

Operacyjne wykorzystanie zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR do oceny warunków rozwoju upraw w Polsce

Operational use of NOAA AVHRR satellite images for crop condition assessment in Poland

Zbigniew BOCHENEK

In 1996 a Crop Condition Assessment System for Poland started to be built at the Polish Remote Sensing and Spatial Information Centre in cooperation with Canada Centre for Remote Sensing. The system is based on 1 KM NOAA AVHRR images, which are collected daily to produce 10-day composite images. The customized software has been prepared for comprehensive processing of raw NOAA AVHRR images, ie. for radiometric, geometric and atmospheric corrections, as well as for cloud thresholding and image compositing. At the same time specialized procedures based on ArcView software have been prepared to produce different outputs from Crop Condition Assessment System, e.g. comparative images, maps, graphs and tables. Historical database consisting of 1 KM Global Land Data collected within International Geosphere Biosphere Pro-

gramme, covering 1992–1996 period, was constructed for Poland's area. In the course of 1997 and 1998 growing seasons two sets of AVHRR NDVI composites were prepared and the reports, which informed about crop growth conditions, were produced for particular administrative units in Poland. NDVI indices were further integrated with crop condition/yield information, obtained through conventional statistical surveys. As a result of regression analyses some relationships between satellite based indices and agricultural parameters characterizing crop status were derived. Outputs from the Polish Crop Condition Assessment System were operationally delivered to the Central Statistical Office, to be further analyzed by decision makers and statistical specialists.

Wprowadzenie

Wiarygodna i szybka informacja o warunkach rozwoju roślin uprawnych w ciągu okresu wegetacyjnego stanowi nieodzowny element prawidłowych działań gospodarczych związanych z produkcją rolną. Z tych względów w wielu krajach są poszukiwane optymalne metody monitorowania stanu roślinności, umożliwiające szybkie otrzymywanie informacji o warunkach rozwoju roślin oraz wnioskowanie o wielkości ich plonów. Metody te bazują na wykorzystywaniu zdjęć satelitarnych o dużej czasowej zdolności rozdzielczej, zezwalających na operacyjne śledzenie dynamiki zmian szaty roślinnej. W niektórych zaawansowanych technologicznie krajach, między innymi w Kanadzie, został utworzony System Oceny Warunków Wzrostu Roślin z wykorzystaniem metod teledetekcji. System kanadyjski jest oparty na wykorzystaniu zdjęć pozyskiwanych z satelitów serii NOAA. Zdjęcia te są rejestrowane za pomocą skanera

AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) w pięciu zakresach spektrum elektromagnetycznego, obejmujących pasmo promieniowania widzialnego, bliskiej podczerwieni oraz podczerwieni termalnej. Rozdzielczość terenowa tych zdjęć w punkcie podsatelitarnym wynosi 1,1 km, zaś szerokość pasa zobrazowania około 2400 km.

W systemie kanadyjskim zdjęcia satelitarne NOAA AVHRR są rejestrowane dwukrotnie w ciągu dnia przez stację odbioru Prince Albert (prowincja Saskatchewan) dla obszaru zachodniej Kanady, stanowiącego główny obszar rolniczy kraju. Następnie surowe dane satelitarne przesyła się do ośrodka przetwarzania zdjęć — *Manitoba Remote Sensing Centre*, gdzie przeprowadza się geometryczną i radiometryczną korekcję obrazów. Wykorzystując specjalistyczne oprogramowanie do przetwarzania obrazów satelitarnych NOAA AVHRR — *Geocomp*, na podstawie skorygowanych zdjęć są wyznaczane znormalizowane wskaźniki zieleni — NDVI oraz są tworzone

kompozycje z siedmiu kolejnych dni okresu wegetacyjnego. Kompozycje te porównuje się z odpowiadającymi im czasowo historycznymi obrazami NOAA w celu utworzenia finalnej informacji o stanie upraw w postaci porównawczych obrazów, map, tabel i wykresów. Ostateczną analizę informacji otrzymanych na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA przeprowadza się w Głównym Urzędzie Statystycznym Kanady (*Statistics Canada, Agriculture Division*). Wnioski z tej analizy są przekazywane zainteresowanym instytucjom związanym z zarządzaniem produkcją rolną, między innymi Ministerstwu Rolnictwa Kanady (Bullock, 1992; Hochheim i in., 1993; Reichert i in., 1991).

W 1996 roku Ośrodek Teledetekcji i Informacji Przestrzennej IGiK podjął wspólny projekt badawczy z Kanadyjskim Centrum Teledetekcji w celu opracowania Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin w Polsce, bazującego na operacyjnym wykorzystaniu zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR. Utworzenie takiego systemu wymagało rozwiązania wielu problemów badawczych, związanych ze zróżnicowaną strukturą przestrzenną i gatunkową obszarów rolniczych w Polsce i różnymi cyklami fenologicznymi roślin uprawnych, jak również rozwiązania problemów techniczno-organizacyjnych łączących się z operacyjnym wykorzystaniem systemu. Poniżej zostały przedstawione poszczególne etapy tworzenia systemu oraz wyniki jego wykorzystania do śledzenia warunków rozwoju upraw na obszarze całej Polski i prognozowania plonów.

Metodyka prac

Budowa Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin na podstawie danych satelitarnych NOAA AVHRR składa się z kilku podstawowych etapów. Należą do nich:

- zorganizowanie stałego, regularnego pozyskiwania zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR w ciągu całego okresu wegetacji roślin;
- opracowanie specjalistycznego oprogramowania służącego do przetwarzania pozyskanych zdjęć satelitarnych;
- zebranie i przetworzenie archiwalnych zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR dla obszaru Polski;
- pozyskanie i przetworzenie danych satelitarnych NOAA AVHRR z okresów wegetacyjnych 1997 i 1998 roku;
- utworzenie bazy danych GIS do wykonywania analiz przestrzennych;
- przygotowanie oprogramowania do tworzenia produktów końcowych Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin.

W celu zapewnienia stałego pozyskiwania zdjęć satelitarnych i ich efektywnego przetwarzania postanowiono zainstalować w Instytucie Geodezji i Kartografii stację odbioru danych z satelitów meteorologicznych. Stacja amerykańskiej firmy Quorum, zainstalowana w lipcu 1996 roku, umożliwia regularny odbiór danych z satelitów serii NOAA w formacie HRPT i ich wstępne przetwarzanie do formatu Level-1b. W okresach wege-

tacyjnych 1996–1998 zarejestrowano około 440 zdjęć z satelitów NOAA.

W kolejnej fazie prac nad budową systemu opracowano specjalistyczne oprogramowanie służące do precyzyjnej, geometrycznej i radiometrycznej korekcji zdjęć NOAA AVHRR oraz do obliczania na podstawie przetworzonych danych wartości znormalizowanego wskaźnika zieleni, który w sposób kompleksowy charakteryzuje stan rozwoju roślin. Oprogramowanie to zostało utworzone na bazie systemu do przetwarzania obrazów kanadyjskiej firmy PCI Inc.

