

System Wczesnego Ostrzegania przed zagrożeniem występowania niedoborów wody na obszarach rolniczych na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA

Early Warning System against the threat of water deficiency based on NOAA satellite images for agricultural areas

Katarzyna DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA

The Early Warning System against the threat of water deficiency has been created with the use of NOAA/AVHRR data as the main source of information due to their high temporal resolution and broad spectral range. Drought is one of the major disasters effecting agriculture in Poland. During the drought years the production drops significantly. Drought in 1992 reduced grain yield (24.0 q/ha) about 30% comparing to 1991 (32.0 q/ha). Therefore early detection and monitoring of the drought expansion have been considered as a very important component in the Early Warning System. Information about drought can be obtained from ground observation (meteorological data and crop observation survey). This information comes from relatively low-density network and quite often is not available early enough in order to make accurate estimates of crop production. In this research for drought monitoring the long term database of low-resolution satellite data (AVHRR/NOAA) has been applied. The AVHRR data were collected from the Global Vegetation Index (GVI) set during the period 1985–1999. The GVI is produced by sampling and mapping the 4-km daily radiance in the VIS (Ch1, 0.58–0.68 μm), NIR (Ch2, 0.72–1.1 μm), and two thermal bands (Ch4, 10.3–11.3 μm ; and Ch5, 11.5–12.5 μm) measured on board of NOAA polar-orbiting satellites, to a 16-km map. In order to minimize cloud effects, these maps, including the NDVI, solar zenith angle and satellite scan angle, have been the composite over a 7-day period by saving those values that have the largest difference between VIS and NIR reflectance for each map cell. The weekly GVI data from April 1985 through November 1988 for NOAA-9, from December 1988 through September 1994 for NOAA-11 and from January 1995 through present for NOAA-14 have been used for the project. The AVHRR data collected in the first two channels have been used to calculate a Normalised Differential Vegetation Index NDVI and the data obtained in the channels 4 and 5 have been used to calculate Brightness Temperature (BT) of the objects. To obtain a clear image of the whole country

a special process has been applied to create a mosaic on weekly or decade basis. On the basis of GVI, Vegetation Condition Index (VCI) calculated from NDVI values and Temperature Condition Index (TCI) calculated from (BT), values have been obtained for each week in the course of 15 years. After smoothing, NDVI and BT values were normalised to the range of their change in the database as follows:

$$\begin{aligned} \text{VCI} &= 100 \cdot (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{min}}) / (\text{NDVI}_{\text{max}} - \text{NDVI}_{\text{min}}) . \\ \text{TCI} &= 100 \cdot (\text{BT}_{\text{max}} - \text{BT}) / (\text{BT}_{\text{max}} - \text{BT}_{\text{min}}) . \end{aligned}$$

where: NDVI, NDVI_{max}, and NDVI_{min} are the smoothed weekly NDVI, its multiyear absolute maximum and minimum respectively; BT, BT_{max} and BT_{min} are similar values for temperature derived from Channel four (Ch4) data. These indices change from 0 to 100 reflecting changes in vegetation conditions from extremely poor to optimal. Both indices characterise the status of crop development. The drought in 1992 has been well characterized by TCI index. The NOAA satellite receiving station of High Resolution Picture Transmission (HRPT) with the resolution of 1.1 \times 1.1 km has been installed in the Institute of Geodesy and Cartography. For each of this pixel the Normalized Vegetation Index (NDVI) has been calculated. Temperature corrected for the absorption by atmospheric water vapor has been used for calculations of water stress indices. Water stress index has been developed from the data on evapotranspiration, which was calculated as a residual from the energy budget equation:

$$\text{LE} = \text{RN} - \text{H} - \text{G},$$

where:

LE — the rate of loss of latent heat by evapotranspiration [Wm^{-2}];

RN — the rate of net gain of heat from radiation [Wm^{-2}];

H — the rate of loss of sensible heat by convection [Wm^{-2}];

G — the rate of loss heat into the ground (measured or statistically obtained from met data) [Wm^{-2}].

The values of the rate of loss of sensible heat by convection (H) have been calculated as follows:

$$H = [p \cdot C_p \cdot (T_s - T_a)] / r_a$$

where: p — air density [kg m^{-3}];

C_p — specific heat of air [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$];

T_s — surface temperature extracted from NOAA/AVHRR images and corrected due to atmospheric water vapor [$^{\circ}\text{C}$];

T_a — air temperature measured at the study area [$^{\circ}\text{C}$];

r_a — air resistance for heat transfer [sm^{-1}].

The drought in 1992 has been well described by NOAA/AVHRR data.

W Instytucie Geodezji i Kartografii trwają prace nad systemem wczesnego wykrywania suszy, monitorowania jej rozwoju, jak również monitorowania obszarów, na których wystąpiło nadmierne uwilgotnienie gleb spowodowane opadami oraz podsięciem wód gruntowych. Celem systemu jest ocena, przy wykorzystaniu metod teledetekcji, stanu roślin uprawnych na obszarach rolniczych. Może on być również zastosowany do oceny zagrożenia pożarowego lasów. Wdrażany do operacyjnego działania, system ma na celu przekazywanie szybkiej informacji o występowaniu stresu roślin, związanego z niedoborem wody, oraz informacji o aktualnym stanie rozwoju roślin i wielkości spodziewanych plonów głównych upraw.

W klimatycznych warunkach Polski susze wywołują duże szkody w roślinach, powodując znaczne obniżenie plonów. Susza bezpośrednio wywołana jest zakłóceniem bilansu wodnego. Na zakłócenie to wpływa susza atmosferyczna spowodowana niedoborem opadów, susza glebowa spowodowana nadmiernym wysuszeniem gleb oraz susza hydrologiczna powodująca obniżenie poziomu wód gruntowych. W ostatnim czterdziestolecu susze o dużym gospodarczym znaczeniu wystąpiły w latach 1951, 1953, 1959, 1963, 1964, 1969, 1971, 1976, 1982, 1988, 1989, 1990, 1992. Największa była susza w roku 1992 (Czaplak, 1996) powodująca zmniejszenie plonów zbóż ozimych o 15%, a zbóż jarych o 20%.

