

## WYKORZYSTANIE TECHNIKI ZOBRAZOWAŃ TERMALNYCH W BADANIACH ROLNICZYCH

*P. Baranowski, W. Mazurek, R.T. Walczak*

Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27  
e-mail: pbaranow@demeter.ipan.lublin.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono możliwości wykorzystania termografii w naukach rolniczych na podstawie badań prowadzonych w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie oraz na podstawie literatury. Wykorzystanie metody termograficznej pozwala na stwierdzenie zbliżającego się lub trwającego stresu wodnego roślin oraz umożliwia określenie z dużą dokładnością parowania z obszarów użytkowanych rolniczo. Termografia jest dobrym narzędziem kontroli warunków termicznych w uprawach pod osłonami i jest coraz częściej stosowana do określania jakości materiałów roślinnych.

**Słowa kluczowe:** termografia, stres wodny roślin, ewapotranspiracja rzeczywista, stan fitosanitarny.

### WSTĘP

W urządzeniach termograficznych detektor uczulony jest na podczerwień termalną emitowaną przez badane obiekty i przepuszczaną przez warstwę atmosfery w tzw. "oknach atmosferycznych"  $3,5\text{-}5\ \mu\text{m}$  oraz  $8\text{-}13\ \mu\text{m}$ . Dzięki rejestracji w tych zakresach uzyskuje się obrazy przedstawiające rozkład temperatury radiacyjnej powierzchni emitującej. Wielką zaletą rejestracji termalnych jest możliwość uzyskiwania map zróżnicowania termicznego dużych powierzchni Ziemi. Eliminuje to konieczność olbrzymiej liczby pomiarów punktowych i uzyskiwania obrazu rozkładu temperatury drogą interpolacji. Konieczne są tylko pomiary w wybranych kilku punktach reperowych, co jest pomocne w interpretacji zobrażeń termalnych. Temperatura radiacyjna w formie obrazów termalnych jest wykorzystywana w badaniach wielu zjawisk w warunkach rolniczych. Jako jeden z parametrów jest potrzebna do określania sytuacji stresowej roślin i ewapotranspi-

racji dużych obszarów. Rośliny porażone chorobami w odróżnieniu od zdrowych wykazują inną temperaturę radiacyjną. Ze zdjęć termalnych można wnioskować o występowaniu płytkich wód gruntowych.

Celem pracy jest przegląd zastosowań techniki odwzorowań termalnych w rolnictwie na podstawie badań własnych oraz doniesień literaturowych.

## NAJWAŻNIEJSZE ZASTOSOWANIA ZOBRAZOWAŃ TERMALNYCH W ROLNICTWIE

W zależności od celu i skali badań można wykorzystywać zarejestrowane zobrażenia termalne z różnych wysokości.

Badania w podczerwieni z pułapu lotniczego i satelitarnego są szeroko stosowane w rolnictwie i ekologii [6,7,10,16,17,19,20]. Szczególnie połączenie zakresów podczerwieni długofalowej (8-13  $\mu\text{m}$ ), krótkofalowej (3,5-5  $\mu\text{m}$ ) i bliskiej (0,76-1,05  $\mu\text{m}$ ) z pasmem widzialnym umożliwia poznanie różnych cech fizycznych i biologicznych dużej grupy naturalnych obiektów na powierzchni Ziemi. Przykładem skanera wielospektralnego jest MIVIS firmy Daedalus. Rejestruje on jednocześnie dane w 102 kanałach widmowych w zakresie od 0,433 do 12,7  $\mu\text{m}$ . Skaner ten automatycznie wyznacza charakterystyki emisyjności i odbicia badanych obiektów. Pozwala on również składać w dowolne kombinacje obrazy składowe z różnych pasm.

W badaniach podstawowych wykorzystuje się najniższe pułapy, tzw. pomiary naziemne (ze statywu, wysięgnika czy też wieży). Wyniki tych badań są konieczne przy interpretacji materiałów teledetekcyjnych wykonanych z wyższych wysokości oraz pozwalają określić podstawowe związki fizyczne między badanymi obiektami.