Założeniem Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin jest monitorowanie rozwoju upraw w odstępach dekadowych. W celu określenia dekadowego rozkładu wskaźnika zieleni na obszarze całej Polski opracowano oprogramowanie umożliwiające utworzenie kompozycji z 10 kolejnych obrazów przedstawiających przestrzenne zróżnicowanie wskaźnika. Uzasadnieniem przyjęcia takiego rozwiązania technologicznego był fakt częstego występowania chmur nad obszarem Polski, co powodowało, że fragmenty kraju, bądź jego znaczna część, a niekiedy nawet i całe terytorium było zasłonięte chmurami. W założeniach metody przyjęto, że zmiany roślin spowodowane ich rozwojem w okresie 10 dni są tak małe, że nie wpływają istotnie na zmiany wskaźnika NDVI. Wybierając zatem z poszczególnych zdjęć obszary nie zasłonięte chmurami można utworzyć obraz zbiorczy (kompozycje), którego każdy fragment reprezentuje rzeczywistą powierzchnię terenu. W ten sposób powstawał obraz satelitarny Polski złożony z bezchmurnych fragmentów zdjęć zarejestrowanych przez stację odbiorczą w ciągu każdego 10 dni w okresie wegetacji.

Ze względu na występowanie w niektórych dekadach okresu wegetacyjnego zachmurzenia, na kompozycjach dekadowych opracowano procedury umożliwiające określenie wartości progowych dla chmur. Wartości te służyły do wyeliminowania wpływu zachmurzenia na wartości wskaźników zieleni w dalszych etapach analizy zdjęć satelitarnych.

W kolejnym etapie prac utworzono bazę archiwalnych zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR, stanowiącą nieodzowny element funkcjonowania systemu monitorowania stanu upraw. Wykorzystano w tym celu dwa źródła danych: zbiór obrazów satelitarnych NOAA AVHRR utworzony w ramach Międzynarodowego Programu Biosfery — IGBP oraz zbiór danych satelitarnych zarejestrowanych przez stację odbiorczą NOAA w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Krakowie.

Zbiór obrazów satelitarnych NOAA, utworzony w ramach Międzynarodowego Programu Biosfery IGBP, powstał w wyniku kilkuletniej współpracy 29 stacji odbiorczych, rozmieszczonych na wszystkich kontynentach. W efekcie wspólnych prac w okresie od 1 IV 1992 r. do 30 V 1996 r. zebrano dla obszarów lądowych naszego globu ponad 40 000 obrazów NOAA o rozdzielczości nadiowej 1 km. W ramach programu IGBP opracowano standardy kalibracji, korekcji geometrycznej i radiometrycznej oraz tworzenia 10-dniowych kompozycji znormalizowanego wskaźnika zieleni — NDVI. Opracowane

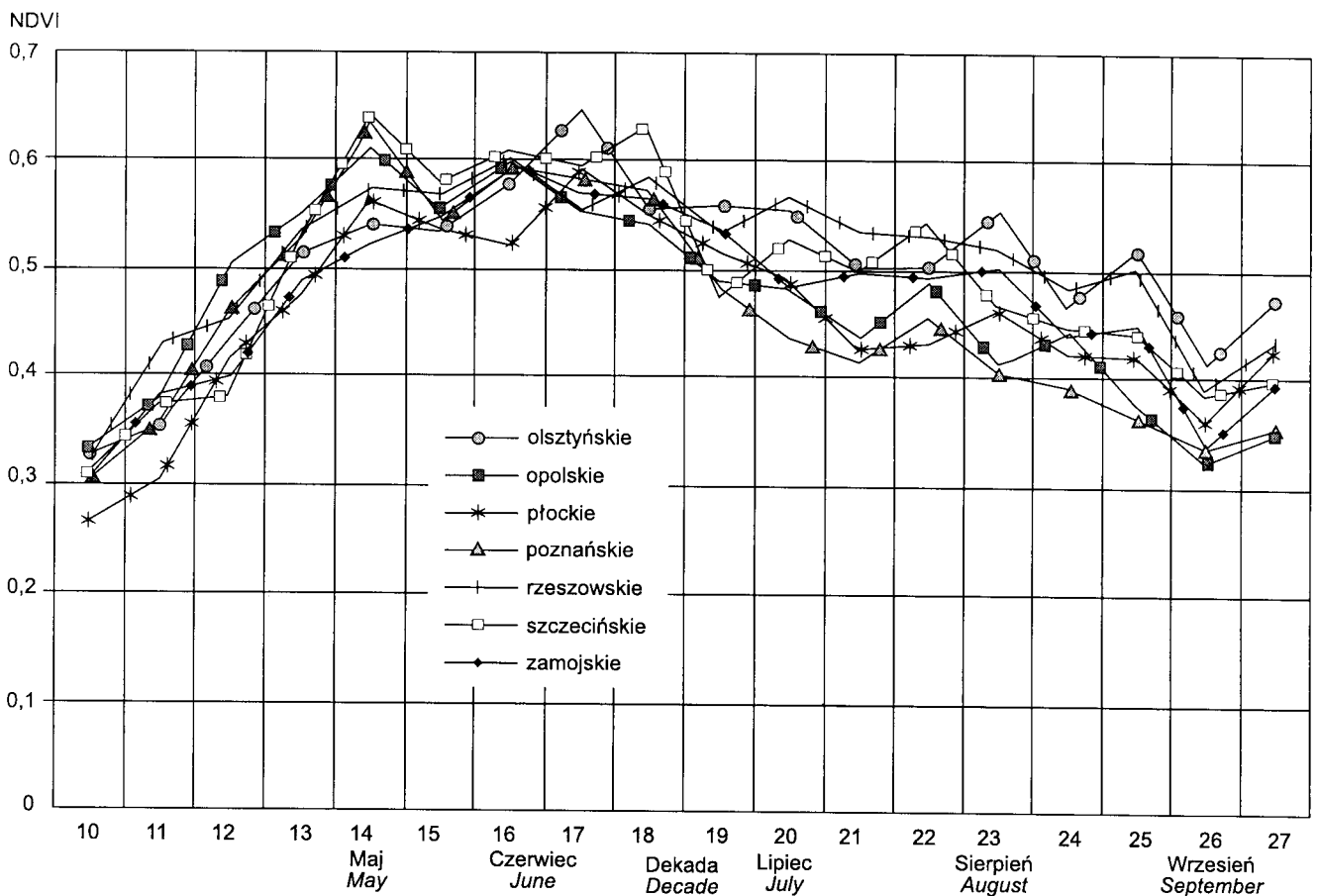
procedury zastosowano w sposób ujednolicony do wszystkich zarejestrowanych zdjęć NOAA. W wyniku przetworzenia tych zdjęć w Ośrodku EROS Data Center w Stanach Zjednoczonych powstała baza danych, zawierająca zestaw zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR o rozdzielczości 1 km, pokrywających obszar lądów całego globu. Baza ta jest ogólnie dostępna poprzez sieć Internetu.

W ramach prac przygotowawczych z serwera Ośrodka EROS Data Center pobrano obrazy satelitarne NOAA pokrywające obszar Polski z okresu 1 IV 1992–30 IX 1995 roku. Obrazy te przetworzono do formatu danych obrazowych stosowanych w Systemie Oceny Warunków Wzrostu Roślin, stosując uprzednio opracowane oprogramowanie. Archiwalną bazę danych rozszerzono o obrazy satelitarne NOAA z okresu wegetacji 1996 roku, pozyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Krakowie. Wszystkie obrazy tworzące historyczną bazę danych NOAA zostały poddane analizie stanu zachmurzenia. Wyznaczone wartości progowe dla chmur zostały wykorzystane w finalnej części Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin.

