

ANDRZEJ CIOŁKOSZ  
BARBARA HALEMBA

[528.71:629.785:621.398]:551.525(438.111)

## Wykorzystanie lotniczych obrazów termalnych w opracowaniu termicznych warunków podłoża południowej Warszawy

Wielkie miasto w bardzo poważnym stopniu kształtuje swój klimat, czyniąc go niekiedy znacznie innym w porównaniu z klimatem terenów otaczających. Jedną z charakterystycznych cech mikroklimatu wielkiego miasta jest duża rozpiętość temperatur na stosunkowo niedużym obszarze i wynikające stąd silne gradienty termiczne kształtujące cyrkulację powietrza w obrębie miasta. Zróżnicowanie temperatury powietrza wynika z różnic w nagrzaniu podłoża przez promienie słoneczne jak też i z różnic ilości ciepła jakie wydziela organizm miejski w poszczególnych swych obszarach.

Temperatura powietrza i podłoża w obrębie dużego miasta były wielokrotnie przedmiotem badań mikroklimatycznych. Stosowane dotychczas metody badawcze sprowadzające się wyłącznie do bezpośrednich pomiarów mają jedną wspólną cechę: są to metody punktowe. Pozwalają one wprawdzie ze stosunkowo znaczną dokładnością wyznaczyć temperaturę badanych obiektów ale w ograniczonej liczbie punktów. Tymczasem zmienność temperatury powietrza i podłoża w obrębie dużego miasta nakazuje jednoczesne wykonywanie pomiarów dużej liczbie punktów oddalonych od siebie niekiedy o kilka lub kilkanaście zaledwie metrów. Jest to ograniczenie, które praktycznie limituje liczbę punktów do kilkadziesiątu co najwyżej kilkuset i to rozłożonych dość przypadkowo. Idealnym rozwiązaniem byłoby zmierzenie temperatury powietrza i podłoża we wszystkich punktach miasta charakteryzujących się różnymi właściwościami absorpcji, przewodzenia i emisji ciepła. W przypadku tradycyjnych metod przeprowadzenie takich pomiarów jest praktycznie niemożliwe. Dopiero wprowadzenie zdalnych, bezkontaktowych metod pomiaru temperatury stworzyło realne możliwości przeprowadzenia pomiarów temperatury podłoża na dużej przestrzeni w stosunkowo krótkim czasie z rozdzielczością geometryczną rzędu kilkunastu metrów kwadratowych i temperaturową rzędu dziesiątych części stopnia C.

W 1977 roku Instytut Geodezji i Kartografii podjął się, na zlecenie Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, opracować mapy termicznych warunków podłoża fragmentu Warszawy stosując jedną z technik zdalnego badania środowiska — lotnicze obrazy termalne. Zostały one wykonane za pomocą skanera podczerwieni AGA Thermoprofile Model THP-1 zamontowanego na pokładzie samolotu IŁ-14. Skaner ten, zaadaptowany do potrzeb teledetekcji lotniczej, rejestruje promieniowanie podczerwone w paśmie 2,0—5,6 nm. Detektor podczerwieni, którym w przypadku omawianego skanera jest kryształ antymonku indu (InSb), zamienia padające nań długofalowe promieniowanie podczerwone na sygnał elektryczny. Po wstępnym wzmocnieniu sygnał ten jest przesyłany do monitora i tu na ekranie lampy oscyloskopowej jest wizualizowany w postaci linii prostej o modulowanej jasności. Modulacja jest wprost proporcjonalna do ilości promieniowania podczerwonego docierającego do detektora. Tak więc obiekty, które emitują więcej podczerwieni są zobrazowane jaśniejszą linią, obiekty o mniejszej emisji promieniowania odwzorowują się w postaci ciemniejszej (węższej) linii.

Geometryczna zdolność rozdzielcza skanera firmy AGA wynosi 5 mrad. Na ekranie monitora obrazowany jest więc tylko taki fragment obiektu, którego wielkość kątowa wynosi 5 mrad. Ustawiony na nieruchomym podeście Thermoprofile analizuje ten sam fragment obiektu z częstotliwością 16 Hz.

W przypadku umieszczenia tego skanera na pokładzie samolotu ruch postępowy statku powietrznego sprawia, że skaner, kolejnym obrotem optycznego układu przeszukującego, analizuje coraz to innych fragment terenu. Ponieważ szybkość wybierania jest stała, a więc przy odpowiednim doborze prędkości lotu można doprowadzić do tego, że kolejno wybierane liniowe obrazy terenu będą stykały się ze sobą. Zsumowane obrazy liniowe utworzą więc pełny obraz terenu. Zsumowania tego, w przypadku wspomnianego skanera, dokonuje się za pomocą fotograficznej kamery szczelinowej, która na filmie światłoczułym odwzorowuje obraz kolejnych linii. W wyniku fotografowania powstaje więc liniowy, bezklatkowy obraz terenu nad którym przelatywał samolot ze skanerem podczerwieni na pokładzie (rys. 1).

W wyniku obrazowania termalnego powstaje obraz, który przypomina lotnicze zdjęcie panchromatyczne. Jednak zasadnicza różnica między zdjęciem a obrazem termalnym tkwi w znaczeniu jego tonu szarości. O ile w przypadku zdjęcia panchromatycznego fototon wyraża jasność spektralną obiektu, o tyle w przypadku obrazu termalnego fototon jest funkcją temperatury obiektu i zdolności emisyjnej jego powierzchni.



**Rys. 1. Obraz termalny-fragmentu Warszawy. Wykonany za pomocą skanera AGA Thermoprofile model THP-1 w dniu 13.06.1977 r.**



Uogólniając można powiedzieć, że obiekty o niższych temperaturach mają na termogramie tony ciemne natomiast obiekty cieplejsze są jaśniejsze. Ta zasada jest jednak do pewnego stopnia zmodyfikowana zdolnością emisyjną obiektu, która może w dużym stopniu zmieniać fototon obrazu termalnego obiektów o takiej samej temperaturze. Oznacza to, że jeżeli zdolność emisyjna określona współczynnikiem emisji danego obiektu jest mniejsza niż innego obiektu, to mimo jednakowej temperatury obu obiektów, pierwszy z nich będzie miał ciemniejszy ton na obrazie termalnym niż drugi.