Do określenia suszy atmosferycznej i w jej wyniku suszy glebowej służą pomiary temperatury powietrza oraz pomiary opadów. Ze względu na złożoność przyczyn powstawania i skutków oddziaływania na produkcję roślinną susz atmosferycznych i glebowych w literaturze podaje się różne kryteria susz, w zależności od czynników atmosferycznych. Nie można jednak jednoznacznie określić, ile dni bez opadów wywołuje zjawisko suszy. Prace na ten temat prowadzili: A. Schmuck (1969), Z. Kaczorowska (1962), S. Bac (1970) i C. Koźmiński (1986).

Do określenia suszy atmosferycznej wpływającej na produkcję roślinną stosuje się tzw. współczynnik suchości będący różnicą opadu i ewapotranspiracji (P-E) lub ilorazem opadu do ewapotranspiracji. P-E. Trudnością tej metody jest uzyskanie wartości ewapotranspiracji. Metody teledetekcyjne mogą dostarczyć informacji, które pozwolą na określenie niekorzystnych warunków wzrostu roślin wywołanych suszą. Metoda szacowania ewapotranspiracji i wilgotności gleb dla obszarów łąk, na podstawie danych uzyskanych ze zdjęć satelitarnych NOAA została przedstawiona przez K. Dąbrowską-Zielińską (1995).

W utworzonym systemie, głównym źródłem informacji są dane teledetekcyjne, uzupełniane okresowo wynikami obserwacji meteorologicznych. Za pomocą tego systemu prowadzona jest analiza stanu roślin w ciągu całego okresu wegetacji, oraz ciągłe porównywanie aktualnego stanu roślin z sytuacją w minionym tygodniu, z tym samym okresem ubiegłego roku i ze stanem wieloletnim. System informuje, w jakiej części kraju mogą wystąpić niedobory wody na wiosnę spowodowane brakiem pokrywy śniegu.

Aby System Wczesnego Ostrzegania miał charakter systemu operacyjnego, obejmującego obszar całego kraju, musi on być oparty na informacjach pochodzących z satelitów synoptycznych, o dużej częstotliwości rejestrowania danych i stosunkowo niewielkich kosztach pozyskiwania tych informacji. Zdjęcia satelitarne powinny umożliwić wykrycie początkowego stadium stresu roślin spowodowanego brakiem wody, tak aby w krótkim czasie można było przedsięwziąć odpowiednie środki zaradcze. Spośród wszystkich satelitów dostarczających zdjęć powierzchni globu ziemskiego najbardziej odpowiednimi do wykorzystania w proponowanym Systemie Wczesnego Ostrzegania są satelity serii NOAA.

Charakterystyka satelitów serii NOAA/TIROS

Satelity wchodzące w skład serii NOAA/TIROS zostały skonstruowane na potrzeby służb meteorologicznych. Jednak od pewnego czasu z coraz większym powodzeniem są one wykorzystywane w badaniach roślinności, w tym także w badaniach z zakresu rolnictwa. Satelity serii NOAA/TIROS są obecnie jedynymi satelitami wyposażonymi w radiometry rejestrujące promieniowanie widzialne, a także bliską, średnią i daleką podczerwień z rozdzielczością przestrzenną 1,1 km. w pikselach podsatelitarnych.

Pierwsze satelity serii NOAA posiadały sensor VHRR (*Very High Resolution Radiometer*), który zapewniał wykonywanie zdjęć o zdolności rozdzielczej rzędu jednego kilometra w punkcie podsatelitarnym. Na ich pokładzie był też zainstalowany radiometr skanujący SR (*Scanning Radiometer*), oraz radiometr do mierzenia pionowych profili temperatur (VTPR) oraz radiometr do pomiaru strumienia protonów i elektronów (SPM). Nowsza generacja tych satelitów została nazwana TIROS-N. Satelity tej serii zostały zaopatrzone w radiometr o bardzo dużej rozdzielczości radiometrycznej AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), rejestrujący odbite

i emitowane promieniowanie w 1024 poziomach) i rozdzielczości przestrzennej 1 km. Obecnie w przestrzeni wokółziemskiej, po orbitach prawie biegunowych, zsynchronizowanych z pozornym ruchem Słońca, krążą dwa czynne satelity serii NOAA o numerach NOAA-14 i NOAA-15 oraz, zostawiony jako zapasowy, satelita NOAA-12. Satelity te znajdują się nad tym samym obszarem co około 6 godzin. Satelita, NOAA-14 obrazuje powierzchnię Ziemi w godzinach wczesnopopołudniowych i nocnych czasu lokalnego, natomiast NOAA-15 wcześniej rano i późnym popołudniem. Więc w ciągu doby można więc otrzymać 4-krotnie zdjęcia powierzchni Ziemi, wykonane radiometrem AVHRR. Radiometr ten rejestruje promieniowanie w 5 zakresach widma: w dwu pierwszych kanałach rejestrowane jest promieniowanie o długości 0,58–0,68 μm i 0,72–1,1 μm . W trzecim kanale, radiometr AVHRR rejestruje środkowy zakres podczerwieni (3,55–3,93 μm), w czwartym i piątym długofalowe promieniowanie podczerwone (10,3–11,3 μm oraz 11,5–12,5 μm). Za pomocą tego radiometru jest rejestrowany pas powierzchni Ziemi o szerokości 2700 km, ze szczegółowością około 1100 m w punkcie podsatelitarnym. Radiometr AVHRR rejestruje radiacyjną temperaturę terenu z dokładnością 0,2°C.

Dane pozyskiwane za pomocą radiometru AVHRR są wstępnie przetwarzane do postaci cyfrowej jeszcze na pokładzie satelity, a następnie przekazywane do naziemnych stacji odbiorczych czterema metodami: jako obrazy HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) są przesyłane w czasie rzeczywistym i pełną dziesięciobitową rozdzielczością oraz rozdzielczością przestrzenną równą 1,1 x 1,1 km; w systemie APT (*Automatic Picture Transmission*) są przesyłane ze zredukowaną rozdzielczością przestrzenną do około 4 km i radiometryczną do 8 bitów; w postaci zbiorów LAC (*Local Area Coverage*)¹; w postaci zbiorów GAC (*Global Area Coverage*)².

