

ROLNICTWO ZA GRANICĄ

WOJCIECH MAZUREK

Zakład Agrofizyki Polskiej Akademii Nauk w Lublinie

BADANIA W ZAKRESIE PRZETWARZANIA ZDJĘĆ TERMALNYCH PROWADZONE W REPUBLICIE FEDERALNEJ NIEMIEC I HOLANDII

Każdy obiekt na powierzchni Ziemi emituje promieniowanie elektromagnetyczne. Zdolność emisyjna ciała zależy od wielu jego właściwości fizycznych, przede wszystkim od temperatury, barwy, chropowatości i innych. Wraz ze zmianą tych właściwości zmienia się nie tylko intensywność wypromieniowywanej energii, ale także jej rozkład spektralny. Te zależności zaczęto wykorzystywać w ostatnich latach w badaniach teledetekcyjnych środowiska przyrodniczego w zakresie termicznym promieniowania elektromagnetycznego.

Pojęcie teledetekcja w szerokim znaczeniu to rozpoznawanie na odległość zjawisk i obiektów (bez kontaktu z nimi) oraz badanie zależności między tymi obiektami i zjawiskami. Jako nośnik informacji służy promieniowanie elektromagnetyczne w tych zakresach, w których możliwe jest jego przenikanie przez warstwę powietrzną atmosfery ziemskiej.

Analiza zdjęć teledetekcyjnych w podczerwieni termalnej pomaga w uzyskiwaniu wielu wiadomości o obiektach i zjawiskach zachodzących na powierzchni Ziemi, które do tej pory były trudne do osiągnięcia lub wręcz nieosiągalne.

Teledetekcja termalna znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach naukowych. W geologii i geomorfologii obok analizy rzeźby terenu i badania form geomorfologicznych zdjęcia teledetekcyjne pomagają w poszukiwaniach złóż surowców mineralnych oraz wykrywaniu anomalii termicznych. Hydrologia wykorzystuje badania w podczerwieni termalnej do stwierdzania stanu zanieczyszczeń wód, przenoszenia wodnego osadów, szacowania zasobów wodnych. W dziedzinie klimatologii metodami tymi można z wielką dokładnością określać tzw. zastoiska chłodu. W ostatnich latach rozpoczyna się rozwój badań środowiska glebowego z zastosowaniem tych metod.

Podstawy metodyki pomiarowej

Według prawa Stephana—Boltzmann'a emitowane w przestrzeń przez ciało czarne promieniowanie ogólne zależy od jego absolutnej temperatury:

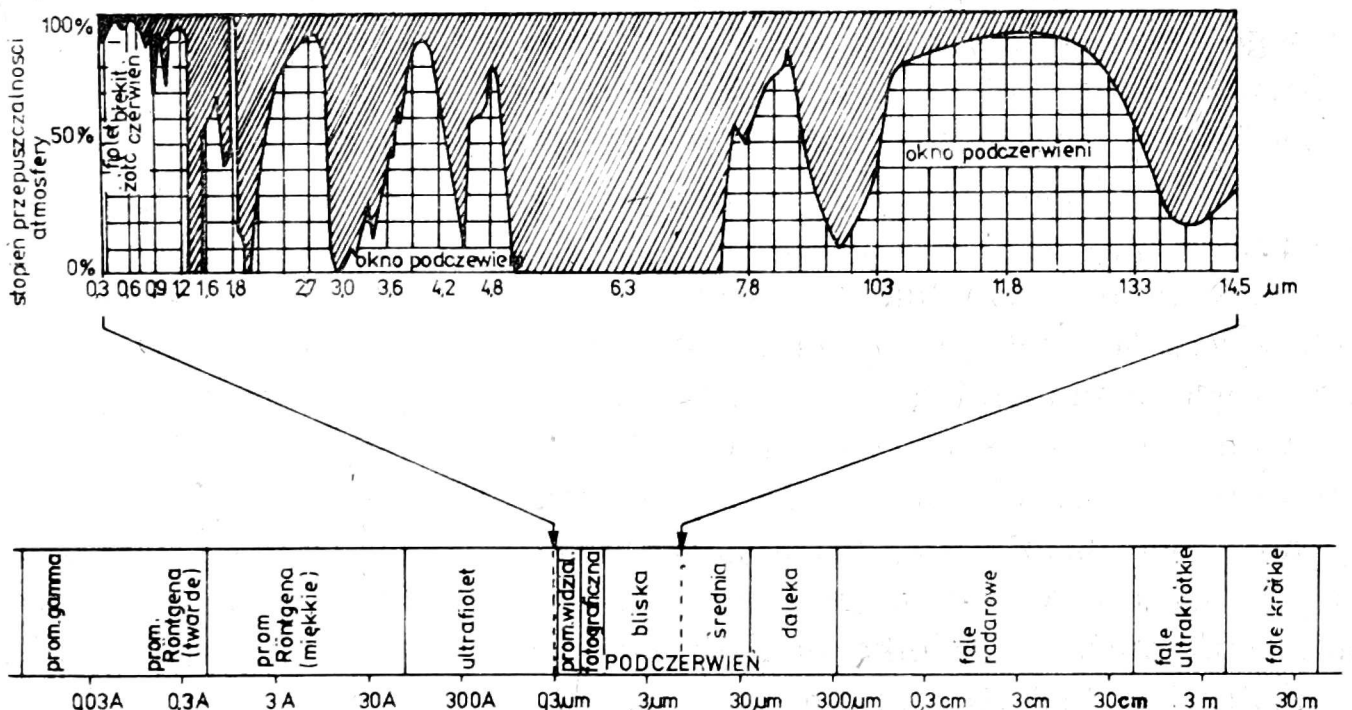
$$(1) \quad S = \sigma \cdot T^4$$

$\sigma = 5,6688 \cdot 10^{-12} \text{ W/cm}^2\text{K}^4$ — współczynnik proporcjonalności

Można więc z emitowanego promieniowania określać temperaturę ciała. Od dawna wykorzystuje się to w wypadku wysokich wartości temperatury, natomiast dla wartości niskich, występujących w obserwacji meteorologicznych, radiometryczne metody pomiaru temperatury znalazły sobie uznanie dopiero w ostatnich kilkunastu latach.

Przy niskich wartościach temperatury ciała jest emitowana nieznaczna ilość promieniowania. Przy 10°C ilość ta nie przekracza nawet 2% promieniowania emitowanego przy 500°C . Istnieje poza tym przesunięcie maksimum emisji z $3,75 \mu\text{m}$ przy 500°C na $10,2 \mu\text{m}$ przy 10°C (zgodnie z prawem przesunięcia Wiena).

Atmosfera ziemska w zakresie elektromagnetycznym powyżej $2 \mu\text{m}$ posiada szereg pasm absorpcyjnych wywołanych przez obecność w powietrzu silnie absorbujących promieniowanie elektromagnetyczne takich substancji, jak para wodna, dwutlenek węgla, ozon. Stąd też w celu maksymalnego zredukowania ujemnego wpływu atmosfery radiometryczne zdjęcia termalne powierzchni ziemi wykonuje się w wybranych przedziałach elektromagnetycznego spektrum, w tzw. „oknach atmosferycznych (rys. 1). Są to zakresy charakteryzujące się stosunkowo naj-



Rys. 1 Elektromagnetyczne spektrum

mniejszą absorpcją promieniowania elektromagnetycznego i zarazem największym współczynnikiem przepuszczalności dla tegoż promieniowania. Chodzi tu o przedziały 3,4—4,2 μm , 4,5—5,1 μm oraz 8,0—13,0 μm . Ten ostatni przedział jest szczególnie ważny, ponieważ pomiary teledetekcyjne temperatury powierzchni ziemi w tym zakresie obarczone są najmniejszym błędem. Stały się one możliwe dopiero w ostatnich kilku latach dzięki zastosowaniu odpowiedniego detektora dla tego zakresu spektrum.