Kolejnym etapem budowy systemu było pozyskanie i przetworzenie obrazów satelitarnych NOAA AVHRR dla bieżących okresów wegetacji. Za pomocą stacji odbiorczej zainstalowanej w IGiK, w okresie 1 IV–30 IX 1997 roku zarejestrowano 185 obrazów NOAA oraz w analo-

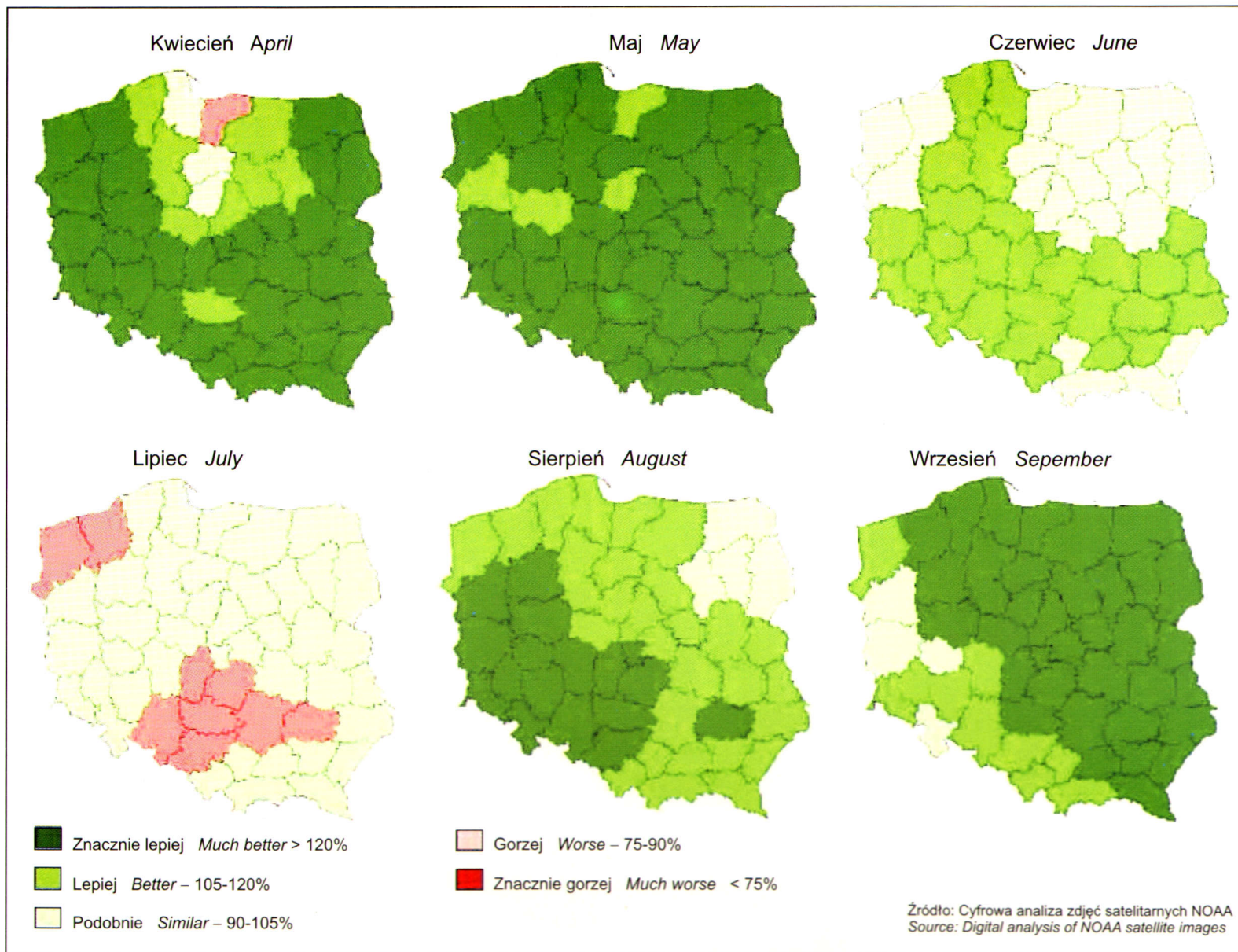
gicznym okresie 1998 roku 190 obrazów. Wszystkie obrazy zostały przetworzone przy użyciu specjalistycznego oprogramowania; w efekcie tych prac utworzono dekadowe kompozycje obrazujące rozkład wskaźnika zieleni na obszarze całej Polski w kolejnych fazach okresu wegetacyjnego. Poszczególne kompozycje przeanalizowano pod względem stanu zachmurzenia. Analiza stanu zachmurzenia wykazała dużą zmienność warunków meteorologicznych, wpływających na jakość przetworzonych obrazów satelitarnych. Aby uniknąć wpływu zachmurzenia na średnie wartości wskaźników NDVI, dla każdej dekady wyznaczono wartości progowe wskaźnika NDVI dla chmur. Wartości te określano dla każdej dekady oddzielnie ze względu na wpływ zróżnicowania pokrywy chmur na wielkość odbicia promieniowania w ciągu okresu wegetacyjnego. Zostały one zastosowane przy tworzeniu końcowych produktów Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin.

Aby przeprowadzać analizy przestrzenne w ramach Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin oraz dostarczać końcowe wyniki tych analiz w postaci porównawczych map i obrazów, należało założyć system informacji geograficznej dla obszaru całej Polski. System ten założono wykorzystując oprogramowanie ArcView GIS 3.0 z modułem Spatial Analyst. Składa się on z następujących warstw informacyjnych.

