

MARIA GRUSZCZYŃSKA

**ZASTOSOWANIE ZDJĘĆ MIKROFALOWYCH
Z SATELITÓW ERS-1 I ERS-2
DO OKREŚLANIA WILGOTNOŚCI GLEBY POD ZBOŻAMI**

ZARYS TREŚCI: W artykule przedstawiono metodę określania wilgotności gleb pod zbożami na podstawie zdjęć mikrofalowych otrzymanych z satelitów ERS-1 i ERS-2 w ramach projektów badawczych zleconych przez Europejską Agencję Kosmiczną.

1. WSTĘP

Jednym z podstawowych czynników decydujących o rozwoju roślin uprawnych i ich plonie jest woda. Ilość wody w powierzchniowej warstwie gleby wpływa również na kształt bilansu wodnego i jest istotną informacją stosowaną w wielu badaniach z zakresu hydrologii i klimatologii. Zawartość wody w glebie 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. 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. Regulowanie zapasu wody w glebie w celu zaspokojenia potrzeb roślin jest jednym z głównych zadań wielu zabiegów agrotechnicznych. 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 (orka przedzimowa), ale i w ciągu całego

okresu jego trwania aż do zbiorów. Pomiary wilgotności gleby powinny być zatem prowadzone w sposób dynamiczny. Konieczność przeprowadzenia w stosunkowo krótkim czasie dużej liczby oznaczeń stawia metodom oznaczania wilgotności gleby duże wymagania - muszą one być proste, szybkie i dostatecznie dokładne.

2. METODY OZNACZANIA WILGOTNOŚCI GLEBY

Obecnie stosowane metody oznaczania wilgotności gleby można podzielić na metody bezpośrednie i pośrednie (Roszak [1997]). 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 elektromagnetyczna, 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.

Pracochłonność i kosztowność tradycyjnych metod 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 (Byrne [1981], Idso [1969], Jackson [1982], Moran [1994]). Metody te oparte są na rejestracji promieniowania elektromagnetycznego z pewnej odległości od powierzchni ziemi, np. z pułapu lotniczego lub satelitarnego (Ciołkosz [1978]). Wśród wielu zakresów promieniowania elektromagnetycznego dostępnych do prowadzenia obserwacji powierzchni ziemi z odległości, mikrofałe posiadają największy potencjał do określania wilgotności gleby, ponieważ wnikają w głąb gleby na głębokość zależną od długości fali - im dłuższa fala, tym większa głębokość penetracji (Ulaby [1982]). 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 mikrofal do oceny wilgotności gleby jest ich reakcja 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, która w tym przypadku wynosi około 3,5 (stała dielektryczna wody wynosi około 80). Właściwość ta spowodowała zainteresowanie naukowców badaniami wilgotności gleby za pomocą mikrofal już od momentu udostępnienia techniki radarowej do celów cywilnych (lata sześćdziesiąte naszego stulecia).

3. SZORSTKOŚĆ POWIERZCHNI - WSKAŹNIK LAI

Z wielu dotychczas przeprowadzonych badań wynika, że współczynnik rozpraszania wstecznego (wyrażający natężenie odbitego od badanej powierzchni promieniowania mikrofalowego) otrzymany ze zdjęć radarowych, tzw. σ° , wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności gleby i zależy również od szorstkości badanej powierzchni i od typu pokrywy roślinnej (Ulaby [1974]). Przy określaniu wilgotności badanych powierzchni wpływ szorstkości na wielkość współczynnika σ° można ograniczyć do minimum, wykonując to zadanie dla obszarów o jednokowej szorstkości. W wyniku badań przeprowadzonych na rolniczym obszarze testowym zlokalizowanym w Wielkopolsce (okolice Rakoniewic) okazało się, że szorstkość powierzchni zbóż może być wyrażona poprzez wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści, tzw. LAI (Leaf Area Index).

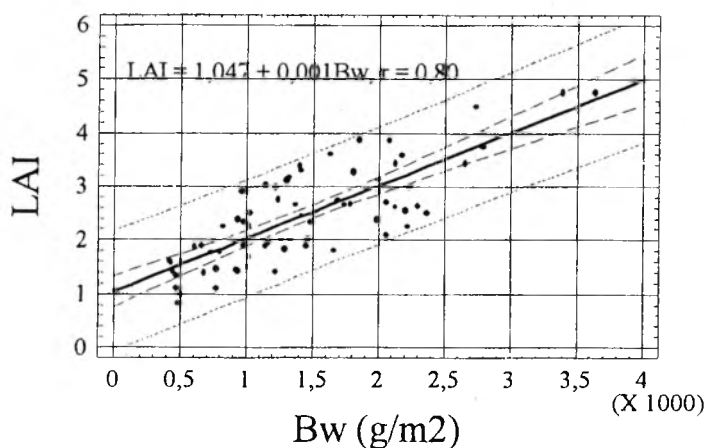
Wskaźnik LAI jest wielkością bezwymiarową, charakteryzującą stosunek powierzchni liści do jednostkowej powierzchni gleby (zwykle jest nią 1 m^2), którą ta roślinność zajmuje. Wskaźnik ten może być również przedstawiany w postaci wymiarowej i wtedy jego jednostką jest m^2/m^2 . Wielkość ta wyraża zarówno gęstość roślin, jak i ich geometrię.