Zgodnie z założeniami ustalonymi przez Instytut Geografii i Przemysłowego Zagospodarowania PAN zdecydowano obrazy termalne wykonać w różnych porach roku i przy napływie różnych mas powietrza. W celu wyeliminowania ewentualnego odbicia promieni słonecznych obrazy zostały wykonane po zachodzie słońca i w nocy, natomiast, wbrew pierwotnym założeniom, z przyczyn obiektywnych nie udało się wykonać lotów przed wschodem słońca. A zatem nie otrzymano obrazu pełnego wychłodzenia miasta jakie ma miejsce tuż po świcie.

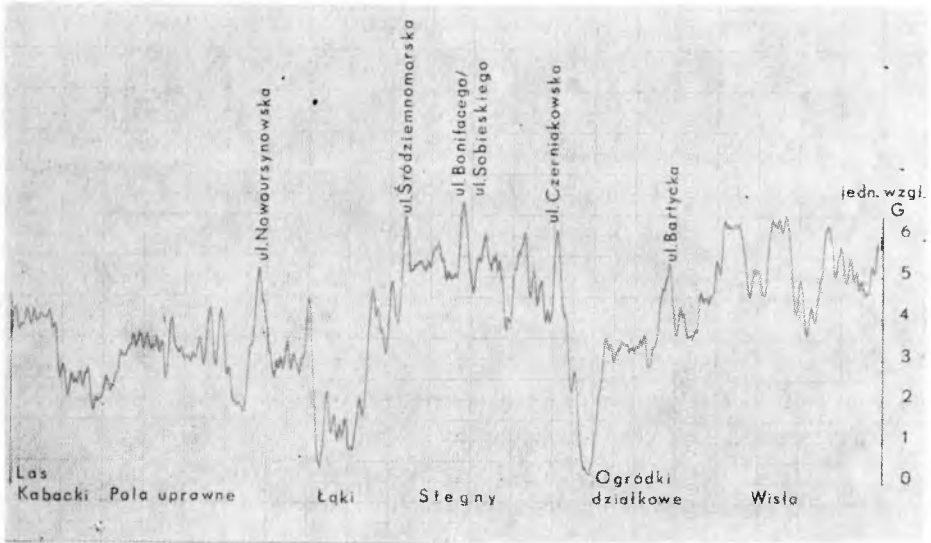
W niniejszym artykule przedstawiono pierwsze wyniki analizy obrazów termalnych otrzymanych latem i jesienią 1977 roku.

Skaner, którym wykonano obrazowanie, wyposażony jest w specjalny układ umożliwiający określanie radiometrycznej temperatury badanych obiektów. W trakcie pierwszych badań nie skorzystano jednak z tej możliwości lecz postanowiono ilościową interpretację termogramu przeprowadzić dostosowując gęstość optyczną obrazu termalnego określonych obiektów do ich rzeczywistej temperatury zmierzonej kontaktowo w czasie wykonywania lotów.

Analizę tonów szarości negatywu obrazu termalnego przeprowadzono na mikrodensytometrze S3 firmy Joyce Loebel. Pomiary mikrodensytometryczne wykonano metodą profilową rejestrując wartości gęstości optycznej z powierzchni 2 mm wzdłuż negatywu obrazu termalnego. W ten sposób każdy negatyw zobrazowanego terenu został podzielony na 10 profili. Odczytane co 2 mm średnie wartości gęstości optycznej z wyżej wymienionych profili stanowiły dane dla powierzchni około  $120 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ , przy uwzględnieniu skali negatywu 1 : 60 000. Amplituda wahań wykresu mikrodensytometrycznego charakteryzuje zmianę gęstości optycznej negatywu, która jak już wspomniano jest w funkcyjnej zależności z temperaturą obiektu i ich emisyjnością (rys. 2).

W trakcie dokonywania obrazowania termalnego wykonano bezpośrednie pomiary temperatury rzeczywistej różnego rodzaju obiektów takich jak: beton, asfalt, woda, trawa, uprawy oraz mierzono temperaturę powietrza na wysokości 1,5 m. Wyniki tych pomiarów stanowiły podstawę dla dostosowania odczytów gęstości optycznej obrazów poszcze-

gólnych obiektów do ich temperatury rzeczywistej. Dostosowanie wyników pomiarów gęstości optycznej do wartości temperatury rzeczywistej zrealizowano poprzez aproksymację krzywej drugiego stopnia przy założeniu, że suma kwadratów odchyłeń poszczególnych zaobserwowanych



Rys. 2. Wykres mikrofotometryczny charakteryzujący zmianę gęstości optycznej negatywu obrazu termalnego

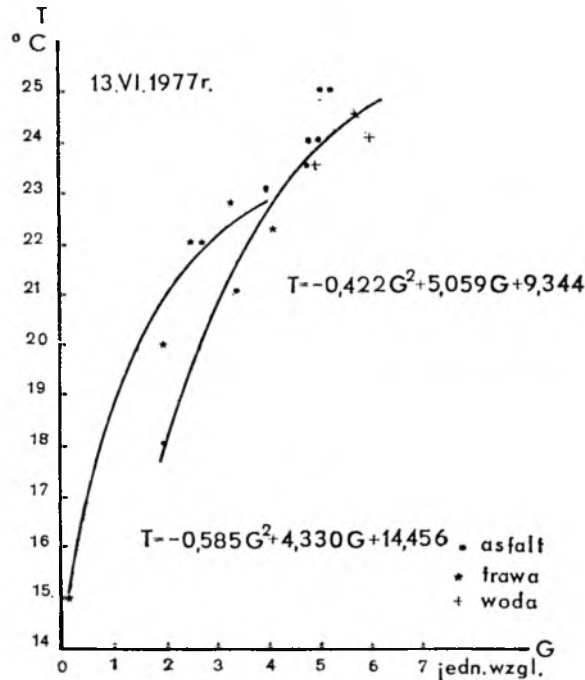
wartości od krzywej będzie najmniejsza. Dostosowanie wyników dla obserwacji wykonanych w czerwcu wykonano w 2 grupach obiektów: do pierwszej zaliczono asfalt, beton, wodę charakteryzujące się bardzo zbliżonym tonem szarości, a do drugiego trawę. Dla każdej grupy obiektów otrzymano równanie drugiego stopnia, określające średnią wartość temperatury rzeczywistej, w zależności od pomierzonej gęstości optycznej negatywu, ze średnim błędem  $m_0 \pm 0,5^\circ\text{C}$ . Równania te mają postać (rys. 3).

$$T = -0,422 G^2 + 5,059 G + 9,344 \text{ (woda, beton, asfalt)}$$

$$T = -0,585 G^2 + 4,330 G + 14,456 \text{ (trawa)}$$

W tabeli 1 zestawiono otrzymane wyniki pomiarów temperatury obiektów zarejestrowanych na lotniczych obrazach termalnych.