Do prac związanych z monitorowaniem wzrostu roślin za pomocą teledetekcji satelitarnej i wprowadzaniem pozyskanych informacji do Systemu Wczesnego Ostrzegania, są wykorzystane dane w zapisie cyfrowym o pełnej rozdzielczości przestrzennej typu HRPT lub LAC, przedstawiające aktualny stan rozwoju roślinności, oraz dane o mniejszej rozdzielczości przestrzennej typu GAC i GVI, będące danymi historycznymi z ostatniego dziesięciolecia jak również danymi aktualnymi. Dane typu GAC składają się z pikseli utworzonych z uśrednienia 4 km² i reprezentują w produkcie GVI piksel o wiel-

kości 16 x 16 km. GAC i GVI otrzymuje się już wstępnie przetworzone, natomiast dane typu HRPT są rejestrowane przez stację odbiorczą zainstalowaną w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie.

Rola teledetekcji w Systemie Wczesnego Ostrzegania

Jak już wspomniano, teledetekcja satelitarna jest w stanie dostarczać informacji odnoszących się do stanu roślin w ciągu całego okresu wegetacyjnego. Ze względu na znaczne różnice w odbiciu przez roślinność i głębę promieniowania widzialnego i podczerwonego można określić pokrycie gleby roślinnością na zasadzie porównania wielkości odbicia promieniowania podczerwonego i widzialnego dochodzącego do radiometru AVHRR z tego samego obszaru.

Na podstawie licznych doświadczeń przeprowadzonych w wielu krajach (Tucker i in., 1981) została opracowana metoda różnicowania roślinności na zdjęciach satelitarnych, pozwalająca jednocześnie na ocenę jej stanu. W metodzie tej wykorzystano informacje pozyskiwane zarówno w promieniowaniu widzialnym jak i podczerwonym, rejestrowane przez radiometr AVHRR odpowiednio w pierwszym i drugim kanale. Polega ona na obliczaniu dla każdego piksela, z których utworzone jest zdjęcie satelitarne, wskaźnika roślinnego (VI) lub wskaźnika nazywanego powszechnie znormalizowanym wskaźnikiem zieleni (NDVI — *Normalized Difference Vegetation Index*). Te wskaźniki uznaje się za najbardziej efektywne do korelowania z parametrami agrometeorologicznymi (Tucker i in., 1981). Obok znormalizowanego wskaźnika zieleni pojawiło się pojęcie wskaźnika skumulowanego, który reprezentuje uśrednione wartości wskaźnika zieleni dla różnych okresów, np. tygodnia lub dekady. Ten wskaźnik został wykorzystany do opracowania map charakteryzujących stan i rozwój roślinności na obszarach poszczególnych kontynentów, a nawet na całej kuli ziemskiej (Tucker i in., 1985; Goward, 1985). W badaniach prowadzonych w wielu krajach między innymi przez P.J. Sellersa (1985, 1987), stwierdzono, że właśnie wielkość wskaźnika zieleni jest ściśle związana z absorbowanym przez rośliny promieniowaniem słonecznym, wykorzystanym w procesie aktywnej fotosyntezy i dlatego wartości znormalizowanego wskaźnika zieleni związane są z wielkością akumulowanej biomasy.

Dane pozyskiwane za pomocą radiometru AVHRR do obliczenia wskaźników roślinno-glebowych

Zakresy promieniowania rejestrowanego przez radiometr AVHRR zostały tak dobrane, aby maksymalnie różnicowały odbicie tego promieniowania od roślinności znajdującej się w różnych stadiach rozwoju czy też charakteryzującej się różną kondycją wywołaną przede wszystkim suszą. Na podstawie wielkości odbicia promieniowania w różnych zakresach widma określano różne tzw. wskaźniki roślinne. Jednym z nich jest Znor-

¹ Zdjęcia w tej postaci są rejestrowane z pełną rozdzielczością nad określonym obszarem kuli ziemskiej i przechowywane na pokładzie satelity, a następnie w czasie przelotu nad stacją odbiorczą są one przesyłane na Ziemię.

² Rozdzielczość danych przesyłanych tym sposobem jest zredukowana już na pokładzie satelity poprzez próbkowanie i uśrednianie. Metoda próbkowania nie jest zadowalająca i obecnie prowadzone są próby jej udoskonalenia. Niemniej dane typu GAC są bardzo przydatne do badań nad roślinnością ze względu na dostępność danych historycznych dla całego globu ziemskiego, a także ze względu na wyprowadzenie z tego typu zbiorów innego produktu bardzo istotnego dla Systemu Wczesnego Ostrzegania, którym jest wskaźnik GVI (*Global Vegetation Index*).

malizowany Wskaźnik Zieleni (NDVI) obliczony z wartości albedo cząstkowego według następującej zależności:

$$\text{NDVI} = (A_2 - A_1) / (A_2 + A_1) \quad (1),$$

gdzie:

$A_{1,2}$ — wartości albedo (cząstkowego) w kanale 1, 2;

$A_{1,2} = G_i \cdot \text{DNI} + I_i$

gdzie:

G_i, I_i — wartości współczynników charakteryzujących dany radiometr oraz kanał 1 lub 2;

DNI — surowe wartości zliczeń w i -tym kanale.

Na podstawie zdjęć satelitarnych wykonanych za pomocą radiometru AVHRR z satelitów NOAA można także obliczyć temperaturę radiacyjną zobrazowanych obiektów. W celu obliczenia tej temperatury należy przeanalizować wielkość emitowanej energii rejestrowanej w czwartym i piątym kanale radiometru AVHRR według odwrotnego równania Plancka:

$$T = C_2 \cdot v / [\ln(C_1 \cdot v^3 / R + 1)] \quad (2),$$

gdzie:

T — temperatura radiacyjna [K];

R — wielkość emitowanej energii (luminancja energetyczna) [$\text{mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{cm}$];

v — liczba falowa dla środka przedziału długości fal rejestrowanych w kanałach 4 i 5 [cm^{-1}];

C_1, C_2 — stałe kalibracyjne.