Wskaźnik LAI można mierzyć w następujący sposób: zebraną z powierzchni 1 m^2 masę roślinną dzieli się na części (np. liście czy łodygi o różnych kształtach) 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 LAI. Istnieje również metoda wagowa pomiaru LAI. 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, Fish-eye Photography, CROWNMETER, CEPTOMETER) (Welles [1990]). Jednym z nich jest przyrząd LAI-2000 Plant Canopy Analyzer produkcji amerykań-

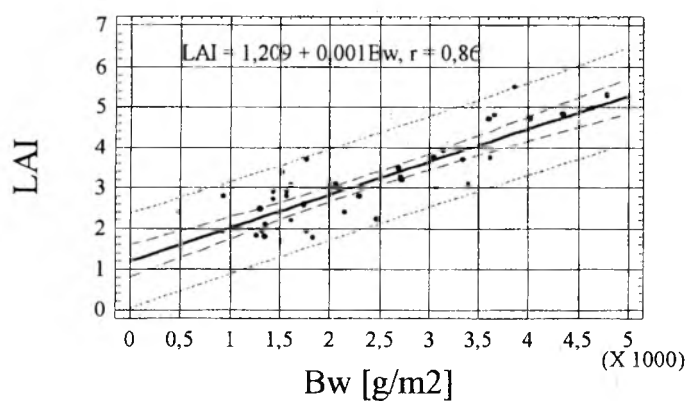
kańskiej firmy LI-COR, który został wykorzystany w prezentowanej pracy. Wartości LAI można również określać na podstawie zdjęć satelitarnych wykonanych w optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego (Dąbrowska-Zielińska [1995]). Odnoszą się one wtedy do powierzchni reprezentowanej przez piksel na zdjęciu satelitarnym.

Instrument LAI-2000 Plant Canopy Analyzer składa się z logera (mikrokomputerowy rejestrator danych) oraz podłączonego do niego czujnika optycznego. Na podstawie pomiarów wykonywanych czujnikiem specjalne oprogramowanie zainstalowane w logerze 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 zasłonięta przez rośliny). Wielkość MTA może teoretycznie przyjmować wartości od 0° (liście ułożone poziomo) do 90° (liście ułożone pionowo). W praktyce waha się od 30° do 60° . Wielkość DIFN waha się od 0 (gleba całkowicie przykryta przez roślinność) do 1 (gleba nie pokryta roślinnością) i w istocie przedstawia strukturę roślinności, gdyż łączy wartości LAI i MTA w jedną wartość.

Pomiary LAI, MTA i DIFN wykonywane były w trakcie przelotu satelitów ERS-1 i ERS-2, od maja do września każdego roku badawczego, w 30 punktach pomiarowych rozmieszczonych na gruntach ornych i użytkach zielonych pola testowego. W tym czasie zboża ozime znajdowały się już w fazie kłoszenia, natomiast zboża jare w fazie krzewienia lub strzelania w źdźbło. W tabeli 1 zamieszczone są wartości LAI, które otrzymano w latach 1992-1997 dla zbóż. Wraz z rozwojem roślin wartości LAI rosną aż do pewnej wartości maksymalnej, różnej w zależności od typu zboża i jego kondycji (gęstości, wysokości itp.). Największe wartości LAI wystąpiły pod koniec fazy kłoszenia (2) i w fazie zapełniania ziarnem (3), kiedy zboża mają największą biomasa. Badania przeprowadzone na polu testowym potwierdziły, że istnieje silna korelacja pomiędzy LAI i biomasa dla zbóż. Zależność ta jest wprost proporcjonalna - im większa biomasa tym większa powierzchnia projekcyjna liści. Rysunki 1 i 2 przedstawiają tę zależność dla zbóż jarych ($r = 0,80$, $S = 0,54$) i ozimych ($r = 0,86$, $S = 0,54$) oddzielnie. Dla zbóż jarych otrzymano słabszą korelację pomiędzy LAI i biomasa niż dla zbóż ozimych. Wynika to z faktu uwzględnienia w przypadku zbóż jarych wcześniejszych faz rozwojowych niż w przypadku zbóż ozimych, to jest fazę krzewienia i strzelania w źdźbło. W tych fazach rozwojowych zbóż wartości LAI słabiej korespondują z biomasa. W obu przypadkach najsilniejszy związek istnieje powyżej wartości biomasy równej 2500 g/m^2 . Dla wszystkich zbóż razem wziętych otrzymano niższą zależność - współczynnik korelacji wyniósł $0,72$, natomiast rozpatrując każdy z badanych rodzajów zbóż oddzielnie otrzymano korelacje najsilniejsze. Wyniki tych korelacji przedstawia tabela 2.



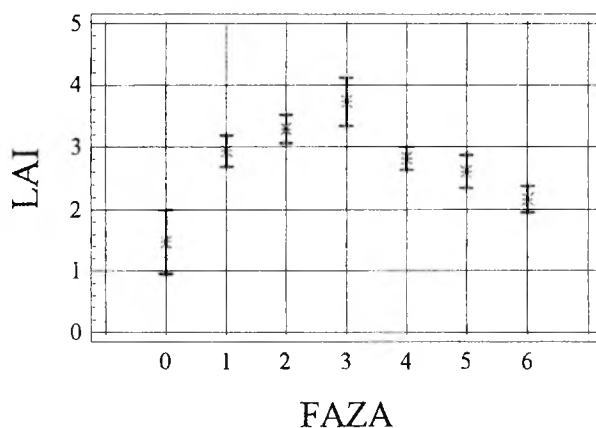
Rys.1. Zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI a biomasą świeżą B_w dla zbóż jarych



Rys.2. Zależność pomiędzy wskaźnikiem LAI a biomasą świeżą B_w dla zbóż ozimych

W tym czasie, gdy wystąpiły największe wartości LAI, średnie wartości DIFN dla wszystkich zbóż były najmniejsze i wynosiły odpowiednio 0,109 i 0,117, co oznacza, że tylko około 11% powierzchni gleby nie było zasłoniętej przez rośliny. Wartości minimalne wyniosły 0,02 w dniu 20.05.1995 r. dla pszenżyta ozimego znajdującego się w fazie kłoszenia i 0,01 w dniu 20.05.1995 r. dla jęczmienia ozimego w fazie zapełniania ziarnem, co oznacza, że praktycznie cała powierzchnia gleby była przykryta przez rośliny, dając w rezultacie rów-