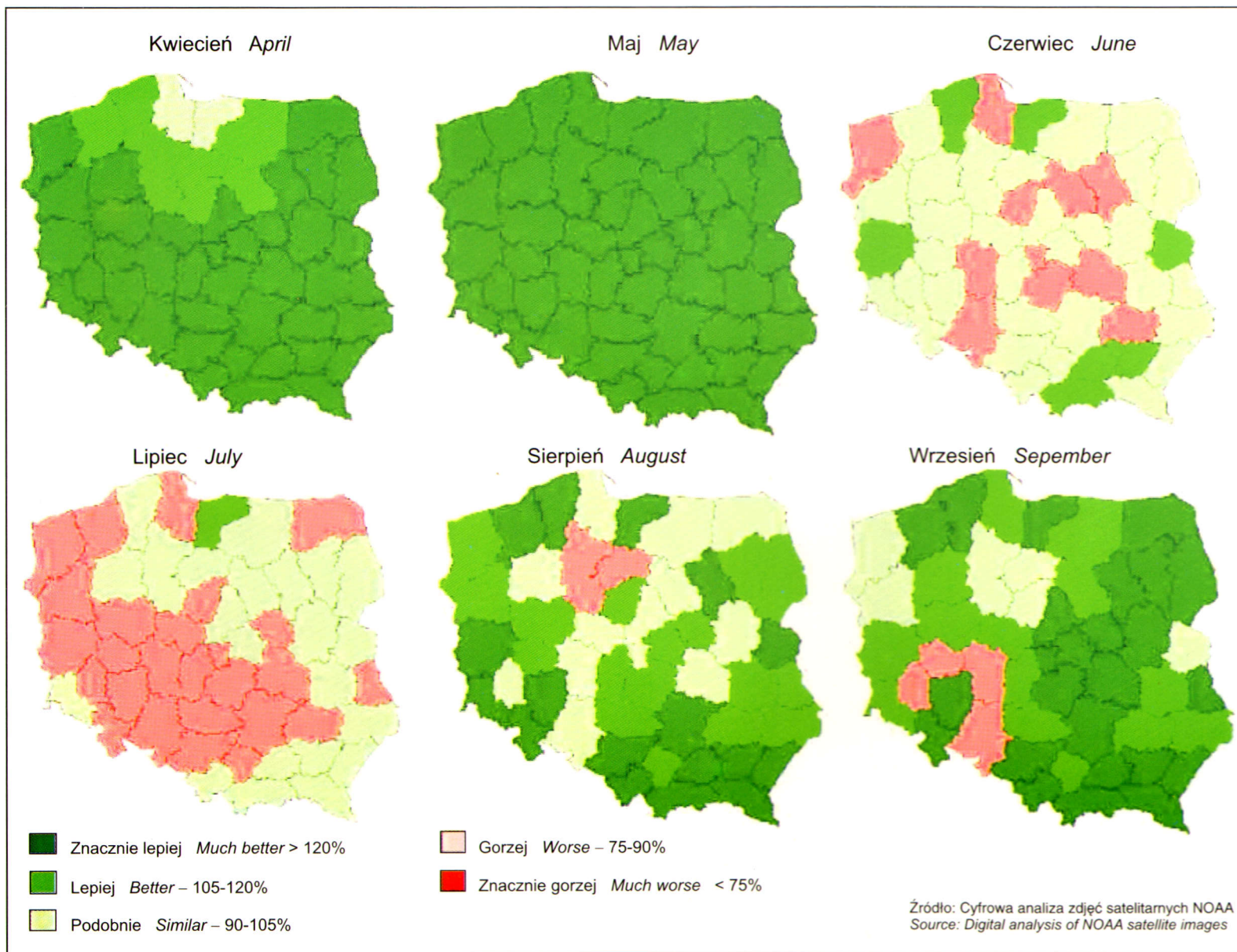


Ryc. 1. Przebieg zmian wskaźnika zieleni NDVI w okresie wegetacyjnym 1998 r.

Fig. 1. Changes of vegetation index NDVI within 1998 vegetation period



Ryc. 2. Zmiany warunków wzrostu roślin w okresie wegetacyjnym 1998 w stosunku do roku średniego
Fig. 2. Changes of crop growth conditions in 1998 vegetation period as compared to normal year



Ryc. 3. Zmiany warunków wzrostu roślin w okresie wegetacyjnym 1998 w stosunku do roku poprzedniego
Fig. 3. Changes of crop growth conditions in 1998 vegetation period as compared to previous year

1. Mapa aktualnego podziału administracyjnego kraju na województwa;
2. Mapa użytkowania ziemi/pokrycia terenu;
3. Przetworzone obrazy satelitarne NOAA NDVI z bieżącego okresu wegetacyjnego;
4. Przetworzone normalne (średnie) obrazy satelitarne NOAA NDVI z lat 1992–1996;
5. Przetworzone obrazy satelitarne NOAA — Kanał 1 z bieżącego okresu wegetacyjnego.

Mapa podziału administracyjnego kraju służy do określania średnich wartości wskaźnika NDVI w granicach poszczególnych województw. Została ona wprowadzona do Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin poprzez digitalizację granic województw za pomocą oprogramowania ArcInfo. Mapa użytkowania ziemi/pokrycia terenu jest niezbędna do wyodrębnienia obszarów rolniczych na obszarze całej Polski spośród innych typów użytkowania ziemi. Na potrzeby Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin wykorzystano mapę pokrycia terenu sporządzoną na podstawie interpretacji zdjęć satelitarnych Landsat TM. Szczegółową legendę tej mapy zagregowano do 5 głównych typów pokrycia terenu, reprezentujących: obszary rolnicze, tereny zabudowane, użytki zielone, obszary leśne i wody.

Zagregowana mapa użytkowania ziemi (pokrycia terenu) posłużyła do sporządzenia w ramach oprogramowania ArcView tematycznej maski obszarów rolniczych oraz masek pozostałych typów pokrycia terenu. Stanowiła ona niezbędny element w procesie tworzenia końcowych produktów Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin.

Wykorzystując mapę podziału administracyjnego kraju, do bazy danych GIS wprowadzono informacje statystyczne związane z rozwojem roślinności i produkcją rolną, a mianowicie:

- statystyczne dane rolnicze o wielkości plonów i produkcji rolnej w granicach poszczególnych województw;
- dane agrometeorologiczne (wielkość opadów, temperatura powietrza);
- dane charakteryzujące jakość rolniczej przestrzeni produkcyjnej (wskaźniki waloryzacji rolnictwa);
- dane charakteryzujące strukturę gatunkową i przestrzenną polskiego rolnictwa.

Zespół tych informacji w połączeniu z informacją dotyczącą rozkładu wskaźnika zieleni NDVI w poszczególnych fazach okresu wegetacji pozwolił na wykonanie analiz korelacyjnych i określenie zależności pomiędzy pozyskiwanymi teledetekcyjnie wskaźnikami a parametrami charakteryzującymi produkcję rolną (Walker, 1988; Wood, 1993; Yang i in., 1997).

Ostatnim etapem budowy Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin było utworzenie finalnych produktów tego systemu. Do wykonania tego zadania wykorzystano specjalistyczny moduł analiz przestrzennych przetworzonych obrazów NOAA NDVI — PCCAP, bazujący na oprogramowaniu ArcView GIS 3.0. Zbiorami wejściowymi do tworzenia finalnych produktów są:

- przetworzone kompozycje NDVI oraz kompozycje w kanale 1 NOAA z kolejnych dekad bieżącego okresu wegetacyjnego;

- średnie obrazy NOAA NDVI utworzone na podstawie danych archiwalnych;
- kompozycje NDVI z kolejnych dekad poprzedniego sezonu wegetacyjnego;
- maska obszarów rolniczych Polski;
- mapa podziału administracyjnego kraju.

Moduł analiz przestrzennych PCCAP wymaga także dostarczenia informacji o wartościach progowych chmur w kanale 1 NOAA oraz dla kompozycji NDVI.

W wyniku realizacji programów zawartych w module PCCAP tworzy się 6 finalnych produktów Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin:

- cztery produkty obrazowe informujące o wielkości wskaźnika NDVI w bieżącej dekadzie w stosunku do wielkości tego wskaźnika w roku średnim, roku poprzednim, w poprzedniej dekadzie oraz w stosunku do najwyższej wartości NDVI w roku średnim;
- dwa produkty w postaci map zagregowanego w granicach województw wskaźnika NDVI w bieżącej dekadzie w relacji do wartości tego wskaźnika w roku średnim i roku poprzednim.

Ponadto, dla każdego województwa są tworzone wykresy przedstawiające przebieg zmian wskaźnika NDVI w bieżącym roku, roku średnim i poprzednim. Informacja liczbowa, będąca podstawą do tworzenia produktów finalnych i wykresów jest zawarta w tabelach.

