

ODWZOROWANIA TERMALNE POWIERZCHNI ROŚLIN

W. Mazurek, P. Baranowski

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

e-mail: wmazurek@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie. W pracy omówiono metodę rejestracji i analizy obrazowań termalnych powierzchni roślin. Przedyskutowano główne czynniki determinujące rzeczywistą wartość temperatury pokrywy roślinnej oraz przedstawiono funkcje rejestracji i analizy obrazowań termalnych stosowane w badaniach pokrywy roślinnej. Przedstawiono przykłady zastosowania pomiaru temperatury radiacyjnej powierzchni roślin do określania ewapotranspiracji rzeczywistej i stresu wodnego roślin.

Słowa kluczowe: termografia, analiza obrazów termalnych, ewapotranspiracja rzeczywista.

WSTĘP

Metoda termografii, stosowana w wielu dziedzinach nauki i techniki, w ostatnim czasie znajduje coraz więcej zastosowań w badaniach agrofizycznych. W przypadku pokrywy roślinnej obrazowania termalne jej powierzchni są wykorzystywane w badaniach stresu wodnego roślin oraz do określania ewapotranspiracji rzeczywistej [1,2,4,6]. Szczególnie ważnym jest określenie momentu powstawania stresowych warunków wodnych. Stres wodny, w tym jego głębokość i czas trwania, mogą spowodować okresowe zahamowanie funkcji fizjologicznych, spadek plonów, a w warunkach ekstremalnych śmierć rośliny.

Dzięki stosunkowo łatwej dostępności materiałów teledetekcyjnych w formie termalnych obrazowań lotniczych i satelitarnych pojawiła się szansa na jednoczesną analizę rozkładów termalnych dużych obszarów użytkowanych rolniczo [3,7]. W warunkach polskiego rolnictwa, gdzie w strukturze agrarnej przeważają małe pola uprawne, z wysokich pułapów odwzorowują się najlepiej duże obszary użytków zielonych i lasów.

Istnieje olbrzymia liczba mono- i wielospektralnych zobrazowań o bardzo dobrej rozdzielczości geometrycznej i radiometrycznej. Zawierają one ogromną liczbę danych o badanych obiektach. Wraz z rozwojem systemów przetwarzania i interpretacji obrazów lotniczych i satelitarnych konieczne jest intensywne prowadzenie badań podstawowych, mających na celu wyjaśnienie zjawisk odbicia promieniowania słonecznego, emisji promieniowania temperaturowego obiektów naturalnych oraz związków między intensywnością promieniowania a własnościami tych obiektów.

W Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie wykorzystywany jest system termograficzny AGEMA 880 LWB pracujący w zakresie spektralnym 8-13 μm . Wyposażony jest on w firmowy pakiet oprogramowania umożliwiającego komputerową analizę obrazów termalnych oraz pozwalającego kontrolować prawidłowość pracy systemu. System termograficzny rozbudowano poprzez dodanie rejestracji badanego obiektu w świetle widzialnym [3]. Umożliwia to porównywanie zobrazowań w obu zakresach spektrum elektro-magnetycznego a nawet odtworzenie z trzech obrazów geometrii przestrzennej badanego obiektu.

Celem pracy jest przedstawienie zastosowań techniki odwzorowań termalnych powierzchni roślin w badaniach realizowanych w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie.

CZYNNIKI DECYDUJĄCE O TEMPERATURZE RADIACYJNEJ ROŚLINY I POKRYWY ROŚLINNEJ

Na wartość temperatury radiacyjnej powierzchni roślin wpływa wiele czynników. Można je podzielić na trzy grupy:

- własności powierzchni roślin i ładu (współczynnik emisyjności ϵ_s , albedo α_s , parametr szorstkości aerodynamicznej powierzchni z_0 , stopień pokrycia powierzchni roślinami wyrażony np. poprzez wskaźnik powierzchni liści LAI, nachylenie powierzchni względem kierunku padania promieni słonecznych);
- fizyczny stan i procesy zachodzące w granicznej warstwie atmosfery (radiacja słoneczna krótkofalowa R_s i długofalowa R_l , temperatura powietrza T_a , ciśnienie atmosferyczne p_a i prężność pary wodnej w powietrzu e_a , prędkość wiatru u) oraz w glebie (potencjał wody glebowej Ψ_g , wilgotność θ , temperatura T_g , charakterystyki wodne gleby $K(\theta)$ i $\Psi_g(\theta)$, właściwości

cieplne gleby tzn. przewodność cieplna λ , dyfuzyjność cieplna α , pojemność cieplna c_v , zawartość substancji chemicznych i skażenie gleby);

