

Teledetekcyjna metoda oceny stanu rozwoju roślin uprawnych i szacowania plonów głównych zbóż w Polsce

*Remote sensing based method of crop development assessment
and forecasting of basic cereals in Poland*

Katarzyna DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA, Andrzej CIOŁKOSZ,
Wanda KOWALIK, Maria GRUSZCZYŃSKA

The application of satellite derived indices for assessment of crop growth conditions in semiarid countries is well known. NOAA/NESDIS elaborated the indices, which have been applied world-wide in semiarid areas for drought detection and monitoring of vegetation conditions. The Polish Remote Sensing Centre in co-operation with NOAA/NESDIS Satellite Research Laboratory in Washington have undertaken the research on modifying and applying these indices in Poland, which is the country with sufficient water supply.

Weather data are a fairly good source of information that can be used for estimates of vegetation growth condition and drought assessment. However, the distribution of weather stations makes vegetation monitoring a very difficult task. Observation from space, especially from the NOAA operational polar-orbiting satellites provide a unique vantage point, synoptic view and regular, repetitive view of nearly all the Earth's surface. The NOAA/AVHRR-base reflectance in the visible and near infrared wave bands and the Normalised Difference Vegetation Index — *NDVI* as well as brightness temperature — *BT*, registered in thermal bands of AVHRR, have been used in designing crop monitoring techniques.

The assumption that that maximum amount of vegetation is developed in years with optimal weather because such weather stimulates efficient use of ecosystem resources. Conversely, minimum vegetation amount develops in years with extremely unfavourable weather, which suppresses vegetation growth. Therefore, the absolute maximum and minimum of *TCI* and *BT* calculated from several years of data that contain the extreme weather events can be used as criteria for quantifying the extreme conditions.

Following these considerations, the largest and the smallest *TCI* and *BT* values during 1985–1998 were calculated for each of 52 weeks of the year and for each pixel covering Poland.

They were then used as criteria for estimating the upper (favourable weather) and the lower (unfavourable weather) limits of the region resources. These limits characterise the range in which *TCI* and *BT* fluctuate due to weather changes from year to year in each of region. These fluctuations were estimated relative to the maximum and minimum intervals of both *TCI* and *BT* variations and named Vegetation Condition Index — *VCI* and Temperature Condition Index — *TCI*.

Since the pixels for which both indices were calculated represent areas larger than agricultural plots in Poland the problem of analysis of usefulness of low-resolution satellite data in characterisation of agricultural areas was investigated. LANDSAT TM derived map of land cover in Poland was used to determine the arable lands. A grid of *VCI* and *TCI* pixels has been overlaid on this map and percentage of arable land in each pixels has been calculated. The detail analysis revealed that there was no difference in the values of *TCI* and *VCI* computed for the pixels containing various percentage of agricultural land. This indicates that the mean value of *VCI* and *TCI* computed for the entire voivodship may be used to represent agricultural areas. The spatial averages of these two indices have been computed for each week from 1985 to 1998 for all 49 voivodships. The *VCI* and *TCI* indices change from 0 to 100 reflecting changes in vegetation growth conditions. Both indices have been used to assess crop growth conditions for every year since early spring to late summer. Since the value of crop yield depends on weather conditions during the growth season and because *VCI* and *TCI* indices characterise these conditions, yield anomalies were correlated with these indices for whole Poland and each voivodship.

Analysis of *VCI* and *TCI* indices for different years for the beginning and for the middle of growth season and their pretty strong correlation with crop yield has proven that these indi-

ces could be applied in model of cereals yield prognosis. Such prognosis has been done at the beginning of June, what means 5–6 weeks before harvest in Poland. The results of forecasting of basic cereals on the basis of satellite derived indices were compared with the yield predicted by the Central Statistical Office. The average error of cereals yield estimates for 49 voivodships was 3.82%. For seven voivodships the error was lower than 5% and for ten exceeded 10%.

The study undertaken for the area of sufficient water supply has proved that the indices derived from low-resolution satellite images can be successfully used for assessment of crop growth conditions, alike in the case of semiarid areas. From two applied indices Temperature Condition Index (*TCI*) and Vegetation Condition Index (*VCI*) the first one was found to be more sensitive for crop yield estimates.

Two periods in crop development were found when *TCI* was proved to be most sensitive to detect crop conditions, which influence crop yield. The first period happens in the weeks 14–16 while the second — in the weeks 21–23 of the year. The negative correlation between cereals yield and *TCI* in the first period of crop growth that low values of *TCI* indicate that spring conditions were appropriate for crop development and high yield. In this case the brightness temperature was close to the maximum for these weeks. On the contrary the high positive correlation between *TCI* and crop yield in the weeks 21–23 shows that high values of *TCI* in this period indicate good crop growth conditions, which would reflect high cereals yield.

Wprowadzenie

Od kilku lat do wykrywania suszy i monitorowania stanu roślinności na obszarach pustynnych i półpustynnych wykorzystuje się wskaźniki roślinne wprowadzane na podstawie danych pozyskiwanych za pomocą satelitów teledetekcyjnych. Wskaźniki te opracował i stosuje w swoich pracach amerykański ośrodek NOAA/NESDIS (Kogan, 1987, 1990; Unganai, Kogan, 1998). Dotychczas nie było prób wykorzystania wskaźników roślinnych w krajach strefy umiarkowanej, charakteryzujących się właściwymi stosunkami wodnymi. Dlatego w Ośrodku Teledetekcji i Informacji Przestrzennej OPOLiS Instytutu Geodezji i Kartografii powstał projekt zmodyfikowania tych wskaźników i zastosowania ich dla obszaru Polski — kraju leżącego w strefie, w której wielkość opadów dotychczas przewyższała transpirację. Od końca lat 60. także w Polsce obserwuje się zmniejszenie wielkości opadów o około 70 mm, co sprawia, że w niektórych regionach kraju zaczyna zaznaczać się deficyt wody. Ze względu na niedobór opadów podczas okresu wegetacyjnego, ciężkie zimy, duże wahania temperatury wiosną i brak wystarczającej liczby pogodnych dni la-

tem, plon wielu upraw znacznie zmienia się (tab. 1). Średni plon głównych upraw w Polsce jest znacznie niższy niż w większości krajów zachodnioeuropejskich, lecz stosunkowo duże obszary zajęte pod poszczególne uprawy stawiają Polskę na szóstym miejscu w produkcji pszenicy, drugim w produkcji żyta, drugim w produkcji ziemniaków oraz czwartym w produkcji buraków cukrowych.

W polskim rolnictwie dominują prywatne gospodarstwa; większość z nich (około 85%) to gospodarstwa jednorodzinne. W ciągu ostatnich 20 lat obszar gospodarstwa indywidualnego wzrósł z 6,5 do 7,8 ha. Jednakże wciąż istnieje około półtora miliona gospodarstw o powierzchni poniżej 1 ha. Likwidacja gospodarstw państwowych i znaczne zmniejszenie liczby spółdzielni produkcyjnych wpłynęło korzystnie na strukturę gospodarstw indywidualnych, zwiększając ich udział w produkcji rolnej. W 1995 roku gospodarstwa prywatne stanowiły 82% obszarów rolniczych Polski.

Produkcja rolnicza w Polsce jest głównym źródłem dochodu dla prawie 12% ludności, dostarczając żywności 40 milionom mieszkańców kraju oraz przyczyniając się w znacznym stopniu do zwiększania dochodu narodowego przez eksport zwierząt oraz produktów żywnościowych. Produkcja głównych zbóż kon-

Tabela 1.

Średni plon wybranych głównych upraw w Polsce
The average yield of some basic crops in Poland

Rok Year	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Uprawa Crops	dt/ha								
Pszemica Wheat	39,6	38,0	30,6	33,3	31,8	37,8	35,6	32,5	36,2
Żyto Rye	26,1	25,8	19,6	22,6	21,8	25,6	23,4	23,1	24,7
Jęczmień Barley	35,9	34,4	23,5	27,9	26,0	38,8	29,0	32,0	31,7
Ziemniaki Potato	198,0	168,0	133,0	206,0	136,0	164,0	203,0	159,0	200,0
Buraki cukr. White beet	380,0	316,0	294,0	392,0	292,0	346,0	394,0	379,0	379,0

Tabela 2.

Produkcja głównych upraw w Polsce

Production of some basic crops in Poland

Rok Year	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Uprawa Crops	mln ton								
Pszenica <i>Wheat</i>	9,0	9,3	7,4	8,2	7,7	8,7	8,6	8,2	9,5
Żyto <i>Rye</i>	6,1	5,9	4,0	5,0	5,3	6,3	5,7	5,3	5,7
Ziemniaki <i>Potato</i>	36,3	29,0	23,4	36,3	23,1	24,9	27,2	20,8	25,9
Buraki cukr. <i>White beet</i>	16,7	11,4	11,4	15,6	11,7	11,7	17,8	15,9	15,2

sumpcyjnych zależy w dużej mierze od warunków pogodowych; w niektórych latach nie jest ona wystarczająca do zaspokojenia zapotrzebowania całego kraju. Dlatego oszacowanie wielkości produkcji zbóż na kilka tygodni przed zbiorami jest bardzo ważnym elementem polskiej gospodarki, ma bowiem wpływ na wielkość importu.

Główny Urząd Statystyczny dokonuje szacunku plonów zbóż, rzepaku, ziemniaków i buraków cukrowych kilkakrotnie w okresie wegetacyjnym. W procesie tego szacowania wykorzystuje się wiedzę i doświadczenie ekspertów rolniczych, którzy oceniają warunki rozwoju upraw bezpośrednio w terenie; prowadzi się także pomiary biometryczne. W celu oszacowania wielkości plonów wykorzystuje się również pomiary parametrów meteorologicznych z około 60 stacji meteorologicznych rozmieszczonych na obszarze całego kraju. Duża ilość informacji o stanie upraw pochodzi też od korespondentów rolniczych pracujących w różnych regionach kraju. Wszystkie informacje są przetwarzane przez ekspertów Głównego Urzędu Statystycznego w celu przygotowania oficjalnych szacunków plonów głównych upraw. Wyniki tych oszacowań są publikowane w oficjalnych biuletynach i dostarczane do Ministerstwa Rolnictwa oraz innych agend rządowych, a także władz lokalnych w całej Polsce.

Pomiary naziemne mają niestety ograniczony charakter; w niektórych regionach nie wykonuje się ich w ogóle. Pomiary tego typu są wykonywane zwykle na małych powierzchniach i ekstrapolowane na duże obszary kraju. Metody oceny warunków rozwoju upraw są więc w dużym stopniu obciążone subiektywizmem. Ponadto procedury zbierania danych, ich interpolacji i modelowania są pracochłonne, czasochłonne i kosztowne. Dlatego w ramach niniejszej pracy Ośrodek Teledetekcji i Informacji Przestrzennej OPOLIS Instytutu Geodezji i Kartografii we współpracy z Ośrodkiem NOAA/NESDIS — Laboratorium Teledetekcji Satelitarnej w Waszyngtonie podjął prace badawcze nad rozszerzeniem zakresu stosowania teledetekcyjnej metody określania stanu roślin (stosowanej do tej pory dla obszarów półpustynnych) do analizy warunków rozwoju roślin uprawnych i szacowania plonów pszenicy w Polsce.

Dane

Dane meteorologiczne są dobrym źródłem informacji, wykorzystywanym do szacowania warunków wzrostu roślin. Jednakże brak odpowiedniej liczby stacji meteorologicznych, a także ich niekorzystne rozmieszczenie na terenie całego kraju sprawiają, że monitorowanie stanu roślinności na dużych obszarach staje się zadaniem trudnym. W sukurs mogą przyjść tu zdjęcia satelitarne, zwłaszcza te wykonywane z pokładu satelitów operacyjnych NOAA. Poprzez wykorzystanie wyjątkowego punktu widzenia zdjęcia satelitarne umożliwiają synoptyczne spojrzenie na duże obszary, stały dopływ danych oraz dużą częstotliwość powtarzania rejestracji dla prawie całego globu ziemskiego (Johnson i inni, 1993).

Zdjęcia satelitarne wykonywane są jednocześnie w kilku zakresach widma elektromagnetycznego, z których dwa są szczególnie istotne z punktu widzenia rozpoznawania i charakterystyki zobrazowanej roślinności. Pierwszy zakres (*VIS*) obejmuje promieniowanie czerwone, w którym przypada minimum odbicia od zielonej roślinności, w drugim natomiast — bliska podczerwień (*NIR*) — obserwuje się maksymalne odbicie promieniowania od zdrowej roślinności. Taki rozkład odbicia związany jest z obecnością chlorofilu w roślinach. Wartości promieniowania rejestrowane w tych dwóch zakresach wykorzystuje się do obliczenia różnych wskaźników zieleni charakteryzujących stan roślinności odwzorowanej na zdjęciach satelitarnych. W celu uniknięcia różnic w odbiciu promieniowania od powierzchni czynnej wywołanych zmianą oświetlenia, ekspozycją i nachyleniem stoków, do badań roślinności najczęściej stosuje się tak zwany znormalizowany wskaźnik zieleni zwany powszechnie z angielska *NDVI*. Wskaźnik ten oblicza się ze wzoru:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

W miarę dojrzewania roślin uprawnych lub pogorszenia się ich warunków zdrowotnych zmienia się zawartość chlorofilu w roślinach, powodując obniżenie wartości znormalizowanego wskaźnika zieleni. Zna-

jomość tego wskaźnika pozwala zatem wnioskować o stanie roślin.

Radiometr AVHRR zainstalowany na satelitach serii NOAA rejestruje także dwa zakresy promieniowania elektromagnetycznego w dalekiej podczerwieni. Rejestracja tego promieniowania ma na celu określenie radiacyjnej temperatury obiektów — BT występujących na powierzchni Ziemi.

Wartości wskaźnika $NDVI$, jak również temperaturę radiacyjną roślinności — BT można obliczać codziennie, jeżeli zezwalają na to warunki pozyskiwania zdjęć. Często jednak całkowite lub częściowe zachmurzenie danego obszaru sprawia, że obliczenie obu wspomnianych wartości nie jest możliwe. Chcąc jednakże mieć obraz stanu roślinności na całym badanym obszarze wykorzystuje się nawet fragmenty zdjęć, na których jest on widoczny. Na podstawie kilku takich fragmentarycznych zdjęć, wykonanych w ciągu tygodnia lub dekady, tworzy się obraz całego terenu metodą mozaikowania. W ten sposób można przedstawić przestrzenny rozkład zarówno wskaźnika $NDVI$ jak i temperatury radiacyjnej BT będący sumą fragmentów zdjęć wolnych od zachmurzenia pozyskanych w określonym przedziale czasu.

Wartości wskaźnika $NDVI$ obliczone z wielolecia stanowią podstawę do obliczenia tak zwanego wskaźnika kondycji roślin — VCI (*Vegetation Condition Index*), natomiast obliczone z wielolecia wartości temperatury radiacyjnej roślinności — BT są podstawą do obliczenia wskaźnika termicznej kondycji roślin — TCI (*Temperature Condition Index*). Przy opracowaniu tych wskaźników zastosowano metodę redukcji szumów wysokich częstotliwości w przebiegu wartości $NDVI$ i BT , co umożliwiło eliminację danych ekstremalnych (Van Dijk i inni, 1987). Pierwszy z tych wskaźników zastosowano z powodzeniem do monitorowania warunków rozwoju roślinności i określania obszarów dotkniętych suszą na terenie Stanów Zjednoczonych oraz w innych krajach (Kogan, 1994, 1995b). Zastosowanie z kolei wskaźnika termicznej kondycji roślin TCI — do badania stanu roślinności zwiększyło precyzję monitorowania suszy i pomogło wyjaśnić wpływ zmian temperatury na proces powstawania tego zjawiska (Dąbrowska-Zielińska, 1998). Wykorzystanie wskaźnika TCI dostarczyło także użytecznych informacji do śledzenia stresu roślin z tytułu nasycenia gleby wodą (Kogan, 1994, 1995b).