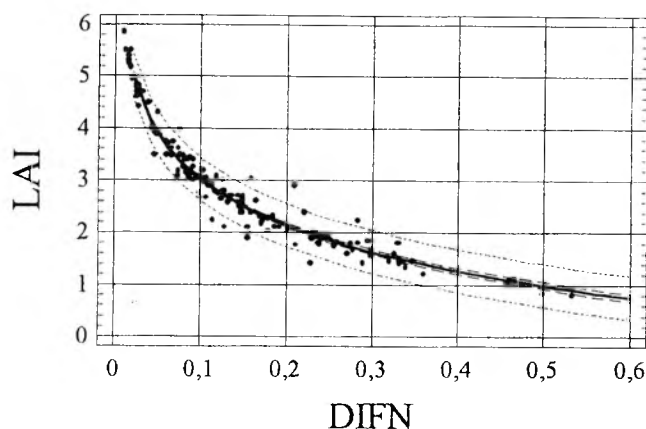
niez największe wartości LAI, równe odpowiednio 4,97 i 5,88. W następnych fazach wartości LAI zbóż zaczynają spadać, co jest związane z obumieraniem liści. W fazie dojrzałości pełnej zarówno liście, jak i źdźbła są już żółte i suche, co ma swoje odzwierciedlenie w małych wartościach LAI. Potwierdza to wykres zamieszczony na rysunku 3 przedstawiający średnie wartości wskaźnika LAI dla zbóż w rozpatrywanych różnych fazach rozwojowych, otrzymane na podstawie pomiarów wykonywanych w latach 1992-1997.



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

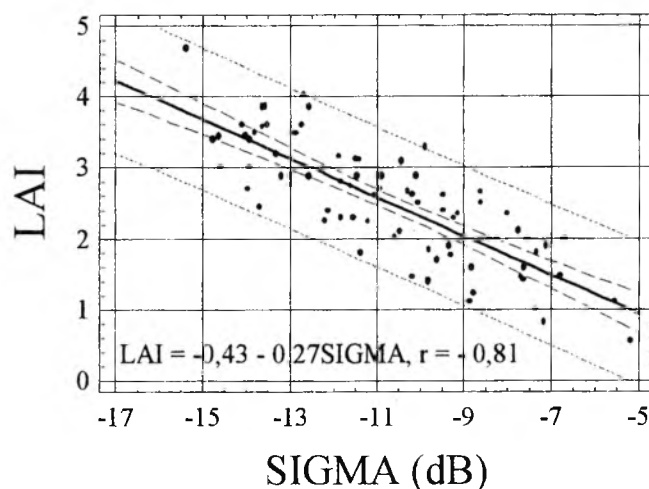
W rozpatrywanym okresie (pierwsze pomiary wykonywane były w maju) najmniejsze wartości LAI wystąpiły w fazie krzewienia (0) oraz pod koniec okresu wegetacyjnego zbóż, w fazie dojrzałości pełnej (6), kiedy rośliny są już żółte i suche. W tym czasie średnie wartości DIFN zbóż były największe i wynosiły odpowiednio 0,335 i 0,242. W pierwszym przypadku 33,5% powierzchni gleby było odsłoniętej, a w drugim 24,2%, stąd małe wartości LAI. Wartości maksymalne DIFN dochodziły do 53% w fazie krzewienia (w dniu 20.05.1995r. dla jęczmienia jarego) i 50% w fazie dojrzałości pełnej (w dniu 1.08.1992 r. dla pszenicy jarej), wtedy też wartości LAI były najmniejsze i wyniosły odpowiednio 0,8 i 0,83. Pomiędzy wartościami LAI i DIFN dla zbóż, począwszy od fazy krzewienia, otrzymano silną zależność logarytmiczną ($r = -0,99$), którą przedstawia rysunek 4 i poniższe równanie:

$$\text{LAI} = 0,102 - 1,27 \cdot \ln(\text{DIFN}) \quad (1)$$



Rys. 4. Zależność pomiędzy wartościami LAI i DIFN dla zbóż począwszy od fazy krzewienia

Z rysunku można odczytać, że LAI rośnie powoli do wartości 2, przy jednoczesnym szybkim spadku DIFN do wartości 0,2, kiedy gleba jest w 80% pokryta przez rośliny. Poniżej wartości DIFN równej 0,1 (gleba w 90% pokryta przez rośliny) LAI rośnie gwałtownie 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 1. Powierzchnia gleby jest wtedy przykryta przez rośliny, które osiągają swoją największą biomasa. Górna powierzchnia roślin staje się jednolita, cechuje się niewielką szorstkością (jest prawie gładka). Wartości współczynnika rozpraszania wstecznego σ° otrzymane ze zdjęć satelitarnych ERS (zakres C) są w tym czasie najmniejsze, gdyż padające na powierzchnię roślin promieniowanie mikrofalowe ulega częściowo lustrzanemu odbiciu (nie powraca do odbiornika), a ta część, która wnika w głąb roślin, podlega silnemu rozproszeniu przez tak dużą masę roślinną (niewiele powraca do odbiornika). Przy niewielkich wartościach LAI, które występują w początkowych i końcowych fazach rozwojowych zbóż, wartości współczynnika rozpraszania wstecznego σ° są największe. Jest to związane z dużą szorstkością powierzchni (fazy początkowe - gleba częściowo przykryta roślinami, nierównomierny rozwój roślin, fazy końcowe - obsychanie roślin, wyłożenia), na którą pada promieniowanie mikrofalowe. Zależność pomiędzy wartościami LAI i wartościami σ° obliczonymi ze zdjęć satelitarnych ERS SAR (European Remote Sensing Satellite Synthetic Aperture Radar), którą otrzymano dla zbóż jarych, przedstawia rys. 5.