- stan fizyczny i procesy fizjologiczne w roślinie (gatunek roślin, faza rozwoju fenologicznego, głębokość systemu korzeniowego, stan fitosanitarny itp.).

ANALIZA ZOBRAZOWAŃ TERMALNYCH

Pojedynczy obraz termograficzny reprezentuje mapę rozkładu temperatury obiektu przedstawioną w skali stopni szarości (maksymalnie 128 stopni szarości na obraz) lub kolorach (od 3 do 16 kolorów). Dla dowolnego piksela obrazu można określać wartość temperatury lub śledzić wykres zmian temperatury w czasie. Rozkład temperatury wzdłuż dowolnie wybranej na obrazie prostej uzyskuje się w postaci wykresu lub zbioru wartości temperatury – profil temperatury. Często istnieje konieczność wyodrębnienia z obrazu termalnego wybranej powierzchni w postaci pola. Dla dowolnych pól można przeprowadzić statystykę rozkładu temperatury (wartości średnie, maksymalne i minimalne, odchylenia standardowe, histogramy temperatury).

Przedstawione na Rys. 1 dwa zobrazenia termalne roślinności łąkowej pochodzące z dwóch różnych terminów pomiarowych ukazują procedurę tworzenia histogramów temperatury radiacyjnej dla wybranych obszarów zobrazenia.

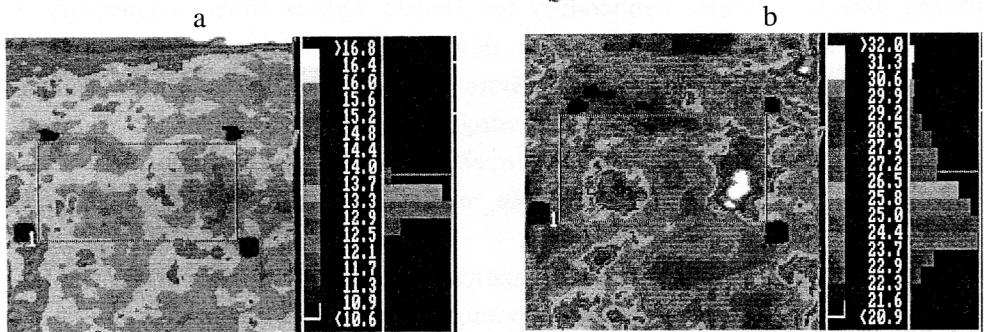
Istnieją trzy tryby pracy systemu:

- tryb pracy na żywo (komputer analizuje odwzorowania termalne transmitowane bezpośrednio ze skanera przez monitor obrazowy);
- tryb odtwarzania (analizowane są zobrazenia termalne wcześniej zarejestrowane na magnetowidzie);
- analiza obrazów zamrożonych (rozpatrywane są pojedyncze obrazy zamrożone podczas pracy w jednym z dwóch poprzednich trybów albo wywołane z pamięci komputera).

W analizie zobrażeń termalnych pokrywy roślinnej wykorzystuje się następujące funkcje przetwarzania obrazu:

- korekcją geometryczną obrazu termalnego przez nałożenie zobrazenia w świetle widzialnym;
- filtrację przestrzenną;
- otrzymywanie obrazów różnicowych lub stanowiących uśrednienie wielu obrazów składowych;

- wpasowywanie położenia obrazu w trybie pracy na żywo do obrazu z pamięci komputera;
- wycinanie z obrazu pikseli o odpowiednich wartościach temperatury;
- tworzenie obrazu zwierciadlanego;
- obrót obrazu o wybrany kąt;
- powiększanie fragmentów obrazu;
- likwidacja zniekształceń obrazu związanych z ruchem obiektu, np. łanu roślin pod wpływem wiatru;
- przedstawienie rozkładu temperatury w formie reliefu.