Instytut Agrofizyki PAN realizował kilkunastoletni cykl badań dotyczących określenia stresu wodnego roślin jako czynnika ograniczającego produkcję biomasy oraz ewapotranspiracji rzeczywistej czyli składowej bilansu wodnego z wykorzystaniem teledetekcyjnych badań termograficznych [2,3,4,15,20]. Rozpoczęto również badania nad wykorzystaniem pomiarów temperatury radiacyjnej do określania jakości materiałów roślinnych [14].

### **Wykrywanie stresu wodnego roślin**

W praktyce rolniczej dąży się do tego, aby na podstawie pojedynczych pomiarów np. temperatury radiacyjnej łanu roślin uzyskać proste do interpretacji wskaźniki intensywności transpiracji a tym samym dostępności wody glebowej dla roślin, co może mieć duże znaczenie dla szybkiej interwencji w celu optymalizacji warunków wodnych w siedlisku rozwoju roślin [1,5,7,8,9,10,11]. Tabela 1

przedstawia przegląd najczęściej stosowanych wskaźników stresu roślin opartych o pomiar temperatury ich powierzchni.

W ramach lizymetrycznych badań własnych nad roślinnością łąkową dokonano oceny wskaźników stresu wodnego; SDD, CTV, TSD i CWSI. Stwierdzono, że wskaźnik SDD wykazuje duże różnice uwarunkowane rodzajem gleby. Wartości tego wskaźnika reagują również na zmianę parametrów meteorologicznych [15]. Wskaźnik TSD w przypadku głębokiego stresu wodnego zmienia się w zakresie 3 - 6°C, natomiast w warunkach komfortu wodnego do 3°C. Wskaźnik stresu wodnego CTV może być użyty w badaniach porównawczych, gdy mamy do dyspozycji pole odniesienia (punkt reperowy) o nieograniczonej dostępności wody glebowej dla roślin. Nawet w przypadku niewielkiej zmienności warunków zewnętrznych może występować duże zróżnicowanie wartości wskaźnika CTV zarówno dla roślin znajdujących się w warunkach komfortu, jak i stresu wodnego. Połączenie wartości ewapotranspiracji potencjalnej z wartościami ewapotranspiracji rzeczywistej obliczanej na podstawie pomiaru temperatury radiacyjnej pokrywy roślinnej pozwala na określenie głębokości stresu wodnego roślin poprzez zastosowanie wskaźnika stresu wodnego CWSI [4]. W warunkach komfortu wodnego roślin współczynnik CWSI nie przekraczał wartości 0,3, natomiast dla warunków ograniczonej dostępności wody glebowej zmieniał się od 0,3 do 1,0. Stwierdzono również że, wskaźnik CWSI jest czuły na zmiany potencjału wody w roślinach.

Zobrazowania termalne pokrywy roślinnej lotnicze i satelitarne nie mogą być wykorzystywane bezpośrednio do oceny zasobów zretencjonowanej w glebie wody, a jedynie do stwierdzenia zbliżającego się lub trwającego stresu wodnego roślin. Ocena ta może być precyzyjna jedynie wtedy, gdy w objętym projekcją obszarze znajdują się punkty reperowe o znanych, komfortowych warunkach wodnych. W przypadku dużych obszarów użytków zielonych punkty te mogą być łatwo zdefiniowane jako znajdujące się w pobliżu cieków lub zbiorników wodnych, co nie wymaga żadnych obserwacji naziemnych.

Jak wynika z badań własnych [4], wystąpienie różnic temperatury radiacyjnej przewyższających wartość 2°C między punktem reperowym a wybranymi obszarami odwzorowanymi na obrazie termalnym lotniczym lub satelitarnym, mogą być traktowane jako wynik pomiaru świadczący o zagrożeniu wejścia lub znajdowania się w stanie stresu wodnego roślin.

Obserwacje lotnicze i satelitarne prowadzące do oceny zagrożenia lub trwania stresu wodnego, w praktyce rolniczej dla dużych obszarów, mogą być wykorzystywane do oceny potrzeb i sterowania nawodnieniami, np. regulując poziom wody w rowach melioracyjnych.