Oprócz wyżej wspomnianych wskaźników roślinnych w niniejszej pracy wykorzystano także jeden z najczęściej stosowanych produktów satelitarnych na świecie, tak zwany wskaźnik GVI (*Global Vegetation Index*) (Kidwell, 1994). Wskaźnik ten tworzy się przez przepróbkowanie informacji o przestrzennym rozmieszczeniu wskaźnika TCI zapisanej z czterokilometrową rozdzielczością przestrzenną do rozdzielczości 16-kilometrowej. Tygodniowe wartości wskaźnika GVI pozyskano dla okresu od kwietnia 1985 r. do końca 1988 r. z satelity NOAA-9, od grudnia 1988 r. do końca 1994 r. z satelity NOAA-11 oraz od stycznia 1995 r. do

końca 1998 r. z satelity NOAA-14. Wykorzystanie zdjęć wykonywanych przez różne satelity serii NOAA do wyznaczania wielkości wskaźnika TCI wymagało ich kalibracji, zarówno w kanałach widzialnych jak i rejestrujących widmo w zakresie bliskiej podczerwieni (Rao, Chen, 1995). Zostały także skorygowane informacje zarejestrowane w obu pasmach dalekiej podczerwieni według reguł wyznaczonych przez Weinreba (i inni, 1990).

Założenia metodyczne

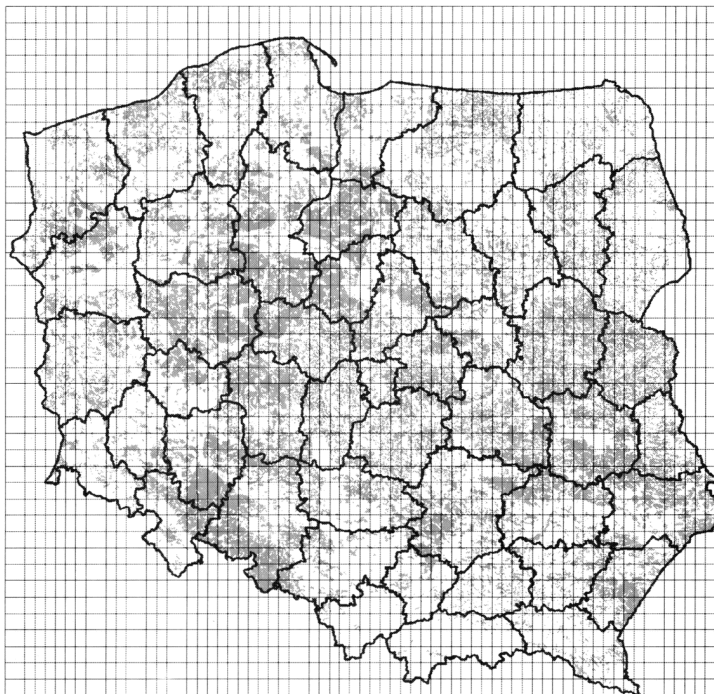
W badaniach dotyczących oceny warunków rozwoju roślinności na podstawie informacji pozyskiwanych za pomocą zdjęć satelitarnych przyjęto, że maksymalny rozwój roślinności następuje w latach charakteryzujących się optymalnymi warunkami meteorologicznymi, gdyż takie warunki stymulują efektywne wykorzystanie ekosystemu (na przykład zwiększenie stopnia pobierania składników odżywczych z gleby). Odwrotnie, minimalny rozwój roślinności następuje w latach o krańcowo niekorzystnych warunkach meteorologicznych (małe opady, wysoka temperatura), powstrzymujących wzrost roślin. Dlatego różnica pomiędzy maksymalną i minimalną wartością wskaźnika $NDVI$ oraz między maksymalną i minimalną wartością temperatury roślin BT wyznaczona z wielolecia, określająca ekstremalne warunki pogodowe, może być zastosowana jako kryterium do kwantyfikacji warunków rozwoju roślin (Kogan, 1995a).

Wychodząc z tych założeń wyznaczono najniższe i najwyższe wartości wskaźnika $NDVI$ oraz temperatury radiacyjnej roślin BT w okresie 1985–1998 dla każdego z 52 tygodni roku i dla każdego piksela zdjęcia satelitarnego obejmującego obszar Polski. Wartości te użyto następnie do określenia korzystnych i niekorzystnych warunków rozwoju roślin oraz ich wartości granicznych w obrębie każdego województwa. Charakteryzują one zakres, w którym wielkość wskaźnika $NDVI$ oraz temperatury radiacyjnej roślin BT zmieniają się w zależności od zmian pogody (w każdym roku i województwie). Fluktuacje obu tych parametrów określa się w stosunku do przedziałów zmienności zarówno $NDVI$ jak i BT (maksimum–minimum), wyznaczając według poniższych wzorów wskaźniki: kondycji roślin — VCI oraz termicznej kondycji roślin — TCI .

$$VCI = 100 \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$$

$$TCI = 100 \frac{BT_{max} - BT}{BT_{max} - BT_{min}}$$

gdzie: $NDVI$ jest wygładzoną wartością znormalizowanego wskaźnika zieleni z okresu tygodniowego; $NDVI_{max}$ i $NDVI_{min}$ oznaczają odpowiednio maksymalne i minimalne wartości znormalizowanego wskaźnika zieleni zanotowane w danym tygodniu w okresie wielolecia; BT oznacza radiacyjną temperaturę ro-



Ryc. 1. Udział terenów rolniczych w obszarach wyznaczonych przez oczka siatki reprezentujące piksele wskaźnika GVI

Fig. 1. Share of arable land in areas covering by grid cells representing pixels of GVI

ślin w danym tygodniu; BT_{max} i BT_{min} oznaczają odpowiednio maksymalne i minimalne wartości radiacyjnej temperatury roślin zanotowane w danym tygodniu w okresie wielolecia.

Wskaźniki VCI i TCI zmieniają się w granicach 0–100, odzwierciedlając warunki rozwoju roślinności od krańcowo złych do optymalnych.

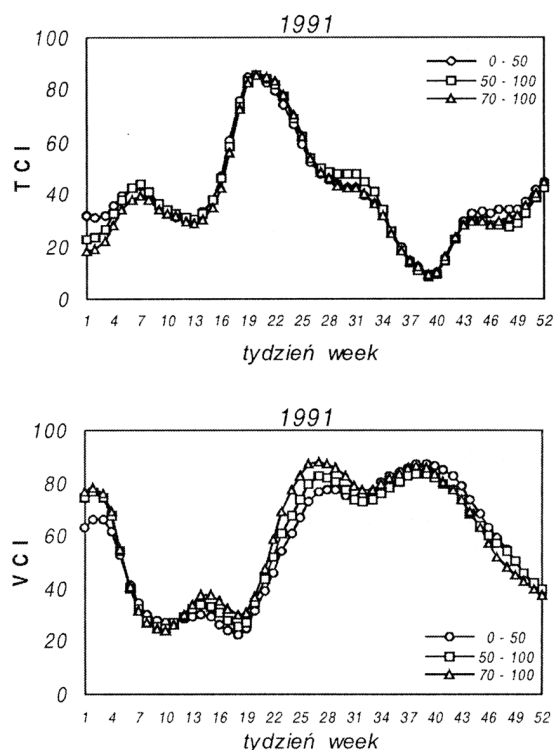
W badaniach nad możliwością oceny warunków rozwoju roślin na podstawie zdjęć satelitarnych wykorzystano również wysokorozdzielcze zdjęcia satelitarne wykonywane przez satelitę środowiskowego LANDSAT TM. Zdjęcia te posłużyły do opracowania mapy użytkowania ziemi w Polsce, na podstawie której wyznaczono tereny rolne. Tylko te obszary były przedmiotem dalszej analizy prowadzonej na podstawie danych pozyskiwanych z satelitów meteorologicznych serii NOAA.

Wykorzystany w niniejszych badaniach wskaźnik GVI , otrzymywany na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA, jest obliczany dla każdego obszaru globu ziemskiego reprezentującego powierzchnię 256 km^2 . Na podstawie tego wskaźnika obliczono z kolei wspomniane wskaźniki pochodne, mianowicie VCI i TCI . Piksele obrazujące przestrzenny rozkład wskaźnika GVI , a więc też wskaźników VCI i TCI , są znacznie większe niż pola orne w Polsce. Ażeby przekonać się, w jakim stopniu wartości tych wskaźników choć w przybliżeniu reprezentują obszary rolne, wykonano najpierw badania mające stwierdzić, czy zdjęcia satelitarne o niskiej rozdzielczości przestrzennej charakteryzują dostatecznie te tereny. Wykorzystano w tym celu mapę użytkowania ziemi opracowaną na podsta-

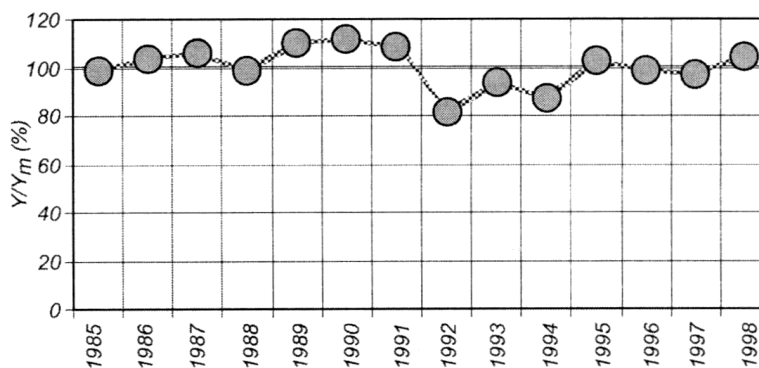
wie zdjęć satelitarnych LANDSAT TM. Na tę mapę nałożono siatkę o wielkości oczek równej wielkości pikseli tworzących obraz wskaźnika GVI . W każdym oczku tej siatki określono procentowy udział terenów zajętych przez grunty rolne. Rycina 1 przedstawia tereny rolne w Polsce z nałożoną siatką pikseli VCI i TCI . Piksele, w których występują grunty rolne podzielono na trzy grupy. W pierwszej znalazły się te piksele, które pokrywały od 70 do 100% terenów rolnych. Do drugiej grupy zaliczono piksele pokrywające od 50 do 100% gruntów rolnych, do trzeciej zaś piksele, w których grunty rolne były reprezentowane przez mniej niż połowę powierzchni piksela. Ponad 68% Polski jest pokryte pikselami VCI i TCI zawierającymi do 50% terenów rolnych, 24% Polski zawiera tereny rolne w granicach 50–100%, zaś 8% Polski to w wyraźnej przewadze tereny rolne (70–100%).

Szczegółowa analiza wartości wskaźników VCI i TCI obliczonych dla okresu wegetacyjnego w latach 1985–1998 wykazała, że w głównych fazach rozwoju roślinności (tygodnie 14–31) nie ma istotnych różnic pomiędzy wartościami wskaźników VCI i TCI

obliczonych na podstawie pikseli o różnym procentowym udziale terenów rolnych (ryc. 2). Nie ma zatem potrzeby wyznaczania na zdjęciach NOAA terenów rol-



Ryc. 2. Średnie wartości wskaźników TCI i VCI obliczone dla pikseli o różnym udziale terenów rolnych (przykład dla 1991 r.)
Fig. 2. Average TCI and VCI values for pixels containing various percentage of agricultural land for year 1991



Ryc. 3. Stosunek aktualnego plonu głównych zbóż w Polsce do plonu średniego z 14-letnia

Fig. 3. The ratio of current to mean values of cereals yields for years 1985–1998 for Poland

nych, gdyż wartości wskaźników VCI i TCI obliczone np. dla obszaru całego województwa wystarczająco dobrze reprezentują występujące w nim tereny rolne.

Ocena warunków rozwoju roślinności

Analiza przebiegu pogody w latach 1985–1998 wykazała, że warunki pogodowe wpływające na wzrost roślin były bardzo zróżnicowane. Znalazło to swoje odzwierciedlenie w zróżnicowanym plonie głównych zbóż. W niniejszych badaniach plon zbóż był wyrażany w postaci odchylenia od 14-letniej średniej (ryc. 3).

Poniżej zostały przedstawione warunki agrometeorologiczne panujące w poszczególnych latach.

1985 r.

Rok ten charakteryzowały zróżnicowane warunki rozwoju roślin, odzwierciedlające się różnymi wartościami wskaźnika TCI . W końcu 21 tygodnia ustabilizowała się pogoda na całym obszarze kraju; wskaźnik TCI wykazywał raczej dobre warunki rozwoju. Ta sytuacja miała swoje odbicie w średniej wielkości plonu. Wskaźnik Y/Y_{sr} określający stosunek plonu bieżącego do średniego wynosił prawie 100%.

1986 r.

Zima tego roku była długa i bardzo chłodna, śnieg pokrywał większą część Polski aż do kwietnia. Od maja obserwowano małe opady i wysoką temperaturę, co spowodowało wysuszenie gleby. W końcu maja opady i temperatura były wysokie, tworząc dobre warunki wzrostu roślin. W końcu czerwca wystąpił brak wody w glebie, wywołując suszę w centralnej Polsce. Niemniej jednak stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} obliczony dla całego kraju wynosił nieco ponad 100%.

1987 r.

Tego roku zima była długa, podobnie jak w 1986 r. W kwietniu było dość ciepło i wystąpiły duże opady, co spowodowało bardzo dobre warunki rozwoju roślin. W końcu maja i w czerwcu temperatura powietrza

była niska. Warunki wzrostu roślin były bardzo dobre w lipcu. Stosunek plonów bieżącego do średniego Y/Y_{sr} wynosił 106%.

1988 r.

W kwietniu i maju obserwowano znaczny niedobór opadów. Wysoka temperatura powietrza i duże nasłonecznienie wywołały w niektórych częściach Polski suszę, co zaowocowało niższym niż średni plonem zbóż. Stosunek Y/Y_{sr} wynosił poniżej 100%.

1989 r.

Warunki agrometeorologiczne były znacznie lepsze niż w roku poprzednim. Wiosna była ciepła i wilgotna. Gorsze warunki występowały tylko w północnej części Polski. Średni plon zbóż dla całego kraju był wysoki. Stosunek plonu średniego do bieżącego Y/Y_{sr} wynosił 110%.

1990 r.

Tego roku zima była krótka i wegetacja zaczęła się wcześniej niż zwykle. Latem warunki pogodowe były bardzo dobre do wzrostu roślin, co zaowocowało wysokim plonem zbóż. Stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} osiągnął 112%.

1991 r.

Ciepła pogoda i wystarczająca ilość wody w glebie wiosną spowodowały szybki rozwój upraw. Warunki pogodowe latem były także bardzo dobre do dojrzewania zbóż w przeważającej części Polski. Stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} wyniósł około 110%.