Rys. 1. Obrazy termalne roślinności łąkowej z histogramami jej temperatury radiacyjnej w wybranych polach: a – pomiar nocny, b – pomiar dzienny.

Fig. 1. Thermal images of meadow plant cover with histograms of radiation temperature in chosen areas: a - night measurement, b - daily measurement.

OKREŚLANIE EWAPOTRANSPIRACJI RZECZYWISTEJ W OPARCIU O POMIAR TEMPERATURY POKRYWY ROŚLINNEJ

Wielkość ewapotranspiracji rzeczywistej stanowi informację o dostępności i możliwości wykorzystania wody glebowej przez rośliny. Jednocześnie istnieje duże zróżnicowanie intensywności ewapotranspiracji rzeczywistej w ciągu doby, co w głównej mierze zależy od warunków meteorologicznych. Informacja na temat potencjalnej możliwości parowania z powierzchni użytkowanej rolniczo może być uzyskana poprzez wyznaczenie ewapotranspiracji potencjalnej. 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.

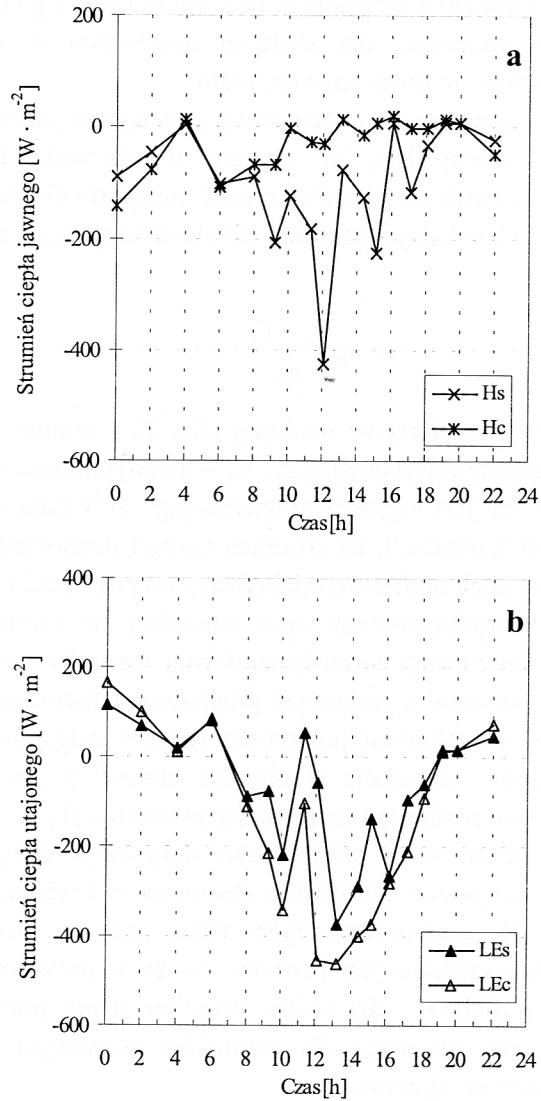
Rozkład temperatury powierzchni roślin jest wykorzystywany do określania ewapotranspiracji rzeczywistej w oparciu o równanie bilansu cieplnego. W metodzie wykorzystuje się oporowy model transportu ciepła w systemie gleba-roślina-atmosfera [1], w którym strumień ciepła jawnego wyraża się wzorem:

$$H = -\rho \cdot c_p \frac{T_c - T_a}{r_{ah}} \quad (1)$$

gdzie T_c – temperatura pokrywy roślinnej (K); T_a – temperatura powietrza (K) mierzona na wysokości referencyjnej z_a ; r_{ah} – aerodynamiczny opór atmosfery na transport ciepła ($s \cdot m^{-1}$); ρ – gęstość powietrza ($kg \cdot m^{-3}$). Znak minus w równaniu 1 wynika z przyjętej konwencji, że strumień energii dochodzącej do powierzchni czynnej ma zawsze znak dodatni, a odchodzący od powierzchni znak ujemny.