Południowa Warszawa została trzykrotnie zobrazowana termalnie. Pierwszy lot został wykonany 13 czerwca 1977 roku przy czym rozpoczął się on w godzinę po zachodzie słońca i trwał około 2 godzin. Obrazami termalnymi pokryto 94 km<sup>2</sup> południowej części miasta, który to obszar od wschodu wyznaczyło koryto Wisły, od południa północna gra-



Rys. 3. Zależność między gęstością optyczną obiektów a ich temperaturą zmierzona metodą kontaktową

nica Lasu Kabackiego, od zachodu ul. Puławska, Komarowa i Chałubińskiego, natomiast od północy Al. Świerczewskiego. Cały ten obszar został zobrazowany na dziewięciu szeregach o przeciętnej szerokości nieco ponad 1 km. Otrzymane szeregi obrazów termalnych zostały zmontowane na wspólnym podkładzie w postaci termofotoszkiu.

Warunki, w których dokonano zobrazowania termalnego były korzystne z punktu widzenia techniki rejestracji długofalowego promieniowania podczerwonego. Po upalnym dniu niebo było bezchmurne, co sprzyjało radiacji, natomiast prędkość wiatru nie przekraczała 4 m/sek, a więc nie następowało wychłodzenie poprzez wymuszoną konwekcję.

Na otrzymanych obrazach termalnych wystąpiła duża gama tonów szarych, zawartych pomiędzy tonem bardzo ciemnym, prawie czarnym a tonem białym. Zgodnie z ogólną zasadą obrazowania termalnego tony te winny oddawać powierzchniową temperaturę terenu względnie występujących na nim obiektów. Na termofotoszkiu dają się zaobserwować zjawiska zróżnicowania tonalnego występującego w obrębie zabudowy. Tak na przykład najjaśniejszym tonem charakteryzują się nowo wzniesione osiedla Stegny i Ateńska, ciemniejszym osiedla starsze np. Sielce,

Tablica 1

Gęstość optyczna negatywu obrazu termalnego a wartość temperatury obiektów  
(13.06.1977 r. — godz. 21.35—23.35)

Rodzaj obiektu	Odczyt gęstości optycznej	Temp. pom. met. kontaktową	Temp. po dostosowaniu	V
	Jedn. niem.	T°C	T°C	°C
woda	6,0	24,0	24,5	+0,5
	4,9	23,5	24,0	+0,5
beton asfalt	5,7	24,5	24,5	0,0
	4,8	24,0	23,9	-0,1
	5,0	25,0	24,1	-0,9
	5,2	25,0	24,2	-0,8
	5,0	24,0	24,1	+0,1
	4,8	23,5	23,9	+0,4
	4,9	24,0	24,0	0,0
	4,0	23,0	22,8	-0,2
	2,0	18,0	17,8	-0,2
	3,4	21,0	21,7	+0,7
$T = -0,422 G^2 + 5,059 G + 9,344$			$m_{sr} = \pm \sqrt{\frac{[VV]}{n-k}} \pm 0,5^\circ\text{C}$	
trawa	2,5	22,0	21,6	-0,4
	2,7	22,0	21,9	-0,1
	3,9	22,0	22,4	+0,4
	2,0	20,0	20,8	+0,8
	0,1	15,0	14,9	-0,1
	3,3	23,0	22,4	-0,6
$T = -0,585 G^2 + 4,330 G + 14,456$			$m_{sr} = \pm \sqrt{\frac{[VV]}{n-k}} \pm 0,5^\circ\text{C}$	

najciemniejszym natomiast stara zabudowa Śródmieścia — zarówno przedwojenna, jak i ta z lat odbudowy. Podobnie jak w przypadku Stegien, bardzo jasny jest ton obrazu kompleksu zabudowań Elektrociepłowni Siekierki.

Teren wolny od zabudowy (ogródki działkowe, pola orne, łąki) charakteryzuje się bardzo różnorodną mozaiką tonów szarości: od stosunkowo jasnych (niektóre uprawy, ogródki z drzewami owocowymi) do niemal, że czarnych (wilgotne łąki).

W celu przeanalizowania przyczyn tak dużego zróżnicowania tonalnego, a zatem i temperaturowego w obrębie badanego obszaru, należy przede wszystkim zwrócić uwagę na panujące tu warunki litologiczno-hydrologiczne, gdyż one w dużej mierze, rzutują na temperaturę podłoża.



Wschodnia część zobrazowanego obszaru leży na młodszym tarasie akumulacyjnym, natomiast zachodnia na tarasie starszym częściowo akumulacyjnym. Oba tarasy są wyraźnie zaznaczone ostrą krawędzią o wysokości względnej dochodzącej miejscami do 15 metrów.

Młodszy taras akumulacyjny jest zbudowany z utworów piaszczystych akumulacji rzecznej. Są to przede wszystkim plejstocenske piaski ze żwirami oraz żwiry rzeczne z wkładkami mad.

Na całym obszarze młodszego tarasu akumulacyjnego pierwszy poziom wody gruntowej w przeważającej części roku występuje na głębokości 0—2 m, sprawia to, że w wielu miejscach taras ten jest zabagniony. Jedynie w okolicach Wilanowa i jego najbliższym sąsiedztwie poziom pierwszego horyzontu wód gruntowych jest nieco niższy.

Starszy taras akumulacyjny zajmujący zachodnią część zobrazowanego obszaru zbudowany jest z piasku średnio i gruboziarnistego ze żwirami. Pierwszy horyzont wód gruntowych kształtuje się tu od 2—5 m poniżej powierzchni terenu, w niektórych zaś miejscach (Ursynów) zalega na głębokości około 10 m.

Tereny silnie zawilgocone mają na lotniczych obrazach termalnych z reguły bardzo ciemny ton. Wiąże się to ściśle ze stosunkowo niską temperaturą tych obszarów. Ta niższa temperatura obszarów wilgotnych w porównaniu z obszarami suchymi jest spowodowana zwiększeniem przewodnictwa ciepła wskutek wypełnienia wodą przestrzeni między cząsteczkami gleby. Zwiększenie przewodnictwa wpływa na szybsze wypromieniowywanie ciepła z gruntu. Na termofotoszkie z dnia 13 czerwca wyraźnie zaznaczają się ciemnym niemal czarnym tonem obszary podmokłych łąk i bagien położone na młodszym tarasie akumulacyjnym. Dość wyraźnie zaznacza się na obrazie termalnym także skarpa odgraniczająca dwa tarasy. U jej podnóża występują bowiem z reguły obszary podmokłych łąk.