Przetwarzaniem obrazów termalnych na terenie Republiki Federalnej Niemiec zajmuje się m.in. Instytut Fotogrametrii i Pomiarów Inżynierskich Uniwersytetu w Hanowerze. Kieruje nim od kilku lat prof. dr inż., dr h.c. Gottfried Konecny. W swojej działalności naukowej rozwija on bardzo intensywnie i z powodzeniem fotogrametrię analityczną i teledetekcję, kładąc nacisk na rozwój metod numerycznego przetwarzania danych.

Pracownicy Instytutu zajmują się głównie:

- geometryczną korekcją zdjęć lotniczych i obrazów skanerowych,
- przetwarzaniem obrazów termalnych ze skanera (radiometru) do badań stosunków termicznych powierzchni ziemi,
- klasyfikacją obrazów skanerowych w celu badania struktury powierzchni w strefie pływów nad Morzem Północnym, a także na lądzie,
- badaniem zanieczyszczeń wód,
- badaniem struktury dna morskiego na podstawie zdjęć sonarowych.

Tematyka badawcza wynika z udziału Instytutu w naukowym programie lotniczych pomiarów teledetekcyjnych przeprowadzonym w ostatnich latach w Republice Federalnej Niemiec. Program ten trwał praktycznie od 1974 do końca 1977 r. i był poprzedzony kilkuletnimi przygotowaniem. W założeniach zwracano uwagę, że w przyszłości będą istniały globalne systemy obserwacji Ziemi za pomocą satelitów z udziałem niemieckich użytkowników. Powinni się więc oni praktycznie zaznajomić z metodami teledetekcyjnymi. Poza tym wewnątrz globalnego systemu obserwacyjnego będą miały duże znaczenie przedsięwzięcia teledetekcyjne za pomocą samolotów dla celów regionalnych.

W celu przeprowadzenia tych zamierzeń Minister Badań i Technologii powołał w 1974 r. Niemiecki Ośrodek Badawczy i Doświadczalny Lotnictwa i Lotów Kosmicznych z siedzibą w Oberpfaffenhofen koło Monachium. Istotnym naukowym celem tego programu było rozwijanie metod ilościowego przetwarzania skanerowych obrazów multispektralnych. W wyniku misji teledetekcyjnych uzyskiwana jest wielka ilość danych. Obrazy multispektralne udostępniane są użytkownikom w for-

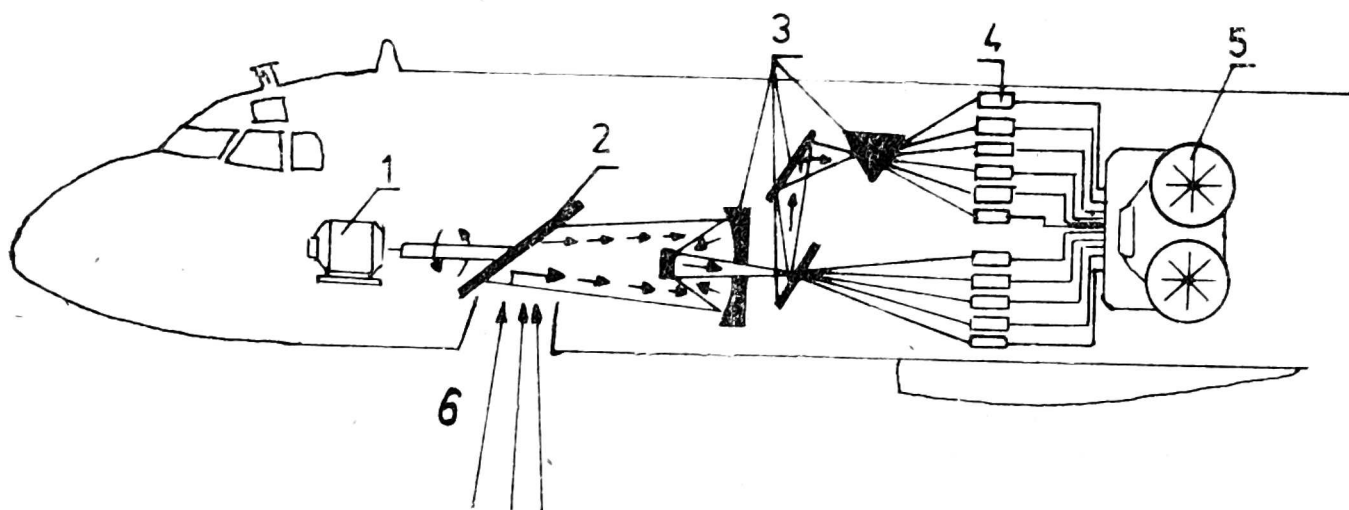
mie cyfrowej na taśmach magnetycznych, stąd tak ważną jest sprawa rozwijania automatycznych i półautomatycznych sposobów przetwarzania danych.