W wyniku zastosowania wyżej opisanego oprogramowania utworzono zestawy finalnych produktów Systemu Oceny Warunków Wzrostu Roślin dla wszystkich dekad okresów wegetacyjnych 1997 i 1998 roku. Sporządzono także wykresy zmian wskaźnika NDVI w ciągu obu okresów wegetacji w układzie regionalnym. Materiały te łącznie z innymi produktami systemu posłużyły do prześledzenia stanu rozwoju roślin uprawnych w ciągu całego okresu wegetacji.

Analiza stanu rozwoju upraw w okresie wegetacyjnym 1998 r.

Na podstawie wykresów zmian wskaźnika NDVI dla poszczególnych województw w okresie I IV–30 IX 1998 r. przeprowadzono analizę rozwoju upraw na obszarze całej Polski. Z analizy tej wynikają następujące wnioski.

1. W okresie I dekada kwietnia – II dekada maja występował w zasadzie stały wzrost wskaźnika NDVI świadczący o prawidłowym rozwoju roślin uprawnych. Wyjątkiem są niektóre województwa na Mazurach, Śląsku, na Podlasiu i Wyżynie Lubelskiej, wykazujące warunki stresowe rozwoju roślinności w II dekadzie kwietnia.

2. We wszystkich regionach kraju z wyjątkiem obszarów przygranicznych wschodniej Polski wskaźnik NDVI osiągnął maksimum w II dekadzie maja (we wschodniej Polsce w I dekadzie czerwca). Pełny rozwój roślinności nastąpił około 2 tygodnie wcześniej niż w okresie wegetacyjnym 1997 roku.

3. W III dekadzie maja w większości regionów kraju, z wyjątkiem Małopolski i Podlasia — Wyżyny Lubelskiej, zaobserwowano spadek wartości wskaźnika NDVI (największy na Pomorzu, Śląsku i w Wielkopolsce), odzwier-

ciędlący warunki stresowe roślin, po czym w czerwcu nastąpił powrót wskaźnika do wartości zbliżonych do maksymalnych.

4. Wyraźne zmniejszenie wartości wskaźnika we wszystkich regionach kraju nastąpiło w I dekadzie lipca w związku z fazą dojrzałości roślin zbożowych.

5. W drugiej części okresu wegetacji — lipiec–wrzesień — podobnie jak w 1997 roku zaobserwowano fluktuacje wartości wskaźnika NDVI wynikające ze zmian pokrywy roślinnej. Znaczne obniżenie wartości wskaźnika we wszystkich regionach kraju wystąpiło w II dekadzie września.

Przebieg zmian wskaźnika zieleni NDVI w okresie wegetacyjnym 1998 roku dla siedmiu województw, reprezentujących główne regiony fizycznogeograficzne Polski (Pomorze, Mazury, Mazowsze, Wielkopolska, Śląsk, Małopolska, Podlasie i Wyżyna Lubelska) został przedstawiony na ryc. 1.

Podstawowymi finalnymi produktami w Systemie Oceny Warunków Wzrostu Roślin są obrazy, mapy i wykresy porównawcze, informujące o stanie rozwoju roślinności w stosunku do sytuacji w roku średnim i roku poprzednim. Informacja w postaci map porównawczych została przykładowo przedstawiona na rycinach 2 i 3. Dodatkowo sporządzono porównawcze wykresy zmienności wskaźnika zieleni NDVI dla reprezentacyjnych województw siedmiu regionów Polski. Z analizy wyżej wymienionych materiałów wynikają następujące wnioski.

1. Analiza map i wykresów porównawczych stanu rozwoju upraw w 1998 roku w stosunku do roku średniego wykazuje, że w pierwszej fazie okresu wegetacji — kwiecień–maj — w zdecydowanej większości Polski warunki wzrostu roślin były lepsze (lub znacznie lepsze) niż w analogicznym okresie roku średniego. W czerwcu zaobserwowano zbliżone lub lepsze warunki wzrostu roślin niż w roku średnim, przy czym lepsze warunki występowały w północno-zachodniej i południowej Polsce. W pierwszej dekadzie lipca stan rozwoju upraw był na ogół zbliżony do roku średniego, z kilkoma województwami w południowej i północno-zachodniej Polsce wykazującymi gorszy stan niż w roku średnim. W sierpniu w zdecydowanej większości kraju obserwowano lepsze warunki wzrostu roślin niż w roku średnim, z wyjątkiem północno-wschodniej Polski.

2. Z analizy map i wykresów porównawczych stanu rozwoju upraw w 1998 roku w stosunku do roku poprzedniego wynikają następujące wnioski. W początkowej fazie okresu wegetacji — I dekada kwietnia — warunki wzrostu roślin w porównaniu z 1997 rokiem były zróżnicowane, od znacznie lepszych w południowej Polsce do zbliżonych w pasie centralnym i województwach północno-zachodnich. W dalszej części okresu wegetacji — kwiecień–druga dekada maja — zaobserwowano lepszy i znacznie lepszy stan rozwoju roślin niż w 1997 roku. W czerwcu warunki wzrostu roślin były zbliżone do warunków w 1997 roku; w niektórych województwach pasa centralnego zaobserwowano stan gorszy w porównaniu z rokiem poprzednim. W I dekadzie lipca w centralnej i zachodniej Polsce stan rozwoju roślin

w 1998 roku był gorszy niż w roku poprzednim; na pozostałym obszarze występowały warunki podobne do 1997 roku. W III dekadzie lipca warunki wzrostu roślin poprawiły się osiągając we wschodniej Polsce stan lepszy (lub znacznie lepszy) niż w roku poprzednim. W sierpniu zaobserwowano stopniowo pogarszającą się sytuację wzrostu roślin w porównaniu z rokiem 1997; w III dekadzie sierpnia w województwach centralnych i północnych występowały gorsze warunki niż w roku poprzednim.

Analiza zależności pomiędzy wartościami wskaźnika zieleni NDVI a parametrami rolniczymi i meteorologicznymi

Zależności pomiędzy strukturą upraw obszarów rolniczych i wielkością plonów a wartościami wskaźników zieleni NDVI

Finalnym etapem prac było przeprowadzenie analiz korelacyjnych pomiędzy wartościami wskaźnika NDVI a różnymi parametrami określającymi stan rozwoju roślin uprawnych. Celem tych prac było stwierdzenie, czy na podstawie wartości wskaźnika NDVI można określać plon roślin uprawnych.

W celu zrealizowania tego etapu prac zbudowano bazę danych, zawierającą wartości wskaźników NDVI dla poszczególnych województw z lat 1992–1997 oraz odpowiadające im wielkości plonów, pochodzące z Głównego Urzędu Statystycznego. Zgromadzono także dane dotyczące gatunkowej i przestrzennej struktury upraw w granicach poszczególnych województw. W pierwszej fazie przeprowadzono analizy regresji dla kolejnych dekad okresów wegetacyjnych lat 1992–1997, obejmujących fazy rozwojowe roślin zbożowych, tj. od III dekady kwietnia do I dekady lipca. Badano korelacje pomiędzy wartościami wskaźnika NDVI w poszczególnych dekadach a wielkością plonów.