Inne obszary młodszego tarasu akumulacyjnego są znacznie jaśniejsze co niewątpliwie wiąże się z ich wyższą temperaturą spowodowaną mniejszym wypromieniowywaniem wskutek obecności upraw na polach. Występujące tu różnice tonalne związane są przede wszystkim z różną wartością współczynnika emisji poszczególnych zespołów roślinnych. W niektórych miejscach młodszego tarasu akumulacyjnego np. w okolicach Zawad (na wschód od Wilanowa) można zaobserwować rozjaśnienie tonu obrazu termalnego, mimo niezmiennych warunków litologicznych i hydrologicznych jakie panują na tym obszarze. Genezy tego zjawiska nie udało się ustalić w trakcie pierwszych eksperymentów.

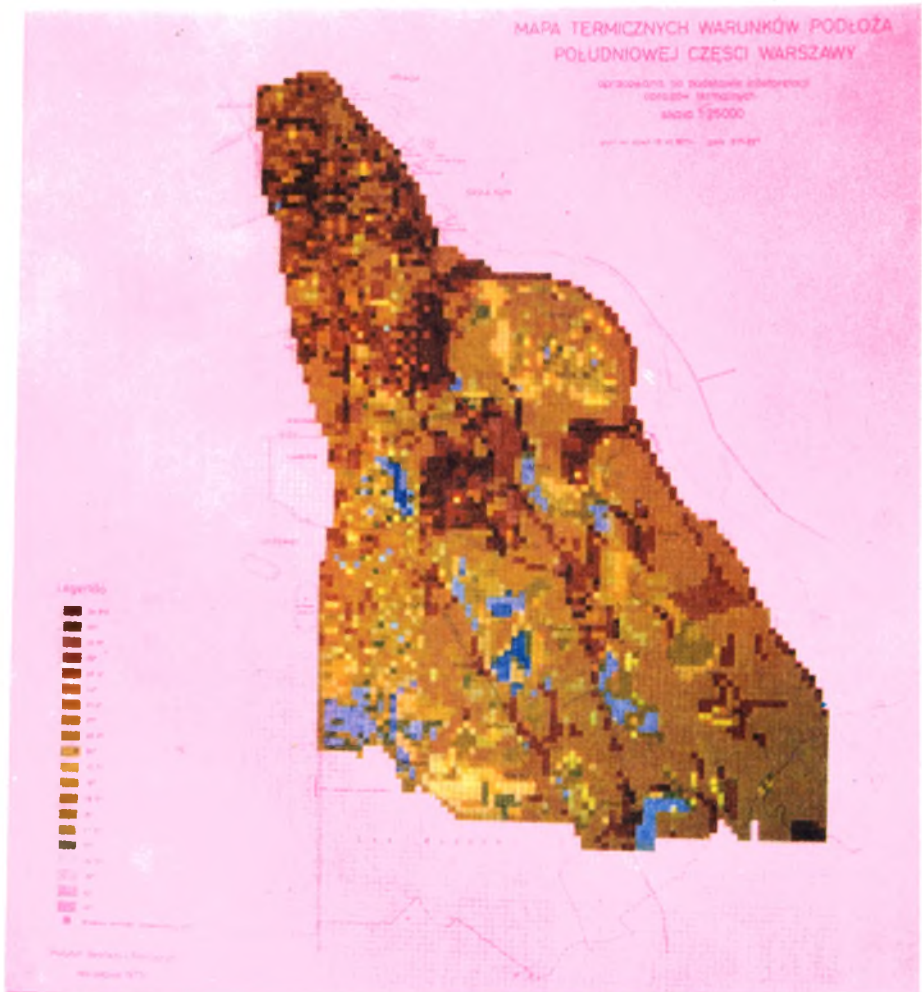
W obrębie starszego tarasu akumulacyjnego różnicowanie tonów jest znacznie mniejsze, co na obszarach niezabudowanych wiąże się niewątpliwie z odmiennymi warunkami hydrologicznymi. Większe głębokości

do pierwszego horyzontu wód gruntowych w obrębie obszarów piaszczysto-żwirowych sprawiają, że są one stosunkowo jaśniejsze, zwłaszcza w porównaniu z obszarami zajętymi przez gliny zwałowe, które na termofotoszkiecie zobrazowały się w tonie znacznie ciemniejszym.

Na obszarze zajętym przez zabudowę właściwie nie można mówić o wpływie litologii na wielkość emisji promieniowania podczerwonego. Powierzchnia gruntu jest tu bowiem zajęta przez budynki bądź pokryta płytami betonowymi, asfaltem, lub też trawnikami. Sprawia to, że przy stosunkowo zbliżonych wartościach współczynników emisji wymienionych obiektów (z wyjątkiem trawy) ton ich obrazu jest zdeterminowany temperaturą.

Wspomniane uprzednio zróżnicowanie tonalne w obrębie zabudowy świadczyłoby zatem o zróżnicowaniu termalnym, a zatem Stegny, czy Sielce czy wreszcie osiedle Ateńska miałyby wyższe temperatury w porównaniu z pozostałą częścią zabudowy pód. części Warszawy. Ponieważ zdjęcie zostało wykonane w czerwcu a więc w okresie niegrzewczym owo zróżnicowanie temperaturowe może wynikać z różnego stopnia nagrzania budynków promieniami słonecznymi, a zatem nowo wznoszone osiedla są większymi pojemnikami ciepła niż osiedla starsze, co w okresie letnim wpływa na obniżenie komfortu wieczornego i nocnego odpoczynku mieszkańców tych dzielnic. Na podstawie termofotoszkiecu ilustrującego jakościowe stosunki termalne na obszarze pód. Warszawy została opracowana mapa charakteryzująca termikę tego obszaru pod względem ilościowym. Wyniki pomiarów temperatury podłoża pód. Warszawy zostały uśrednione dla pól o powierzchni 1,44 ha i przedstawione na mapie w skali 1 : 25 000 (rys. 4). Późny czerwcowy wieczór charakteryzował się znaczną amplitudą temperatury w analizowanej części miasta. Najchłodniejsze miejsca (podmokłe łąki) miały temperaturę około 14°C. Natomiast najsilniej nagrzane obszary w obrębie zabudowy mieszkalnej charakteryzowały się temperaturą 24,5°C. Temperatura podłoża starej zabudowy Warszawy wynosiła około 22°—23°C, lecz obszary tak wysokich temperatur są rozdzielone wieloma polami o temperaturach znacznie niższych rzędu 19°—20°C, czego nie obserwuje się na obszarach nowowznoszonych osiedli gdzie stosunkowo wysoka temperatura panuje na dużych obszarach. Spośród osiedli mieszkaniowych zobrazowanych na termofotoszkiecie z dnia 13. 06. 1977 r. najwyższymi temperaturami charakteryzują się Stegny i Sielce. Średnia temperatura powierzchni tego obszaru kształtuje się w granicach 24°C. Warto zwrócić uwagę, że obszary bezpośrednio sąsiadujące z zabudową mają temperaturę rzędu 16°C. Bardzo silny gradient termalny zaznacza się szczególnie wzdłuż zachodniej granicy osiedla Stegny.