1992 r.

Chociaż wiosna była ciepła i wilgotna, pozostała część okresu wegetacji była bardzo sucha. Wysoka temperatura powietrza i małe opady (około 50% poniżej średniej) od końca maja do sierpnia spowodowały bardzo złe warunki rozwoju roślin, co zaowocowało niskim plonem. Stosunek plonu bieżącego do średniego

Y/Y_{sr} był najniższy w badanym 14-letnim okresie i wyniósł nieco ponad 80%.

1993 r.

Kwiecień był chłodny, z małą ilością opadów. Na początku maja zaobserwowano deficyt wody w glebie w całym kraju. Czerwiec był chłodny i deszczowy. Takie warunki pogodowe zaowocowały niższym niż średni plonem. Stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} wyniósł około 94%.

1994 r.

Ten rok był wyjątkowo wilgotny. Duże opady i niska temperatura w maju i czerwcu spowodowały bardzo złe warunki wzrostu roślin. W końcu czerwca i w lipcu temperatura powietrza była wysoka, co wywołało deficyt wody w glebie. Plon zbóż był niski. Stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} był mniejszy od 90%.

1995 r.

Warunki pogodowe w różnych częściach Polski były zróżnicowane. Łagodna zima stworzyła bardzo dobre warunki wzrostu roślin ozimych, początek kwietnia był chłodny. Jednak później, w kwietniu, temperatura powietrza była wyższa niż średnia, stwarzając korzystne warunki rozwoju roślin. Czerwiec był ciepły i wilgotny, co dało dobre warunki dojrzwania zbóż. Stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} osiągnął około 103%.

1996 r.

Wiosna była bardzo zimna, wegetacja zaczęła się 5 dekad później niż zwykle. Warunki rozwoju roślin w maju i czerwcu były bardzo dobre ze względu na wysokie temperatury i dużą wilgotność. Jednak stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} był niższy niż w 1995 roku; wyniósł około 100%.

1997 r.

Ten rok charakteryzował się znacznymi anomaliami pogodowymi i zróżnicowanymi warunkami wzrostu, często niekorzystnymi dla rozwoju roślin. Silne deszcze w lipcu spowodowały powódź, która zmniejszyła zbiory zbóż. Jednakże stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} był tylko nieco mniejszy niż 100%.

1998 r.

Warunki agrometeorologiczne wpływające na rozwój upraw były dobre. Roślinność zaczęła się rozwijać wcześniej niż zwykle. W maju i czerwcu wilgotność gleby i temperatura były optymalne dla wzrostu ro-

ślin. Stosunek plonu bieżącego do średniego Y/Y_{sr} wyniósł 105%.

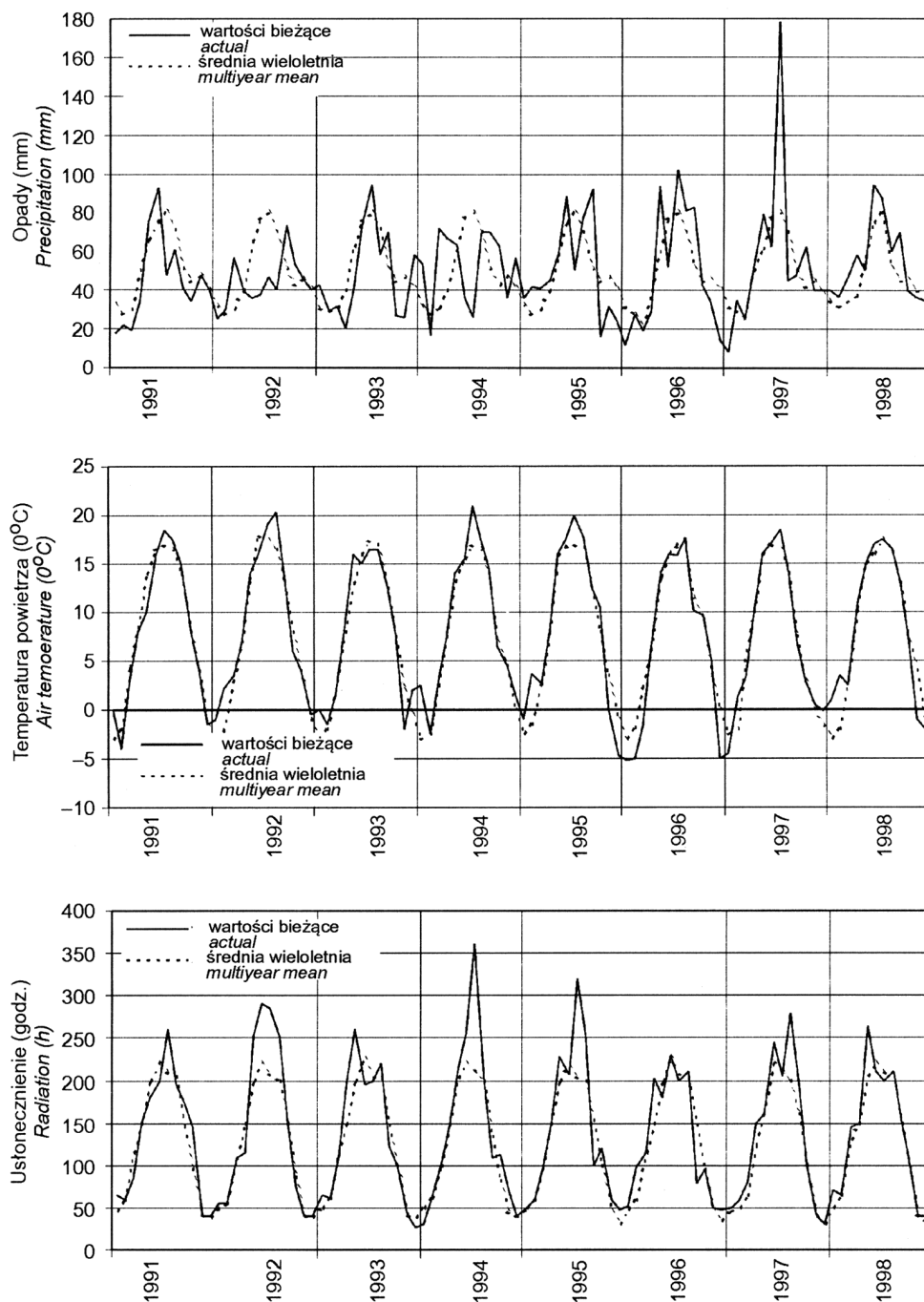
Na rycinie 4 przedstawiono wartości opadów, temperatury powietrza i usłonecznienia w latach 1991–1998. W tym okresie najwyższe plony zbóż zanotowano w 1991, 1995 i 1998 roku. Lata te odznaczały się wyższą niż przeciętna temperaturą powietrza, a także wyższymi opadami w całym okresie wegetacyjnym. Z kolei 1992 rok charakteryzował się bardzo niskimi plonami spowodowanymi wysoką temperaturą powietrza i usłonecznieniem znacznie przekraczającym wartość średnią, przy jednoczesnym niedoborze opadów, których wielkość była znacznie niższa niż średnia wieloletnia. W wyniku panującej w tym roku suszy również rok następny był suchy. Opady w okresie wegetacyjnym 1993 roku były niższe od przeciętnych, temperatura powietrza była zbliżona do przeciętnej, natomiast usłonecznienie było ponadprzeciętne. Rok 1994 cechował się wysokim usłonecznieniem w późniejszym okresie wegetacji, natomiast wyższymi od przeciętnej opadami na początku wegetacji, wyższej od przeciętnej temperaturze powietrza i znacznie niższymi od przeciętnej opadami w okresie znaczącym dla rozwoju roślin. Złe warunki atmosferyczne spowodowały znacznie niższe od średnich plony. Rok 1998 był rokiem korzystnym dla rozwoju zbóż, o wyższej od przeciętnej temperaturze, usłonecznieniu i opadach co spowodowało, że plony zbóż były także wyższe od średnich z wielolecia.

Warunki rozwoju roślinności charakteryzowane wskaźnikami VCI i TCI

W toku prac badawczych przeanalizowano wartości wskaźników VCI i TCI obliczone dla okresu 14 lat (1985–1998) w każdym województwie i w całym kraju. Wskaźniki te wykorzystano do oceny warunków wzrostu roślin w poszczególnych latach, poczynawszy od wczesnej wiosny do początku września.

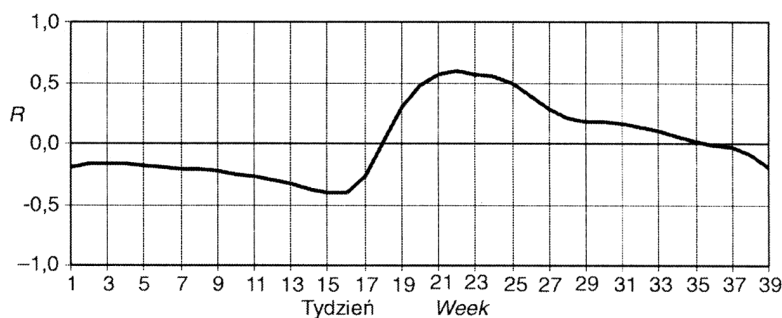
Ponieważ wielkość plonów poszczególnych upraw zależy od warunków pogodowych panujących w okresie wegetacji, a jak już wspomniano wskaźniki VCI i TCI charakteryzują te warunki, dokonano korelacji wskaźników przedstawiających stosunek plonu bieżącego do średniego ze wskaźnikami VCI i TCI zarówno dla obszaru całego kraju jak i dla poszczególnych województw.

Na rycinie 5 przedstawiono wynik korelacji pomiędzy wartością wskaźnika TCI i odchyleniem wielkości aktualnych plonów od wielkości średniej dla każdego tygodnia okresu wegetacyjnego. Jak wynika z rysunku istnieją dwa ważne okresy, w których współczynnik korelacji osiąga ekstremalne wartości. Najwyższa wartość współczynnika korelacji (korelacja ujemna) przypada na okres pomiędzy 14 i 16 tygodniem oraz pomiędzy 21 i 23 tygodniem (korelacja dodatnia). Korelacja ujemna wskazuje, że niskie plony występują wówczas, gdy wartości wskaźnika TCI są wysokie i na



Ryc. 4. Przebieg opadów, temperatury powietrza i usłonecznienia w Polsce w latach 1991–1998

Fig. 4. Plots of the precipitation, air temperature and sunshine duration curves in Poland in 1991–1998



Rys. 5. Współczynnik korelacji (R) między wartością Y/Y_{mean} i TCI dla tygodni 1–39

Fig. 5. Correlation coefficient (R) of relationship between Y/Y_{mean} and TCI for weeks 1–39

odwrot — wysokie plony są wówczas, gdy wskaźnik *TCI* przybiera małe wartości. Małe wartości wskaźnika *TCI* wiążą się z wartościami radiacyjnej temperatury roślin bliskimi wartościom maksymalnym. Dodatnia korelacja pomiędzy 21 a 23 tygodniem wskazuje, że dla tego okresu wysokie wartości wskaźnika *TCI* są zapowiedzią wysokich plonów. Wtedy aktualna radiacyjna temperatura roślin jest znacznie niższa od maksymalnej jaka wystąpiła w tym okresie.

Zarówno pierwszy okres (14–16 tydzień, kiedy zboża jare znajdują się w fazie kielkowania i wschodzenia, a zboża ozime w fazie krzewienia) jak i drugi (21–23 tydzień, kiedy zboża są w fazie kłoszenia), charakteryzują się szybkim rozwojem roślin i dużym ich zapotrzebowaniem na wodę. Duże wartości wskaźnika *TCI* w pierwszym okresie i małe w drugim wskazują na nieodpowiednią wilgotność gleby, co jest zapowiedzią niskich plonów.

Wskaźnik kondycji roślin *VCI* wykazywał również pewne korelacje z wielkością plonów, lecz nie były one takie silne jak w przypadku termicznego wskaźnika kondycji roślin *TCI*.

W celu oceny warunków wzrostu roślin na podstawie wskaźników roślinnych przeanalizowano przebieg wartości wskaźników *VCI* i *TCI* dla każdego województwa w tygodniach 10–35 w latach 1985–1998 (ryc. 6). Analizując wartości obu tych wskaźników należy pamiętać, że najwyższe plony zbóż były w latach 1990 i 1991, najniższe zaś w latach 1992 i 1994. Rozpatrując wartości termicznego wskaźnika kondycji roślin *TCI* w tych latach można zauważyć, że w pierwszych dwóch spośród wymienionych lat wartości wskaźnika *TCI* różniły się od wartości osiągniętych przez ten wskaźnik w latach 1992 i 1994. Małe wartości wskaźnika *TCI* wczesną wiosną 1990 r. wskazywały na bardzo dobre warunki wzrostu roślin oraz dość dobre warunki panujące później — w maju i czerwcu, podczas gdy w 1991 r. warunki wzrostu wiosną nie były tak dobre jak w 1990, lecz znacznie poprawiły się w maju i czerwcu. Duże wartości termicznego wskaźnika kondycji roślin *TCI* obserwowane wiosną i wczesnym latem 1992 i 1994 r. potwierdzają słabe warunki rozwoju roślinności w tym okresie. Roślinność miała wówczas niską temperaturę radiacyjną. Wartości wskaźnika kondycji roślin *VCI* określone dla tych okresów nie wykazują silnych zależności.