W badaniach zastosowano różnorodne warianty metodyczne, dokonując analizy regresji pomiędzy wartościami wskaźnika NDVI w poszczególnych dekadach a wielkością plonów roślin zbożowych oraz plonów wszystkich głównych roślin uprawnych (przeliczonych na jednostki zbożowe). Stwierdzono, iż nie ma istotnej różnicy pomiędzy współczynnikami korelacji, otrzymanymi w wyniku obu typów analiz. Przeprowadzono także analizę regresji pomiędzy wielkością plonów a tzw. skumulowanymi wskaźnikami zieleni, tzn. ich sumą w określonym przedziale okresu wegetacyjnego. Zastosowanie skumulowanych wskaźników zieleni, w niektórych latach zwiększało wielkość współczynnika korelacji.

Szczegółowa analiza przeprowadzona dla kolejnych lat 1992–1997 wykazała, iż w zależności od sezonu wegetacyjnego zmieniały się zarówno optymalna dekada, jak i siła związku pomiędzy wielkością plonów a wartościami wskaźnika NDVI, mierzona wielkością współczynnika korelacji. Dla lat 1992, 1993 i 1996 stwierdzono słabą zależność pomiędzy badanymi wielkościami — współczynnik korelacji nie przekraczał wartości $R = 0,50$. W 1995 roku najsilniejsza, istotna zależność pomiędzy

wartościami wskaźnika NDVI i wielkością plonów wystąpiła w I dekadzie maja ($R = 0,74$). Zbliżone wartości współczynników korelacji osiągnięto także przy zastosowaniu skumulowanych wskaźników zieleni dla pierwszej fazy okresu wegetacyjnego. W 1997 roku najwyższe współczynniki korelacji otrzymano dla III dekady maja i II dekady czerwca oraz dla skumulowanego wskaźnika zieleni w całym okresie wegetacji roślin zbożowych.

W drugiej fazie tego etapu prac, podjęto próbę przeanalizowania wpływu struktury gatunkowej upraw na zależność pomiędzy wskaźnikami zieleni a wielkością plonów. W tym celu z pełnej liczby województw wybrano 24 województwa, charakteryzujące się wysokim procentowym udziałem roślin zbożowych w strukturze upraw (udział >60% według danych z Rocznika Statystycznego GUS 1997). Następnie przeprowadzono analizę regresji, wykorzystując w niej tylko wybrane województwa. W porównaniu z wynikami osiągniętymi przy użyciu 49 województw osiągnięto znaczące podwyższenie współczynników korelacji, zwłaszcza dla roku 1995 ($R = 0.82$ dla I dekady maja).

Na podstawie skumulowanych danych NDVI z całego okresu wegetacji 1997 roku wyprowadzono równanie regresji, umożliwiające wyznaczenie wielkości plonów zbóż na podstawie wartości wskaźnika NDVI. Ma ono następującą postać:

$$Y = -22,208 + 12,699 \cdot \sum \text{NDVI}$$

gdzie: Y oznacza wielkość plonów zbóż.

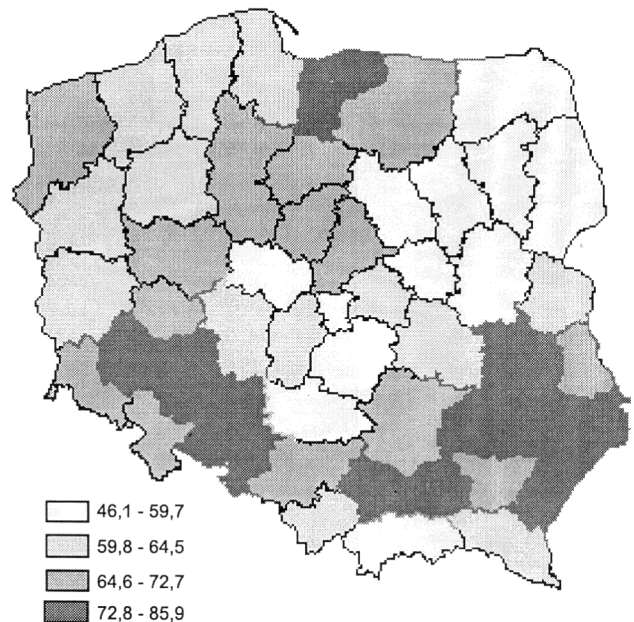
Równanie to wykorzystano do obliczenia wielkości plonów dla wszystkich 49 województw. Następnie sporządzono mapy rozkładu wielkości plonów w Polsce na podstawie danych wyznaczonych metodą teledetekcyjną oraz danych otrzymanych przez GUS metodą tradycyjną.

Z porównania tych map wynika generalnie zbieżność wielkości plonów wyznaczanych metodą teledetekcyjną i tradycyjną. Dotyczy to zwłaszcza województw o najwyższych wielkościach plonów, położonych w zachodniej i północnej Polsce. W przypadku niektórych województw wschodniej i południowej Polski występują większe różnice wielkości plonów. Biorąc pod uwagę względny błąd wyznaczenia plonów metodą teledetekcyjną (średnio 7,5% w 1997 roku) oraz trudny do określenia błąd szacunku plonów GUS-owskich należy uznać wyniki osiągnięte przy wykorzystaniu zdjęć satelitarnych NOAA za zadowalające.

Zależności pomiędzy jakością rolniczej przestrzeni produkcyjnej i wielkością plonów a wartościami wskaźników zieleni NDVI

W tej części pracy postanowiono sprawdzić, czy stratyfikacja obszarów rolniczych przyniesie istotne zwiększenie siły związku pomiędzy wielkością plonów a wartościami wskaźnika NDVI. W tym celu dokonano podziału kraju na cztery kategorie, różniące się jakością

rolniczej przestrzeni produkcyjnej. Podstawą stratyfikacji była wielkość wskaźnika waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej, wyznaczonego dla wszystkich województw na podstawie map bonitacji gleb i warunków agroklimatycznych. W wyniku podziału do pierwszej grupy zaliczono województwa o najniższym wskaźniku waloryzacji, do grup drugiej i trzeciej — województwa o pośrednich wskaźnikach, zaś do grupy czwartej województwa o najwyższym wskaźniku waloryzacji. Przestrzenny rozkład wskaźnika na obszarze Polski został przedstawiony na rycinie 4.



Ryc. 4. Rozkład wskaźnika waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej

Fig. 4. Distribution of valorization index of agricultural land

Następnie przeprowadzono oddzielnie dla każdej grupy województw analizę regresji, w celu określenia zależności pomiędzy wartościami wskaźnika NDVI a wielkością plonów. Analiza ta wykazała, że tylko w przypadku grupy województw o najwyższych wskaźnikach waloryzacji (elbląskie, legnickie, krakowskie, lubelskie, opolskie, przemyskie, tarnobrzeskie, tarnowskie, wrocławskie, zamojskie) osiągnięto istotny związek, mierzony wielkością współczynnika korelacji. Najślabsze zależności występowały dla pierwszej grupy województw, charakteryzującej się najniższymi wskaźnikami waloryzacji (białostockie, częstochowskie, ciechanowskie, łomżyńskie, łódzkie, ostrołęckie, konińskie, piotrkowskie, nowosądeckie, siedleckie, suwalskie, warszawskie).

