współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.76$ .

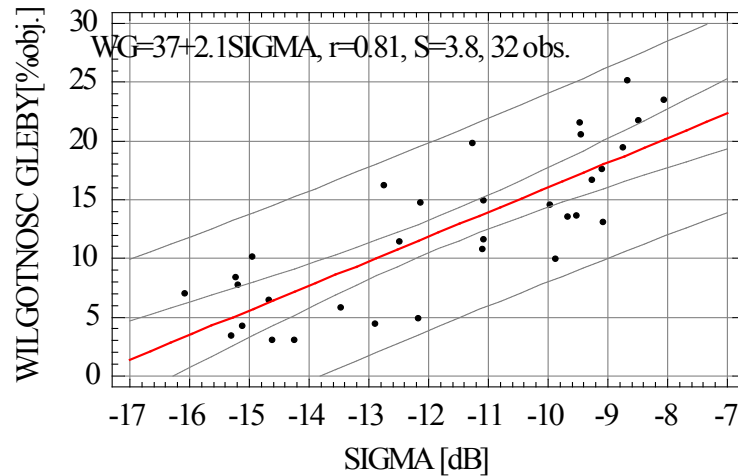
Rysunek 11.2.6 przedstawia zależność o modelu liniowym jaką otrzymano dla drugiej klasy wilgotności roślin (fazy 3-4) i pierwszej klasy szorstkości (LAI <2). Współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.84$  (poziom ufności 99%). W tym przypadku analiza nie obejmuje roku 1999, w którym nie występowały w drugiej klasie wilgotności roślin (fazy 3-4) tak małe wartości wskaźnika LAI dla zbóż (<2). Należy również zwrócić uwagę, że wilgotność gleby zmierzona w terenie, odpowiadająca rozpatrywanym warunkom, nie przekraczała wartości 15% obj., 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. 11.2.6. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 3-4 i wartości LAI <2.

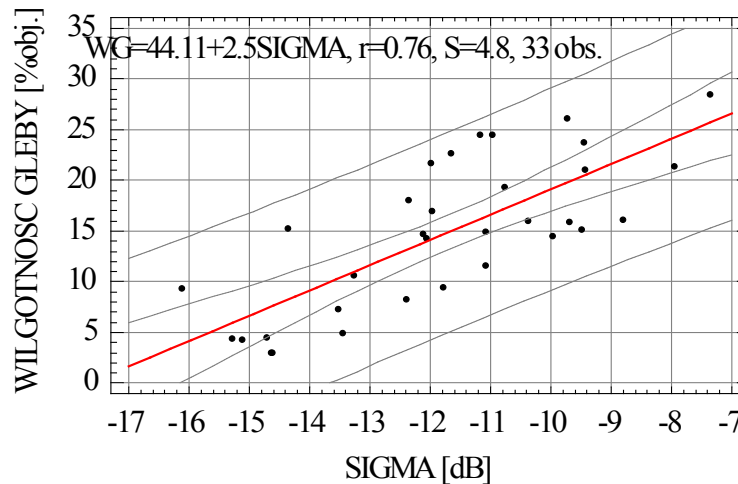
Rysunek 11.2.7 przedstawia zależność o modelu liniowym jaką otrzymano pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  dla drugiej klasy wilgotności roślin (fazy 3-4) i drugiej klasy szorstkości (LAI 2-3). Współczynnik korelacji jest nieco niższy od otrzymanego dla tej samej klasy wilgotności roślin lecz dla mniejszych wartości wskaźnika LAI (<2) i wynosi  $r=0.81$  (poziom ufności 99%). Równanie opisujące wyżej wymienioną zależność obejmuje jednak szersze niż poprzednio (rys. 11.2.7 – WG do 15%) spektrum wartości wilgotności gleby (3-26% obj.). Zastosowanie różnych funkcji nieliniowych nie wpłynęło na poprawę współzależności badanych wielkości w analizowanych warunkach szorstkości i wilgotności łąnów zbóż.





Rys. 11.2.7. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 3-4 i wartości LAI 2-3.

Na rysunku 11.2.8 pokazana jest zależność o modelu liniowym, jaką otrzymano dla drugiej klasy wilgotności roślin (fazy 3-4) i trzeciej klasy szorstkości (LAI >3).

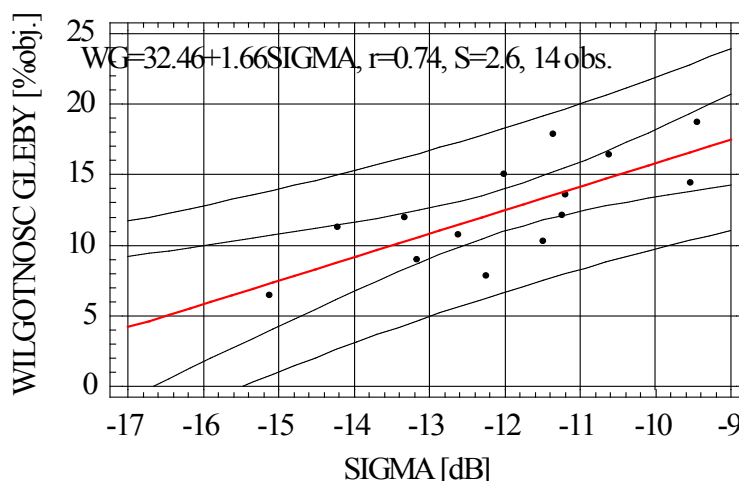


Rys. 11.2.8. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 3-4 i wartości LAI >3.