Lotniczy obraz termalny dostarcza w tym przypadku szczególnie



Rys. 4. Mapa obrazująca termiczne warunki podłoża pld. części Warszawy



ważnych informacji dla potrzeb planowania przestrzennego. Znacznie cieplejszy w stosunku do otoczenia, obszar osiedla powoduje wynoszenie nagrzanego powietrza, którego miejsce zajmuje powietrze chłodniejsze napływające z otaczających terenów. Dobrze więc się stało, że nie zabudowane obszary wokół Stegien mogą dostarczyć tego chłodniejszego powietrza. Natomiast przy dalszej rozbudowie południowej Warszawy trzeba bardzo dokładnie rozważyć lokalizację sąsiednich osiedli, ażeby przez ograniczenie wielkości powierzchni nie zabudowanej wokół Stegien nie spowodować zakłóceń w wymianie powietrza.

14 czerwca o godz. 1<sup>00</sup> w nocy rozpoczął się drugi lot termalny nad tym samym obszarem. Nowy obraz termalny miasta jest nieco inny niż ten sprzed 4 godzin. Generalnie ton obrazu termalnego jest znacznie ciemniejszy i bardziej jednorodny. Kontrasty tonalne są znacznie mniejsze, jeśli pominąć powierzchnię wody. Wyrównanie temperatury zaznacza się przede wszystkim na obszarze nie pokrytym zabudową, gdzie jedynie ton obrazu podmokłych łąk jest w dalszym ciągu bardzo ciemny. Wskutek intensywnego wypromieniowywania ciepła obserwuje się ogólne obniżenie temperatury na badanym obszarze, przy czym wychłodzenie nie jest jednakowe dla wszystkich obszarów. Obszary pól uprawnych ochłodziły się w granicach 2—2,5°C, obszary zabudowy od 0,5—1°C, natomiast w przypadku podmokłych łąk nie zaobserwowano zmian temperaturowych. W niektórych przypadkach na obszarze pól uprawnych wychłodzenie doszło do 5°C. Porównując otrzymane dwa obrazy termalne można zauważyć, że obszary nowej zabudowy wychłodziły się stosunkowo nieznacznie.

Kolejny obraz termalny płd. Warszawy został wykonany w dniu 8 października 1977 r. Rozpoczął się on w 1,5 godziny po zachodzie słońca i trwał 2 godziny. Otrzymany obraz charakteryzuje się dość dużą rozpiętością tonalną, a za tym i temperaturową. W porównaniu z obrazami czerwcowymi zupełnie inaczej został zobrazowany młodszy taras akumulacyjny Wisły. Ton jego obrazu jest znacznie ciemniejszy, przy czym wyraźnie wyróżnia się granica oddzielająca taras młodszy od starszego. W obrębie tarasu młodszego nastąpiło ujednoczenie tonów spowodowane podniesieniem się zwierciadła pierwszego horyzontu wód gruntowych. Na obraz tarasu starszego, gdzie jak wspomniano pierwszy horyzont wód gruntowych zalega głębiej, obfite opady jakie miały miejsce w lecie 1977 roku nie wywarły tak dużego wpływu. Obrazy termalne zostały wykonane wtedy, kiedy miejska sieć ciepłownicza została już włączona. Daje się to zaobserwować poprzez znacznie większy kontrast tonalny pomiędzy samymi budynkami a terenem najbliższego ich sąsiedztwa. Ciepłe budynki są znacznie lepiej wyróżnialne na obrazie jesiennym niż miało to miejsce na obrazie wykonanym w lecie. I znowu jak poprzed-

nio wyróżnia się zabudowa nowsza od starszej. Tym razem także znacznie cieplejsze są nowo wznoszone budynki. Jednak geneza ich wyższej temperatury jest tym razem inna. Wiąże się to niewątpliwie z ogrzewaniem budynków i oddawaniem otrzymanego ciepła przez zewnętrzne ściany i dachy budynków. W tym przypadku lotnicze obrazy termalne ujawniają zatem niedostateczną izolację termiczną nowo wznoszonych budynków, a tym samym duże straty ciepła.

Opracowana na podstawie jesiennych obrazów termalnych mapa rozkładu temperatury na powierzchni terenu ujawnia także duże różnice termiki. W warunkach jesiennych kontrast termiczny na obszarze płd. Warszawy wynosi około  $10^{\circ}\text{C}$ . Najniższą temperaturę rzędu  $6^{\circ}\text{C}$  mają obszary podmokłych łąk, najwyższą natomiast zabudowa w obrębie Sielec i Stegien — około  $15^{\circ}\text{C}$ .

Wyniki pierwszych prac nad termiką podłoża południowej Warszawy wskazują na ogromną przydatność obrazów termalnych wykonywanych z pokładu samolotu. Obrazy te bowiem umożliwiają otrzymanie niemal jednoczesnego spojrzenia na dość duży i różnorodny obszar, czego nie są w stanie zapewnić tradycyjne metody badawcze. Przy pewnych modyfikacjach technicznych samego skanera można jeszcze bardziej zwiększyć szybkość otrzymywania informacji o termice terenu. W nadchodzącej erze umieszczania wysokorozdzielczych skanerów podczerwieni na pokładach sztucznych satelitów Ziemi otrzymywane obrazy będą rzeczywiście przedstawiały chwilowy rozkład temperatury na znacznych obszarach.