W 1982 r. został opracowany przez Amerykańską Agencję do spraw Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej NASA system monitorowania roślinności na całym globie ziemskim tzw. *Global Inventory Monitoring Studies* (GIMS). W systemie tym wykorzystano znormalizowany wskaźnik zieleni (NDVI). System ten jest wykorzystywany do pozyskiwania informacji w skali globalnej. Jednak twórcy tego systemu podkreślili, że znormalizowany wskaźnik zieleni nie jest wystarczającą informacją o warunkach wzrostu roślin. W celu otrzymania dokładniejszych informacji o stanie roślin musi być zastosowany dodatkowo inny wskaźnik, utworzony na podstawie danych pozyskiwanych w kanałach rejestrujących radiacyjną temperaturę roślin. Dlatego w Systemie Wczesnego Ostrzegania o zagrożeniach w wyniku suszy wykorzystana jest informacja o radiacyjnej temperaturze roślin.

Energia cieplna roślin jest funkcją ich temperatury. Regulowana jest ona w procesie wymiany ciepła z otoczeniem poprzez wypromieniowanie, konwekcję oraz proces transpiracji. Jednym ze wskaźników wilgotności roślin wykorzystującym temperaturę radiacyjną (T_s) jest różnica tej temperatury i temperatury powietrza (T_a). Wielkość tej różnicy zależna jest od promieniowania słonecznego, wiatru oraz deficytu wilgotności powietrza. Różnica pomiędzy temperaturą radiacyjną roślin a temperaturą powietrza jest funkcją bilansu energetycznego, wzór 3 przedstawia uproszczone równanie tego bilansu. Od różnicy temperatur ($T_s - T_a$) zależy wielkość ciepła jawnego (H), a więc ciepła przepływającego wskutek różnicy temperatur pomiędzy roślinami a otoczeniem.

$$\text{RN} = \text{LE} + \text{H} + \text{G} \quad (3),$$

gdzie:

RN — strumień różnicowy promieniowania (saldo promieniowania);

LE — gęstość strumienia ciepła utajonego biorącego udział w procesach parowania i kondensacji,

H — gęstość turbulencyjnego strumienia ciepła jawnego biorącego udział w procesach ogrzewania atmosfery lub płynącego z atmosfery do powierzchni czynnej,

G — gęstość strumienia ciepła wymianianego pomiędzy powierzchnią czynną a podłożem

$$H = \rho C_p (T_s - T_a) / r_a \quad (4),$$

gdzie:

ρ — gęstość powietrza;

C_p — ciepło właściwe powietrza;

T_s — temperatura powierzchni czynnej uzyskana ze zdjęć satelitarnych;

T_a — temperatura powietrza;

r_a — opór powietrza.

Korekta wartości wskaźnika NDVI i temperatury

Na wielkość transmisji promieniowania przez atmosferę ziemską duży wpływ mają aerozole, tlen, ozon, a przede wszystkim para wodna. Składniki te powodują, że natężenie promieniowania ulega w różnym stopniu osłabieniu. Ma to więc wpływ na wielkość obliczanego wskaźnika NDVI. Dlatego należy podjąć działania mające na celu zminimalizowanie tego wpływu. W Systemie Wczesnego Ostrzegania została zastosowana metoda tzw. MVC (*Maximum Value Composite*) opisana po raz pierwszy przez B.N. Holbena w roku 1986. Dla każdego rozpatrywanego piksela na zdjęciu satelitarnym jest automatycznie wybrana maksymalna wartość NDVI z odpowiedniego przedziału czasowego (10-dniowego lub tygodniowego). Dużą trudnością jest zlokalizowanie na zdjęciu chmur typu *cirrus*. W systemie zastosowany jest program Apollo wyznaczający wartości progowe występowania chmur oraz maskowanie obszarów zasłoniętych przez nie.

Do utworzenia obrazów typu GVI (powstałych z produktu GAC), zostaje wybrany każdy piksel, charakteryzujący się maksymalną różnicą wartości zarejestrowanych w dwóch kanałach — widzialnym i podczerwonym — w okresie siedmiu dni.

Na wartość wskaźnika zieleni istotny wpływ ma również położenie Słońca w momencie wykonania zdjęcia przez satelitę. Największe wartości NDVI występują przy blisko nadirowym kącie obrazowania terenu i małym kącie zenitalnym Słońca, dlatego w proponowanej metodzie MVC wybiera się tylko zdjęcia, rejestrowane przez satelitę NOAA-14 wczesnym popołudniem czasu lokalnego, kiedy badana powierzchnia została zobrazowana pod kątem bliskim nadirowi (do 10°).

W celu otrzymania informacji o najlepszych warunkach rozwoju roślin jakie panowały na danym terenie w ciągu tygodnia lub w okresie 10-dniowym, zdjęcia satelitarne muszą być na siebie nałożone, a więc muszą

być doprowadzone do określonej skali i odwzorowania kartograficznego. Zdjęcia wykonane za pomocą radiometru AVHRR mają zniekształconą geometrię wynikającą z: krzywizny Ziemi, ruchu obrotowego Ziemi, wahań prędkości i wysokości orbity satelity, niestabilności sensora.

W Systemie Wczesnego Ostrzegania przewiduje się więc geometryzację zdjęć satelitarnych za pomocą istniejących w Instytucie Geodezji i Kartografii odpowiednich programów stanowiących integralną część systemu. Pomiar temperatury badanej powierzchni może być obarczony błędami spowodowanymi obecnością pary wodnej w atmosferze ziemskiej tłumiącej długofalowe promieniowanie podczerwone emitowane z powierzchni obiektów odwzorowanych na zdjęciach. Również zawartość w atmosferze CO₂, ozonu i aerozoli może wpłynąć na wielkość błędu określenia temperatury powierzchni terenu odwzorowanego przez satelitę na zdjęciu. System Wczesnego Ostrzegania zawiera odpowiedni program do korekty temperatury, tak aby zminimalizować wielkość tłumiącego wpływu atmosfery ziemskiej na transmisję długofalowego promieniowania podczerwonego.