Jak widać na powyższym rysunku korelacja pomiędzy wilgotnością gleby a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  jest nieco słabsza, współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.76$  (poziom ufności 99%). 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 do pierwszej z

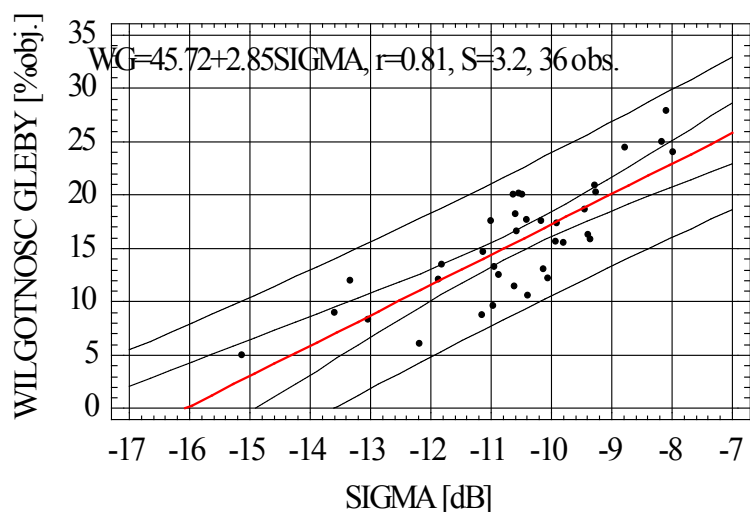
wyróżnionych klas wilgotności roślin. Wpływa to na zwiększoną głębokość penetracji fali radarowej. Przy tak dużych wartościach wskaźnika LAI promieniowanie to ulega również większemu tłumieniu (Attema, [1978]), gdyż dłuższa jest jego droga poprzez masę roślinną. W ten sposób można wytłumaczyć słabszą zależność, jaką otrzymano w rozpatrywanych warunkach szorstkości i wilgotności roślin.

Następne analizy statystyczne wykonano dla trzeciej klasy wilgotności roślin (fazy 5-6). Rysunek 11.2.9 przedstawia zależność o modelu liniowym jaką otrzymano pomiędzy wilgotnością gleby (<20%) a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  dla pierwszej klasy szorstkości (LAI <2). Współczynnik korelacji w tym przypadku był najniższy ze wszystkich rozpatrywanych i wyniósł  $r=0.74$  (poziom ufności 99%). Zastosowanie różnych modeli nieliniowych nie poprawiło stopnia współzależności obu parametrów. W tym wypadku, to jest przy małych wartościach LAI i wyschniętych już roślinach, na sygnał mikrofalowy mogła mieć wpływ również szorstkość prześwietlonej gleby, nie uwzględniona w proponowanym modelu (nie ma możliwości wykonania pomiarów szorstkości gleby porośniętej roślinnością).



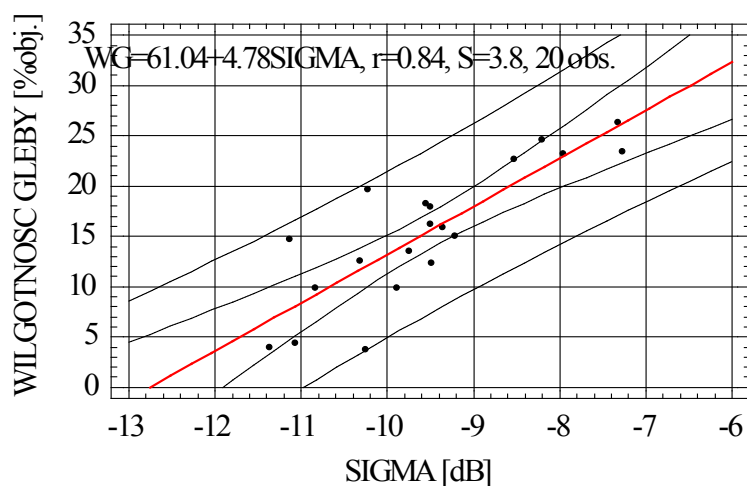
Rys. 11.2.9. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 5-6 i wartości LAI <2.

Na rysunku 11.2.10 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  $\sigma^\circ$  jest dużo silniejsza ( $r=0.81$ , poziom ufności 99%). Można to wytłumaczyć tym, że większe niż w poprzedniej klasie wartości wskaźnika LAI zbóż ograniczyły wpływ szorstkości gleby na sygnał mikrofalowy. Zboża w znajdujące się w fazie dojrzałości woskowej i pełnej są charakteryzują 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, współczynnik korelacji wyniósł  $r=0.82$ .



Rys. 11.2.10. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 5-6 i wartości LAI 2-3.