Lotnicze obrazy termalne mają jednak i słabą stronę. Na ich jakość w dużym stopniu wpływają warunki meteorologiczne przede wszystkim opady i para wodna. Te dwa czynniki wyrównują kontrast termalny obiektów terenowych. Pora wykonywania obrazów ma więc bardzo istotne znaczenie.

Ilość informacji otrzymana za pomocą obrazów termalnych o termice miasta jest tak duża, że nie można jej wszystkiej wyrazić na mapie w skali 1 : 25 000. Stąd też w prezentowanym opracowaniu wprowadzono dość znaczną generalizację. Obrazy te jednak można z powodzeniem wykorzystać do badań mikroklimatycznych nawet małych grup zabudowy.

АНЖДЕЙ ЦИОЛКОШ  
БАРБАРА ХАЛЕМБА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ АЭРОСЪЕМКИ В РАЗРАБОТКЕ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ГРУНТА ЮЖНОЙ ВАРШАВЫ

### Резюме

Большой город в значительной степени формирует свой собственный климат. На его улицах и площадях появляются своеобразные микроклиматические условия в зависимости от застройки, системы транспорта или же размещения зелени. Развитие городского строительства изменяет существенным образом природные условия в городе. От длительного времени ведутся работы, имеющие целью определение актуальных и прогнозных микроклиматических условий постоянно развивающихся городов. В этих работах используются обычно наблюдения выполняемые в небольшом числе пунктов.

Эти несовершенства традиционных методов могут быть в значительной степени исключены тепловой аэросъемкой, на основе которой можно анализировать поверхностное распределение температуры для значительной территории в сравнительно короткое время.

В данной работе представлены результаты анализа тепловых аэроснимков охватывающих южную Варшаву. Тепловая съемка выполнена с помощью инфракрасного сканера AGA Thermoprofile Model TNP-1, установленного на борту самолета ИЛ-14. AGA Thermoprofile Model TNP-1 это устройство, действие которого заключается в регистрации электромагнитного излучения в диапазоне волн длиной от 2,0 до 5,6 микрометра.

Тепловая съемка территории южной Варшавы выполнена была трехкратно. Первый тепловой полёт был произведен в июне во время между 21.35 и 23.35 час. после заката солнца. Второй полет выполнено 4 часа позже, а третий в октябре после притока арктических масс воздуха, также после заката солнца.

Вся снимаемая территория была покрыта 9 рядами по направлению север—юг. Масштаб полученных негативов термограмм выюсит приблизительно 1 : 60 000.

Условия, в которых производилась тепловая съемка, были положительны с точки зрения техники регистрации длинноволнового инфракрасного излучения. После жаркого дня небо было безоблачное, что благоприятствовало радиации, а скорость ветра не превышала 4 м/сек, а таким образом не происходило охлаждение путем вынужденной конвекции.

На полученных тепловых снимках выступила большая гамма серых тонов, заключенных между очень темным тоном, почти черным, и белым тоном. Обобщая, можно сказать, что объекты с низкой температурой имеют на термограмме темные тона, а объекты теплые — более ясные. Этот принцип днако в некоторой степени модифицирован эмиссионной способностью объекта, которая в значительной мере изменяет фототон термального изображения объектов с одной и той же температурой. Обозначает это, что если эмиссионная способность определенная коэффициентом эмиссии данного объекта меньше чем другого, то, несмотря на одинаковую температуру обеих объектов, первый из них будет иметь более темный тон на тепловом снимке, чем другой.

Термограммы дают возможность качественной интерпретации распределения температуры на поверхности исследуемой территории. Количественный анализ

тепловых снимков произведен на Микрофотометре CS-3 фирмы Joyce — Loebel. Микроденситометрические измерения произведено профильным методом, регистрируя величины оптической плотности с поверхности 2 мм вдоль негатива теплового снимка. Амплитуда колебаний микроденситометрического графика характеризуется изменением оптической плотности негатива, которая находится в функциональной зависимости с температурой объекта и его эмиссионностью.

Во время произведения тепловой съемки выполнено непосредственные измерения реальной температуры разного вида объектов, таких как: бетон, асфальт, вода, трава, сельскохозяйственные культуры, а также измерено температуру воздуха на высоте 1,5 м. Эти температуры становились основой для приспособления показателей оптической плотности отдельных объектов к их реальной температуре, учитывая таким образом коэффициент эмиссии объектов.

Приспособление результатов измерений оптической плотности к величине реальной температуры произведено путем аппроксимации кривой второй степени при условии, что сумма квадратов отклонений отдельных наблюдаемых величин от кривой будет наименьшая. Средняя квадратическая ошибка величины реальной температуры в зависимости от измеренной оптической плотности получена в границах:  $\pm(0,5^{\circ}\text{C} - 0,8^{\circ}\text{C})$ .

Как уже было упомянуто, на тепловых снимках изображаемой территории выступила большая тональная, а тем самым и температурная дифференциация. С целью проанализирования причин так большой тональной дифференциации на исследуемой территории следует прежде всего обратить внимание на преобладающие тут литологическо-гидрологические условия, т.к. они в значительной мере влияют на температуру подстилающей поверхности.

Восточная часть изображаемой территории лежит на молодой аккумуляционной террасе, зато западная на старшей террасе частично аккумуляционной. Молодая аккумуляционная терраса сложена из песчаных отложений речной аккумуляции. Прежде всего это плейстоценовые пески с гравием и речной хрящ с вкладки ила.

На всем пространстве молодой аккумуляционной террасы первый уровень грунтовой воды в преобладающей части года выступает на глубине 0—2 м. Это вызывает, что во многих местах терраса заболочена. Сильно увлажненные территории имеют на тепловых аэроснимках, как правило, довольно темный тон. Связано это тесно со сравнительно низкой температурой этих территорий.

Другие пространства молодой аккумуляционной террасы значительно более ясные, что несомненно связано с их высшей температурой вызванной как меньшим излучением, так и наличием культур на полях. Выступающие тут тональные различия связаны прежде всего с величиной коэффициента эмиссии отдельных растительных комплексов.

Старшая аккумуляционная терраса, занимающая западную часть изображаемой территории, сложена из средне и крупнозернистого песка с гравием. Первый горизонт грунтовых вод выступает тут на глубине от 2—5 м, а в некоторых местах формируется на глубине около 10 м. Дифференциация серых тонов для этой территории значительно меньшая.

На территории занятой застройкой собственно не можно говорить о влиянии на величину эмиссии инфракрасного излучения. Поверхность грунта занята тут или домами, либо покрыта бетонными плитами, асфальтом, или также травой. Это вызывает, что при сравнительно близких величинах коэффициентов эмиссии перечисленных объектов, за исключением травы, тон их изображения предопределен величиной температуры.