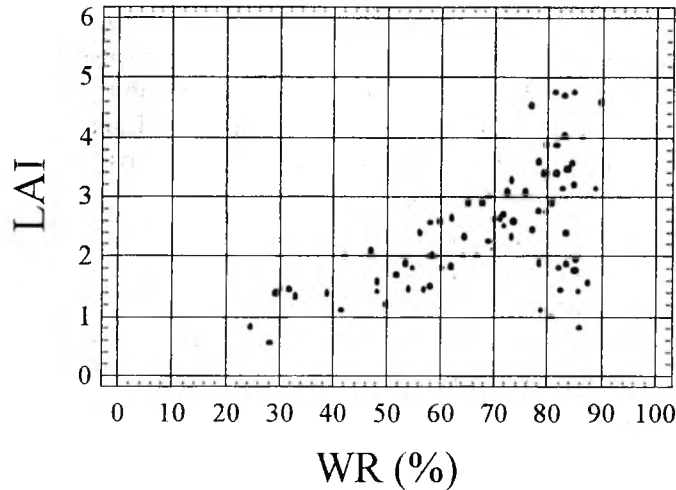
Rys.5. Zależność pomiędzy wartościami LAI i wartościami σ° (SIGMA) dla zbóż jarych

Zależność ta jest odwrotnie proporcjonalna, w miarę wzrostu wartości LAI wartości σ° maleją, osiągając wartości minimalne przy maksymalnych wartościach LAI. Pomiedzy wartościami DIFN i σ° otrzymano nieco słabszą zależność wprost proporcjonalną o współczynniku korelacji $r = 0,76$.

4. WILGOTNOŚĆ ROŚLIN

W czasie przelotów satelitów ERS-1 i ERS-2 nad obszarem badawczym wykonywane były również pomiary biomasy świeżej. Rośliny ścinano z powierzchni 1m^2 , a następnie ważono. W laboratorium określana była procentowa zawartość wody w roślinach oraz sucha masa roślin. W pierwszej zarejestrowanej na zdjęciach satelitarnych fazie rozwojowej (krzewienie) zboża jare miały już dużą wilgotność od 82% do 88% przy małych wartościach LAI (od 0,8 do 1,8 - tab. 1). Zawartość wody w roślinach wzrosła niewiele (do wartości 90%) w następnej fazie (strzelanie w źdźbło), przy jednoczesnym dużym wzroście wartości LAI, po czym zaczęła wolno spadać w fazie kłoszenia do wartości niewiele niższych od tych zaobserwowanych w fazie krzewienia, przy ciągłym jeszcze wzroście LAI. Można zatem przyjąć, że intensywny przyrost LAI odbywał się praktycznie przy stałej zawartości wody w roślinach. Ilość wody w zbożach jarych zaczęła intensywnie spadać dopiero w fazie dojrzałości młeczej, podczas gdy spadek wartości LAI rozpoczął się wcześniej. Zależność pomiędzy wilgotnością roślin a LAI, jaką otrzymano dla zbóż jarych, przedstawia rys. 6.

Potwierdza on podane wyżej obserwacje - zróżnicowanie wartości LAI (od 0,8 do 4,76) przy praktycznie stałej wilgotności roślin (80-90%) od fazy krzewienia do fazy zapełniania ziarnem.



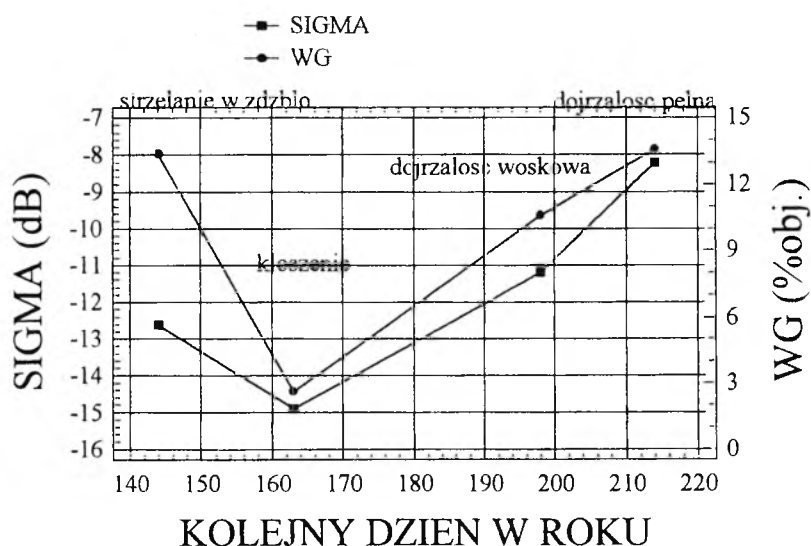
Rys. 6. Wykres wartości zawartości wody w roślinach (WR) względem LAI dla zbóż jarych

5. ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY WILGOTNOŚCIĄ GLEBY A WSPÓLCZYNNIKIEM σ°

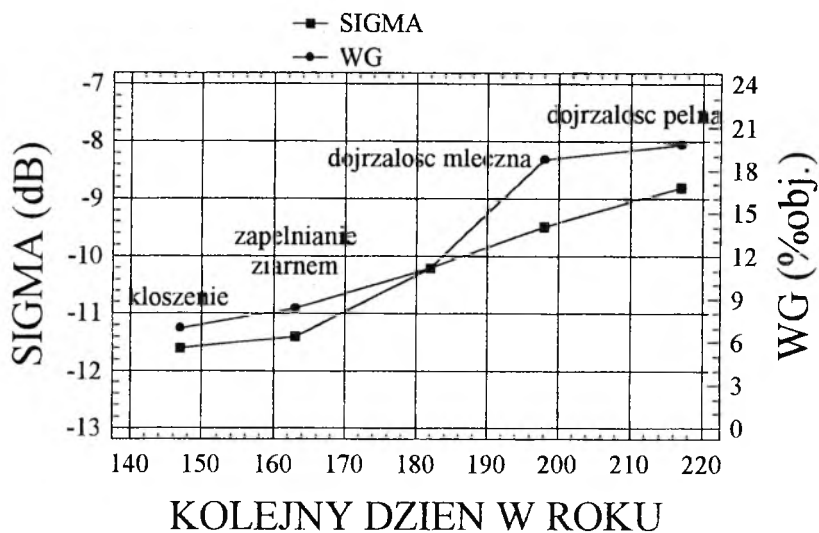
Współczynnik rozpraszania wstecznego σ° zależy głównie od dwóch czynników - szorstkości i wilgotności badanej powierzchni (zależność wprost proporcjonalna), których poszczególny udział w przypadku gleb pokrytych roślinnością jest trudny do określenia. Zatem aby móc jeden z tych czynników obliczać na podstawie wartości σ° , należy 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 gleb a wartościami σ° w poszczególnych klasach szorstkości wyrażonych za pomocą wskaźnika LAI.