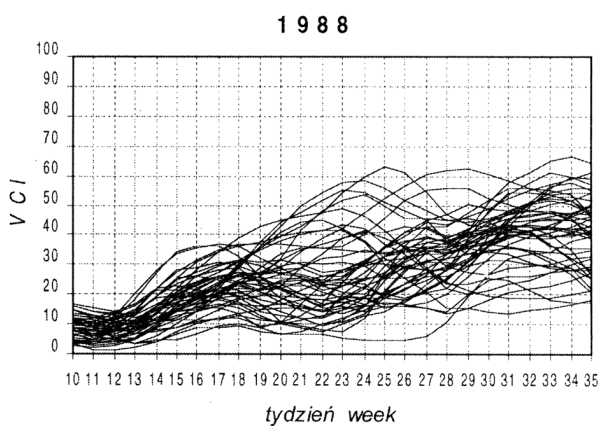
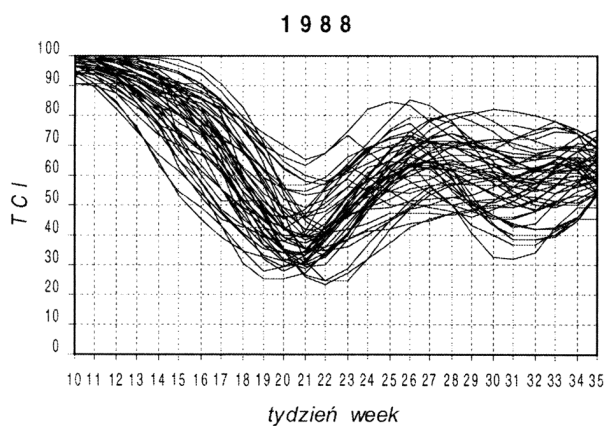
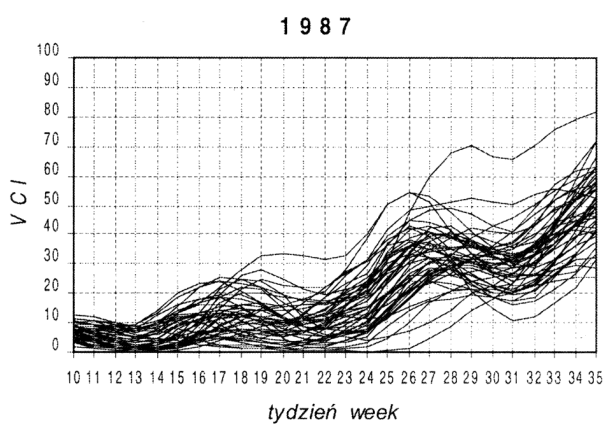
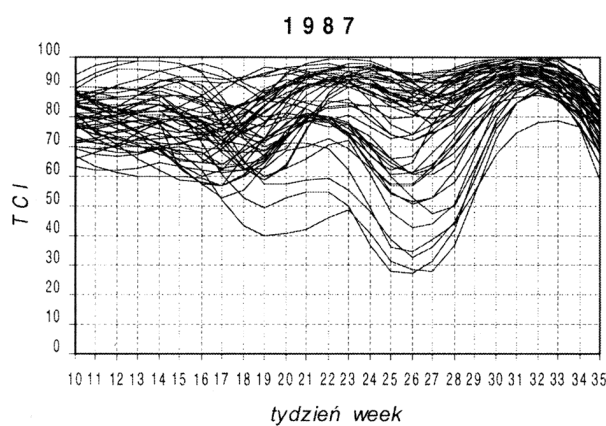
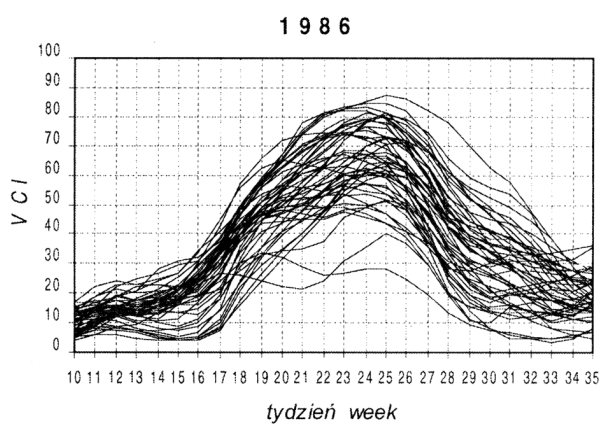
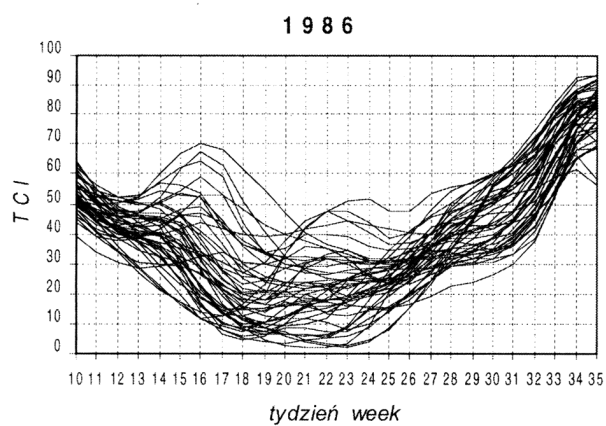
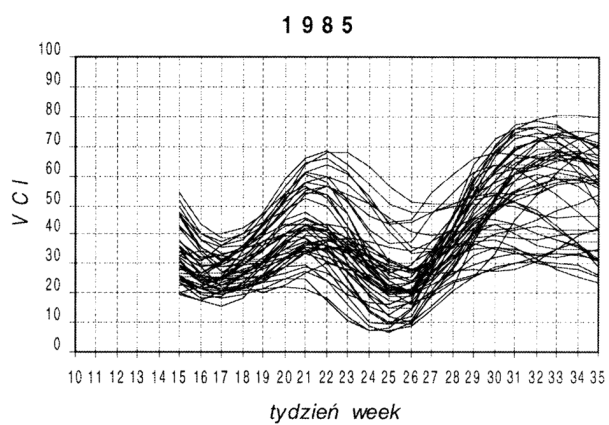
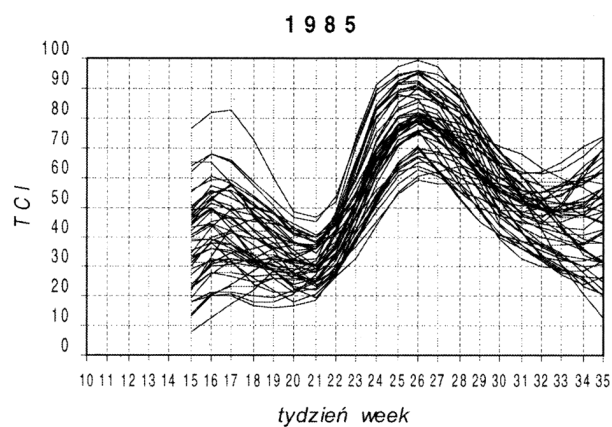
Do dalszej analizy warunków wzrostu roślin na podstawie danych satelitarnych i naziemnych wybrano dwa ekstremalne lata: 1991 ($Y/Y_{sr} = 109\%$) oraz 1992 ($Y/Y_{sr} = 82\%$), a także dwa przeciętne lata: 1997 ($Y/Y_{sr} = 97\%$) oraz 1998 ($Y/Y_{sr} = 103\%$) (Rocznik..., 1999). Rok 1998 jest ostatnim w relacjonowanych badaniach, gdyż w następnym roku dokonano zmiany podziału administracyjnego i dla nowych województw nie było jeszcze wyznaczonych wartości plonów.

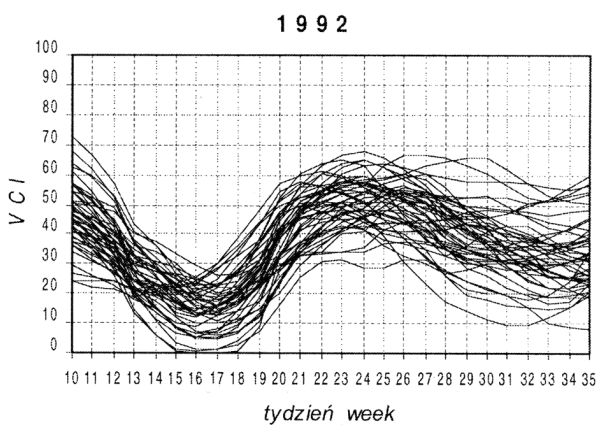
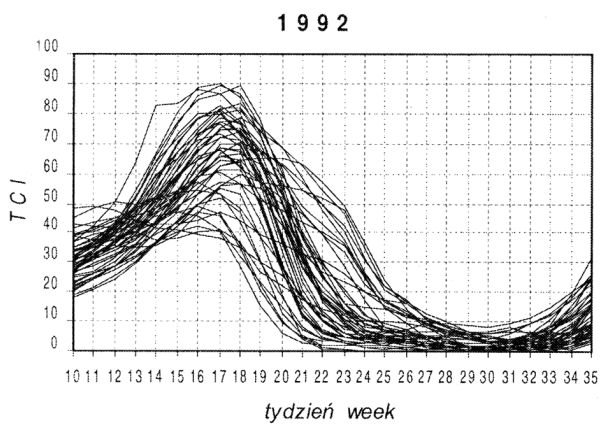
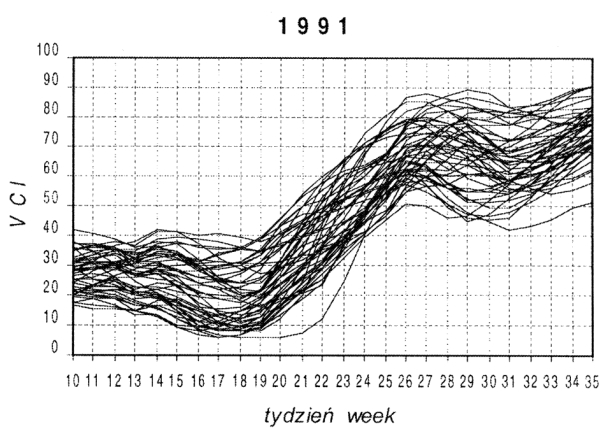
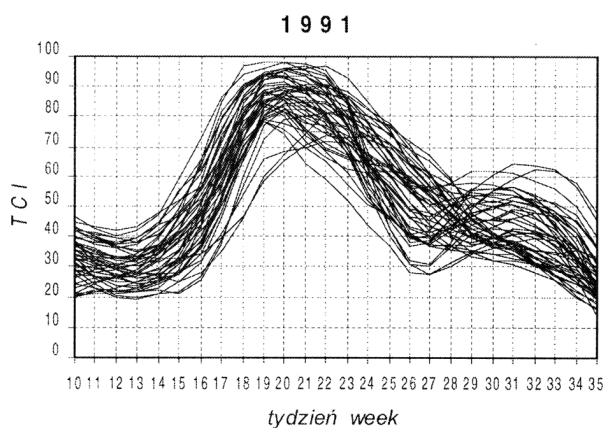
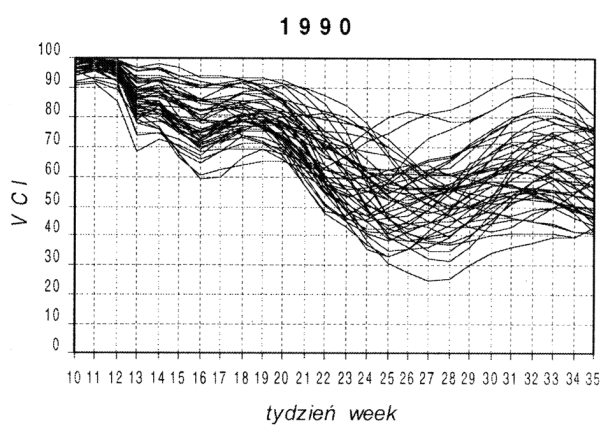
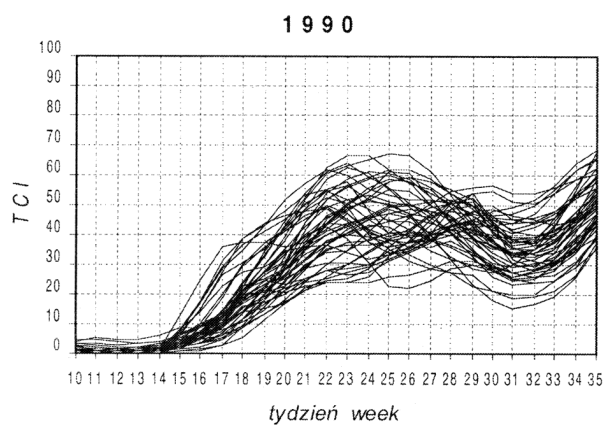
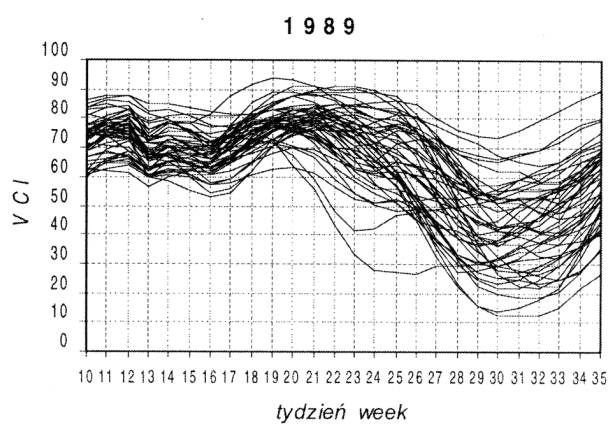
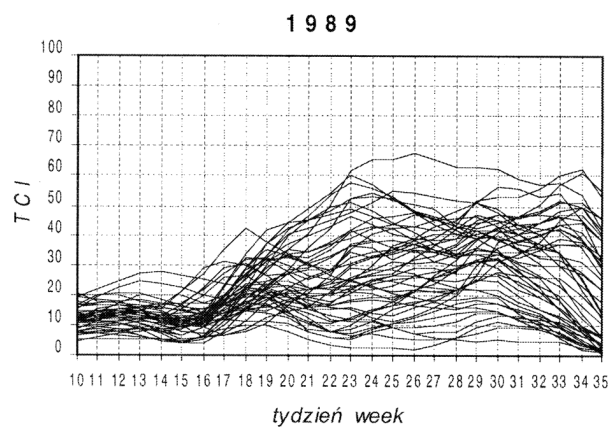
Zróznicowane wartości wskaźnika *TCI* w trakcie okresu wegetacyjnego zostały potwierdzone obserwacjami meteorologicznymi (Biuletyn Agrometeorologiczny, 1991, 1992, 1997, 1998). Na rycinie 7 przed-