На основе тепловой фотосхемы, иллюстрирующей качественным способом термальные отношения на территории южной Варшавы, были разработаны карты изображающие количественную характеристику термики этой территории. Результаты интерпретации термограмм, выполненных в июне, нанесено на карту в масштабе 1:25 000 методом сетки квадратов, соответствующих анализированным микрофотометрическим способом элементарным поверхностям негатива теплового снимка.

Тепловые снимки, выполненные в июне после заката солнца, показывают значительную амплитуду температур на территории города. Более холодные места (подмокшие луга) имели температуру ряда 14°C, зато наиболее нагретые поверхности в пределах новых жилых районов характеризовались температурой 24,5°C. Температура грунта старой застройки Варшавы равнялась около 22—23°C.

Тепловое изображение города, выполненное 4 часа позже, является несколько другим. Вообще тон теплового изображения значительно темнее и более однородный. Вследствие интенсивного излучения тепла наблюдается общее понижение температуры на исследуемой территории, причем охлаждение не одинаково для всех поверхностей. Территории сельскохозяйственных полей охладились в границах 2—2,5°C, застроенные поверхности от 0,5—1°C, зато в случае подмокших лугов не замечено изменений температуры.

Для осенних условий термический контраст между районами города составляет около 10°C. Самую низкую температуру ряда 6°C имеет поверхность подмокших лугов, а застроенные районы около 15°C. И снова, как прежде, отличается застройка новая от старшей. На этот раз значительно более теплыми являются также новые дома. Однако генезис их высшей температуры на этот раз другой. Связано это несомненно с отоплением домов и отдачей полученного тепла внешними стенами и крышами домов.

Перевод: Róża Tolstikowa

ANDRZEJ CIOŁKOSZ  
BARBARA HALEMBA

## GROUND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN SOUTHERN WARSAW DETERMINED FROM LOW-ALTITUDE THERMAL IMAGERY

### Summary

Any big city shapes to a certain extent its own climate. The specific microclimatic conditions prevailing on its streets and squares depend on its layout — the height of buildings, the transportation network and the distribution of the green belts. Research on the present climatic conditions in big cities as well as the provision of climatic forecasts for constantly growing urban centres is being done mainly on the basis of ground data collected at a limited number of locations.

The deficiency inherent in the traditional methods may be eliminated to a large extent by employing one of the modern means of data acquisition: the thermal

imagery from air-borne sensors. Low-altitude thermal imagery permits the interpretation of surface temperature distribution over a large area in a relatively short time.

This paper presents the results of an analysis of airborne thermal imagery of the area of southern Warsaw. The imagery was produced with the infrared scanner AGA Thermoprofile Model THP-1, mounted on board of a ILYUSHIN-14. The AGA Thermoprofile THP-1 registers electromagnetic radiation in the spectral range of 2.0 to 5.6  $\mu\text{m}$ .

The images were taken on three different dates: the first time was between 21,35 hrs and 23,35 hrs on a June night; the second time 4 hours later and the third time in October, after the sunset (shortly after an arctic air mass invasion). The area was covered by 9 strips of thermal images with a scale of 1 : 60 000.

Weather conditions during the June flight were favourable for the acquisition of long-wave infrared imagery. After a very hot day the sky was clear, i.e. the radiation was extensive; moderate winds (up to 4m/sec) were not creating any forced convection, i.e. the surface temperature was not decreasing rapidly.

A large number of grey tones were registered on the images; starting from very dark (almost black) to very light grey and white. Generally speaking, cool objects are registered on the imagery in dark tones and warm objects in light tones. However, the emission characteristics of different objects modify this general rule, and frequently two objects of the same temperature are depicted on the imagery in different tones. The object having greater emissive power is registered in darker tone.

Thermal images allow for qualitative interpretation of ground temperature distribution over the area investigated.

Quantitative analysis of thermal imagery was carried out with the use of a Joyce-Loebl Microdensitometer CS-3. Optical density was measured on the negative, along the profile, in intervals of 2 mm. The resulting graph shows changes in the optical density of the negative, which are a function of the temperature and the emissive power of different ground objects.

Ground data was collected simultaneously with the acquisition of imagery. Air temperature was measured at a height of 1.5 m above the surface; the temperatures of concrete, road asphalt, water, grass and cultivated plants were also registered.

The results of these direct temperature measurements were used for the calibration of the optical density readings for various objects. The procedure allows to take into account the effects of differences in the emissive powers of the objects investigated. A quadratic relationship between the optical density and the temperature was assumed and the data were fitted by means of the least-squares fit. The mean error of the temperature thus established for ground objects is within the range of  $\pm (0,5-0,8^{\circ}\text{C})$ .

The distribution of ground temperature depends to a large degree on the lithology and hydrology of an area. The eastern part of the area under investigation is situated on the younger alluvial terrace; the western part on the older alluvial terrace. The younger terrace consists of sands from river accumulation. These are mainly pleistocene sands with gravels and river gravels with small sections of alluvial soil.

Troughout the greater portion of the year the first level of ground water in this area appears at a depth of 0—2 m below the surface; large portions of the

younger terrace are boggy. The relatively low temperature of these wet and boggy areas results in dark tones on their thermal images.

Images of other parts of the younger terrace are considerably lighter. The higher temperature of these mostly arable lands is attributed to lower radiation. Tonal differences appearing within arable land are associated with different emission coefficients of different plant associations.

The older terrace consists of sands and gravels. The first ground water level here appears at a depth of 2–5 m, in some places even as deep as 10 m below the surface. Tonal differences within this area are negligible.

In the built-up areas almost the entire surface is occupied by buildings or is covered with concrete, asphalt and green plants. With the exception of greenery, the emission coefficients of these materials are similar. The tone of their image depends on their temperature.

The results of the interpretation of the thermal images of Southern Warsaw acquired in June were used for the elaboration of a map at the scale of 1 : 25 000 showing the distribution of ground temperatures. The square grid method was used; the size of one square corresponding to the smallest area analyzed with the use of a microdensitometer.

The thermal images of Warsaw, taken on a June evening, show significant deviations of ground temperatures in the city. Wet meadows are the coolest, with temperatures around 14°C; the highest temperatures are in newly built housing developments (about 24.5°C). The ground temperature in the older parts of the city is slightly lower (22–23°C).