Różnice w wartościach współczynnika rozpraszania wstecznego σ° , otrzymanych dla powierzchni o jednakowej szorstkości (wyrażonej zbliżonymi wartościami LAI lub DIFN), powinny być 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 i wpływ tego czynnika na sygnał mikrofalowy będzie w tym okresie wzrostu roślin stały. Należy się zatem spodziewać, że po spełnieniu wyżej wymienionych warunków otrzymamy bezpośrednią korelację pomiędzy wilgotnością gleb pod zbożami i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° . Potwierdzają to wykresy przebiegu w czasie wartości wilgotności gleb (wyrażonych w procentach objętościowych) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° . Przykłady tych wykresów otrzymanych dla pszenicy jarej przedstawione są na rysunkach 7 i 8. Wykresy potwierdzają, że zależność ta jest wprost proporcjonalna - równoczesny spadek (lub wzrost) wartości wilgotności gleb i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° . Z rysunku 7 można również odczytać gwałtowny spadek wilgotności gleb od maja (143 dzień w roku) do czerwca (163), co zostało później odnotowane jako susza, która nawiedziła nie tylko obszar Polski, ale i większą część Europy. Susza ta oraz brak opadów zimowych spowodowały niekorzystne warunki wilgotnościowe we wczesnych fazach sezonu wegetacyjnego 1993 r., co również można zaobserwować na rysunku 8.



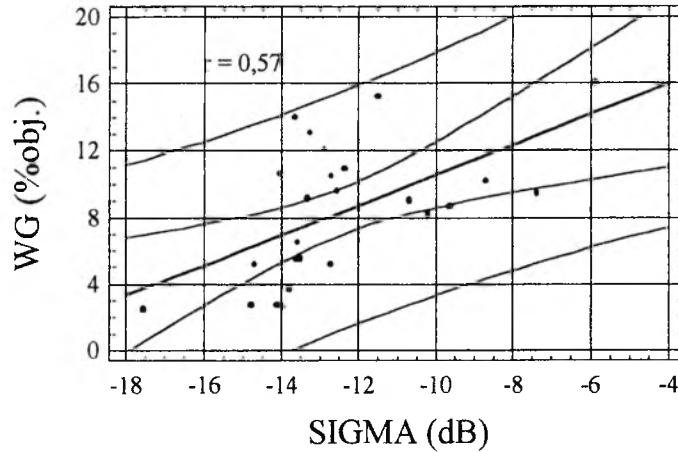
Rys. 7. Przebieg wartości wilgotności gleby (WG) i współczynnika σ° (SIGMA) dla punktu pomiarowego zlokalizowanego na polu obsianym pszenicą jara w 1992 r.



Rys.8. Przebieg wartości wilgotności gleby (WG) i współczynnika σ° (SIGMA) dla punktu pomiarowego zlokalizowanego na polu obsianym pszenicą jarą w 1993 roku.

6. SZACOWANIE WILGOTNOŚCI GLEBY ZE ZDJĘĆ SATELITARNYCH ERS SAR

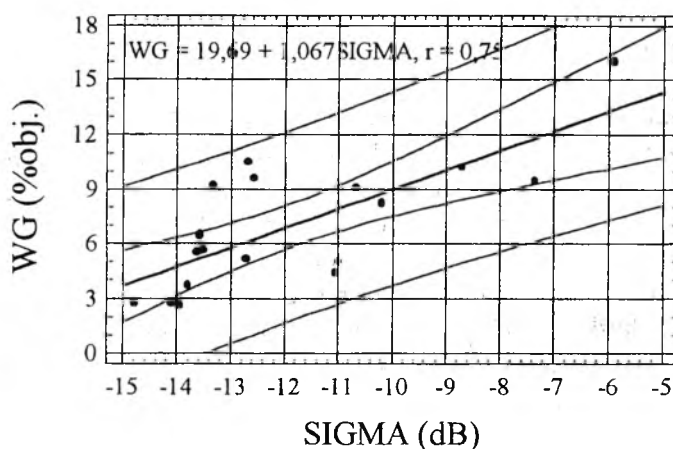
Jak już wspomniano, zależność pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° należy zbadać w obrębie stałych warunków szorstkości i wilgotności roślin. Oba warunki mogą być spełnione jednocześnie poprzez podział badanych zbóż na klasy według wartości LAI i wartości zawartości wody w roślinach. Wyróżniono następujące klasy LAI dla zbóż: 1-2, 2-3, 3-4, 4-6. Klasy wilgotności roślin wyróżnione zostały na podstawie podziału na fazy rozwojowe zbóż, gdyż zawartość wody w roślinach jest z nimi ściśle związana. Klasa pierwsza obejmowała fazy od strzelania w źdźbło do wypełniania ziarnem (1-3 według oznaczeń z tab. 1), klasa druga fazę dojrzałości mlecznej i woskowej (4-5), klasa trzecia fazę dojrzałości pełnej (6). W obrębie każdej klasy wilgotności roślin znajdowały się wyróżnione klasy LAI. W ramach tak przygotowanego podziału danych postanowiono szukać relacji pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° . W pierwszej kolejności postanowiono rozpatrzeć wszystkie zboża razem wzięte, bez podziału na zboża jare i ozime. Wyniki analizy statystycznej, którą przeprowadzono dla jednego z przypadków (fazy 1-3, LAI 3-4) przedstawia wykres na rysunku 9.