Rysunek 11.2.11 przedstawia zależność o modelu liniowym pomiędzy wilgotnością gleby pod zbożami a współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  dla trzeciej klasy wilgotności roślin (fazy 5-6) i trzeciej klasy szorstkości (LAI >3).



Rys. 11.2.11. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 5-6 i wartości 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  $r=0.84$  (poziom ufności 99%). 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  $\sigma^\circ$  występuje w tej klasie wilgotności roślin.

Wyniki przeprowadzonych analiz regresji pomiędzy współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  i wilgotnością gleby w warstwie powierzchniowej (0-15 cm) są przedstawione w tabeli 11.2.1. 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  $\sigma^\circ$  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 11.2.1. Wyniki analizy regresji pomiędzy wilgotnością gleby (WG) [%obj.] i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  [dB] dla zbóż.

| KLASY WILGOTNOŚCI ROŚLIN (FAZY)                                   | KLASY SZORSTKOŚCI LAI | r    | S   | O  | RÓWNANIE WG - wilgotność gleby [%obj.] |
|---|-----------------------|------|-----|----|--|
| 0 - 2<br>od fazy krzewienia do fazy strzelania w źdźbło           | <2                    | 0,82 | 3,6 | 8  | $WG = 36,61 + 2,54\sigma^\circ$        |
|   | 2 - 3                 | 0,82 | 2,7 | 11 | $WG = 46,53 + 3,17\sigma^\circ$        |
|   | >3                    | 0,81 | 3,7 | 40 | $WG = 65,27 + 4,18\sigma^\circ$        |
| 3 - 4<br>od fazy zawiązywania ziarna do fazy dojrzałości młecznej | <2                    | 0,84 | 2,0 | 12 | $WG = 26,11 + 1,47\sigma^\circ$        |
|   | 2 - 3                 | 0,81 | 3,8 | 32 | $WG = 37,0 + 2,1\sigma^\circ$          |
|   | >3                    | 0,76 | 4,8 | 33 | $WG = 44,11 + 2,5\sigma^\circ$         |
| 5 - 6<br>od fazy dojrzałości woskowej do fazy dojrzałości pełnej  | <2                    | 0,74 | 2,6 | 14 | $WG = 32,46 + 1,66\sigma^\circ$        |
|   | 2 - 3                 | 0,81 | 3,2 | 36 | $WG = 45,72 + 2,85\sigma^\circ$        |
|   | >3                    | 0,84 | 3,8 | 20 | $WG = 61,04 + 4,48\sigma^\circ$        |

Objaśnienia:

r - współczynnik korelacji,

S - odchylenie standardowe średniej,

O - ilość obserwacji,

$\sigma^\circ$  - współczynnikiem rozpraszania wstecznego [dB].

Jak widać z powyższej tabeli, otrzymane współczynniki korelacji są wysokie. Najniższe otrzymano dla drugiej klasy wilgotności roślin (fazy 3-4) i trzeciej klasy szorstkości powierzchni roślinnej (wskaźnik LAI>3) oraz trzeciej klasy wilgotności roślin (fazy 5-6) i pierwszej klasy szorstkości powierzchni roślinnej (wskaźnik LAI<2). Przyczynę słabszych korelacji dla tych warunków wyjaśniono wyżej. Należy zaznaczyć, że w wymienionych fazach wpływ zawartości wody w glebie na rozwój zbóż nie jest już tak istotny jak w poprzednich fazach. 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 wskutek 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 [1997]). Dla okresu najeięszego zpotrzebowania zbóż na wodę otrzymano zależności o dużych współczynnikach korelacji.

W dalszej kolejności postanowiono sprawdzić z jaką dokładnością można obliczyć wilgotność gleby stosując wyprowadzone algorytmy (o teoretycznej dokładności zbudowanych modeli informuje wartość  $S$  – odchylenie standardowe średniej). W związku z tym, równania podane w tabeli 11.2.1 zostały wykorzystane do obliczenia wartości wilgotności gleby i porównania ich z wartościami zmierzonymi na obszarze badawczym w roku 1999 (wyłączonymi losowo z analiz statystycznych) oraz w roku 1998 i 1999 na polu testowym *Gostyń*, znajdującym się na południe od badanego terenu.

## 12. 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 11.2.1 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 30.06.1998 i 20.07.1999 na polu testowym *Gostyń* znajdującym się na południe od badanego obszaru. W tabeli 12.1 znajdują się dane niezbędne do zastosowania proponowanych modeli dla pól testowych *Gościeszyn* i *Grodzisk Wlk* (faza, LAI,  $\sigma^\circ$ ), wyniki obliczeń, różnice pomiędzy wartościami wilgotności gleby obliczonymi i zmierzonymi w terenie oraz błąd względny w procentach.