Do wykonywania zdjęć teledetekcyjnych z różnych wysokości (od kilkuset metrów do kilku kilometrów) wykorzystuje się samolot wyposażony w specjalne urządzenia pomiarowe i rejestrujące. Są to:

- jedenastokanałowy multispektralny skaner firmy Bendix M²S,
- czternastościeżkowe urządzenie rejestrujące na taśmę magnetyczną firmy Ampex AR 1700,
- kamera do zdjęć lotniczych Zeiss RMK A15/23,
- multispektralny zestaw kamer składający się z pięciu aparatów Hasselblad 500EL i jednego Hasselblad MK70,
- termometr radiacyjny Barnes PAT 5,
- czterokanałowy radiometr Exotech 100 A,
- kamera z optyką „rybie oko” Hasselblad 500EL.

Kamera skierowana do góry, z optyką „rybie oko”, służy do rejestrowania ewentualnego zachmurzenia w czasie wykonywania zdjęć. Termometr radiacyjny Barnes PAT 5 rejestruje wzdłuż linii lotu temperaturę powierzchni ziemi. Te wartości temperatury służą jako punkty odniesienia podczas ilościowej analizy zdjęć termalnych.

Przyrządem głównym wyposażenia rejestrującego jest jedenastokanałowy skaner Bendix M²S (Rys. 2). Siedem pierwszych kanałów skanera rejestruje promieniowanie odbite od powierzchni ziemi w zakresie widzialnym promieniowania elektromagnetycznego, trzy następne — w bliskiej podczerwieni i ostatni — promieniowanie własne ziemi w zakresie podczerwieni termalnej 8—13 μm (tab. 1).



Rys. 2 Schemat jedenastokanałowego skanera Bendix M²S; 1 — silnik, 2 — zwierciadło wybierające, 3 — układ optyczny, 4 — układ elektroniczny z detektorami, 5 — urządzenie rejestrujące, 6 — wiązka promieniowania elektromagnetycznego

Momentowe pole widzenia skanera ma wielkość 2,5 mrad. Znaczy to, że z wysokości 1000 m skaner rejestruje na linii lotu pole $2,5 \times 2,5$ m w postaci jednego elementu obrazu. Efektywny kąt rejestrowania wynosi 100° , przy czym w jednej linii obrazu są zarejestrowane 803 punkty. Przy tym typie skanera prędkość obrotowa zwierciadła wybierającego jest nastawiana zmiennie między 10 i 100 obrotów na sekundę, zawsze według stosunku v/h (v — prędkość lotu, h — wysokość lotu).

Tabela

Zakresy czułości poszczególnych kanałów skanera Bendix M²S

Kanał	Zakres spektralny (μm)
1	0,350—0,470
2	0,415—0,515
3	0,475—0,555
4	0,520—0,600
5	0,560—0,640
6	0,600—0,680
7	0,640—0,720
8	0,680—0,760
9	0,710—0,910
10	0,925—1,105
11	8,000—13,000

Wartości pomiarowe zdjęte przez skaner dla poszczególnych punktów obrazu są rejestrowane i ukazują się na wyjściu w formie 8 bit. Rejestracja następuje na czternastościeżkowej taśmie magnetycznej. Szybkość taśmy jest sprzężona z prędkością obrotową zwierciadła wybierającego, tak że gęstość rejestracji jest stała i wynosi 10 kbit/cal/ścieżkę. Na pierwszych jedenastu ścieżkach taśmy są zarejestrowane obrazy w jedenastu zakresach elektromagnetycznego spektrum, podczas gdy na trzech pozostałych jest miejsce dla danych dodatkowych, jak: temperatura wzdłuż linii lotu, data, numer kolejny linii itp.