Rys.9. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby (WG) i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° (SIGMA) dla faz rozwojowych zbóż 1-3 i wartości LAI 3-4

Jak widać z rysunku 9, otrzymano słabą zależność, współczynnik korelacji w tym przypadku wyniósł 0,57. Jeszcze słabsze korelacje otrzymano dla pozostałych klas LAI. Jest to wynik różnic szorstkości powierzchni roślinnej, które jednak istnieją pomiędzy zbożami jarymi i ozimymi. Postanowiono zatem wykonać dodatkowy podział danych na zboża jare i ozime i całą operację powtórzyć dla każdego zbioru oddzielnie. Zależność otrzymaną dla powyższych warunków pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem σ° dla zbóż jarych przedstawia wykres na rysunku 10. Otrzymano znacznie silniejszą korelację - $r=0,75$.

Wyniki analiz statystycznych, które przeprowadzono dla wszystkich rozpatrywanych klas wilgotności roślin i LAI dla zbóż jarych zamieszczone są w tabeli 3. Najniższe współczynniki korelacji otrzymano dla małych wartości LAI, to jest dla klasy 1-2, najwyższe dla klasy 3-4. W przypadku dużych wartości LAI powierzchnia gleby jest przykryta przez rośliny, które osiągają wtedy największą biomasa (powierzchnia roślin, na którą pada promieniowanie mikrofalowe jest prawie gładka) i mają stałą, również największą zawartość wody. Można zatem uznać, że wpływ szorstkości i wilgotności roślin jest wtedy minimalny, stąd największa korelacja pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° . W klasie wilgotności roślin 4-5 nie wystąpiła wystarczająca liczba wartości LAI od 4 do 5, a w klasie 6 wartości LAI powyżej 3, aby można było przeprowadzić analizę statystyczną. Wartości takie występowały rzadko w tych fazach rozwojowych zbóż jarych na badanym obszarze.



Rys.10. Zależność pomiędzy wartościami wilgotności gleby i współczynnika rozpraszania wstecznego σ° dla faz rozwojowych zbóż jarych 1-3 i LAI 3-4

Podobne badania zależności pomiędzy wartościami wilgotności gleb i wartościami współczynnika rozpraszania wstecznego σ° przeprowadzono dla zbóż ozimych. W tym przypadku pierwszą rozpatrywaną klasą wilgotności roślin była faza 2-3, a więc od kłoszenia do zapelniania ziarnem, następane takie jak w przypadku zbóż jarych. W klasie tej oraz w klasie 6 (faza dojrzałości pełnej) niskie wartości LAI (klasa 1-2) wystąpiły rzadko, w związku z tym brak jest analiz statystycznych dla tych warunków. W tabeli 4 zamieszczono wyniki zależności uzyskanej pomiędzy badanymi parametrami. Dla zbóż ozimych otrzymano wyższe współczynniki korelacji niż dla zbóż jarych, jednak wartości odchyłeń standardowych są w tym przypadku wyższe. Stosując zamieszczone w tabeli 4 wzory dla zbóż ozimych, należy się liczyć z większymi błędami wykonanych na ich podstawie obliczeń wilgotności gleby niż w przypadku zbóż jarych. Jest to spowodowane mniejszą liczebnością danych, które zebrano dla zbóż ozimych - przez ostatnie dwa lata prowadzenia pomiarów (1996 i 1997) większa część powierzchni zbóż ozimych wypadła w wyniku wiosennych przymrozków.

7. PODSUMOWANIE

W wyniku badań przeprowadzonych w latach 1992-1997 na polu testowym zlokalizowanym w Wielkopolsce stwierdzono, że wilgotność gleb pod zbożami może być obliczana na podstawie współczynnika rozpraszania wstecznego σ° otrzymywanego ze zdjęć mikrofalowych w paśmie C, np. z satelitów

ERS czy przyszłego satelity ENVISAT. W tabelach 1 i 2 zamieszczone są równania, które pozwalają na szacowanie wilgotności gleb pod zbożami jarymi i ozimymi z dokładnością równą standardowemu odchyleniu (S). Zastosowanie tych równań wymaga znajomości fazy rozwojowej i wartości LAI, a także typu zboża - jare czy ozime. Podział zbóż na jare i ozime można uzyskać na podstawie klasyfikacji zdjęć satelitarnych wykonywanych w optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego lub na podstawie klasyfikacji wieloterminowych zdjęć mikrofalowych. Wartości LAI dla każdej fazy rozwojowej zbóż można określić na podstawie rysunku 3 lub na podstawie zdjęć satelitarnych wykonywanych w optycznym zakresie promieniowania elektromagnetycznego (Dąbrowska-Zielińska [1995]). Proponowana metoda oznaczania wilgotności gleb wymaga weryfikacji, która będzie przeprowadzona na podstawie danych uzyskanych w okresie wegetacyjnym 1998 r.