**Tabela 1.** Przegląd wskaźników stresu wodnego roślin opartych o pomiar temperatury powierzchni roślin  
**Table 1.** Overview of existing plant water stress indices which base on the measurement of plant cover temperature

Nazwa wskaźnika i twórcy	Zalety (+) i wady(-)	Stosowalność
SDD (Stress Degree Day) [11]	+ nie potrzeba parceli reperowej - wartość progowa wskaźnika zależy od parametrów klimatycznych i biologicznych	Pozwala na sterowanie nawodnieniami od wartości progowej w klimacie suchym
CTV (Crop-Temperature Variabilit) [7,8]	+ nie potrzeba parceli reperowej; możliwa analiza wybranych pikseli obrazu termowizyjnego - wartość wskaźnika może się zmieniać na skutek działania wiatru lub uszkodzeń mechanicznych łąnu	może być stosowany w klimacie strefy umiarkowanej
TSD (Temperature Stress Day) [7]	+ możliwość regulowania nawodnieniami; pozwala wykrywać choroby - konieczność wydzielenia parceli reperowej	może być stosowany we wszystkich strefach klimatycznych
SDT (Somme des Differences des Temperature) DIENG [9]	+ wykrywanie obszarów zaatakowanych chorobą w łąnie zbóż - wymagana parcela wzorcowa	Przetestowano w klimacie morskim
TSI(Temperature Stress Index) [5]	+ uwzględnia czynniki biologiczne wpływające na wystąpienie stresu; wysoka korelacja z wielkością biomasy - konieczność wyznaczenia biochemicznej linii bazowej temperatury	Stosowany w klimacie suchym
CWSI (Crop Water Stress Index) [12,13]	+ uwzględnia wiele czynników meteorologicznych i glebowych; pozwala wykrywać zbliżający się stres wodny. - wymaga wielu danych wejściowych.	z powodzeniem stosowany w różnych strefach klimatycznych dla wielu upraw

### Określanie ewapotranspiracji z dużych obszarów

Znajomość wartości ewapotranspiracji jest niezbędna do oceny intensywności procesów fizjologicznych, a także do oceny wykorzystywania zasobów wodnych. Dlatego też stosuje się fizyczne i fizyczno-fenomenologiczne modele z licznymi parametrami.

Główne założenia modeli ewapotranspiracji rzeczywistej w oparciu o pomiar temperatury radiacyjnej są następujące:

- temperatura roślin jest determinowana procesami transportu wody i ciepła w kontinuum gleba-roślina-atmosfera;

- wymiana energii na powierzchni roślin wyraża się poprzez równanie bilansu cieplnego;
- temperatura roślin może być zastosowana do określania ewapotranspiracji aktualnej poprzez połączenie równania bilansu cieplnego powierzchni czynnej z równaniami pionowego transportu ciepła utajonego i ciepła jawnego.

W badaniach prowadzonych w Instytucie Agrofizyki PAN [3,4] założono, że zastosowanie pomiaru temperatury powierzchni roślin podwyższa dokładność oszacowania ewapotranspiracji, gdyż wykorzystujemy reakcję rośliny do oceny procesów fizjologicznych w niej zachodzących. Hipoteza, że równania do oznaczania ewapotranspiracji zawierające temperaturę radiacyjną dają najdokładniejsze wyniki, została pozytywnie zweryfikowana eksperymentalnie. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność metody do stwierdzania zbliżającego się lub trwającego stresu wodnego roślin oraz do określania z dużą dokładnością parowania z dużych obszarów użytkowanych rolniczo.

### **Określanie powierzchni roślinnych zaatakowanych chorobami i szkodnikami**

Interpretacja lotniczych i satelitarnych zobrażeń termalnych umożliwia w połączeniu z materiałami teledetekcyjnymi wykonanymi w innych zakresach elektromagnetycznego spektrum uzyskanie informacji o zasięgach upraw, występowaniu chorób roślin i ich genotypach.

W stacji doświadczalnej ENSA w Rennes - Francja, [9] prowadził pomiary temperatury radiacyjnej łąki pszenicy, porastającego jednorodnie, jeśli chodzi o warunki glebowe, pole. Niektóre fragmenty łąki wykazywały w godzinach przedpołudniowych, kiedy to wykonano lotnicze zobrazenie termalne, podwyższoną temperaturę. Stwierdzono u tych roślin znaczne uszkodzenia systemu korzeniowego przez niczenie, w następstwie czego utrudniony był pobór wody z gleby i następował spadek intensywności transpiracji.