Aktualny stan prac nad Systemem Wczesnego Ostrzegania o warunkach wzrostu roślin uprawnych

Promieniowanie w zakresie 0,58–0,68 μm rejestrowane w kanale pierwszym radiometru AVHRR satelity NOAA jest maksymalnie absorbowane (80–90%) przez chlorofil, czemu towarzyszy niskie odbicie, w bliskiej zaś podczerwieni (0,72–1,10 μm) absorpcja promieniowania przez zielone liście jest niska, a odbicie tego zakresu promieniowania przyjmuje maksymalne wartości. Wskutek tego rośliny o zielonych liściach mają wysoki wskaźnik zieleni NDVI, natomiast w przypadku suchych, żółtych roślin wskaźnik ten ma skrajnie niskie wartości. Dla badanych terenów łąk zielona trawa o dobrych warunkach wilgotnościowych charakteryzowała się wysoką wartością wskaźnika NDVI (0,82), natomiast znaczny spadek tego wskaźnika wskazujący na występowanie suszy zanotowano w drugiej połowie czerwca 1992 roku (0,30), a w sierpniu wartość wskaźnika NDVI obniżyła się do niezwykle niskiej wartości: 0,27.

Im większa susza tym różnica temperatur jest większa, energia dochodząca do powierzchni czynnej zamieniona jest w dużym stopniu na wytworzenie ciepła jawnego (wzór 4), natomiast zmniejsza się wielkość ciepła utajonego, a więc zmniejsza się wielkość ewapotranspiracji. Suma różnic pomiędzy temperaturą radiacyjną roślin a temperaturą powietrza dla każdego dnia w okresie wzrostu roślin jest dobrym wskaźnikiem suszy. W 1992 r. już w czerwcu różnica temperatur wynosiła 2°C, a w wyniku pogłębiającej się suszy różnica ta wzrosła do 8°C.

W badaniach z zastosowaniem metod teledetekcji w wykrywaniu zagrożenia pożarowego w lasach, prowadzonych przez Instytut Geodezji i Kartografii wraz z Instytutem Badawczym Leśnictwa, w latach 1993–1995 zanotowano różnicę pomiędzy temperaturą drzewostanu

mierzoną przez radiometr AVHRR satelity NOAA a temperaturą powietrza mierzoną nad powierzchnią lasu, równą 5°C, przy wilgotności ściółki 10% (Karlikowski i in., 1997).

W badaniach nad określaniem obszarów zagrożonych suszą wartość temperatury radiacyjnej została wykorzystana do określenia wartości ewapotranspiracji. Następnie został wyprowadzony wskaźnik wilgotności w strefie korzeniowej roślin będący ilorazem ewapotranspiracji rzeczywistej (*Ea*) obliczonej z zastosowaniem temperatury radiacyjnej mierzonej przez satelitę NOAA do ewapotranspiracji potencjalnej (*Ep*). Wartość ewapotranspiracji dobowej w lipcu 1992 roku dla obszarów rolniczych (zboża) wynosiła 1,18 mm, a wartość obliczonego wskaźnika wilgotności była bardzo niska (0,20), podczas gdy w tym samym czasie w roku 1993, wartość ewapotranspiracji dobowej wynosiła 3,3 mm, a wskaźnik wilgotności *Ea/Ep* wynosił 0,8.

Wskaźnik *Ea/Ep* zastosowano również do oceny zagrożenia pożarowego w lasach. Wartość progowa tego wskaźnika wynosiła 0,4 przy wilgotności ściółki poniżej 10%.

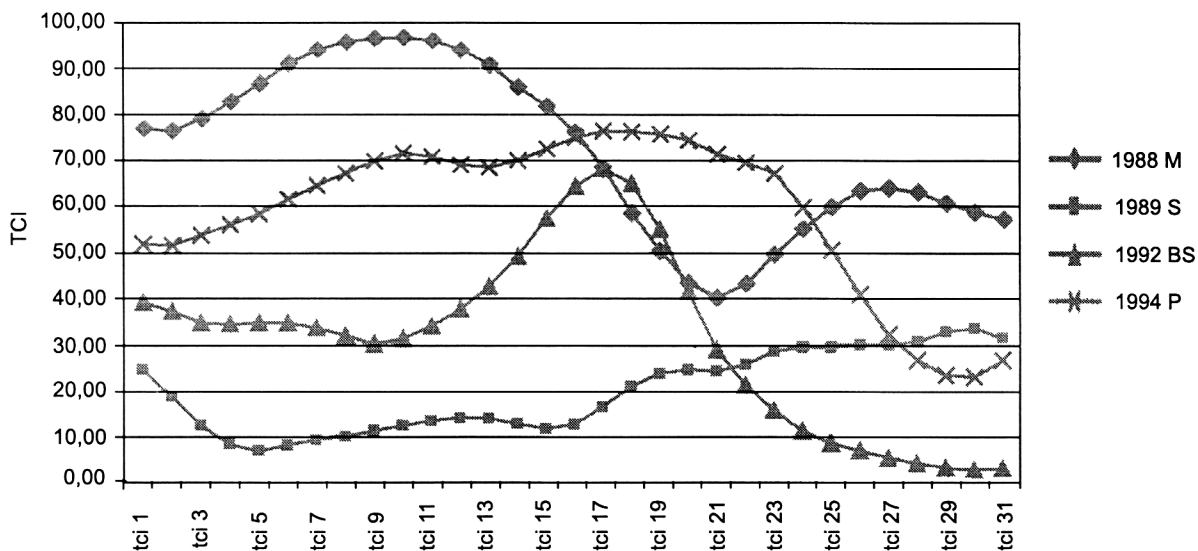
W Systemie znajduje się historyczna baza, skąd czerpana jest informacja o warunkach wzrostu roślin w ciągu ostatnich dwunastu lat, utworzona z produktu AVHRR tzw. Globalnego Indeksu Zieleni (*Global Vegetation Index*). Każdemu pikselowi reprezentującemu rolniczą przestrzeń produkcyjną została przypisana maksymalna wartość wskaźnika NDVI dla każdego tygodnia w ciągu całego sezonu wzrostu roślin. W bazie danych znajdują się także informacje o radiacyjnej temperaturze roślin w terminie charakteryzującym się maksymalną wartością wskaźnika NDVI.