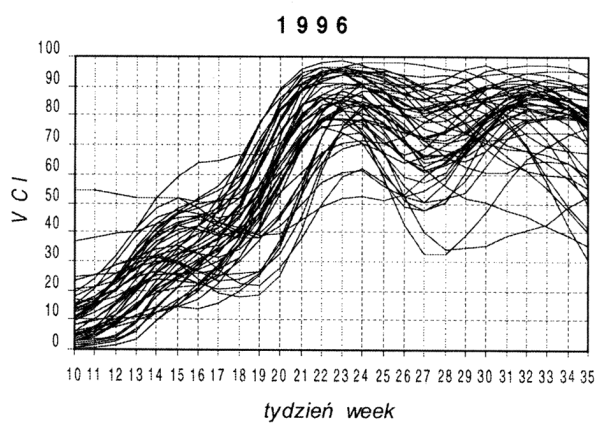
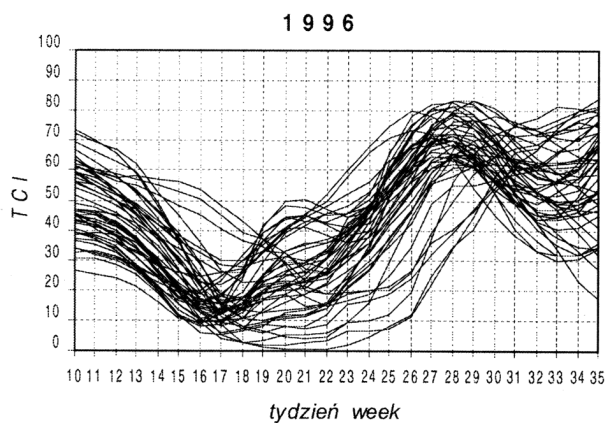
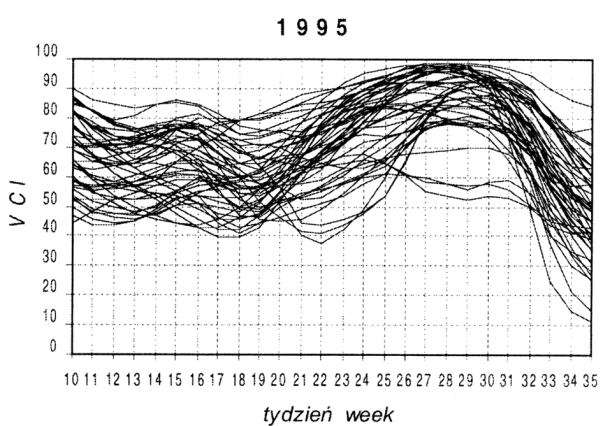
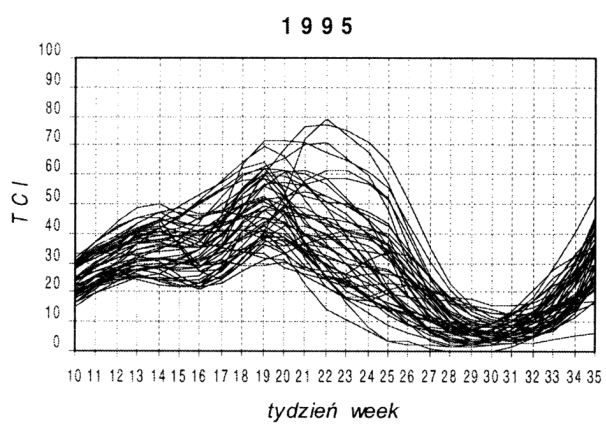
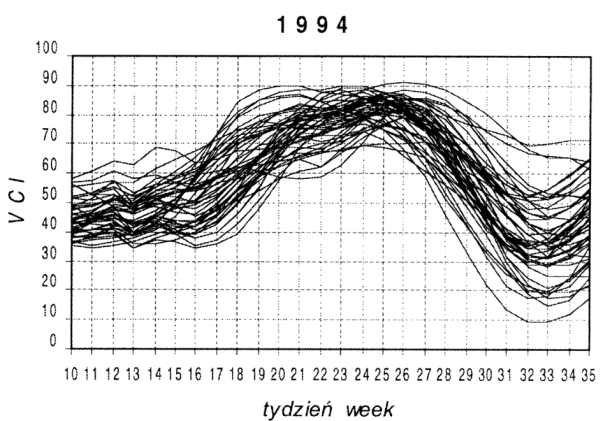
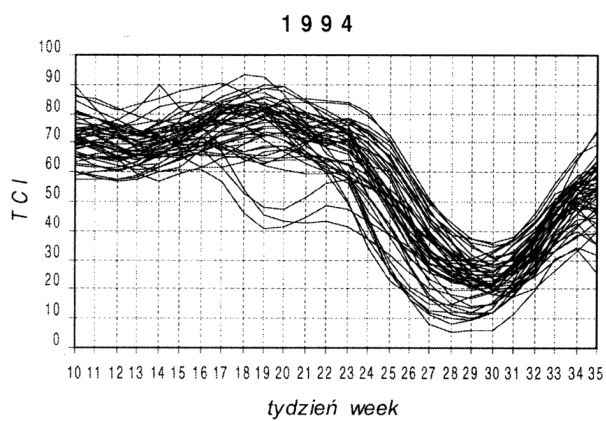
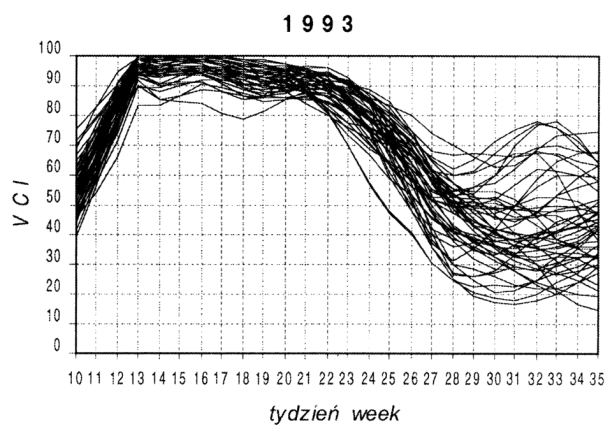
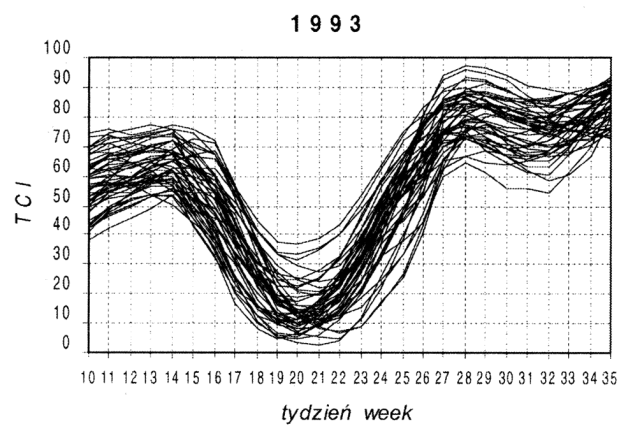
stawiono różnice pomiędzy bieżącą i średnią temperaturą powietrza i wielkością opadów w czterech wybranych latach.

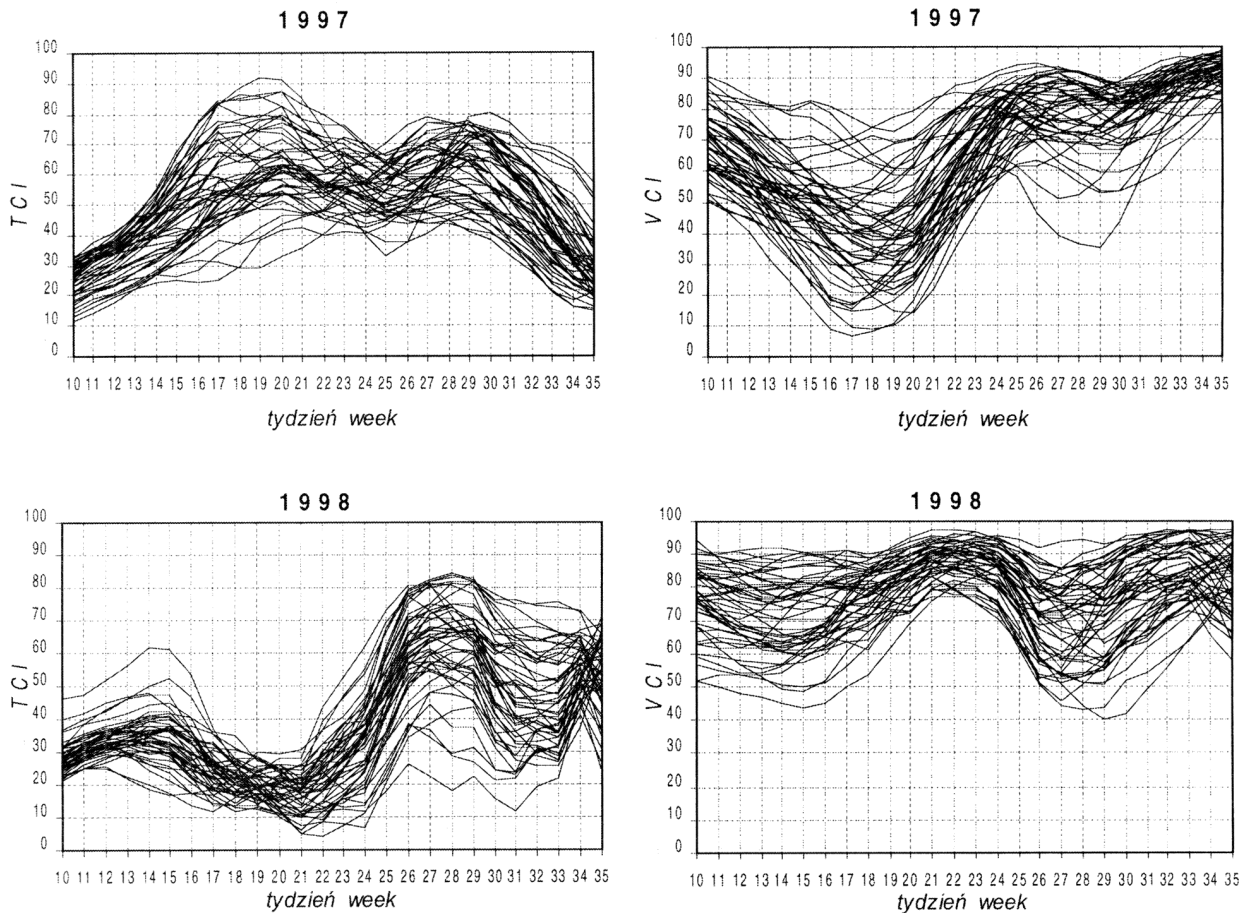
W 1991 r. w pierwszej fazie okresu wegetacji, aż do 14 tygodnia, wskaźnik *TCI* był mały we wszystkich województwach (ryc. 6). W następnych dwóch tygodniach w niektórych województwach wskaźnik ten pozostał w dalszym ciągu na niskim poziomie, ale też w wielu województwach wykazał tendencję wzrostową. Począwszy od tygodnia dziesiątego do dwudziestego trzeciego wskaźnik *TCI* dla większości województw osiągał duże wartości (80–100). Po tym okresie zaczął się on powoli zmniejszać aż do tygodnia trzydziestego piątego. Mała wartość wskaźnika *TCI* do tygodnia szesnastego wskazywała na bardzo dobre warunki wzrostu roślin. Temperatura powietrza była w tym czasie o około 3°C wyższa niż średnia temperatura w Polsce (ryc. 7), świadcząc o dobrych warunkach rozwoju roślin. Równocześnie suma opadów była niższa od średniej (ryc. 7), jednak wilgotność gleby, ze względu na retencję wody w czasie zimy, była wystarczająca. W następnym, krytycznym dla rozwoju roślin okresie (tygodnie 22–25), wartości wskaźnika *TCI* wskazywały, że radiacyjna temperatura roślin była niższa od temperatury maksymalnej. To świadczyło o dobrych warunkach wzrostu roślin. W tygodniach 15–22 temperatura powietrza była niższa od średniej, jednak suma opadów w tygodniach 18–22 znacznie przekraczała średnią (20 mm powyżej średniej w tygodniu 20). To zaowocowało bardzo dobrą wilgotnością gleby w okresie zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę (patrz ryc. 7). W tygodniach 23–26 temperatura powietrza była bliska średniej, zaś suma opadów przekraczała średnią. Z kolei, w tygodniach od dwudziestego szóstego aż do czterdziestego 1991 roku, temperatura powietrza była wyższa od średniej, zaś suma opadów niższa. W tej fazie rozwoju roślin zbożowych zapotrzebowanie na wodę było zmniejszone, gdyż osiągnęły już one stadium dojrzałości.

Zróznicowane wartości termicznego wskaźnika kondycji roślin *TCI* można zaobserwować w 1992 roku (ryc. 6). Na początku okresu wegetacji wskaźnik *TCI* był niski (tygodnie 10–12), jednak począwszy od tygodnia trzynastego zaczął się zwiększać, osiągając maksimum w tygodniach 16–18. W następnych tygodniach wskaźnik *TCI* zaczął spadać, osiągając minimum w niektórych województwach już w dwudziestym drugim tygodniu, zaś we wszystkich województwach spadek wartości tego wskaźnika obserwuje się w tygodniach od dwudziestego szóstego aż do trzydziestego czwartego. Począwszy od trzydziestego czwartego tygodnia wskaźnik *TCI* zaczął ponownie wzrastać. Średnia temperatura powietrza w Polsce w 1992 rok (patrz ryc. 7) na początku okresu wegetacji (do tygodnia 18) była tylko o jeden stopień niższa niż średnia wieloletnia. Taka temperatura pozytywnie wpływała na rozwój zbóż, co wyrażały wysokie wartości wskaźnika *TCI* (powyżej 50 w większości województw). Temperatura powietrza zaczęła wzrastać począwszy od szesnaste-









Ryc. 6. Przebieg wartości wskaźników *TCI* i *VCI* w okresie od 10 do 35 tygodnia w poszczególnych województwach w latach 1985–1998

Fig. 6. Plots of *TCI* and *VCI* curves in the period 10–35 weeks of the year in all voivodships in Poland in 1985–1998

go tygodnia i w tygodniu dwudziestym drugim była już wyższa od średniej wieloletniej o $1,5^{\circ}\text{C}$, osiągając wartość 4°C powyżej średniej w tygodniu trzydziestym drugim. W 1992 roku suma opadów do szesnastego tygodnia była wyższa od średniej wieloletniej dla tego okresu (rys. 7). W następnej fazie wegetacji ilość opadów spadała poniżej średniej i w tygodniach 20–22 była już o około 6 mm niższa, obniżając się aż do tygodnia trzydziestego. Wzrost temperatury i brak opadów spowodował bardzo złe warunki rozwoju roślin, co wyraziło się niskimi wartościami *TCI* (bliskimi 0), podczas gdy temperatura radiacyjna roślinności osiągnęła niemal maksymalne wartości obserwowane w tym okresie (Dąbrowska-Zielińska i inni, 1998).

Zróżnicowane warunki wzrostu roślin wystąpiły w 1997 roku (ryc. 6). Na początku okresu wegetacji (tygodnie 10–13) wartości wskaźnika *TCI* były małe (wartości *BT* były bliskie BT_{\max} w tym okresie), co wskazywało na dobre warunki wzrostu roślin. Temperatura powietrza w całym kraju w tym czasie (tydzień 10) wynosiła 2°C powyżej średniej (ryc. 7). Począwszy od czternastego tygodnia wartości wskaźnika *TCI* zaczęły się zwiększać; różnicując się znacznie pomiędzy poszczególnymi województwami: od małych (około 30) do bardzo dużych (80) w tygodniu szesna-

stym. Ta rozpiętość wartości wskaźnika *TCI* wskazywała, że warunki wzrostu w poszczególnych województwach były bardzo różne, od bardzo dobrych do złych. W późniejszym okresie, w tygodniach 11–18, średnia temperatura powietrza w całym kraju spadała; była ona niższa o 4°C od średniej wieloletniej dla tego okresu (ryc. 7). W dwudziestym drugim tygodniu wskaźnik *TCI* zmieniał się znacznie (40–80), wskazując na zróżnicowane warunki wzrostu zbóż, od średnich do bardzo dobrych. Przed dwudziestym drugim tygodniem temperatura powietrza była niższa od 4°C , zaś suma opadów w tym tygodniu przekraczała średnią o 10 mm. Po dwudziestym drugim tygodniu nastąpiło ocieplenie z opadami wyższymi od przeciętnych, które począwszy od tygodnia trzydziestego drugiego miały charakter opadów intensywne (ryc. 7).