W tabeli 12.2 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 12.1. Wyniki dokładności wyprowadzonych algorytmów - pola testowe *Gościeszyn* i *Grodzisk Wlk*.

| DATA   | UPRAWA         | FAZA | WG   | LAI  | SIGMA  | WGI   | A     | %l   |
|--------|----------------|------|------|------|--------|-------|-------|------|
| 110599 | jęczmień jary  | 0    | 17.7 | 2.6  | -9.87  | 15.24 | -2.46 | 13.9 |
| 110599 | pszenica jara  | 0    | 14.3 | 1.6  | -8.96  | 13.85 | -0.45 | 3.1  |
| 300599 | owies jary     | 1    | 12.1 | 5.07 | -12.81 | 11.72 | -0.38 | 3.1  |
| 300599 | pszenica jara  | 1    | 7.3  | 4.7  | -13.75 | 7.80  | 0.50  | 6.8  |
| 300599 | pszenica ozima | 1    | 12.4 | 5.1  | -12.54 | 12,85 | 0.45  | 3.6  |
| 300599 | pszenica ozima | 2    | 15   | 3.1  | -12.19 | 14.32 | -0.68 | 4.6  |
| 300599 | pszenica ozima | 2    | 12.3 | 4.25 | -12.97 | 11.06 | -1.24 | 10.1 |
| 40799  | owies jary     | 3    | 10.2 | 4.03 | -12.8  | 12.11 | 1.91  | 18.7 |
| 150699 | pszenica ozima | 4    | 12.4 | 3.21 | -12.24 | 13.51 | 1.11  | 9    |
| 40799  | pszenica jara  | 4    | 16.3 | 2.9  | -8.34  | 19.49 | 3.19  | 19.5 |
| 40799  | pszenica jara  | 5    | 18.3 | 2.63 | -7.64  | 23.95 | 5.65  | 30.9 |
| 40799  | jęczmień jary  | 5    | 15.1 | 3.07 | -8.61  | 19.88 | 4.78  | 31.7 |
| 40799  | pszenica ozima | 5    | 17.7 | 1.89 | -7.85  | 19.43 | 1.73  | 9.8  |
| 200799 | pszenica ozima | 6    | 15.5 | 2.32 | -9.79  | 17.82 | 2.32  | 15   |
| 200799 | pszenica ozima | 6    | 13.2 | 2.93 | -11.84 | 11.98 | -1.22 | 9.3  |
|        | średnia        |      |      |      |        |       |       | 12   |

Objaśnienia:

WG - wilgotność gleby [%obj.] zmierzona w terenie instrumentem TRIME-FM,  
 LAI - wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści zmierzony w terenie [bezwymiarowe],  
 SIGMA - współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  obliczony ze zdjęć ERS-2.SAR [dB],  
 WGI - wilgotność gleby obliczona według równania z tabeli 11.2.1,  
 A - różnica pomiędzy WGI i WG,  
 %l - błąd względny w procentach  $(A/WG)*100$ .



Tabela 12.2. Wyniki dokładności wyprowadzonych algorytmów - pole testowe *Gostyń*.

| DATA   | UPRAWA          | FAZA | WG   | LAI  | SIGMA  | WGI   | A     | %l   |
|--------|-----------------|------|------|------|--------|-------|-------|------|
| 300698 | owies jary      | 4    | 12.7 | 2.5  | -12.8  | 10.12 | -2.58 | 20.3 |
| 300698 | jęczmień jary   | 4    | 24.2 | 3.2  | -8.33  | 23.29 | -0.91 | 3.8  |
| 300698 | pszenica jara   | 4    | 25.8 | 3.8  | -10.12 | 18.81 | -6.99 | 27.1 |
| 300698 | pszenżyto ozime | 5    | 19.4 | 2.3  | -8.33  | 18.63 | -0.77 | 4    |
| 300698 | pszenżyto ozime | 5    | 20.6 | 2.86 | -7.09  | 20.69 | 0.09  | 0.4  |
| 200799 | pszenica jara   | 5    | 13.6 | 1.69 | -11.19 | 13.88 | 0.28  | 2.1  |
| 300698 | żyto            | 6    | 18.3 | 2.21 | -10.69 | 15.25 | -3.05 | 16.6 |
| 200799 | jęczmień ozimy  | 6    | 17.3 | 2.22 | -10.42 | 16.02 | -1.28 | 7.3  |
| 200799 | pszenica ozima  | 6    | 22.7 | 3.22 | -8.53  | 20.27 | -2.43 | 10.7 |
| 200799 | żyto            | 6    | 26.3 | 3.38 | -7.32  | 26.05 | -0.25 | 1    |
| 200799 | 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],  
 SIGMA - współczynnik rozpraszania wstecznego  $\sigma^\circ$  obliczony ze zdjęć ERS-2.SAR [dB],  
 WGI - wilgotność gleby obliczona według równania z tabeli 11.2.1,  
 A - różnica pomiędzy WGI i WG,  
 %l - błąd względny w procentach  $(A/WG)*100$ .

Jak widać z powyższych tabel, średni błąd obliczeń wykonanych za pomocą równań liniowych wyniósł około 12% dla obszaru badawczego i 8.6% dla pola testowego *Gostyń*. Zbudowane modele w przeważającej części zawyżały wyniki dla obszaru badawczego (różnica A według tab. 12.1 dodatnia) i zaniżały dla pola testowego *Gostyń* (różnica A według tab. 12.2 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%). Wilgotności gleby były wtedy jedne z największych spośród analizowanych. Wymienione wyżej zboża znajdowały się w tej samej fazie rozwojowej (dojrzałość woskowa), charakteryzującej 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  $\sigma^\circ$  (odpowiednie współczynniki korelacji wyniosły 0.84 i 0.81 według tab. 11.2.1). 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 gleby, dla której różnice rzędu 5% obj. nie są aż tak istotne jak w przypadku gleb przesuszonych.