### **Badania warunków temperaturowych w szklarniach pod kątem optymalnej ich eksploatacji**

Metoda termowizyjna umożliwia w sposób dynamiczny rejestrację rozkładów temperatury radiacyjnej różnych powierzchni. Może ona mieć istotne znaczenie w badaniach warunków temperaturowych upraw pod osłonami, w celu optymalnej ich eksploatacji.

Zobrazowania termalne pozwalają uzyskiwać mapę rozkładu temperatury powierzchni badanego obszaru. Temperatura radiacyjna roślin zawiera informację o ich stanie fizjologicznym. Zaburzenia pola temperaturowego wskazują na zmiany chorobowe roślin, zaatakowanie szkodnikami, brak dostępności wody, stres tlenowy, niedobór składników pokarmowych i in.

Warunki termiczne panujące w różnych częściach stanowiska uprawowego mają istotny wpływ na prawidłowy rozwój roślin, przy czym poszczególne gatunki roślin mają różne wymagania temperaturowe. Pomiary termowizyjne całej powierzchni uprawowej pod osłonami pozwalają poznać warunki temperaturowe i w następstwie na planowanie i wyznaczanie miejsc pod poszczególne uprawy [2]. W przypadku niepełnego pokrycia projekcyjnego możliwa jest również doraźna termowizyjna kontrola stanu podłoża. Pomiary termowizyjne mogą być również bardzo pomocne w ocenie stanu izolacji cieplnej osłon.

Analiza mapy pola temperaturowego powierzchni roślin pozwala na precyzyjne wyznaczenie zasięgów negatywnych zmian, niewidocznych gołym okiem. Stanowi to wskazówkę by przeprowadzić w tych miejscach badania i analizy wyjaśniające ich przyczyny. Umożliwia to szybką interwencję i zapobieżenie rozprzestrzeniania się negatywnych zmian.

### **Badanie jakości materiałów roślinnych**

O jakości nasion i owoców w pierwszej fazie po ich zbiorze oraz o zdolności materiału nasiennego do kiełkowania decydują złożone procesy biologiczne i fizykochemiczne w nich zachodzące. Ich przebieg decyduje o bilansie energetycznym tych materiałów i może się odwzorowywać się w postaci rozkładu temperatury ich powierzchni. Termografia umożliwia, w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, precyzyjny pomiar temperatury powierzchni badanego obiektu. W przypadku nasion i owoców ich złożona, trójwymiarowa budowa i częstokroć niewielkie wymiary oraz wymagania dużej czułości systemu pomiarowego wymuszają konieczność zastosowania najnowszych rozwiązań aparaturowych, metod analizy zobrazowań oraz opracowania specyficznej metodyki pomiaru rozkładu temperatury ich powierzchni [14].

Ocena jakości nasion i owoców jest bardzo ważnym zagadnieniem z punktu widzenia badawczego i praktycznego. W przypadku badania zdolności kiełkowania nasion stosowane obecnie próby kiełkowania nasion wymagają długotrwałego wyczekiwania. Zastosowanie metody zobrazowań termalnych do oceny zdolności kiełkowania nasion strączkowych umożliwi znaczne skrócenie procesu ich selekcji.

W przypadku badań owoców jabłek zastosowanie termografii do poznania procesów energetycznych zachodzących w owocach bezpośrednio po zbiorze wnosi nowy wkład do stanu wiedzy o procesach fizycznych i fizjologicznych decydujących o zdolności do ich przechowywania.

#### PODSUMOWANIE

Termografia w podczerwieni umożliwia rejestrację dynamicznych rozkładów temperatury radiacyjnej różnych powierzchni. Ma ona duże znaczenie w badaniach rolniczych. Umożliwia określanie warunków cieplnych i wilgotnościowych różnych upraw. Analiza mapy pola temperaturowego powierzchni roślin pozwala na precyzyjne wyznaczanie zasięgów negatywnych zmian, niewidocznych gołym okiem. Wykorzystanie metody termograficznej pozwala na stwierdzenie zbliżającego się lub trwającego stresu wodnego roślin oraz umożliwia określenie z dużą dokładnością parowania z obszarów użytkowanych rolniczo. Termografia jest dobrym narzędziem kontroli warunków termicznych w uprawach pod osłonami i jest coraz częściej stosowana do określania jakości materiałów roślinnych.