Jednocześnie z nalotami prowadzony jest szeroki program pomiarów naziemnych. Celem tych dodatkowych pomiarów jest otrzymanie danych referencyjnych, które korelowane z wartościami pomiarowymi z samolotu umożliwiają ilościową interpretację materiału zdjęciowego. Pomiarów te są dokonywane na wybranych punktach badanego obszaru z charakterystyczną strukturą powierzchni, łatwą do identyfikacji na obrazie skanerowym. Chodzi tu głównie o różne parametry meteorologiczne, jak: temperatura i wilgotność powietrza, prędkość i kierunek wiatru, temperatura powierzchni czynnej i gleby, promieniowanie odbite od powierzchni ziemi, promieniowanie emitowane przez powierzchnię czynną

i inne. Dane te są nieodzownym załącznikiem do materiału zdjęciowego, a pomiary promieniowania są używane do przygotowania katalogu spektralnych sygnatur elementów powierzchni ziemi.

*Przetwarzanie zdjęć skanerowych w zakresie termalnym 8—13 μm
w Instytucie Fotogrametrii Uniwersytetu w Hanowerze*

Odbierane przez skaner (radiometr) promieniowanie daje się wyrazić poprzez następujące równanie:

$$R = \omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{\lambda} \varepsilon_{\lambda} E_{\lambda}(T) \tau_{\lambda} [H] d\lambda$$

promieniowanie ciepłe
powierzchni ziemi

$$(2) \quad + \omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi_{\lambda} (1 - \varepsilon_{\lambda}) \frac{1}{\pi} (G_{\lambda} + \Omega_{\odot} E_{\lambda\odot}) \tau_{\lambda} [H] d\lambda$$

promieniowanie
zwrotne atmo-
sfery i odbite
promieniowanie

$$+ \omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_H^{\infty} \phi_{\lambda} E_{\lambda}(T_p[h]) \frac{\partial \tau}{\partial h} dh d\lambda$$

emisja warstwy powietrza mię-
dzy powierzchnią ziemi i ska-
nerem

$+\Delta i$

błąd pomiarowy skanera

przy czym:

ω kąt otwarcia skanera

ϕ_{λ} czułość spektralna skanera

E_{λ} promieniowanie Plancka

$\tau_{\lambda} [H]$ przepuszczalność warstwy atmosfery o grubości H

ε_{λ} zdolność emisyjna

G_{λ} promieniowanie zwrotne atmosfery

Ω_{\odot} kąt słońca

$T_p [h]$ temperatura powietrza na wysokości h

Jak już uprzednio wspomniano, zdjęcie termalne powierzchni ziemi wykonane w najbardziej optymalnym do tego zakresie elektromagnetycznego spektrum 8—13 μm jest mimo wszystko obarczone pewnym

błędem wynikającym z zakłóceń atmosfery, jak i z możliwości samego skanera. Poza tym mierzona temperatura jest parametrem zmieniającym się w czasie wykonywania zdjęcia, wynoszącym od kilkudziesięciu sekund do kilku minut. Dla uzyskania możliwie najbardziej wiernego obrazu termalnego powierzchni ziemi konieczne jest przeprowadzenie korektury tegoż zdjęcia. Można ją wykonywać różnymi metodami. W Instytucie Fotogrametrii Uniwersytetu w Hanowerze przeprowadza się korekcję dwiema metodami.