Aby określić aerodynamiczny opór atmosfery na transport ciepła, należy uwzględnić stan równowagi termodynamicznej atmosfery wyrażający związek między siłami związanymi z pionowym gradientem temperatury powietrza a siłami zewnętrznymi wywołanymi poziomym ruchem mas powietrza. Jednym ze sposobów określania warunków stabilności atmosfery jest określanie relacji temperatury pokrywy roślinnej i temperatury powietrza [1].

Na Rys. 2 przedstawiono przykładowe dobowe przebiegi strumieni ciepła jawnego i ciepła utajonego dla dwóch stanowisk o zróżnicowanej dostępności wody glebowej. Dla godzin dziennych widać znaczne różnice wartości tych strumieni. Charakterystyczne jest również to, że w przypadku nieograniczonej dostępności wody glebowej dla roślin strumień ciepła jawnego (H_c) oscyluje wokół wartości zero natomiast dla warunków stresowych strumień ten (H_s) przyjmuje duże wartości ujemne.



Rys. 2. Dobowe przebiegi: a - strumieni ciepła jawnego H_s i H_c oraz b - strumieni ciepła utajonego LE_s , LE_c (odpowiednio dla pokrywy roślinnej z komfortowymi i stresowymi warunkami wodnymi).
Fig. 2. Daily courses: a - sensible heat fluxes H_s and H_c and b - latent heat fluxes LE_s , LE_c (respectively for comfort and water stress conditions of plant cover).

Poprzez połączenie równania bilansu cieplnego powierzchni parującej z równaniami transportu dla strumieni ciepła jawnego i ciepła utajonego uzyskuje się związek pomiędzy aktualną wartością temperatury radiacyjnej łanu T_c a parametrami agrometeorologicznymi w przygruntowej warstwie atmosfery [1]:

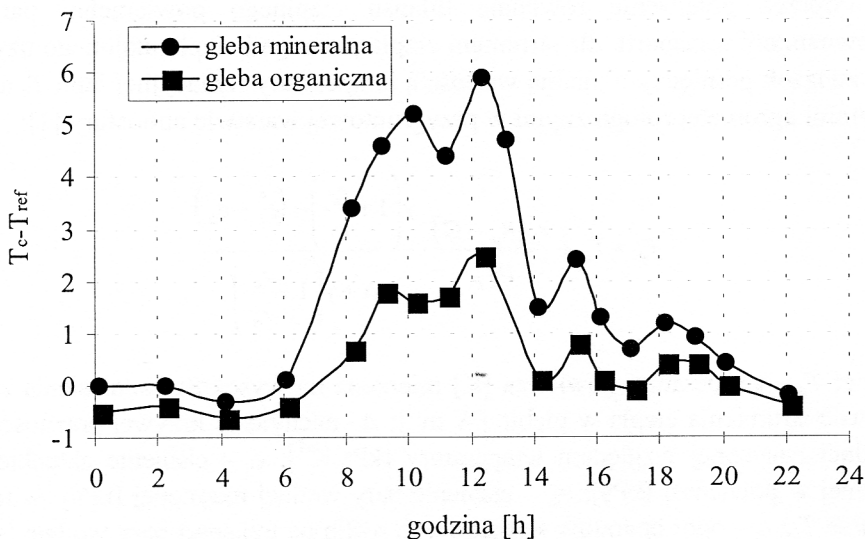
$$T_c = T_a + \frac{r_a(R_n - G)}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right) - (e_a^* - e_a)}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (2)$$

gdzie: T_a - temperatura powietrza [K] mierzona na wysokości odniesienia z_a ; G - gęstość strumienia ciepła w glebie [W m^{-2}]; Δ - nachylenie krzywej prężności pary wodnej nasyconej względem temperatury [kPa K^{-1}]; e_a - ciśnienie aktualne pary wodnej w powietrzu [kPa]; e_a^* - ciśnienie pary wodnej nasyconej [kPa] w temperaturze T_a ; r_c - opór aparatów szparkowych roślin na transport pary wodnej [s m^{-1}]; r_a - opór aerodynamiczny [s m^{-1}]; R_n - gęstość strumienia salda promieniowania [W m^{-2}]; γ - stała psychrometryczna [kPa K^{-1}]; ρ - gęstość powietrza [kg m^{-3}]; c_p - ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$];

Z tego równania wynika, że różnica pomiędzy temperaturą powierzchni roślin a temperaturą powietrza jest liniowo zależna od niedosytu wilgotności powietrza. ($e_a^* - e_a$), przy założeniu, że wartości r_a , r_c , R_n i G są stałe.