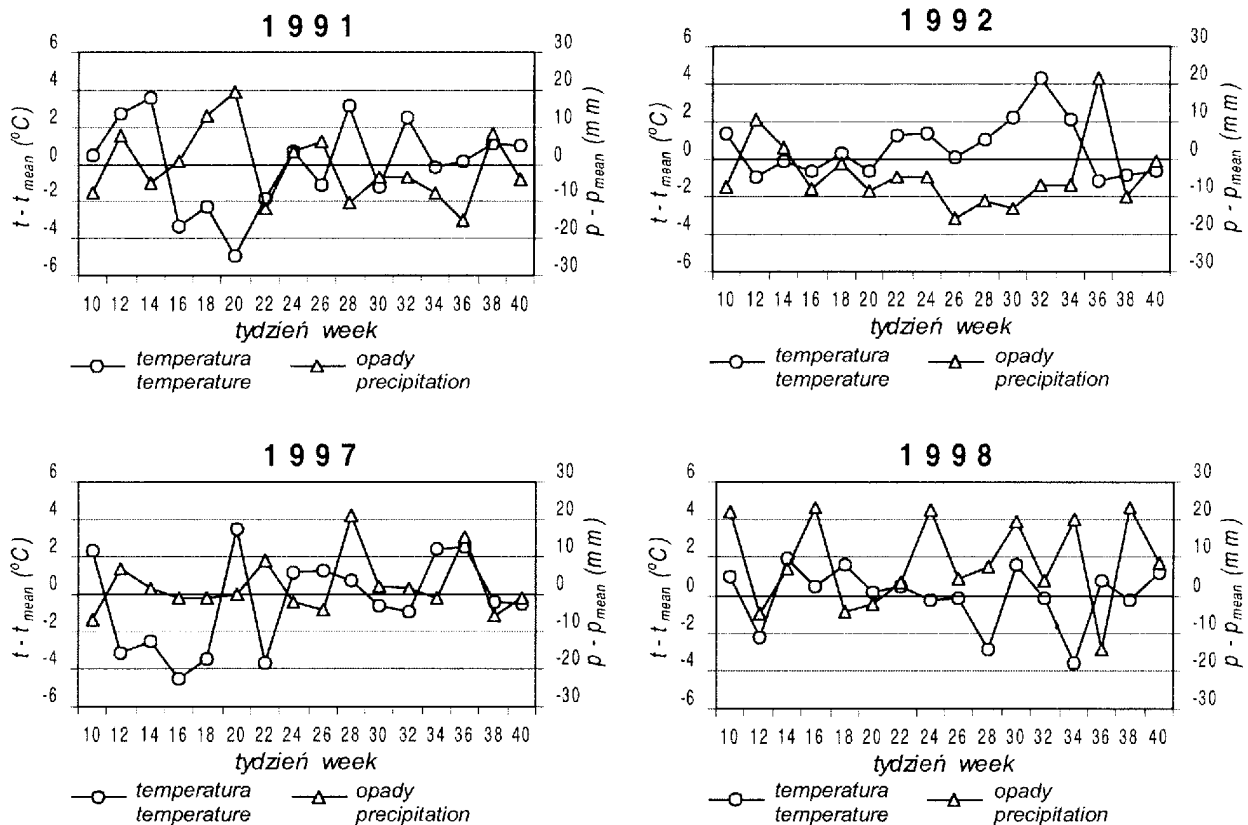
Analizując przestrzenny rozkład wartości wskaźnika *TCI* w szesnastym tygodniu 1997 roku (ryc. 8) można zauważyć, że największe jego wartości (>60 , co oznacza niekorzystne warunki rozwoju roślin) wystąpiły w województwach podlaskim, kieleckim i rzeszowskim, zaś najniższe (30–40) w województwach poznańskim, leszczyńskim i pilskim. Niekorzystne warunki rozwoju roślin wyraziły się niskim plonem w tych województwach. Na przełomie maja i czerwca

(22 tydzień) w większości województw wartości wskaźnika *TCI* wykazywały dobre warunki wzrostu roślin.

Przebieg wskaźnika *TCI* w 1998 roku przedstawia rycina 6. Wczesną wiosną aż do szesnastego tygodnia wskaźnik *TCI* zmieniał się w przedziale od 25 do 50, wskazując na zróżnicowane warunki wzrostu w różnych województwach. Od tego momentu wartości wskaźnika *TCI* zaczęły spadać, wyrównując się w większości województw. Wartości wskaźnika *TCI* poniżej 40 w tym okresie wskazywały na dobre warunki rozwoju zbóż. Temperatura powietrza w kraju

kim jak Polska, położonym w strefie przejściowej między klimatem morskim i kontynentalnym, warunki wzrostu roślin mogą się dość znacznie różnić.

Na rycinach 9 i 10 przedstawiono rozkład wskaźników *TCI* i *VCI* we wszystkich 49 województwach w wybranych 4 latach oraz dwóch tygodniach (16 i 22), reprezentujących najważniejsze okresy rozwoju roślin zbożowych. Na początku sezonu wegetacyjnego 1991 roku (tydzień 16) wskaźnik *TCI* wykazywał znaczne wahania. W większości województw był niższy od 50, wskazując na dobre warunki rozwoju prawie w całym kraju. W środku sezonu (tydzień 22)



Ryc. 7. Różnica między aktualną i średnią temperaturą powietrza oraz aktualną i średnią wielkością opadów w latach 1991, 1992, 1997 i 1998

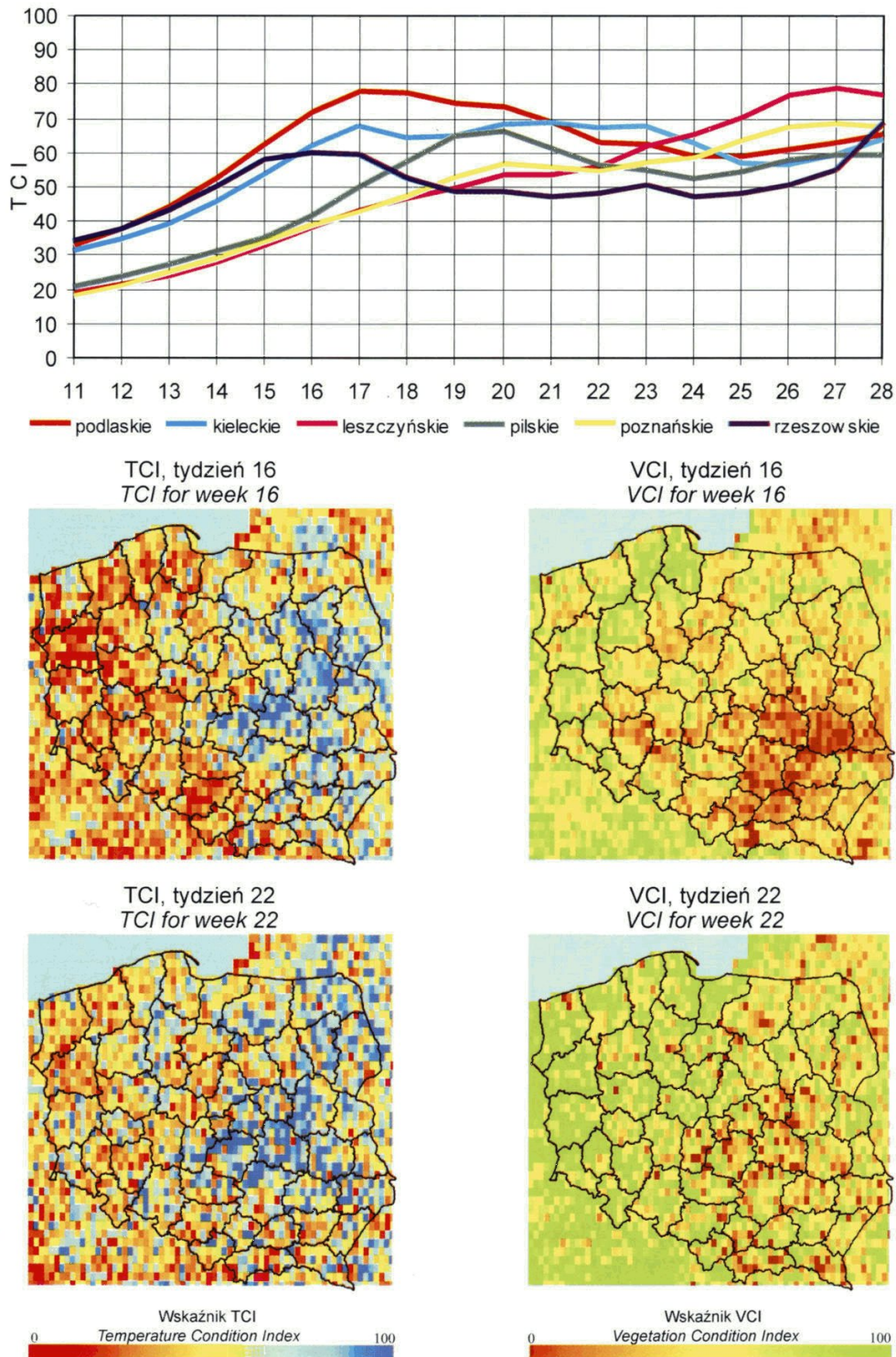
Fig. 7. Difference between current and mean air temperature ($t-t_{mean}$) and current and mean precipitation ($p-p_{mean}$) in 1991, 1992, 1997 and 1998

w dwunastym tygodniu była niższa o 2°C od średniej wieloletniej. Począwszy od szesnastego tygodnia aż do dwudziestego czwartego temperatura powietrza wzrastała, osiągając wartości wyższe od średniej dla tego okresu (ryc. 7). Na początku okresu wegetacji opady były duże (25 mm powyżej średniej w tygodniu szesnastym); w tygodniach 22–36 przekraczały one średnią o 20 mm. Wartości wskaźnika *TCI* w tygodniach 22–24 zmieniały się od 10 do 50, reprezentując różne warunki wzrostu roślin.

Powyzsza analiza wykazuje, że warunki rozwoju roślin zmieniały się znacznie w różnych okresach wegetacyjnych oraz w różnych województwach. Wskazuje to na fakt, że nawet w stosunkowo małym kraju, ta-

wskaźnik *TCI* był wysoki, wskazując także na korzystne warunki wzrostu roślin. W rezultacie, plon zbóż osiągnął wartość najwyższą w całym 14-letnim okresie (ryc. 3).

Odmienne warunki panowały w 1992 roku. Wczesną wiosną wartości wskaźnika *TCI* były bardzo duże w całej Polsce. Niskie temperatury powietrza w marcu i kwietniu wpływały niekorzystnie na rozwój zbóż. W maju i czerwcu w zachodniej i centralnej Polsce wskaźnik *TCI* był wyjątkowo niski, wskazując na termiczny stres roślin, podczas gdy we wschodniej Polsce utrzymywał się na wysokim poziomie, świadcząc o korzystnych warunkach rozwoju. Niekorzystne warunki wzrostu roślin panujące w większości województw Pol-

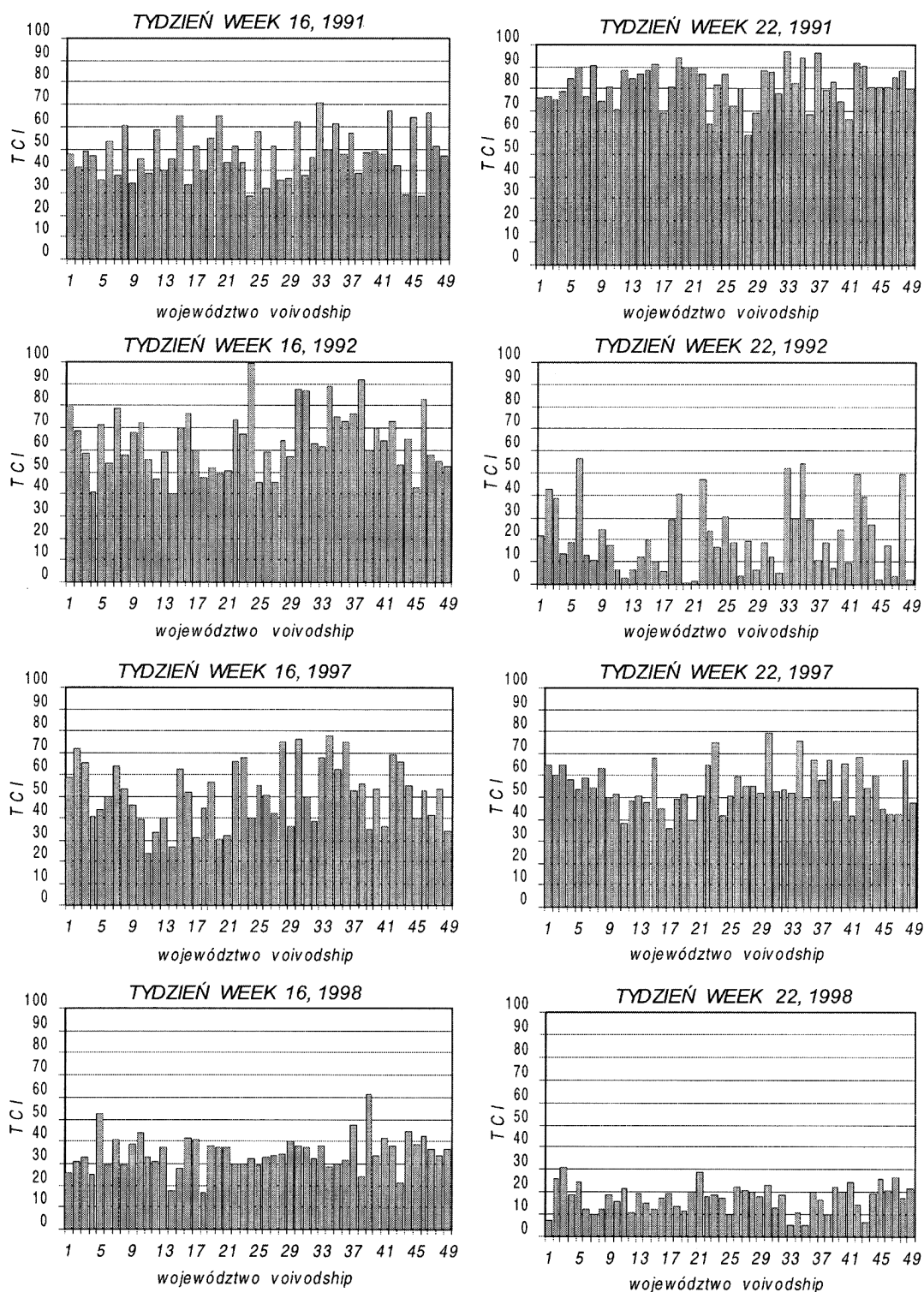


Ryc. 8. Warunki wzrostu roślin w wybranych województwach w tygodniach 16 i 22 1997 r., wyrażone wskaźnikami *TCI* oraz *VCI*
 Fig. 8. Crop growing conditions in 16 and 22 week of 1997 in chosen voivodships expressed by *TCI* and *VCI*

ski wpłynęły na wielkość plonu, który był najniższy w całym 14-letnim okresie.