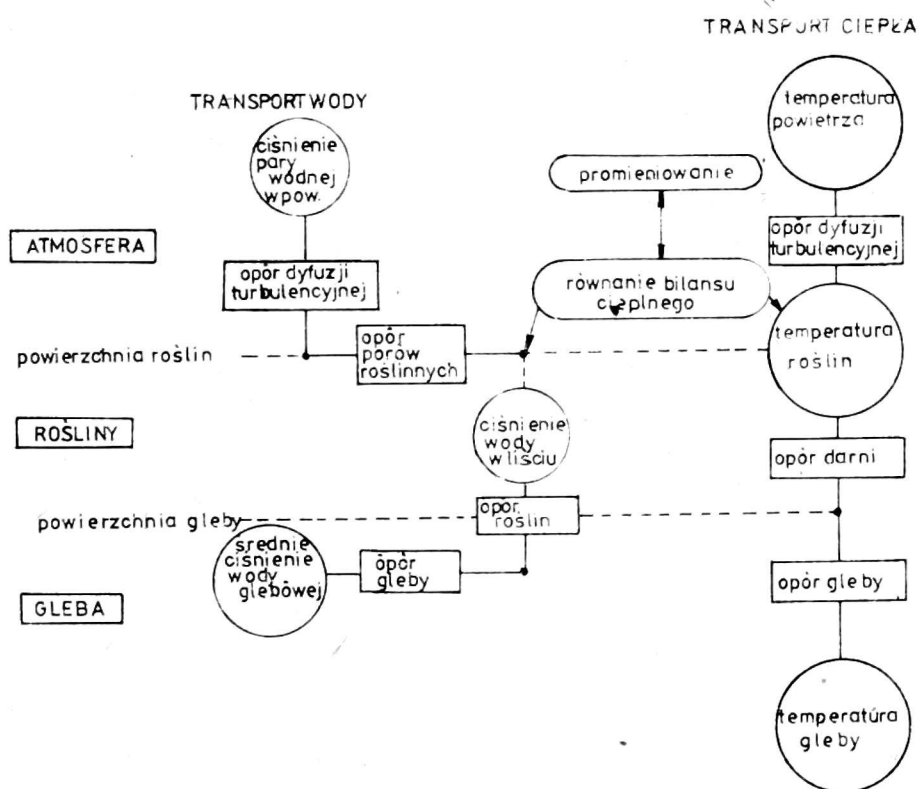
Pierwszą z nich jest metoda przybliżeń, która wartość sprowadza temperatury zarejestrowaną na obrazie do wartości zmierzonej w celach kontrolnych na powierzchni ziemi. Założeniem w tej metodzie jest utworzenie „termicznych” i „geometrycznych” punktów odniesienia. Przyjęto dwa modele: model terenowy składający się ze współrzędnych punktu i wartości temperatury rzeczywistej oraz model dla obrazu o współrzędnych ij (i — linia obrazu, j — szpalta obrazu) z wartością temperatury zarejestrowaną przez skaner. Następnie konieczne są dwie transformacje: 1. geometryczna — oba modele muszą być dokładnie nałożone na siebie, 2. radiometryczna — wartość zarejestrowana przez skaner jest zredukowana do wartości zmierzonej na powierzchni ziemi.

W wymienionym Instytucie przy operacjach związanych z przetwarzaniem obrazów skanerowych, jak np. korekcja geometryczna wyznaczanie ekwidensyt, łącznie i analizowanie informacji zawartych w poszczególnych kanałach, wykorzystuje się metody numeryczne. Pracownicy Instytutu mają do dyspozycji pakiet kilkudziesięciu przeznaczonych do tego celu programów, no i oczywiście szerokie możliwości korzystania z miejscowego centrum obliczeniowego. Wyniki analizy obrazów termalnych mogą być przedstawiane bądź w postaci izoterm lub nawet w postaci barwnej, przyporządkowując danym przedziałom temperatury odpowiednie barwy. Polega to na tym, że treść obrazu w postaci cyfrowej zostaje za pomocą odpowiednich programów przeliczona na trzy wyciągi charakteryzujące trzy barwy: cyjanową, żółtą i purpurową. Następnie te wyciągi poddane zostają zabiegom fotochemicznym na specjalnych materiałach i nałożone na siebie, tworząc kolorowy diapoztyw.

Drugim sposobem korekcji obrazu termalnego jest ustalenie wszystkich zależności przedstawionych w równaniu. Aby je rozwiązać, należy uwzględnić stan atmosfery w czasie wykonywania zdjęcia. Ostatnio w Instytucie Fotogrametrii w Hanowerze podjęto prace nad zastosowaniem modelu fizycznego atmosfery. Chodzi tu o program LOWTRAN 3 z Laboratorium Badawczego Sił Zbrojnych w Cambridge w stanie Massachusetts. Za pomocą tego programu oblicza się przepuszczalność atmosfery ziemskiej w zakresie spektralnym od $0,25 \mu\text{m}$ do $28,5 \mu\text{m}$.