Tabela 1. Wartości LAI dla zbóż w latach 1992-1997

LAI		FAZY ROZWOJU ROŚLIN						
		0	1	2	3	4	5	6
ZBOŻA RAZEM	Srednia	1,47	2,94	3,30	3,74	2,82	2,60	2,16
	S	0,41	0,99	0,91	1,34	0,70	0,78	0,64
	Min	0,80	1,20	2,00	2,00	1,60	1,35	0,83
	Max	1,80	4,60	4,97	5,88	4,50	3,90	3,03
ZBOŻA JARE	Srednia	1,47	2,94	3,13	3,39	2,95	2,13	2,06
	S	0,41	0,99	0,69	1,19	0,69	0,76	0,64
	Min	0,80	1,20	2,03	2,62	1,60	1,35	0,83
	Max	1,80	4,60	4,70	4,76	4,50	3,50	3,03
ZBOŻA OZIME	Srednia	-	-	3,52	3,91	2,88	2,92	2,47
	S	-	-	1,13	1,49	0,59	0,64	0,54
	Min	-	-	2,00	2,00	1,82	1,90	1,75
	Max	-	-	4,97	5,88	3,50	3,90	3,00

Objaśnienia:

- Średnia - wartość średnia,
- S - odchylenie standardowe,
- 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,
- brak danych.

Tabela 2. Wyniki korelacji pomiędzy wartościami LAI i biomasy świeżej Bw dla zbóż

RODZAJ ZBOŻA	r	S	RÓWNANIE
JĘCZMIEN JARY	0,92	0,58	$LAI = 0,44 + 0,002Bw$
OWIES JARY	0,91	0,45	$LAI = 0,116 + 0,002Bw$
PSZENICA JARA	0,88	0,45	$LAI = 0,448 + 0,001Bw$
PSZENICA OZIMA	0,96	0,36	$LAI = 0,554 + 0,001Bw$
PSZENŻYTO JARE	0,85	0,43	$LAI = 1,27 + 0,0008Bw$
PSZENŻYTO OZIME	0,90	0,52	$LAI = 0,81 + 0,0009Bw$
ŻYTO	0,87	0,35	$LAI = 1,97 + 0,0005Bw$

Objaśnienia:

r - współczynnik korelacji,
S - odchylenie standardowe,
Bw - biomasa świeża.

Tabela 3. Wyniki korelacji pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° dla zbóż jarych (1992-1997)

KLASY WILGOTNOŚCI ROŚLIN (FAZY ROZWOJOWE)	KLASY LAI	r	S	RÓWNANIE WG - wilgotność gleby (%obj.)
1 - 3 od fazy strzelania w źdźbło do fazy zawiązywania ziarna	1 - 2	0,59	2,6	$WG = 13,75 + 0,607\sigma^{\circ}$
	2 - 3	0,71	2,7	$WG = 20,69 + 1,145\sigma^{\circ}$
	3 - 4	0,75	2,4	$WG = 19,69 + 1,067\sigma^{\circ}$
	4 - 5	0,74	2,6	$WG = 32,58 + 1,885\sigma^{\circ}$
4 - 5 od fazy dojrzałości młeczonej do fazy dojrzałości woskowej	1 - 2	0,68	3,3	$WG = 24,37 + 1,471\sigma^{\circ}$
	2 - 3	0,75	2,9	$WG = 28,84 + 1,697\sigma^{\circ}$
	3 - 4	0,75	3,6	$WG = 29,11 + 1,611\sigma^{\circ}$
6 faza dojrzałości pełnej	1 - 2	0,69	4,3	$WG = 39,49 + 3,144\sigma^{\circ}$
	2 - 3	0,75	4,1	$WG = 33,89 + 2,052\sigma^{\circ}$

Objaśnienia:

r - współczynnik korelacji,
S - odchylenie standardowe.

Tabela 4. Wyniki korelacji pomiędzy wilgotnością gleby i współczynnikiem rozpraszania wstecznego σ° dla zbóż ozimych (1992-1997)

KLASY WILGOTNOŚCI ROŚLIN (FAZY ROZWOJOWE)	KLASY LAI	r	S	RÓWNANIE WG - wilgotność gleby (%obj.)
2 - 3 od fazy kłoszenia do fazy zapełniania ziarnem	2 - 3	0,74	3,6	WG = 18,30 + 0,95 σ°
	3 - 4	0,87	2,5	WG = 41,35 + 2,30 σ°
	4 - 6	0,81	2,7	WG = 69,98 + 3,79 σ°
4 - 5 od fazy dojrzałości mlecznej do fazy dojrzałości woskowej	1 - 2	0,94	3,5	WG = 45,79 + 3,12 σ°
	2 - 3	0,85	1,4	WG = 15,05 + 0,86 σ°
	3 - 4	0,77	2,8	WG = 38,59 + 3,21 σ°
6 faza dojrzałości pełnej	2 - 3	0,81	4,3	WG = 53,49 + 4,83 σ°
	3 - 4	0,89	1,7	WG = 23,44 + 1,87 σ°

Objaśnienia:

r - współczynnik korelacji,
S - odchylenie standardowe.

LITERATURA

1. Byrne G.F., Dąbrowska-Zielińska K., Goodrick G.N. [1981]: *Use of visible and thermal satellite data to monitor an intermittently flooding marshland*. Remote Sens. Environ. 11, s. 393-399.
2. Ciołkosz A., Miszański J., Ołędzki J.R. [1978]: *Interpretacja zdjęć lotniczych*. Warszawa: PWN.
3. Czarnowski M. S. [1989]: *Zarys ekologii roślin lądowych*. Warszawa: PWN.
4. Dąbrowska-Zielińska K. [1995]: *Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA*. PAN, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Prace Geograficzne Nr 165, Wrocław: Continuo.
5. Dubas A., Gładysiak St. [1997]: *Szczegółowa uprawa roślin rolniczych*. Poznań: Wyd. Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego.