Najmniejsze błędy jakie otrzymano dla obszaru badawczego wystąpiły dla zbóż znajdujących się w pierwszej klasie wilgotności roślin (fazy 0-2) z wyjątkiem jęczmienia jarego. Zboże to znajdowało się w fazie krzewienia, i jak stwierdzono w trakcie badań, powierzchnia łanu charakteryzowała 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, jaki otrzymano 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. 12.2) Największy błąd obliczeń wystąpił dla pszenicy jarej znajdującej się w fazie dojrzałości mleczonej i charakteryzującej dużą wartością wskaźnika LAI. Dla tych warunków wzrostu zbóż otrzymano słabszą niż dla innych korelację pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  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 mleczonej i charakteryzującego 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.

Uważam, że zwiększenie liczby pomiarów może poprawić wyniki otrzymane na podstawie próby statystycznej, którą dysponowano. Należy zatem kontynuować dalsze badania, tym bardziej, że zakres promieniowania mikrofalowego, który wykorzystano w pracy (C, VV), będzie dostępny również w przyszłości z satelity ENVISAT.

### 13. PODSUMOWANIE

W celu realizacji tematu rozprawy doktorskiej wykonane zostały prace terenowe na obszarze badawczym zlokalizowanym w Wielkopolsce. Otrzymane na podstawie badań wyniki upoważniają do stwierdzenia, że wilgotność gleby pod zbożami może być obliczana na podstawie współczynnika rozpraszania wstecznego  $\sigma^{\circ}$  otrzymywanego ze zdjęć mikrofalowych w paśmie C (polaryzacja VV). Takie zdjęcia można otrzymać np. z satelitów ERS czy z przyszłego satelity ENVISAT.

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 ich fazę rozwojową. 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 znaczącym wkładem naukowym w badaniach rolniczych.

W okresie trwania badań tj. w latach 1997-1999, od maja do sierpnia stwierdzono wystąpienie sześciu 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  $\sigma^{\circ}$ . W tabeli 11.2.1 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. Tym samym postawiona w rozprawie teza została udowodniona.

Zastosowanie wyprowadzonych równań wymaga jedynie znajomości fazy rozwojowej zbóż i wartości wskaźnika LAI oraz zdjęcia mikrofalowego zarejestrowanego w paśmie C przy polaryzacji VV. Wartości LAI dla każdej fazy rozwojowej zbóż można określić na podstawie rysunku 9.3.2 lub na podstawie zdjęć satelitarnych wykonywanych w optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego (Dąbrowska-Zielińska [1995]). Faza rozwojowa zbóż jest możliwa do określenia przy znajomości daty rozpoczęcia wegetacji na wiosnę na danym obszarze (dane dostępne z IMGW). Zdjęcia satelitarne mikrofalowe można kupić w Polsce – przedstawicielstwo EURIMAGE, które zajmuje się dystrybucją zdjęć satelitarnych znajduje się w IGIK.

Proponowana metoda oznaczania wilgotności gleby została poddana weryfikacji przeprowadzonej na podstawie losowo wybranych danych uzyskanych na obszarze badawczym w okresie wegetacyjnym 1999 r oraz danych zebranych z innego terenu badawczego w roku 1998 i 1999. Ogólnie można stwierdzić, że otrzymane wyniki są zadawalające jeśli chodzi o badania prowadzone dla dużych powierzchni rolniczych. Średni błąd szacowania wilgotności

gleby pod zbożami na podstawie zdjęć mikrofalowych ERS-2.SAR wyniósł 12% na obszarze badawczym i 8.6% na innym obszarze nie objętym badaniami.

Biorąc pod uwagę koszty (koszt zdjęcia ERS-2.SAR.PRI wynosi około 5.000 zł, koszt pomiaru punktowego około 15 zł za jedną próbę), czas (zdjęcie można otrzymać już po pięciu dniach od daty rejestracji) i zasięg przestrzenny obszaru odwzorowanego na zdjęciu satelitarnym (ERS.SAR – 100x100 km), informacja taka może być wykorzystywana do monitorowania wilgotności gleby pod zbożami i wstępnych szacunków warunków wzrostu roślin oraz w konsekwencji do prognozowania plonów na dużym obszarze. Pokrycie terenu odwzorowanego na zdjęciu satelitarnym pomiarami punktowymi wykonanymi co 100 metrów wyniesie około 15 mln zł, a więc około 3000 razy więcej niż koszt zdjęcia mikrofalowego. Jeśli nawet założyć, że na takim obszarze grunty orne zajmują jedynie 50% powierzchni, to i tak koszt pomiarów punktowych znacznie przekracza koszt zdjęcia satelitarnego i pracy z nim związanej (koszt przetworzenia i koszt obliczeń wynosi w IGiK około 1.500 zł).