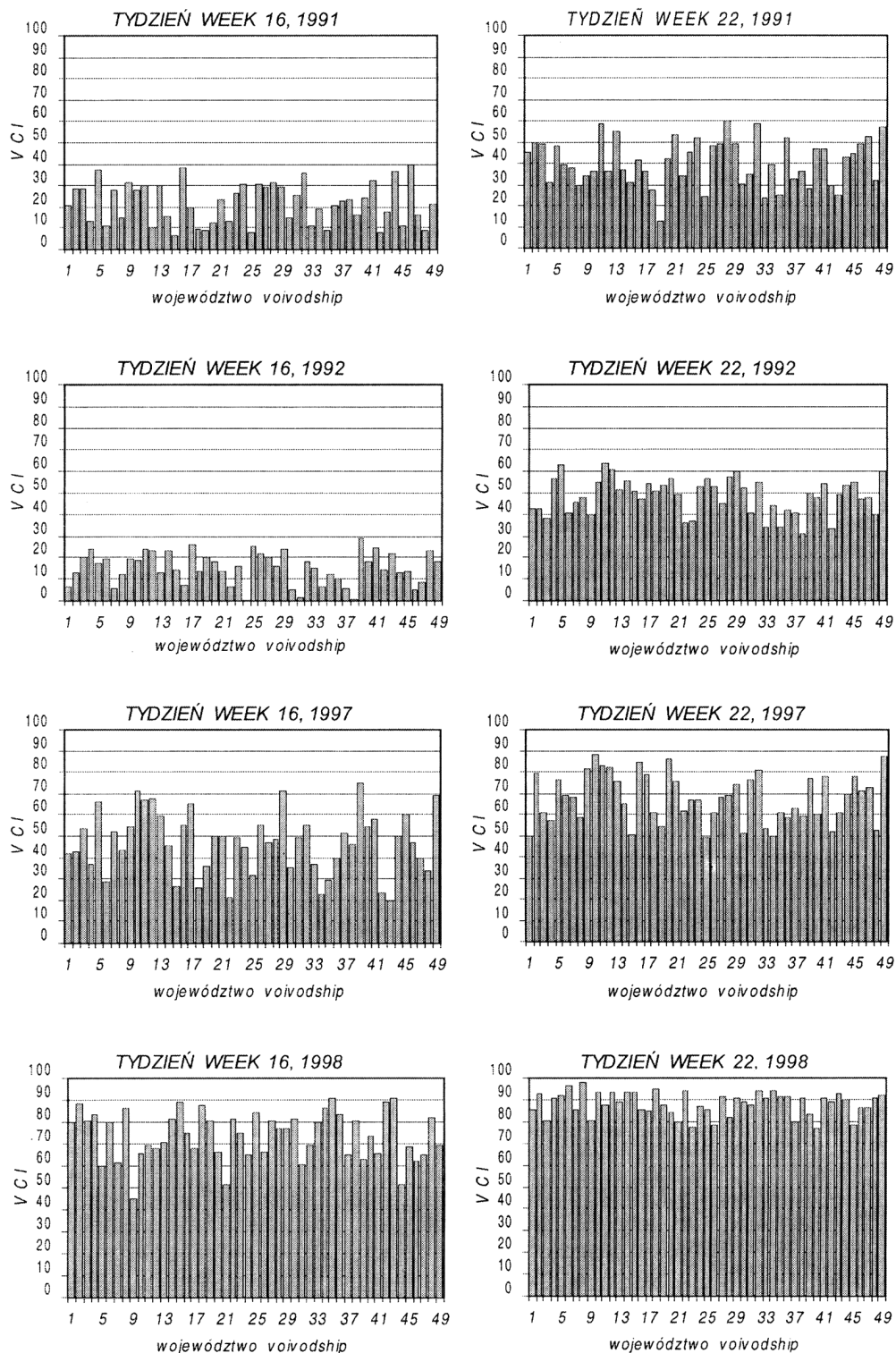
W 1997 roku plon zbóż był bliski średniej wieloletniej (ryc. 3), co potwierdziły wartości wskaźnika *TCI* (około 50). Oznaczało to, że wczesną wiosną 1997 roku warunki wzrostu roślin nie były korzystne. Późną wiosną (tydzień 22) wskaźnik *TCI* osiągał wartość 50, świadcząc o przeciętnych warunkach rozwoju.

Wczesną wiosną 1998 roku w całej Polsce występowały małe wartości wskaźnika *TCI* (poniżej 40), wskazując na ciepłą pogodę i korzystne warunki wzrostu roślin. Późną wiosną (tydzień 22) warunki te pogorszyły się znacznie (w tym czasie małe wartości wskaźnika *TCI* świadczą o złych warunkach rozwoju roślin). Jednakże istotna poprawa warunków nastąpiła w czerwcu, co zawoocowało plonami nieco wyższymi od średniej.



Ryc. 9. Rozkład wartości wskaźnika *TCI* w województwach: w dwóch tygodniach (16 i 22) 1991, 1992, 1997 i 1998 r. reprezentujących najważniejszy okres rozwoju roślin: 1 — warszawskie, 2 — białkopodlaskie, 3 — białostockie, 4 — bielskie, 5 — bydgoskie, 6 — chełmskie, 7 — ciechanowskie, 8 — częstochowskie, 9 — elbląskie, 10 — gdańskie, 11 — gorzowskie, 12 — jeleniogórskie, 13 — kaliskie, 14 — katowickie, 15 — kieleckie, 16 — konińskie, 17 — koszalińskie, 18 — krakowskie, 19 — krośnieńskie, 20 — legnickie, 21 — leszczyńskie, 22 — lubelskie, 23 — łomżyńskie, 24 — łódzkie miejskie, 25 — nowosądeckie, 26 — olsztyńskie, 27 — opolskie, 28 — ostrołęckie, 29 — piłskie, 30 — piotrkowskie, 31 — płockie, 32 — poznańskie, 33 — przemyskie, 34 — radomskie, 35 — rzeszowskie, 36 — siedleckie, 37 — sieradzkie, 38 — skierniewickie, 39 — słupeckie, 40 — suwalskie, 41 — szczecińskie, 42 — tarnobrzeskie, 43 — tarnowskie, 44 — toruńskie, 45 — wałbrzyskie, 46 — wrocławskie, 47 — zamojskie, 48 — zielonogórskie

Fig. 9. *TCI* distribution in all 49 voivodships in Poland in two weeks (16 and 22) in 1991, 1992, 1997 and 1998 representing two the most important periods for crop development



Ryc. 10. Rozkład wartości wskaźnika VCI w poszczególnych województwach w dwóch tygodniach (16 i 22) 1991, 1992, 1997 i 1998 r. reprezentujących najważniejszy okres rozwoju roślin

1 — warszawskie, 2 — białkopodlaskie, 3 — białostockie, 4 — bielskie, 5 — bydgoskie, 6 — chełmskie, 7 — ciechanowskie, 8 — częstochowskie, 9 — elbląskie, 10 — gdańskie, 11 — gorzowskie, 12 — jeleniogórskie, 13 — kaliskie, 14 — katowickie, 15 — kieleckie, 16 — konińskie, 17 — koszalińskie, 18 — krakowskie, 19 — krośnieńskie, 20 — legnickie, 21 — leszczyńskie, 22 — lubelskie, 23 — łomżyńskie, 24 — łódzkie miejskie, 25 — nowosądeckie, 26 — olsztyńskie, 27 — opolskie, 28 — ostrołęckie, 29 — piłskie, 30 — piotrkowskie, 31 — płockie, 32 — poznańskie, 33 — przemyskie, 34 — radomskie, 35 — rzeszowskie, 36 — siedleckie, 37 — sieradzkie, 38 — skierniewickie, 39 — słupskie, 40 — suwalskie, 41 — szczecińskie, 42 — tarnobrzeskie, 43 — tarnowskie, 44 — toruńskie, 45 — wałbrzyskie, 46 — wrocławskie, 47 — wrocławskie, 48 — zamojskie, 49 — zielonogórskie.

Fig. 10. VCI distribution in all 49 voivodships in Poland in two weeks (16 and 22) in 1991, 1992, 1997 and 1998 representing two the most important periods for crop development

Wskaźnik *VCI* nie przedstawia powyższych zależności wyraźnie, jednakże zaobserwowano, że może być on użyteczny do określania warunków przezimowania roślin.

Warunki przezimowania roślin

Przeważającym typem zbóż w Polsce są zboża ozime (żyto i pszenica). Ocena warunków ich przezimowania ma zasadnicze znaczenie dla prognozy produkcji zbóż. Teledetekcja satelitarna może dostarczyć ważnych informacji również na ten temat.

W celu określenia zasięgu pokrywy śnieżnej w Polsce podczas zim w latach 1996 i 1997 przeanalizowano wskaźnik zieleni *VCI*. Te dwie zimy charakteryzowały się niskimi temperaturami, lecz różnym stopniem pokrycia śniegiem. Na zdjęciach satelitarnych zaobserwowano, że w 1996 roku w większości województw, z wyjątkiem województw zachodnich (zielonogórskie, gorzowskie, szczecińskie), wartości *VCI* w pierwszych tygodniach roku (1–12) były raczej małe, od bliskich 0 do 20 (ryc. 11b). Małe wartości tego wskaźnika były spowodowane występowaniem pokrywy śnieżnej. Jednakże w trzech wyżej wymienionych województwach wartości wskaźnika *TCI* dla pierwszych 7 tygodni były wyższe, osiągając wartość 60 (ryc. 11a), co zinterpretowano jako brak pokrywy śnieżnej. Tę informację potwierdziły pomiary naziemne prowadzone przez Służbę Meteorologiczną. Zima w 1996 roku trwała długo, aż do trzynastego tygodnia (rozwój roślinności opóźnił się o 4–5 tygodni), po czym ruszyła szybka wegetacja roślin. Począwszy od tygodnia czternastego warunki wzrostu roślin były bardzo dobre (wartości wskaźnika *VCI* osiągały prawie maksimum), co ilustruje także rycina 11b.

W tygodniach 10–13 wartości wskaźnika *TCI* zaczęły spadać we wszystkich województwach, co wskazywało na wzrost temperatury gleby i roślin, która osiągnęła prawie maksimum dla tego okresu. W czasie zwiększonego zapotrzebowania roślin na wodę (tygodnie 16–18) wartości wskaźnika *TCI* w większości województw mieściły się w zakresie 10–35, co wskazywało, że temperatura roślin była bliska optymalnej temperaturze rozwoju, a zatem dochodziła do maksymalnych wartości obserwowanych w tej porze roku (ryc. 11a). W tygodniach 20–24 wartości wskaźnika *TCI* wahały się w poszczególnych województwach od bardzo małych, wskazujących na warunki suszy (gdy temperatura roślin osiągała maksimum dla tego okresu), aż do warunków bardzo dobrych, wyrażonych niską temperaturą oraz wskaźnikiem *TCI* w zakresie 40–50.

Zima na przełomie lat 1996/97 odznaczała się brakiem śniegu i bardzo niską temperaturą. Rozpatrując rozkład wskaźnika *VCI* można zaobserwować, że jego wartości w tygodniach pierwszym do siódmego mieściły się w zakresie 30–90. Istnieje wyraźna różnica w wartościach wskaźnika *VCI* pomiędzy dwoma grupami województw (ryc. 11d). Ten rysunek przedstawia war-

tości wskaźnika *VCI* zagregowane dla wszystkich województw. Województwa, dla których przebieg wskaźnika *VCI* przedstawiają dolne linie na wykresie (patrz ryc. 11d), charakteryzują się niskimi jego wartościami, z tendencją do lekkiego wzrostu począwszy od 1–4 tygodnia. W tych województwach rzeczywiste wartości wskaźnika *NDVI* były bliskie wartościom reprezentującym pokrywę śnieżną ($NDVI_{min}$) w okresie ostatnich 12 lat (dotyczy to województw południowych: krakowskiego, tarnowskiego, katowickiego, rzeszowskiego, wałbrzyskiego, nowosądeckiego, przemyskiego, opolskiego, krośnieńskiego, jeleniogórskiego, bielskiego). Wzrost wartości wskaźnika *VCI* do 80 w ósmym tygodniu wskazuje, że od tego momentu pokrywa śnieżna już nie występowała. Te wnioski zostały potwierdzone przez Służbę Meteorologiczną (Biuletyn Agrometeorologiczny, 1996, 1997). Grubość pokrywy śnieżnej w tych obszarach osiągała 30 cm w pierwszych tygodniach roku i zmniejszyła się do 0 w ósmym tygodniu. Inna sytuacja występowała w województwach reprezentowanych na wykresie przez grupę górnych linii. Wskaźnik *VCI* był tu wysoki z powodu braku pokrywy śnieżnej, ponieważ wartości *NDVI* były znacznie wyższe (dotyczyło to województw zachodnio-centralnych: radomskiego, zielonogórskiego, skierniewickiego, pilskiego, piotrkowskiego, gorzowskiego, leszczyńskiego, kaliskiego, poznańskiego, sieradzkiego).

Regiony reprezentowane wysokimi wartościami wskaźnika *VCI* znajdowały się w centralnej części Polski. W całym kraju temperatura była bardzo niska, lecz na obszarze bez pokrywy śnieżnej zboża ozime nie przezimowały dobrze. Wnioski te potwierdziły dane Głównego Urzędu Statystycznego. Z powodu braku pokrywy śnieżnej w regionach centralnej Polski plon pszenicy ozimej w 1997 roku był niższy o 4,8%, co spowodowało niższe zbiory o około 1,9 miliona ton w porównaniu z 1996 roku (Wyniki..., 1997).

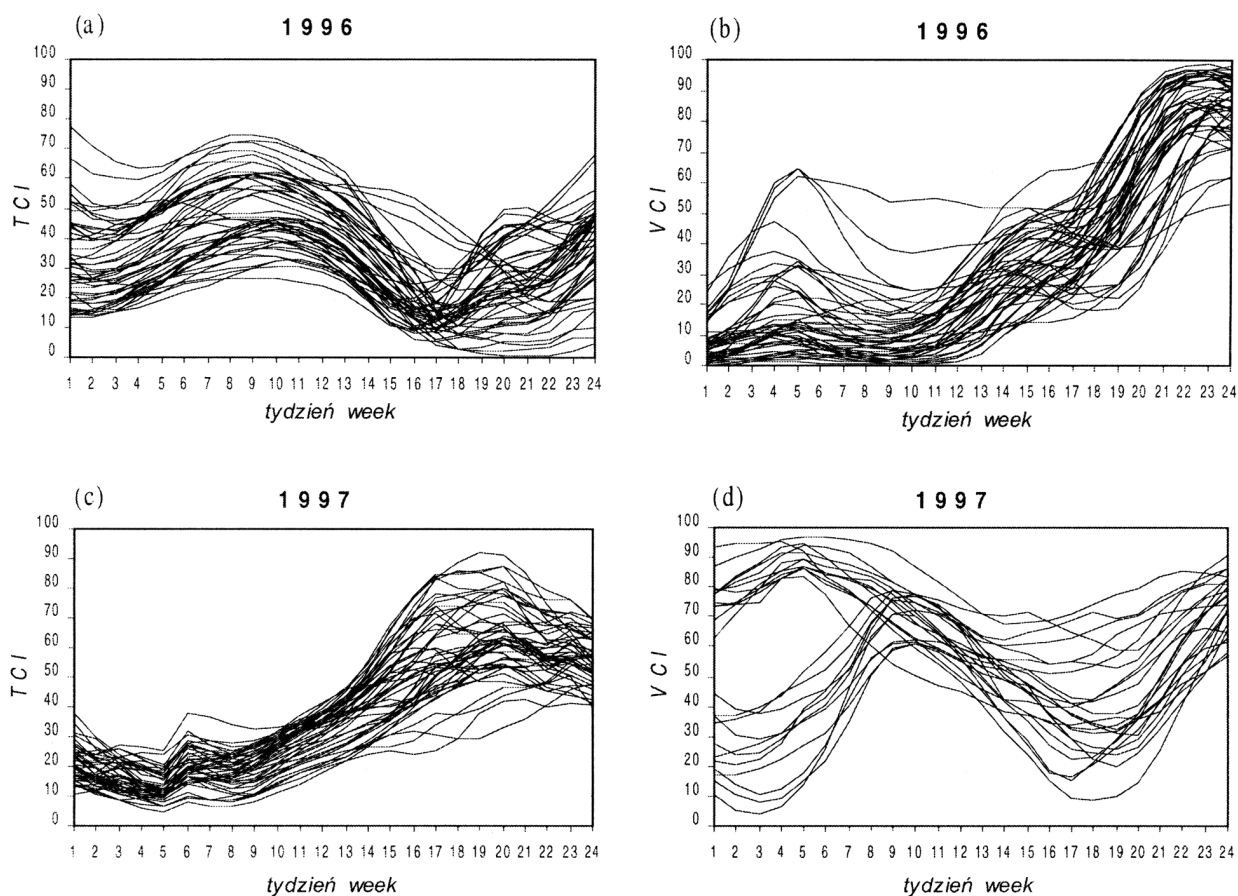
Zastosowanie teledetekcji satelitarnej do prognozowania plonów zbóż

Analiza wartości wskaźnika *TCI* w różnych latach, na początku oraz w środku okresu wegetacyjnego, a także ich dość silna korelacja z plonem zbóż wykazała, że ten wskaźnik można stosować do modelowania plonu zbóż. Prognoza plonów może być wykonana już na początku czerwca, a więc na 4–6 tygodni przed zniwami w Polsce.