Program daje możliwość wyboru jednego z sześciu modeli atmosferycznych w zależności od pory roku, szerokości geograficznej i wysokości do 100 km nad poziom morza. Zaletą tego programu jest to, że brane są w nim pod uwagę parametry atmosfery mające największy wpływ na rejestrację termalną. Po pierwszych próbach przeprowadzenia korekcji zdjęć termalnych tą drogą uzyskano bardzo dobre wyniki. Np. dla powierzchni wodnej zatoki Jade nad Morzem Północnym osiągnięto dokładność absolutną $0,2^{\circ}\text{C}$.

Zdjęcie skanerowe termalne skorygowane przy pomocy omówionych metod i będące odzwierciedleniem rzeczywistych warunków termicznych ziemi stanowi materiał wyjściowy do dalszych badań. Możliwościami praktycznego zastosowania obrazów termicznych zajmują się między innymi naukowcy Instytutu Melioracji i Gospodarki Wodnej (ICW) w Wageningen w Holandii — dr Klaassen i inż. Nieuwenhuis. Podjęli oni próby obliczenia ewapotranspiracji chwilowej na podstawie temperatury powierzchni zmierzonej skanerową techniką teledetekcyjną. Wartość ewapotranspiracji chwilowej są punktem wyjściowym do obliczenia wartości ewapotranspiracji dziennej. W tym celu stosuje się model Tergra rozwinęty przez Soera [8]. Jest to oporowy model fizyczny przepływu wody i ciepła w systemie gleba—roślina—atmosfera (rys. 3).

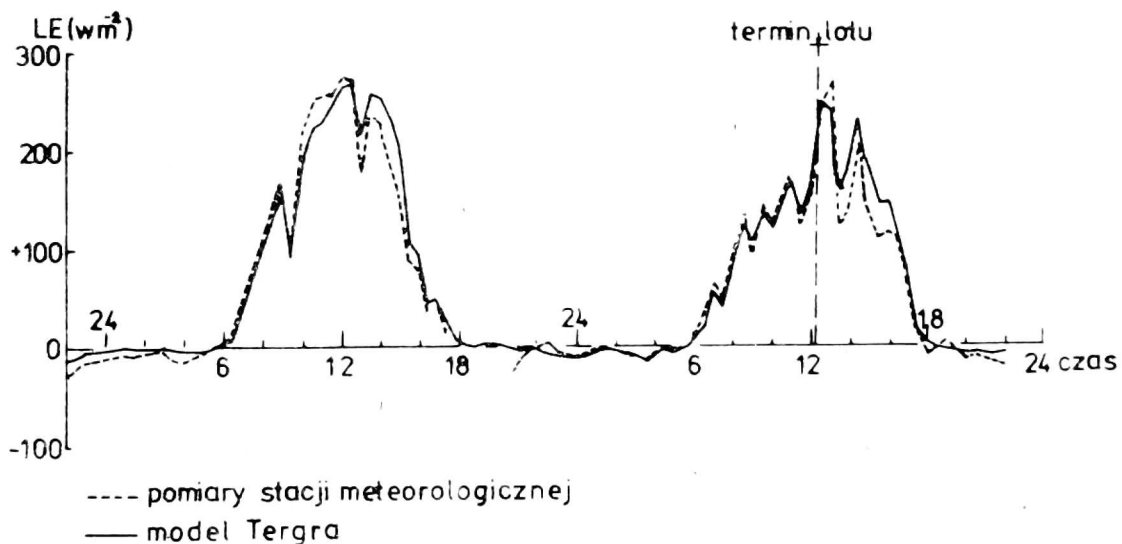


Rys. 3 Oporowy model przepływu wody i ciepła w systemie gleba—roślina—atmosfera

Obliczenie wielkości dziennej ewapotranspiracji za pomocą modelu Tergra wymaga wykorzystania wielu pomiarów różnych parametrów fi-