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.

Proponowana metoda określania wilgotności gleby pod zbożami w poszczególnych fazach ich rozwoju może być wykorzystana:

- przez jednostki organizacyjne szczebla centralnego zajmujące się produkcją rolną do prognozowania plonów na dużym obszarze w celu podejmowania odpowiednich decyzji gospodarczych, np. określania wielkości eksportu lub importu poszczególnych gatunków zbóż,
- przy podejmowaniu przez odpowiednie jednostki gospodarcze decyzji dotyczących gospodarowania zasobami wodnymi na danym obszarze,
- przez placówki naukowo-badawcze z dziedziny rolnictwa w pracach badawczych nad zwiększeniem produktywności poszczególnych gatunków zbóż,
- w niektórych placówkach naukowo-badawczych dla celów dydaktycznych.

#### 14. SPIS LITERATURY

- Attema E. P. W., Ulaby F. T., *Vegetation modeled as a water cloud*, Radio Science, Vol. 13, No 2, s. 357-364, 1978.
- Baronti S., Del Frate F., Ferrazzoli P., Paloscia S., Pampaloni P., Schiavon G., *SAR polarimetric features of agricultural areas*, Int. J. Remote Sensing, vol. 16, no. 14, s. 2639-2656, 1995.
- Beaudoin A., Le Toan T., Gwyn Q. H. J., *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, 1990.
- Benallegue M., Taconet O., Vidal-Madjar D., Normand M., *The use of radar backscattering signals for measuring soil moisture and surface roughness*, Remote Sens. Environ., no. 53, s. 61-68, 1995.
- Blanchard B. J., Chang A. T. C., *Estimation of soil moisture from SEASAT SAR data*, Water Resources Bulletin, vol. 19, No. 5, 1983.
- Brisco B., Pultz T. J., Brown R. J., Topp G. C., Hares M. A., Zebchuck W. D., *Soil moisture measurements using portable dielectric probes and time-domain reflectometry*, Water Resource Research, Vol. 28, s. 1339-1346, 1992.
- Byrne G. F., Dąbrowska-Zielińska K., Goodrick G. N., *Use of visible and thermal satellite data to monitor an intermittently flooding marshland*. „Remote Sens. Environ.” 11, s. 393-399, 1981.
- Cihlar J., Ulaby F. T., *Dielectric properties of soils as a function of moisture content*, CRES Technical Report 177-47, Kansas, 1974.
- Chanzy A., *Basic soil surface characteristics derived from active microwave remote sensing*, Remote Sensing Reviews, vol. 7, s. 303-319, 1993.
- Chuah H., T., *A study of backscattering mechanisms from a vegetative medium*, Remote Sensing Reviews, vol. 10, s. 217-244, 1994.
- Ciołkosz A., Miszański J., Olędzki J. R., *Interpretacja zdjęć lotniczych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1999.
- Ciołkosz A., Dąbrowska-Zielińska K., Stankiewicz K., Gruszczyńska M., Zawila Niedźwiecki T., *Opracowanie metody interpretacji mikrofalowych zdjęć satelitarnych*, Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego Nr 2 2150 92 03p/21, Warszawa, 1994.
- Cravey R. L., Jackson T. J., Hsu A. Y., *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, 1998.

Czarnowski M.S., *Zarys ekologii roślin lądowych*. PWN, Warszawa, 1989.

Dallemand J. F., Lichtenegger J., Raney R. K., Schumann R., *Radar imagery: Theory and interpretation*, Lecture notes, FAO, Rome, 1993

Dawson M. S., Fung A. K., Manry M.T., *Tools for soil moisture retrieval from radar measurements*, ACTES/Proceedings of the Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, s. 295-305, 1995.

Dąbrowska-Zielińska K., *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, 1995.

Demircan A., Rombach M., Mauser W.: *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, 1992.

Dobson M. C., Ulaby F. T., *Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: Part III-Soil tension*, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-17, 1978.

Dubas A., Gładysiak St., *Szczegółowa uprawa roślin rolniczych*, Wyd. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, 1997.

Dubois P., Van Zyl J., Wood E., Engman T., *An empirical algorithm to measure soil moisture and surface roughness with imaging radars*, ACTES/Proceedings of the Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, s. 317-323, 1995.

Duchossois G., Zobl R., *ERS-2: A Continuation of the ERS-1 Success*, ESA Bulletin No. 83, 1996.

Encyklopedia Fizyki, t.1, PWN, s. 350, 1972.

*ERS-1 A new tool for global environmental monitoring in the 1990's*, ESA BR-36, 1989.

Evans D. L., *Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Current Status and Future Directions*, NASA Technical Memorandum 4679, A Report to the Committee on Earth Sciences, 1995.

Freeman T., *What is Imaging Radar*, JPL Bulletin, CIT, 1996.



French N. H. F., Kasischke E. S., Bourgeau-Chavez L. L., Harrell P. A., *Sensitivity of ERS-1 SAR to variations in soil water in fire-disturbed boreal forest ecosystems*, Int. J. Remote Sensing, vol. 17, no. 15, s. 3037-3053, 1996.