#### PIŚMIENNICTWO

1. **Aston A.R., van Bavel C.H.M.:** Soil surface water depletion and leaf temperature. *Agron. J.*, 64, 368-373, 1972.
2. **Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T.:** Ocena warunków termicznych w uprawie pod osłonami z wykorzystaniem termowizji. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.* z. 429, 37-43, 1996.
3. **Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T.:** Zastosowanie pomiaru temperatury powierzchni łąnu do określania strumienia ciepła jawnego przy zróżnicowanej dostępności glebowej. *Acta Agrophysica* 34, 9-18, 2000.
4. **Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T.:** Zastosowanie termografii do badania stresu wodnego roślin i ewapotranspiracji rzeczywistej. Monografia. *Acta Agrophysica* 21, 1999.
5. **Burke J.J., Hatfield J.L., Wanjura D.F.:** A thermal stress index for cotton. *Agron. J. Vol.* 82, 526-530, 1990.
6. **Carbone, G.J., S. Narumalani, and M. King:** Application of remote sensing and GIS technologies with physiological crop models. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 62, 171-179, 1996.
7. **Clawson K.L., Blad B.L.:** Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agron. J.*, 74, 311-316, 1982.
8. **Clawson K.L., Jackson R.D., Pinter P.J.:** Evaluating plant water stress with canopy temperature differences. *Agron. J.*, 81, 858-863, 1989.
9. **Dieng S.B.:** Detection precoce d'une attaque de piétin-verse par radiothermometrie dans l'infrarouge thermique. These doc. Ing de l'ENSA de Rennes, 89, 1988.

10. **Ehrler W.L.:** Cotton leaf temperatures as related to soil water depletion and meteorological factors. *Agron. J.*, 65, 404-409, 1973.
11. **Idso S.B., Jackson R.D., Pinter P.J. Jr., Reginato R.J., Hatfield J.L.:** Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.*, 24, 45-55, 1981.
12. **Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J.:** Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.*, Vol.17, No.4,1133-1138, 1981.
13. **Jackson R.D.:** Canopy temperature and crop water stress. *Adv. Irrig.*, 1, 43-85, 1982.
14. **Mazurek W., Dobrzański B. jr., Walczak R.T., Baranowski P., Rybczyński R.:** Zastosowanie pomiaru temperatury radiacyjnej w przedwstępnej ocenie zdolności kiełkowania nasion. Referaty i Doniesienia, II Zjazd Naukowy PTA, 217-219, Lublin 2000.
15. **Mazurek W., Baranowski P.:** The use of chosen water stress indices for meadow plant cover. VIII International Poster Day, Transport of Water, Chemicals and Energy in the System Soil-Crop Canopy-Atmosphere, Bratislava, 2000.
16. **Moran, S.M., S.J. Maas, P.J. Pinter, Jr.:** Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. *Remote Sensing Reviews*, 12, 335-353, 1995.
17. **Nieuwenhuis G.J.A., Smidt E.H., Thunnissen H.A.M.:** Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 6, No. 8, 1319-1334, 1985.
18. **O'Toole J.C., Hatfield J.L.:** Effect of wind on the crop water stress index derived by infrared thermometry. *Agron. J.*, 75, 811-817, 1983.
19. **Reginato R.J.:** Field quantification of crop water stress. *Trans ASAE*, 26, 772-775/781, 1983.
20. **Walczak R., Baranowski P.:** Analiza statystyczna wpływu czynników meteorologicznych i glebowych na wartość temperatury radiacyjnej powierzchni roślin. *Acta Agrophysica*, 38, 157-164, 2000.

## APPLICATION OF THERMAL IMAGES TECHNOLOGY IN AGRICULTURAL INVESTIGATIONS

*P. Baranowski, W. Mazurek, R.T. Walczak*

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin  
e-mail: pbaranow@demeter.ipan.lublin.pl

**Summary.** This paper presents possibilities of application of thermography in agricultural investigations on the base of the studies conducted in the Institute of Agrophysics, PAS in Lublin and literature. The use of the thermographic method enables to determine the approaching or persisting plant water stress conditions and to evaluate with high accuracy the evaporation from arable areas. Thermography is a good tool of controlling the thermal conditions in hot-bed cultures and is more and more often used for plant materials quality determination.

**Key words:** thermography, plant water stress, actual evapotranspiration, phyto-sanitary status.