Do bazy danych zostały także wprowadzone aktualne wartości wskaźników NDVI, jako NDVI_a i temperatury (*T*) uśrednione dla każdej gminy i województwa. Odpowiednie funkcje systemu pozwalają na wybranie maksymalnej i minimalnej wartości wskaźnika NDVI (NDVI_{max} i NDVI_{min}), a także maksymalnej i minimalnej wartości temperatury (*T*_{max} i *T*_{min}) dla każdej jednostki administracyjnej (gmina lub województwo) w dowolnym tygodniu okresu wegetacyjnego w ciągu ostatnich 15 lat.

Na podstawie maksymalnych i minimalnych wartości wskaźników NDVI i temperatury radiacyjnej (*T*) zostały wyprowadzone dwa wskaźniki roślinne, mianowicie (tzw. wskaźnik VCI (*Vegetation Condition Index*) oraz TCI (*Temperature Condition Index*). Pierwszy z tych wskaźników został wyprowadzony z wartości NDVI i charakteryzuje biomasa, drugi natomiast został wyprowadzony z wartości temperatury i informuje o warunkach dostępu roślin do wody. Poprzez porównywanie wartości obu wspomnianych wskaźników z okresu historycznego (1985–1999) z ich wartościami aktualnymi system ocenia bieżące warunki wzrostu roślin, klasyfikując je jako odpowiednie bądź stresowe.

Wskaźniki VCI i TCI zostały określone na podstawie poniższych zależności:

$$VCI = 100(NDVI_a - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \quad (5)$$



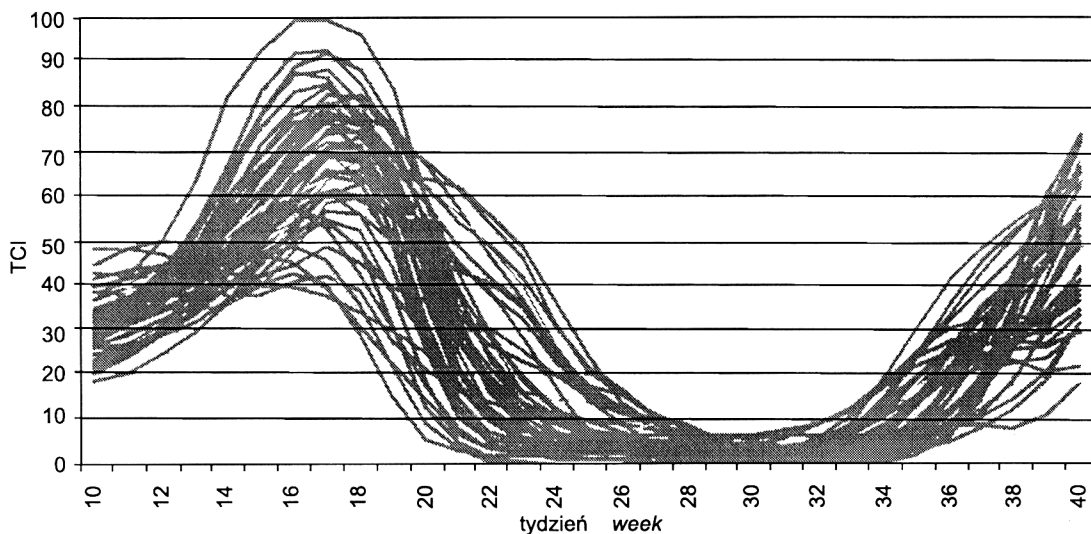
Ryc. 1. Przebieg wartości wskaźnika TCI jako średnie dla Polski w tygodniach 1–31, dla lat: 1988, 1989, 1992 i 1994

Fig. 1. Values of TCI index averaged for Poland for 1–31 week of the year for 1988, 1989, 1992 and 1994