Funding R., Kohler K., Stacheder M., *Measurement of Material and Soil Moisture with the TRIME-Method*, IMKO GmbH, Ettlingen, 1992-1995.

Gruszczyńska M., *Pomiary użytków zielonych systemem LAI i ich zastosowanie*, Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, 3, 1992, s. 114-115.

Gruszczyńska M., Dąbrowska-Zielińska K., Janowska M., Wielogórska A., *Application of ERS-1 SAR data for hydrological studies*, From Optics to Radar, SPOT and ERS Applications, CEPADUES-EDITIONS, France, 1993, s. 365-369.

Gruszczyńska M., *Zastosowanie zdjęć satelitarnych ERS-1 SAR w badaniach rolniczych*, Fotointerpretacja w Geografii. Problemy Telegeoinformacji, 24, Warszawa, 1994, s. 53-57.

Gruszczyńska M., *Zastosowanie zdjęć mikrofalowych z satelitów ERS-1 i ERS-2 do określania wilgotności gleb pod zbożami*, Prace IGiK, 1998a, t. XLV, z. 97, s. 117-136.

Gruszczyńska M., Dąbrowska-Zielińska K., *Application of microwave images from European Remote Sensing Satellites (ERS-1/2) for soil moisture estimates*, Journal of Water and Land Development, No 2, 1998b, s. 7-18.

Gruszczyńska M., *Historia i wykorzystanie zdjęć radarowych*, Fotointerpretacja w Geografii, Nr 29 Problemy Telegeoinformacji, PTG, Warszawa, 1999, s. 23-33.

GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, *Wstępny szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich*, Informacje sygnałne, nr 7/97 Warszawa, 1997a.

GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, *Przedwiniowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich w 1997 r.*, Informacje sygnałne, nr 8/97 Warszawa, 1997b.

GUS, *Wyniki produkcji roślinnej 1997, Powierzchnia, plony i zbiory roślin uprawnych*, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa 1998a.

GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, *Wiosenna ocena stanu upraw rolnych i ogrodnich w połowie maja 1998 r.*, Informacje sygnałne, nr 6/98, Warszawa, 1998b.

GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, *Badanie produkcji roślinnej, Przedwiniowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodnich*, Informacja sygnałna, Warszawa, 1998c.

GUS, *Wyniki produkcji roślinnej w 1998*, Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa, 1999a.

GUS, Departament Rolnictwa i Ochrony Środowiska, *Badanie produkcji roślinnej: Wstępny szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodniczych oraz Przedwinkowy szacunek produkcji głównych ziemiopłodów rolnych i ogrodniczych*, Informacja sygnałna, Warszawa, 1999b.

Hallikainen M. T., Ulaby F. T., Dobson M. C., El-Rayes M. A., Wu L., *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, 1985.

Henderson F.M., Lewis A.J., *Principles and Applications of Imaging Radar*, Manual of Remote Sensing, Third Edition, volume 2, ed. R.A. Ryerson, John Wiley and Sons, New York, 1998.

Holz R. K., *The Surveillant Science: Remote Sensing of the Environment*, John Wiley and Sons, New York, 1982.

Idso S.B., Jackson R.D., *Thermal radiation from the atmosphere*, J. Geophys. Res., 74, s. 5397-5403, 1969.

Institute for Remote Sensing Applications, Annual Report 1994, JRC, EU, Luxembourg, 1995.

Jackson R.D., *Canopy temperature and crop water stress*, Adv. Irrig., 1, s. 43-85, 1983.

Kasischke E. S., Melack J. M., Dobson M. C., *The use of imaging radars for ecological applications-A review*, Remote Sens. Environ., vol. 59, No 2, s. 141-156, 1997.

Kondracki J., *Geografia fizyczna Polski*, PWN, Warszawa, 1978.

Koopmans B. N., *Present and Future Satellite Radar Programs*, Proc. Of the Workshop on Synthetic Aperture Radar Systems and It's Application in Natural Resources, Warsaw, 1993.

Kuźnicki F., Białousz St., Skłodowski P., *Podstawy gleboznawstwa z elementami kartografii i ochrony gleb*, PWN, Warszawa, 1979.

LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, Operating Manual, LI-COR Inc., Lincoln, Nebraska, 1991.

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

Lichtenegger J., *Overview of optical and microwave Remote Sensing*, Proc. Of the Workshop FAO/CEC/Telespazio/ESA, Frascati, 1993.

Lo C. P., *Applied remote sensing*, Longman Inc., New York, 1986.

Łomnicki A., *Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1995.

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

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

Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A., *Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index*, Remote Sens. Environ., 49, s. 246-263, 1994.

Ołędzki J.R., *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, 1993.

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

Portmann F., Mendel H., G., *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, 1997.

Prevot L., Chauki H., Remond A., King C., Wigneron J. P., Chanzy A., Calcagno P., Desprats J. F., *Comparison of ERS and multi-angular RadarSat measurements over agricultural canopies: first results of the Alpillies-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, 1998.