Na podstawie danych satelitarnych dla grupy województw o najwyższych wskaźnikach waloryzacji, pochodzących z początkowej fazy okresu wegetacyjnego 1997 roku, utworzono równanie regresji, określające związek pomiędzy wskaźnikiem NDVI a wielkością plonów. Następnie zastosowano to równanie do wyznaczenia wielkości plonów na podstawie wartości wskaźnika NDVI i porównano je z wielkościami określonymi przez GUS

metodą tradycyjną. Wyniki tego porównania przedstawia tabela 1.

Błąd względny wyznaczenia wielkości plonów metodą teledetekcyjną dla badanych województw wyniósł średnio 8.4%. Zatem osiągnięto zbliżoną dokładność szacunku plonów do dokładności otrzymanej przy wykorzystaniu równania regresji wyznaczonego na podstawie 24 województw (o najwyższym procentowym udziale roślin zbożowych). Biorąc pod uwagę słabsze zależności pomiędzy wskaźnikiem NDVI a wielkością plonów dla grup województw o niższych wskaźnikach waloryzacji należy stwierdzić, że zastosowanie stratyfikacji obszarów rolniczych nie zwiększa precyzji szacowania wielkości plonów na podstawie wartości wskaźnika NDVI.

Tabela 1.

Porównanie wielkości plonów wyznaczonych metodą tradycyjną i teledetekcyjną
Comparison of yields determined by traditional and remote sensing method

Województwo Voivodship	Plon OPOLIS OPOLIS yield dt/ha	Plon GUS GUS yield dt/ha	Błąd względny Relative error %
Elbląskie	34,2	35,4	3,4
Krakowskie	30,7	28,2	8,8
Legnickie	30,6	32,2	5,0
Lubelskie	28,1	26,5	6,0
Opolskie	31,0	34,0	8,8
Przemyskie	32,9	28,6	15,0
Tarnobrzeskie	29,0	26,2	10,7
Tarnowskie	32,5	27,4	18,6
Wrocławskie	29,5	27,8	6,1
Zamojskie	28,9	29,5	2,0

Zależności pomiędzy strukturą przestrzenną obszarów rolniczych i wielkością plonów a wartościami wskaźników zieleni NDVI

W trzecim etapie prac analitycznych postanowiono zbadać wpływ struktury przestrzennej obszarów rolniczych na siłę zależności pomiędzy wielkością plonów a wartościami wskaźnika NDVI. W tym celu 49 województw podzielono na 3 grupy charakteryzujące się różnym udziałem gospodarstw wielkopowierzchniowych w całkowitej strukturze obszarów rolniczych. Jako gospodarstwa wielkopowierzchniowe przyjęto duże gospodarstwa rolne o powierzchni ponad 10 ha.

Do pierwszej grupy zaliczono 16 województw mających na swym obszarze ponad 33% gospodarstw większych od 10 ha. Według Rocznika Statystycznego (1997) były to następujące województwa: białostockie, bydgoskie, ciechanowskie, elbląskie, gdańskie, gorzowskie, koszalińskie, leszczyńskie, łomżyńskie, olsztyńskie, pilskie, poznańskie, śląskie, suwalskie, szczecińskie i toruńskie.

Do drugiej grupy zaliczono 11 województw mających na swych obszarze od 20 do 33% gospodarstw większych od 10 ha. Były to województwa: białkopodlaskie,

jeleniogórskie, kaliskie, konińskie, legnickie, ostrołęckie, płockie, wałbrzyskie, wrocławskie, wrocławskie i zielonogórskie.

Do trzeciej grupy zaliczono pozostałe województwa mające na swym obszarze poniżej 20% gospodarstw o powierzchni większej niż 10 ha.

Następnie oddzielnie dla każdej grupy województw wykonano analizy korelacji pomiędzy wskaźnikiem NDVI a wielkością plonów, obejmujące okres rozwoju roślin zbożowych (kwiecień–lipiec) w latach 1992–1997. Na podstawie wartości współczynników korelacji wyciągnięto następujące wnioski:

1. Dla województw należących do I i II grupy, tzn. charakteryzujących się dość dużym udziałem gospodarstw wielkopowierzchniowych, wystąpiły silne związki pomiędzy wartościami wskaźnika NDVI a wielkością plonów w każdym z badanych lat (1992–1997).

2. Najwyższe wartości współczynnika korelacji (0,70–0,85) wystąpiły w pierwszej fazie okresu wegetacji – w ciągu trzech dekad maja.

3. Stwierdzono słabe zależności pomiędzy wskaźnikiem NDVI a wielkością plonów dla województw należących do III grupy, tzn. charakteryzujących się znacznym rozdrobnieniem przestrzennym.

W celu określenia dokładności szacowania wielkości plonów dla województw o dużym udziale gospodarstw wielkopowierzchniowych na podstawie równania regresji z I dekady maja 1995 roku ($R=0,84$) obliczono plon upraw zbożowych dla 27 województw należących do grupy I i II. Wyniki obliczeń porównano z oficjalnymi danymi GUS. Błąd względny wyznaczenia wielkości plonów dla wyżej wymienionych województw wyniósł średnio 8,1%.

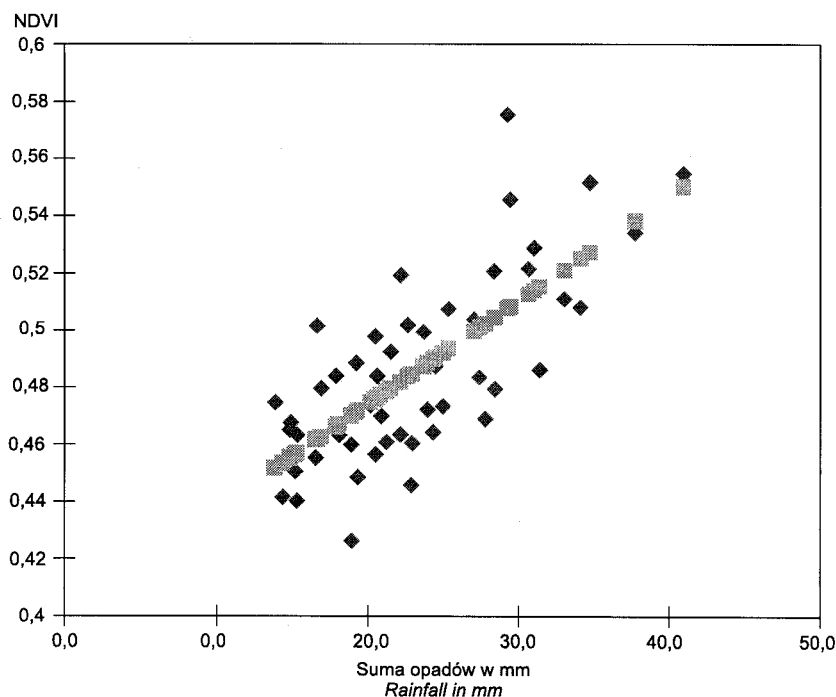
Zależności pomiędzy parametrami agrometeorologicznymi a wartościami wskaźników zieleni NDVI

W finalnej fazie niniejszej pracy badawczej postanowiono zbadać zależności występujące pomiędzy głównymi parametrami meteorologicznymi, wpływającymi na rozwój roślin, a wartościami wskaźnika zieleni NDVI. Do badań wybrano dwa podstawowe parametry: wielkość opadów i temperaturę powietrza.