Dla każdego z województw przeprowadzono analizę regresji pomiędzy odchyleniem plonu od średniej (Y/Y_{sr}) a wskaźnikiem *TCI* dla tygodni 16 i 22 oraz wskaźnikiem *VCI* dla tygodnia 25. Otrzymano następujące równanie regresji:

$$Y/Y_{sr} = a + b \times TCI_{16} + c \times TCI_{22} + d \times VCI_{25}$$

Ten model wykorzystano do oszacowania plonów w latach 1997 (ryc. 12) oraz w 1998 (ryc. 13). Prognozę wykonano w końcu czerwca, na cztery tygodnie



Rys. 11. Przebieg wartości wskaźników *TCI* i *VCI* w okresie od 1 do 24 tygodnia w poszczególnych województwach w latach 1996 i 1997

Fig. 11. Plots of *TCI* and *VCI* curves in the period 1–24 week of the year in all voivodships in Poland in 1996 and 1997

przed żniwami. Wyniki oszacowania porównano z szacunkiem plonów Głównego Urzędu Statystycznego, opublikowanym w końcu 1998 roku (*Wyniki...*, 1998). Średni błąd oszacowania plonów zbóż dla 49 województw wyniósł 3,82%. Dla siedemnastu województw błąd ten był mniejszy od 5%, zaś dla dziesięciu przekraczał 10%. Duży błąd wystąpił w przypadku województw górzystych, pokrytych w znacznym stopniu lasami oraz województw przemysłowych.

Podsumowanie i wnioski

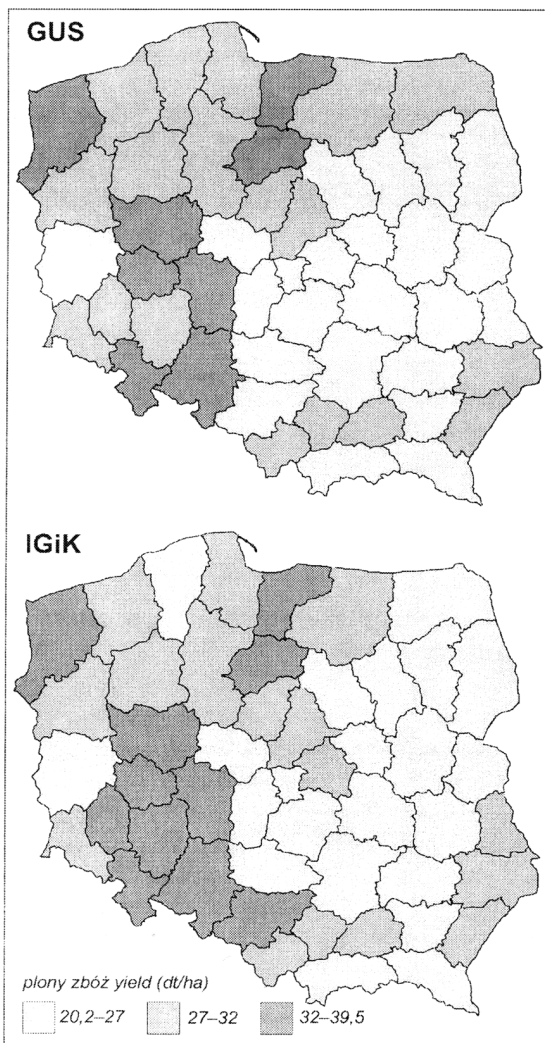
Przeprowadzone prace badawcze wykazały, że wskaźniki roślinne wyznaczone na podstawie zdjęć satelitarnych o niskiej rozdzielczości przestrzennej mogą być z powodzeniem stosowane do szacowania warunków wzrostu roślin także w krajach o normalnych stosunkach wilgotnościowych, a nie tylko na obszarach półpustynnych. Spośród dwóch badanych wskaźników (Wskaźnik Termicznej Kondycji Roślin — *TCI* i Wskaźnik Kondycji Roślin — *VCI*) pierwszy wykazał lepszą korelację z plonem zbóż.

W toku badań wyznaczono dwa okresy rozwoju roślinności, w których wskaźnik *TCI* najlepiej oddawał stan upraw. Te dwa okresy mają decydujący wpływ na wielkość plonów. Pierwszy okres przypada na tygodnie 14–16, zaś drugi na tygodnie 22–25. Ujemna

korelacja pomiędzy plonem i wskaźnikiem *TCI* w pierwszej fazie okresu wegetacji wskazuje, że warunki wiosną są właściwe dla rozwoju roślin i uzyskania wysokich plonów. W tym przypadku temperatura radiacyjna (*BT*) osiągała wartości bliskie maksimum dla tego okresu. Wysoka dodatnia korelacja pomiędzy plonem i wskaźnikiem *TCI* w tygodniach 22–25 wykazuje, iż wysokie wartości *TCI* w tym okresie świadczą o dobrych warunkach wzrostu roślin, odzwierciedlających się wysokim plonem. W tym okresie wysoka temperatura radiacyjna *BT* oznaczałaby niekorzystne warunki rozwoju roślin.

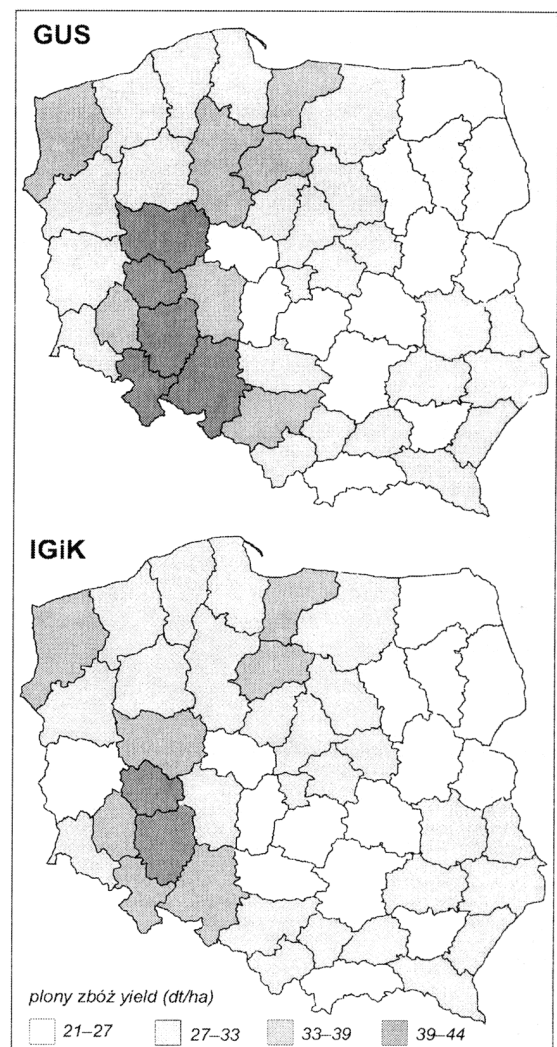
Powyższe wnioski zostały potwierdzone obserwacjami meteorologicznymi wykonywanymi na ograniczonej liczbie punktów oraz pomiarami naziemnymi. Oznacza to, iż informacja pochodząca ze zdjęć satelitarnych może w dużym stopniu udoskonalić szacowanie warunków wzrostu roślin, prowadzone dotychczas tylko na podstawie danych meteorologicznych i naziemnych.

Podziękowanie. Zespół badawczy składa podziękowania pracownikom ośrodka NOAA/NESDIS, dzięki którym otrzymano dane satelitarne NOAA/AVHRR dla obszaru Polski, co umożliwiło opracowanie teledetekcyjnej metody oceny stanu roślin uprawnych i szacowania wielkości plonów zbóż.



Ryc. 12. Plony zbóż w Polsce w 1997 r. wg GUS i prognoza plonów opracowana w Instytucie Geodezji i Kartografii (IGiK) na podstawie danych satelitarnych

Fig. 12. Results of cereals yield assessment in 1997 according to the Central Statistical Office (GUS) and performed by the Institute of Geodesy and Cartography (IGiK) on the basis of satellite data



Ryc. 13. Plony zbóż w Polsce w 1998 r. wg GUS i prognoza plonów opracowana w Instytucie Geodezji i Kartografii (IGiK) na podstawie danych satelitarnych

Fig. 13. Results of cereals yield assessment in 1998 according to the Central Statistical Office (GUS) and performed by the Institute of Geodesy and Cartography (IGiK) on the basis of satellite data

Literatura

- Biuletyn Agrometeorologiczny 1991, 1992, 1996, 1997, 1998, IMiGW, Warszawa.
- Dąbrowska-Zielińska K., 1998: *Teledetekcyjne wykrywanie obszarów zagrożenia suszą*, [w:] *II Forum Inżynierii Ekologicznej, Monitoring Środowiska*, Nałęczów, 83–88.
- Dąbrowska-Zielińska K., Kogan F.N., Ciołkosz A., Gruszczynska M., Rączka U., Kowalik W., Jankowski R., 1998: *New methods of drought detection based on NOAA satellites and its impact on agriculture*, ASPRS-RTI Conference.
- Johnson G.E., Achutuni V.R., Thiruvengadachari S., Kogan F., 1993: *The role of NOAA satellite data in drought early warning and monitoring*, [w:] D.A. Wilhite (ed.), *Drought assessment. Management and Planning: Theory and Case Studies*, Kluwer Academic, 31–49.
- Kidwell K.B. (ed.), 1994: *Global Vegetation Index User's Guide*; U.S. Department of Commerce, Tech. Rep. Washington, D.C.
- Kogan F.N., 1987: *Vegetation index for areal analysis of crop conditions*, [w:] W. Lafayette (ed.), *Proceedings of the 18th Conference on Agricultural and Forest Meteorology*, Amer. Meteor. Soc., 103–107.
- Kogan F.N., 1990: *Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas*, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 11, 1405–1419.
- Kogan F.N., 1994: *Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection*, *Adv. Space Res.*, vol. 15, no. 11, 91–100.
- Kogan F.N.; 1995a: *Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA Polar Orbiting Satellite Data*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 76, 655–668.
- Kogan F.N., 1995b: *AVHRR data for detection and analysis of vegetation stress*, [w:] *The 1995 Meteorological Satellite Data Users' Conference*, September, Winchester, UK, 155–162.
- Rao C.R.N., Chen J., 1995: *Inter-satellite calibration linkages for the visible and near-infrared channels of the Advanced*

Very High Resolution Radiometer on the NOAA-7, -9, and -11 spacecrafts, Int. J. Remote Sens., vol. 16, 1931–1942.
Rocznik Statystyczny RP, 1999, GUS, Warszawa.
 Unganai L.S., Kogan F.N., 1998: *Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data*, Remote Sensing of Environ., vol. 63, 219–232.
 Van Dijk A., Callis S.L., Sakamoto C.M., Decker W.L., 1987: *Smoothing vegetation index profiles: An alternative method*

for reducing radiometric disturbance in NOAA/AVHRR data, Photogr. Engin. Rem. Sens., vol. 53, 1059–1067.
 Weinreb M.P., Hamilton G., Brown S., 1990: *Nonlinearity correction in calibration of the Advanced Very High Resolution Radiometer infrared channels*, J. Geophys. Res., vol. 95, 7381–7388.
Wyniki produkcji roślinnej 1996, 1997 i 1998, GUS, Warszawa.



Dr hab., prof. IGIK Katarzyna Dąbrowska-Zielińska jest kierownikiem Zakładu Teledetekcji (OPOLiS) w Instytucie Geodezji i Kartografii. Tytuł doktora filozofii otrzymała na Australijskim Narodowym Uniwersytecie w Canberze, gdzie prowadziła badania nad zastosowaniem zdjęć NOAA do lasów eukaliptusowych.

W 1995 roku otrzymała stypendium Fulbrighta i prowadziła badania w USA w Phoenix i na Uniwersytecie Tucson dotyczące modelowania wielkości plonów z zastosowaniem danych meteorologicznych i teledetekcyjnych. W OPOLiS zajmuje się prognozowaniem plonów oraz określaniem warunków wzrostu roślin z zastosowaniem informacji pochodzących z sensorów optycznych i mikrofalowych.

Instytut Geodezji i Kartografii, ul. Jasna 2/4, 00-950 Warszawa; e-mail: kasia@igik.edu.pl



Prof. dr hab. Andrzej Ciołkosz pracuje w Instytucie Geodezji i Kartografii. Jest Sekretarzem Naukowym w Instytucie Geodezji i Kartografii. Wykłada również na Wydziale Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego w Zakładzie Teledetekcji Środowiska. Główne zainteresowania naukowo-badawcze to:

wykorzystanie teledetekcji w badaniach środowiska geograficznego; zastosowanie obrazów satelitarnych w badaniu uszkodzeń lasów iglastych, a także w szacowaniu plonów głównych roślin uprawnych oraz kartowaniu użytkowania ziemi na podstawie zdjęć lotniczych i satelitarnych. Opublikował ponad 100 oryginalnych prac naukowych. Jest również autorem i współautorem licznych podręczników akademickich z zakresu teledetekcji i fotointerpretacji; e-mail: ciolkosz@igik.edu.pl



Mgr inż. Wanda Kowalik, absolwentka Wydziału Mechaniki, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Od roku 1996 zatrudniona w Zakładzie Tele-

detekcji Instytutu Geodezji i Kartografii. Zajmuje się nowoczesnymi technikami numerycznego przetwarzania obrazów satelitarnych i ich zastosowaniem w badaniach środowiska przyrodniczego.



Dr inż. Maria Gruszczyńska ukończyła studia na Wydziale Melioracji Wodnych Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie w 1976 r. Pracę magisterską pt. *Hydrologiczna interpretacja zdjęć lotniczych terenów przyległych do projektowanego zbiornika wodnego* wykonała w Instytucie Budownictwa Melioracyjnego i Rolniczego pod kierunkiem doc. dr

hab. Reginy Poźniak. Od 1976 r. pracuje w Instytucie Geodezji i Kartografii w OPOLiS. Zajmuje się wykorzystaniem technik teledetekcji w rolnictwie i ochronie środowiska. W latach 1992–1999 brała udział m.in. w trzech projektach badawczych Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) dotyczących wykorzystania zdjęć radarowych w badaniach rolniczych. W 2000 r. Rada Naukowa IGIK podjęła uchwałę o nadaniu stopnia doktora.

Instytut Geodezji i Kartografii, ul. Jasna 2/4, 00-950 Warszawa; e-mail: mary@igik.edu.pl