6. Idso S.B., Jackson R.D. [1969]: *Thermal radiation from the atmosphere*. J. Geophys. Res. 74, s. 5397-5403.
7. Jackson R.D. [1983]: *Canopy temperature and crop water stress*. Adv. Irrig. 1, s. 43-85.
8. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, Operating Manual [1991], LI-COR Inc., Nebraska: Lincoln.
9. Moran M.S., Clarke T.R., Inoue Y., Vidal A. [1994]: *Estimating Crop Water Deficit Using the Relation between Surface-Air Temperature and Spectral Vegetation Index*. Remote Sens. Environ., 49, s. 246-263.
10. Roszak Wł. [1997]: *Ogólna uprawa roli i roślin*. Warszawa: PWN.
11. Ulaby F.T. [1974]: *Radar Measurement of Soil Moisture Content*. IEEE Transactions on Antennas and Propagation Vol. AP-22, No. 2.
12. Ulaby F. T. [1982]: *Radar Signatures of Terrain: Useful Monitors of Renewable Resources*. Proc. of the IEEE Vol. 70, No 12, s. 1410-1427.
13. Welles J.M. [1990]: *Some indirect methods of estimating canopy structure*. Remote Sensing Reviews Vol. 5(1), s. 31-43.

Recenzował: prof. dr hab. Andrzej Ciolkosz

MARIA GRUSZCZYŃSKA

APPLICATION OF MICROWAVE IMAGES FROM ERS-1 AND
ERS-2 SATELLITES FOR SOIL MOISTURE ASSESSMENT.
CASE STUDY - CEREALS

S u m m a r y

Soil moisture content is an important parameter influencing vegetation growth and crop yield. It also affects dimension and shape of water balance and is used in irrigation scheduling and other applications in hydrology, agriculture and meteorology. Among numerous methods only remote sensing offers a potential means of determining the spatial distribution of soil moisture over large areas within a short time and a reasonable cost. Among the various electromagnetic bands available for remote sensing observations from satellite platforms, the microwave region offers the greatest potential in terms of penetration through soil for the depth dependent on spectral bands - the longer band the deeper penetration. The basic principle of imaging radars is to emit electromagnetic radiation towards the earth surface and to record the quantity and time delay of energy backscattered. Microwaves can penetrate clouds, which is important for

the regularity of the observation. The main physical factors, which affect radar backscatter response, are surface roughness and dielectric properties of target, which correspond closely with the moisture content. The possibility to determine soil moisture using active microwaves draw the attention of scientists since the radar techniques have been open to civilians. It is obvious from the recent studies that radar backscattering coefficient σ° increases with the increase of soil moisture and surface roughness (Ulaby [1974]). For soil moisture determination from radar measurements the effect of surface roughness should be separated from the effect of moisture (soil and vegetation moisture) of the target. In case of soil covered by crops the vegetation surface roughness was mostly considered as a troublesome factor. It was found that vegetation surface roughness could be expressed by Leaf Area Index (LAI) values. LAI can be measured in ground during field survey or calculated from images obtained in optical bands of the electromagnetic spectrum (Dąbrowska-Zielińska [1995]). In this paper author propose the assessment of soil moisture from ERS SAR data for the stable vegetation surface roughness condition characterised by LAI and for the stable vegetation moisture condition characterised by growing stage of crops. The results obtained from study carried out from 1992 to 1997 for spring and winter cereals are presented in this paper.

МАРИЯ ГРУЩИНЬСКА

**ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ СНИМКОВ СО
СПУТНИКОВ ERS-1 И ERS-2 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЛАЖНОСТИ ПОЧВ ПОД ЗЕРНОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ**

Резюме

Одним из основных факторов, решающих о развитии выращиваемых растений и о их урожае, является вода. Количество воды в поверхностном слое почвы влияет также на вид водного баланса и является существенной информацией, применяемой во многих приложениях из области гидрологии и климатологии. Среди многих методов определения влажности почв (например, сушильный, электромагнитный, TDR, нейронный) только методы дистанционного зондирования разрешают определить пространственный ход этого параметра на произвольно большой территории, в короткое время и за относительно низкую цену. Среди многих диапазонов электромагнитного излучения, доступных для проведения наблюдений поверхности земли с высоты спутника, микроволны имеют наибольший потенциал для определения влажности почв, т.к. проникают

вглубь почвы на глубину зависимую от длины волны, чем длинее волна, тем большая глубина обследования. Кроме того микроволновое излучение проникает через тучи, что особенно важно в случае проведения многократной съёмки в точно определённых сроках вегетационного периода. Однако основной чертой, благодаря которой возможно применение микроволн для оценки влажности почв, является их реакция на величину диэлектрической постоянной почв, которая находится в тесной связи с количеством содержащейся в них воды. Это свойство вызвало заинтересованность учёных изучением влажности почв с помощью микроволн уже с момента предоставления радиолокационной техники для гражданских целей (шестидесятые годы нашего столетия). Из многих проведённых до сих пор исследований вытекает, что коэффициент обратного рассеивания (дисперсии), выражающий интенсивность отражённого от исследуемой поверхности микроволнового излучения, полученный с радиолокационных снимков, так называемый σ^0 , возрастает вместе с ростом влажности почвы и зависит также от шероховатости исследуемой поверхности (Ulaby, 1974). При определении влажности исследуемой поверхности (в случае почв покрытых растительностью это как влажность почвы, так и влажность самих растений) влияние шероховатости на величину коэффициента σ^0 можно ограничить до минимума, исполняя это задание для территорий с постоянной шероховатостью. В результате исследований, проводимых на сельскохозяйственной тестовой территории, расположенной в Великой Польше, оказалось, что шероховатость поверхности зерновых может быть выражена показателем проекционной поверхности листьев, так называемым LAI (Leaf Area Index). Величины LAI можно измерять непосредственно на местности или определять на основе спутниковых снимков, выполненных в оптическом диапазоне электромагнитного излучения (Dąbrowska-Zielińska K. 1995). В представленной статье автор предлагает определять влажность почв в постоянных условиях шероховатости растительной поверхности, выраженной величиной LAI, а также в постоянных условиях влажности растений, выраженной их фазой развития. Результаты, полученные для яровых и озимых культур исследуемых в 1992-1997 годах, представлены в данной статье.

Перевод: Róża Tolstikowa