$$TC = 100(T_{max} - T) / (T_{max} - T_{min}) \quad (6).$$

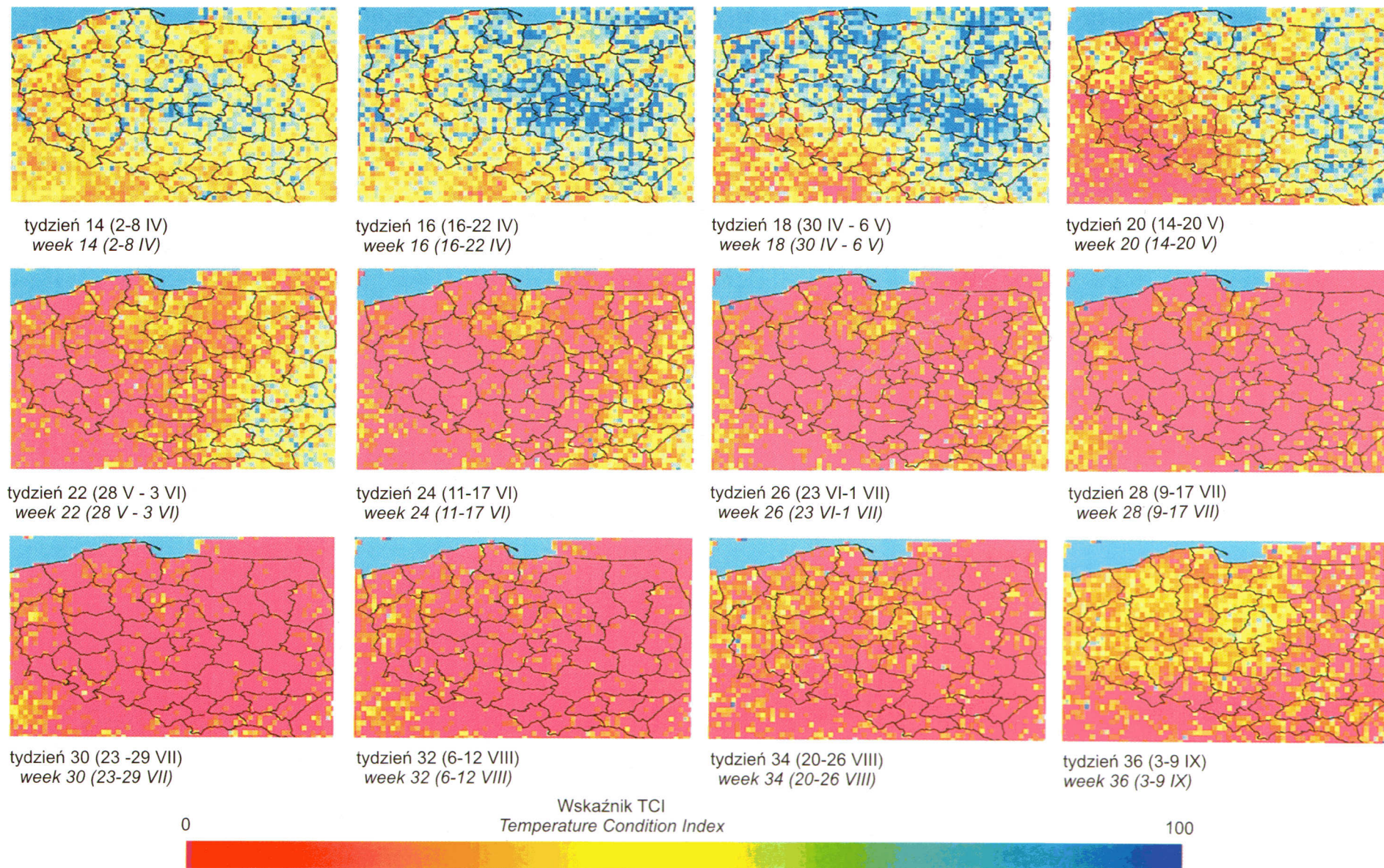
Oba wskaźniki mogą przybierać wartości od 0 do 100. Korzystne warunki wzrostu roślin będą charakteryzowane przez wysokie wartości wskaźnika VCI w czasie całego okresu wegetacyjnego, natomiast niskie jego wartości charakteryzują warunki stresowe. Wskaźnik TCI zmienia się w zależności od fazy rozwoju rośliny. Jego niskie wartości w okresie wiosennym świadczą o dogodnych warunkach wzrostu ze względu na to, że temperatura roślin zbliżona jest do potencjalnej dla tego okresu. Warunki stresowe będą charakteryzowane przez niskie wartości w okresie kłoszenia wówczas, gdy temperatura roślin będzie zbliżona do temperatury maksymalnej charakteryzującej warunki suszy.

W OPOLIS wykonano prace pilotowe zmierzające do sprawdzenia przydatności proponowanych wskaźników VCI oraz TCI do oceny warunków wzrostu roślin oraz prognozy plonów. W wyniku przeprowadzonych prac (Dabrowska-Zielińska i in., 1998) stwierdzono, że najbardziej istotnymi okresami pomiaru powierzchni roślinnej przez radiometr AVHRR, dostarczającymi najbardziej przydatnych informacji do wnioskowania o stanie roślin, są 15–17 tydzień (kwiecień) oraz 21–23 tydzień (maj/czerwiec). Wówczas istnieje największe zapotrzebowanie roślin na wodę, co jest związane z okresem kiełkowania nasion i okresem rozwoju juwenilnego oraz z okresem zwiększonego wzrostu wegetacyjnego przy maksymalnym zapotrzebowaniu na wodę, przed przejściem do fazy generatywnej (faza strzelania w źdźbło



Ryc. 2. Przebieg wartości wskaźnika TCI w poszczególnych województwach w roku 1992

Fig. 2. TCI values for voivodeships in 1992



Ryc. 3. Wartości TCI w roku 1992 dla tygodni 14–36 (2 IV–9 IX)

Fig. 3. Distribution of TCI values for 1992 for 14–36 weeks of the year (2 IV–9 IX)

i kłoszenia). Późniejszy okres to faza dojrzewania przy zmniejszającym się zapotrzebowaniu zbóż na wodę.

Zapotrzebowanie roślin na wodę w okresie kwietniowym charakteryzowane jest najlepiej przez wskaźnik TCI. Najodpowiedniejsza temperatura do prawidłowego rozwoju roślin w tym okresie jest wówczas, gdy jej wartości są zbliżone do temperatury maksymalnej, obliczonej z wielolecia dla kwietnia, charakteryzującej dobre warunki wilgotnościowe. Taka temperatura jest charakteryzowana przez niskie wartości wskaźnika TCI. W okresie późnej wiosny, a więc w tygodniach 21–23, optymalne warunki wzrostu roślin panują wówczas, gdy wartości wskaźnika VCI są wysokie, natomiast temperatura aktualna jest niższa od maksymalnej, charakteryzującej warunki stresowe, co powoduje podniesienie wartości wskaźnika TCI. Obniżanie wartości obu wskaźników wskazuje na występowanie suszy. Szczególnie czułym wskaźnikiem charakteryzującym stopień stresu roślin jest wskaźnik TCI. Analizując zdjęcia satelitarne wykonywane za pomocą radiometru AVHRR można co tydzień otrzymać informację pozwalającą ocenić, czy aktualny stan rozwoju roślin jest zbliżony do lat ubiegłych, czy też lepszy lub gorszy niż w tym samym okresie w latach poprzednich. To porównanie pozwoli również na prognozowanie potencjalnych plonów.