Pulliainen J., Mikkela P., Hallikainen M., Tomppo E., *Combined estimation of forest biomass, soil moisture and forest canopy moisture using ERS-1 SAR data*, ACTES/Proceedings, Toulouse, France, 1995.

*RADARSAT illuminated Your guide to products and services*, RADARSAT International Bulletin, 1995.

Rombach M., Mauser W., *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, 1997.

Roszak Wł., *Ogólna uprawa roli i roślin*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997.

Roth C.H., Malicki M.A., Plagge R., *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, 1992.

Schanda E., *Experience with SEASAT*, Proc. of the EARTHNET/EARSel Workshop, Frascati, Italy, s. 3-9, 1979.

Schmugge T., *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., 1990.

Schreier G., *SAR geocoding: data and systems*, Wichmann, Karlsruhe, 1993.

Simonett D. S., Ulaby F. T., *Manual of Remote Sensing*, The Sheridan Press, Virginia, 1983.

Smith M., Weeks R., Gillespie A., *A strategy to quantify moisture and roughness from SAR images using finite impulse response filters*, ACTES/Proceedings of the Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, s. 417-426, 1995.

Soulis E.D., Rotunno Filho O.C., Kouwen N., Seglenieks F., Pultz T., Crevier Y., *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, 1995.

Stankiewicz K., *Metoda przetwarzania mikrofalowych zdjęć satelitarnych terenów o urozmaiconej rzeźbie z wykorzystaniem numerycznego modelu terenu*, Prace IGiK, tom XLV, zeszyt 97, s. 7-80, Warszawa, 1998.

Statgraphic Plus User Manual, Manugistics Inc., 1997.

Stuttard M., Zmuda A.D., Bird P., Corr D., Blyth K., Rast M., *Soil Moisture Measurement and Retrieval Using Simulated ASAR Imagery-Results of the Thames 1997 Experiment*, Proc. of the Workshop on Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, ESTEC, The Netherlands, s. 445-450, 1998.

Su Z., Troch P. A., De Troch F. P., Nachtergale L., Cosyn B., Lin D. S., *Preliminary analysis results of various remote sensing experiments in the Zwalm catchment*, ACTES/Proceedings of the Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications, Toulouse, France, s. 395-405, 1995.

Ślusarczyk E., *Wpływ wielkości biomasy na pobieranie wody z gleby*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, z. 205, s. 115-126, 1978.

Topp G. C., Davis J. L., Annan A. P., *Electromagnetic determination of soil water content*, Water Resour. Res., 16, s. 574-582, 1980.

Trevett J. W., *Imaging Radar for Resources Surveys*, Chapman and Hall, London, 1986.

Ulaby F.T., *Radar Measurement of Soil Moisture Content*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-22, No. 2, 1974.

- Ulaby F.T., Batlivala P.P., *Optimum radar parameters for mapping soil moisture*, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-14, No. 2, 1976a.
- Ulaby F.T., Batlivala P.P., *Diurnal Variation of Radar Backscatter from Vegetation Canopy*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-24, No. 1, s. 11-17, 1976b.
- Ulaby F. T., Batlivala P. P., Dobson M. C., *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, 1978a.
- Ulaby F. T., Bradley G. A., Dobson M. C., *Microwave dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture:Part II-Vegetation-covered soil*, IEEE Transactions on Geoscience Electronics, vol. GE-17, 1978b.
- Ulaby F. T., *Radar Signatures of Terrain:Useful Monitors of Renewable Resources*, Proc. of the IEEE, vol. 70, No. 12, 1982.
- Ulaby F. T., Moore M. K., Fung A. K., *Microwave Remote Sensing, Active and Passive*, vol. 3, Artech House, Norwood, MA, 1986.
- Ulaby F. T., Sarabandi K., McDonald K., Whitt M., Dobson M. C., *Michigan microwave canopy scattering model*, International Journal of Remote Sensing, Vol. 11, No 7, s. 1223-1253, 1990.
- Ulaby F. T., *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, 1998.
- Van Genderen J. L., *Operationalization of Radar Remote Sensing*, Proc. of the International Symposium, vol. 5, Enschede, 1993.
- Wakabayashi H., Osawa Y., Toda K., Hamazaki T., Kuramasu R., *A SAR system on the ALOS*, Proc. of the XVIII ISPRS Congress, Vienna, 1996.
- Welles J. M., *Some indirect methods of estimating canopy structure*. „Remote Sensing Reviews”, Vol. 5(1), s. 31-43, 1990.
- Werle D., *Radar Remote Sensing, A Training Manual*, Ottawa, 1988.
- Wever T., Henkel J., *Evaluation of the AIRSAR System for soil moisture analysis*, Remote Sens. Environ., No. 53, s.118-122, 1995.
- Winokur R. S., *Operational use of civil space-based Synthetic Aperture Radar (SAR)*, NOAA Document, 1996.

Wooding M. G., Griffiths G. H., Evans R., Bird P., Kenward D., Keyte G. E., *Temporal monitoring of soil moisture using ERS-1 SAR data*, Proc. of First ERS-1 Symposium, s. 641-647, Cannes, France, 1992.

Wooding M. G., Zmuda A. D., Griffiths G. H., *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, 1993.