zycznych gleby, roślin i powietrza w przyziemnej warstwie. Klaassen i Nieuwenhuis sięgnęli po bogate dane uzyskane przez stację pomiarową Królewskiego Instytutu Meteorologicznego Holandii znajdującą się na obszarze badań, uzupełniając je danymi dodatkowymi. Chodzi tu m.in. o pomiary psychrometryczne za pomocą wentylowanego psychrometru termoparowego na wysokościach 0,45 m i 1,10 m. Pomiary siły ssącej gleby mierzono tensjometrycznie na dwóch głębokościach 0,30 m i 0,50 m. Zawartość wody glebowej była mierzona metodą neutronową co 0,10 m do głębokości 1,10 m. Kontrolne pomiary temperatury powierzchni czynnej prowadzono za pomocą radiometrów Heimanna i Barnesesa z wysokości 1,5 oraz 200 m.

Za pomocą modelu Tergra badacze ci obliczyli ewapotranspirację dzienną dla dwóch dni. Wyniki te porównano z pomiarami prowadzonymi na stacji meteorologicznej. Na rysunku 4 przedstawione są przebiegi dobowe ewapotranspiracji symulowanej i zmierzonej w dniach 30 i 31 sierpnia 1977 roku. Różnica między całkowitymi wartościami dobowymi uzyskanymi w obu wypadkach wynosi tylko 4%, podczas gdy różnica maksymalna dla ewapotranspiracji chwilowej sięga 25%. Tak duży błąd występuje w porze nocnej. Jednak ze względu na niewielką wartość ewapotranspiracji w tych godzinach nie ma to istotnego znaczenia dla wielkości dobowej.



Rys. 4 Dobowy przebieg ewapotranspiracji obliczonej według modelu Tergra i zmierzonej

Ograniczone ramy niniejszego opracowania nie pozwalają na przytoczenie matematycznego rozwinięcia badanego zagadnienia. Szczegółowy materiał znajduje się w Zakładzie Agrofizyki PAN w Lublinie.

Obserwowanie zjawiska ewapotranspiracji na podstawie zdjęć termalnych rozległych powierzchni ziemi ma doniosłe znaczenie z punktu widzenia badań bilansu wodnego tych obszarów. Od marca 1978 roku krąży po orbicie okołoziemskiej amerykański satelita LANDSAT C dostarczający w odstępach osiemnastodniowych zdjęcia termalne tego samego wycinka Ziemi o wielkości 185×185 km. Szczegółowa analiza zdjęć pod kątem określania ewapotranspiracji pozwoliłaby na dokładniejsze poznanie rozkładu i dynamiki tego zjawiska na tak dużym obszarze.

LITERATURA

1. Baehr H.P.: „Digital image processing experience at Hannover Institute for Photogrammetry” Int. Symp. „Image Processing” Graz 1977.
2. Heilman J.L., Kanemasu E.T., Rosenberg N.J., Blad B.L.: „Thermal scanner measurements of canopy temperatures to estimate evapotranspiration” Remote Sensing of Environment 5, 1976.
3. Konecny G.: „Zum gegenwaertigen Stand der Fernerkundung” Symp. Flugzeugmessprogramm Hannover, August 1977.
4. Lohmann P.: „Auswertungen von Thermalaufnahmen des Jadegebietes” Symp. Flugzeugmessprogramm, Hannover, August 1977.
5. Lorenz D.: „Die radiometrische Messung der Boden-und Wasseroberflaechentemperatur und ihre Anwendung insbesondere auf dem Gebiet der Meteorologie” Zeitschrift fuer Geophysik, Band 39, 1973.
6. Nieuwenhuis G.J.A., Klaassen W.: „Estimation of the regional evapotranspiration from remotely sensed crop surface temperatures” I Grassland Nota 1055, ICW, Wageningen, The Netherlands 1978.
7. Soer G.J.R.: „Estimation of regional evapotranspiration and soil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures” NIWARS publ. 45, Delft, The Netherlands 1977.
8. Soer G.J.R.: „The Tergra model — a mathematical model for the simulation of the daily behaviour of crop surface temperature and actual evapotranspiration” NIWARS publ. 46, Delft, The Netherlands 1977.