W celu pełniejszego zilustrowania możliwości jakie stwarza System Wczesnego Ostrzegania, przedstawiono wartości wskaźnika TCI (ryc. 1) jako wartości średnie dla Polski dla tygodni 1–31 w czterech latach charakteryzowanych pod względem zasobności w wodę (Byczkowski, Meyer, 1998). Rok 1988 był uznany za rok mokry (M), 1989 jako suchy (S), 1992 jako bardzo suchy (BS), natomiast 1994 jako przeciętny (P). W tygodniach 22–31 najniższe wartości TCI występowały w roku 1992 i 1989. Wówczas temperatura zbliżona była do temperatury maksymalnej z tego okresu. W tych tygodniach wartość TCI w roku 1989 wynosiła 30, natomiast w 1992 była bliska zeru. Temperatura więc zbliżona była do temperatury maksymalnej dla tego okresu co świadczy o stresowych warunkach wzrostu roślin i bardzo dużej suszy.

Najwyższe wartości TCI występowały w roku 1988, wskazując na odpowiednie warunki wilgotnościowe. Nieco gorsze warunki wilgotnościowe począwszy od tygodnia 26, występowały w roku 1994. Ten okres związany jest jednak z fazą dojrzewania zbóż i znacznie mniejszym zapotrzebowaniem roślin na wodę. Rycina 2 przedstawia przebieg wartości wskaźnika TCI w roku 1992, dla poszczególnych województw, w tygodniach 10–40, co odpowiada okresowi od kwietnia do końca września. Wskaźnik TCI został przedstawiony jako średnia wartość w województwie. Wartości wskaźnika TCI zaczęły maleć od 18 tygodnia, co wskazuje, że temperatura radiacyjna roślin zaczęła się podnosić, zbliżając się do maksymalnej temperatury w danym tygodniu. Wzrost tej temperatury był jednak różny w poszczególnych województwach. Od 25 tygodnia, tj. 8–14 lipca, w całej Polsce panowała susza. Wówczas wskaźnik TCI był bliski zeru. Według danych z literatury (Słota i in., 1992) największy

zasięg suszy zanotowano 10 lipca. Do określenia tej suszy autorzy przeprowadzili badania, uwzględniając siedem wskaźników agrometeorologicznych.

Ryc. 3 przedstawia przestrzenny rozkład wskaźnika TCI dla Polski w roku 1992 w tygodniach 14–26. Od tygodnia 17–18, wartości wskaźnika TCI dla południowo-zachodniej części Polski zaczęły maleć, co wskazywało na występowanie warunków suszy. W tygodniu 22–23 (przełom maja–czerwca) bardzo niskie wartości TCI występowały już w całym kraju. Z końcem czerwca susza objęła całą Polskę.

Metoda teledetekcyjna określania obszarów zagrożonych suszą jest metodą szybką i niekosztowną. Wskaźniki charakteryzujące warunki wzrostu roślin mogą być również wykorzystane do prognozowania plonów. Metoda ta ma potwierdzenie w pomiarach naziemnych.

Podziękowanie. Autorka artykułu składa podziękowanie mgr inż. Wandzie Kowalik za wykonanie ryciny nr 3.

Literatura

- Bac S., 1970: Badania nad współzależnością parowania z wolnej powierzchni wodnej promieniowania terenowego i ewapotranspiracji potencjalnej. *Prace i Studia Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, t. X.
- Byczkowski A., Meyer W., 1998: Susza w życiu społecznym i gospodarczym kraju [w:] *Zagrożenie klęskami żywiołowymi*. Konferencja Naukowo-Techniczna, Bielsko-Biała.
- Czaplak I., 1996: Posucha 1992 roku w Polsce a ogólne prawidłowości rozkładu ciągów dni bezopadowych. *Wiadomości Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych*, t. XIII, z. 4.
- Dąbrowska-Zielińska K., 1995: Szacowanie ewapotranspiracji, wilgotności gleb i masy zielonej łąk na podstawie zdjęć satelitarnych NOAA. *Prace Geograficzne*, nr 165, IGiPZ PAN, Warszawa.
- Dąbrowska-Zielińska K., Kogan F., Ciołkosz A., Gruszczyńska M., Rączka U., Kowalik W., Jankowski R., 1998: New method of drought detection based on NOAA satellite and its impact on Polish agriculture. *ASPRS-RTI Annual Conference*, Tampa, Florida.
- Goward S.N., Tucker C.J., Dye D.G., 1985: North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Vegetation*, vol. 64.
- Holben B.N., 1986: Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7.
- Kaczorowska Z., 1962: Opady w Polsce w przekroju wieloletnim. *Przegląd Geograficzny*, t. 33, IG PAN, Warszawa.
- Karlikowski T., Dąbrowska-Zielińska K., Zawila-Niedźwiecki T., Gruszczyńska M., Santorski Z., Sakowska H., Janowska M., 1997: Wykorzystanie zdjęć satelitarnych NOAA-AVHRR do wspomagania oceny zagrożenia pożarowego lasu. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, seria A, nr 829.
- Koźmiński C., 1986: Przestrzenny i czasowy rozkład okresów bezopadowych trwających ponad 15 dni na terenie Polski. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, z. 268.
- Schmuck A., 1969: *Meteorologia i klimatologia dla WSR*. PWN, Warszawa.
- Słota H., Bobiński E., Dobrowolski A., Fal B., Gałka S., Korol R., Lorenc H., Tomaszewska T., Mierkiewicz M., Żelaziński J., Rutkowski Z., 1992: Susza 1992. *Materiały badawcze. Hydrologia i Oceanologia*, IMGW, Warszawa.

Sellers, P.J., 1985: Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6.

Sellers, P.J., 1987: Canopy reflectance photosynthesis and transpiration. II Theory of biophysics in the linearity of their independence. *Remote Sensing of Environment*, vol. 21.

Tucker C.J., Holben B.N., Elgin J.H., Mc Murtrey J.E., 1981: Remote Sensing of total dry matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, vol. 11.

Tucker C.J., Townshend J.R.G., Goff T.E., 1985: African land cover classification using satellite data. *Science*, nr 227.



Doc. dr hab. Katarzyna Dąbrowska-Zielińska jest kierownikiem Zakładu Teledetekcji w Ośrodku Teledetekcji i Informacji Przestrzennej (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 USDA 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.

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