W celu przeprowadzenia analiz założono bazę danych meteorologicznych, do której wprowadzono informacje dotyczące wielkości opadów w poszczególnych dekadach okresu wegetacyjnego oraz wielkości średniej i maksymalnej temperatury powietrza w tych samych okresach. W bazie umieszczono dane meteorologiczne z lat 1992, 1993, 1997 i 1998.

W pierwszej fazie analiz zbadano zależności pomiędzy wielkością opadów a wartościami wskaźnika NDVI. W wyniku tych analiz stwierdzono, iż w 1992 r., charakteryzującym się dużą zmiennością ilości opadów w ciągu okresu wegetacyjnego, występuje istotna korelacja pomiędzy sumą opadów występujących w maju a wskaźnikiem zieleni w pierwszej dekadzie czerwca ($R=0,73$). Zależność tę w formie graficznej przedstawia ryc. 5.

Podobną zależność otrzymano w przypadku korela-



Ryc. 5. Wykres zależności pomiędzy wskaźnikiem NDVI a sumą opadów w maju 1992 r.

Fig. 5. Relationship between NDVI index and rainfall in May 1992

cji sumy opadów z kwietnia i maja z wartościami wskaźnika NDVI w pierwszej dekadzie czerwca. Natomiast związki pomiędzy wskaźnikami NDVI a sumą opadów z poprzedniej dekady były na ogół słabsze. Wypływa stąd wniosek, iż skumulowanie wielkości opadów w ciągu miesiąca (lub w dłuższym okresie) wpływa w sposób istotny na wartości wskaźnika zieleni.

Analogiczną analizę przeprowadzono w celu określenia zależności pomiędzy średnią i maksymalną temperaturą powietrza a wartościami wskaźnika NDVI. W wyniku tej analizy stwierdzono, iż w pierwszej fazie okresu wegetacji (I dekadzie maja) istnieje istotna zależność między tymi parametrami. Nieco słabszy związek występuje pomiędzy sumą średnich temperatur w maju z wartościami wskaźnika NDVI w pierwszej dekadzie czerwca 1992 r. Występowanie tych zależności w określonej fazie okresu wegetacji jest związane z charakterystycznymi zmianami parametrów meteorologicznych w tym okresie: znacznym wzrostem temperatury w I dekadzie maja i zwiększeniem ilości opadów w drugiej dekadzie maja.

Analiza zależności między wielkością opadów a wartościami wskaźnika NDVI w latach 1993, 1997 i 1998 wykazała nieco słabsze związki; w niektórych dekadach okresu wegetacyjnego współczynnik korelacji osiągał wartość $R = 0,5$. Natomiast w przypadku analizy związków wskaźnika NDVI z temperaturą powietrza stwierdzono, iż w każdym z badanych lat istotne zależności występują pomiędzy sumą temperatur w maju a tzw. skumulowanym wskaźnikiem zieleni z pierwszej fazy okresu wegetacji (kwiecień–maj).

Podsumowanie

W wyniku różnorodnych działań prowadzonych w ramach przedstawionej pracy został utworzony operacyjny system oceny warunków wzrostu roślin, bazujący na wykorzystaniu zdjęć satelitarnych NOAA AVHRR. Przygotowano specjalistyczne oprogramowanie do przetwarzania zdjęć z satelitów NOAA oraz zebrano niezbędne historyczne i bieżące zdjęcia satelitarne, umożliwiające uruchomienie i funkcjonowanie systemu.

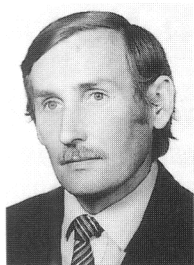
W finalnej części pracy przeprowadzono szereg analiz zmierzających do zbadania zależności pomiędzy wartościami wskaźnika zieleni NDVI a parametrami charakteryzującymi stan rozwoju roślin uprawnych. Badano siłę związku pomiędzy wartościami wskaźnika NDVI a wielkością plonów, biorąc pod uwagę jakość rolniczej przestrzeni produkcyjnej oraz zmienność gatunkową i przestrzenną obszarów rolniczych. W wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż w przypadku obszarów rolniczych charakteryzujących się gospodarką wielkoprzestrzenną i przewagą upraw zbożowych zależności między badanymi wielkościami (wskaźnik NDVI — plon) są silniejsze niż dla gospodarki drobnoprzestrzennej o zróżnicowanej strukturze gatunkowej. Jakość rolniczej przestrzeni produkcyjnej ma mniejszy wpływ na siłę badanych związków. Zbadano także wpływ zmian parametrów meteorologicznych — opadów i temperatury powietrza — na wartości wskaźnika NDVI. Stwierdzono występowanie istotnych zależności pomiędzy sumą opadów oraz sumą temperatur w pierwszej fazie okresu wegetacyjnego (kwiecień–maj) a wartościami wskaźnika zieleni na początku czerwca, tj. w szczytowej fazie rozwoju wegetacji.

Reasumują, w wyniku przeprowadzonych prac w Instytucie Geodezji i Kartografii powstał operacyjny system oceny warunków wzrostu roślin uprawnych. System ten dostarcza bieżącej informacji o stanie upraw w skali kraju lub regionu, umożliwiając szacowanie wielkości zbiorów i wspomagając podejmowanie decyzji ekonomicznych związanych z produkcją rolną.

Literatura

- Bullock P.R., 1992: Operational estimates of Western Canada grain production using NOAA AVHRR LAC data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 18, no. 1.
- Hochheim K.P., Bullock P.R., 1993: Operational estimates of

- Western Canada spring wheat yield using NOAA AVHRR LAC data. *Proceedings of the 12th W.T. Pecora Memorial Symposium*. Sioux Falls, USA, August 23–26, 1993.
- Reichert G.C., Bullock, P.R., Prout N.A., Walker G.K., 1991: A near real time crop monitoring tool using NOAA LAC AVHRR data. *Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing*. Calgary, Canada, May 6–10, 1991.
- Walker G.K., 1988: Model for operational forecasting of Western Canada wheat yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, 44, 339–351.
- Wood D., 1993: The use of multitemporal NDVI measurements from AVHRR data for crop yield estimation and prediction. *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 14, no. 2, 190–210.
- Yang W., Yang L., Merchant J.W., 1997: An assessment of AVHRR/NDVI ecological relations in Nebraska, USA. *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 18., no. 10. 2161–2180



Dr inż. Zbigniew Bochenek jest absolwentem Wydziału Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej. W 1980 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w zakresie geodezji i kartografii — specjalność teledetekcja w Instytucie Geodezji i Kartografii. Jest długoletnim pracownikiem

Ośrodka Teledetekcji i Informacji Przestrzennej IGiK. Zajmuje się wykorzystaniem zdjęć satelitarnych i lotniczych w rolnictwie, leśnictwie i kartowaniu użytkowania ziemi. Instytut Geodezji i Kartografii, Ośrodek Teledetekcji i Informacji Przestrzennej, 00-950 Warszawa, ul. Jasna 2/4, tel/fax: 827-03-28; e-mail: zbig@igik.edu.pl