Z uwagi na to, że temperatura powierzchni roślin jest uwarunkowana licznymi parametrami glebowymi i meteorologicznymi, często przyjmuje się metodykę pomiarów różnicowych, tzn. porównuje się temperaturę roślin znajdujących się w identycznych warunkach zewnętrznych z wyjątkiem zróżnicowanych warunków wilgotnościowych w glebie [4]. Takie podejście pozwala na identyfikację obszarów pokrytych roślinnością znajdującą się w niekorzystnych warunkach dostępności wody glebowej do systemu korzeniowego.

Na Rys. 3 przedstawiono przykład różnicowego pomiaru dobowych rozkładów temperatury roślinności łąkowej porastającej glebę mineralną i organiczną. Odniesienie się w obu przypadkach do temperatury referencyjnej pokrywy roślinnej w warunkach nieograniczonej dostępności wody glebowej (odpowiednio dla obu gleb) pozwoliło zarejestrować zróżnicowanie względnych temperatur roślin dla obu stanowisk. Temperaturę referencyjną T_{ref} wyznaczano poprzez pomiar termograficzny pokrywy roślinnej na stanowisku glebowym, na którym utrzymywano uwilgotnienie odpowiadające potencjałowi wody łatwo dostępnej dla roślin.



Rys. 3. Dobowe przebiegi temperatury roślin porastających dwa rodzaje gleby.

Fig. 3. Diurnal courses of the temperature of plants growing on two kinds of soils.

PODSUMOWANIE

Analiza mapy pola temperaturowego powierzchni roślin pozwala na precyzyjne wyznaczanie 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 rozprzestrzenianiu się negatywnych zmian.

Metoda termograficzna umożliwia rejestrację dynamicznych rozkładów temperatury radiacyjnej różnych powierzchni. Może ona mieć istotne znaczenie w badaniach warunków wilgotnościowych i ciepłych różnych upraw.

PIŚMIENICTWO

1. **Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T.:** Zastosowanie termografii do badania stresu wodnego roślin i ewapotranspiracji rzeczywistej. Monografia. Acta Agrophysica, 21, 1999.
2. **Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T.:** Zastosowanie pomiaru temperatury powierzchni łanu do określania strumienia ciepła jawnego przy zróżnicowanej dostępności glebowej. Acta Agrophysica, 34, 9-18, 2000.

3. **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.
4. **Clawson K.L., Jackson R.D., Pinter P.J.:** Evaluating plant water stress with canopy temperature differences. *Agron. J.*, 81, 858-863, 1989.
5. **Danych R., Pietrzak P., Więcek B., Zwolenik S.:** Współczesne systemy rejestracji i przetwarzania obrazów termograficznych – przegląd rozwiązań. IV Konferencja Krajowa Termografia i Termometria w Podczerwieni, Łódź, 16-18.11.2000.
6. **Mazurek W., Walczak R., Baranowski P.:** Analiza statystyczna wpływu czynników meteorologicznych i glebowych na wartość temperatury radiacyjnej powierzchni roślin. *Acta Agrophysica*, 38, 157-164, 2000.
7. **Moran, S.M., S.J. Maas, and P.J. Pinter, Jr.:** Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. *Remote Sensing Reviews*, 12, 335-353, 1995.

Thermal Imagery of Plants Cover

W. Mazurek, P. Baranowski

Institute of Agrophysics PAS, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

e-mail: wmazurek@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. In the paper the method of registration and analysis of thermal images of plant cover has been described. The main factors determining the actual value of plant cover temperature have been discussed and the functions of registration and analysis used in the studies of plant cover have been presented. Some examples have been given of the use of radiation measurement of the plant surfaces for determination the actual evapotranspiration and plant water stress.

Key words: thermography, analysis of thermal analysis, actual evapotranspiration.