The tone of the thermal image of the city taken 4 hours later is generally darker; the image is more homogenous than the previous one. Due to the intensive radiation, ground temperatures are generally lower. Because of the radiation being most intensive in the cultivated areas, the ground temperature here dropped by 2–2.5°C. The ground temperature in the built-up areas decreased only by 0.5–1.0°C, whereas no decrease was observed for wet meadows.

The results of interpretation of the thermal image taken in October are also presented on a map at the scale of 1 : 25 000. The differences of ground temperatures within the city are up to 10°C. Wet meadows are again the coolest, with temperatures around 6°C, the temperature of built-up areas is about 15°C.

Thermal differences between the new and the old housing developments are also visible. The ground temperature in the new city quarters is again much higher. This time, however, the deviations are to be attributed to the differences in the physical properties of building materials. Apparently, the outside walls and roofs of new buildings give off more thermal energy than those of older buildings.

Translation: Wiesława Sujkowska

ANDRZEJ CIOŁKOSZ  
BARBARA HALEMBA

## UTILISATION DES IMAGES AÉRIENNES THERMALES POUR L'ÉLABORATION DES CONDITIONS THERMALES DU SOUS-SOL DE LA PARTIE MÉRIDIONALE DE VARSOVIE

### Résumé

Une grande agglomération urbaine forme, dans une grande partie, son propre climat. Des conditions microclimatiques spécifiques se produisent sur ses rues et sur ces places en fonction des constructions, du système du transport et de la disposition des espaces verts. Le développement de la construction dans les grandes villes change d'une façon considérable leurs conditions naturelles. Depuis longtemps on poursuit les travaux ayant pour objectif de déterminer les conditions microclimatiques actuelles et prévues des villes en expansion. Au cours de ces travaux on utilise, généralement, des observations effectuées dans un nombre limité de points.

Cette imperfection des méthodes traditionnelles peuvent, dans une grande partie, être éliminée par les images aériennes thermales à base desquelles on peut analyser, dans un temps relativement bref, la répartition superficielle de la température pour un terrain d'une surface considérable.

Notre exposé présente les résultats de l'analyse des images aériennes thermales de la partie méridionale de Varsovie. Les images thermales furent effectuées par le Scanner d'infrarouge AGA Thermoprofile modèle THP — 1 installé au bord de l'avion IŁ — 14. AGA Thermoprofile THP — 1 est un dispositif dont le fonctionnement consiste à enregistrer le rayonnement électromagnétique à la gamme de fréquences des ondes de 2,0 à 5,6 micromètres.

La visualisation thermique des terrains méridionaux de Varsovie fut effectuée à trois reprises. Le premier vol thermal eut lieu au mois de juin entre 2h35 et 23h35 après le coucher du soleil. Le deuxième fut réalisé 4 heures plus tard et le troisième au mois d'octobre, après l'affluence d'air arctique, également après le coucher du soleil.

Le terrain en question fut couvert de 9 bandes d'images à orientation nord-sud. L'échelle des négatifs des thermogrammes obtenus fut approximativement de 1 : 60.000.

Les conditions dans lesquelles eut lieu la visualisation thermique furent favorables du point de vue de la technique d'enregistrement du rayonnement infrarouge à longues ondes. Après la journée très chaude, le ciel fut clair ce qui favorisa la radiation et la vitesse du vent ne dépassant pas 4 m/s le refroidissement par la convection forcée ne put pas se produire.

Sur les images thermales obtenues on observa une large gamme de tons gris se renfermant entre les tons très foncés, presque noirs et les tons blancs. En généralisant, on peut constater que les objets à températures basses sont représentés sur les thermogrammes par les tons foncés et les objets à températures plus élevées par les tons clairs. Ce principe est modifié, dans une certaine mesure, par la capacité d'émission de l'objet qui change remarquablement le phototon de l'image thermique des objets de la même température. Cela signifie que, si la capacité d'émission déterminée par le coefficient de l'émission d'un objet est moindre que

d'un autre objet, le premier d'entre eux sera marqué sur l'image thermique par le ton plus foncé que le deuxième quoique leur température soit la même.

Les thermogrammes permettent d'effectuer l'interprétation qualitative de la répartition de température sur la surface du terrain étudié. Quant à l'analyse quantitative des images thermiques, elle fut réalisée avec le microphotomètre CS — 3 de la société Joyce — Loeb. Les mesures microdensimétriques furent effectuées par la méthode de profil avec l'enregistrement des valeurs de la densité optique de la surface de 2 mm, le long du négatif de l'image thermique. L'amplitude des variations du diagramme microdensimétrique caractérise le changement de la densité optique du négatif qui reste en dépendance fonctionnelle avec la température de l'objet et avec son pouvoir émissif.

Au cours de l'exécution de la visualisation thermique, on effectua les mesures directes de la température réelle de différents objets tels que: béton, asphalte, eau, gazons, cultures. On mesura également la température de l'air à l'altitude de 1,5 m. Ces températures servirent de base pour l'adaptation des lectures de la densité optique de différents objets à leur température réelle et c'est ainsi que l'on peut tenir compte du coefficient d'émission de ces objets.

L'adaptation des résultats des mesures de la densité optique à la valeur de la température réelle fut réalisée par l'approximation de la courbe conique avec l'hypothèse que la somme de carrés des écarts de différentes valeurs observées par rapport à la courbe soit minimale. L'erreur moyenne de la valeur de la température réelle en fonction de la densité optique mesurée se renferma entre  $\pm (0,5^{\circ}\text{C} - 0,8^{\circ}\text{C})$ .

Comme il en eut déjà question, une importante différenciation de tons, donc de températures fut observée sur les images thermiques du terrain visualisé. Pour en analyser les raisons, il faut particulièrement tenir compte des conditions lithologiques et hydrologiques existantes sur ce terrain, car ce sont ces conditions qui, en grande partie, influencent la température du sous-sol.

La partie est du terrain visualisé se trouve sur une terrasse jeune d'accumulation, par contre la partie ouest sur une autre plus ancienne qui n'est que partiellement une terrasse d'accumulation. Cette première terrasse est composée de sols sableux de l'accumulation fluviale. Ce sont surtout des sables et graviers de pléistocène ainsi que des graviers fluviaux avec des intercalations du sol alluvial.

Sur le terrain entier de la terrasse jeune d'accumulation, le premier niveau de l'eau souterraine paraît, dans une majeure partie de l'année, à la profondeur de 0 à 2 m et c'est pourquoi certaines parties du terrain sont marécageuses. Les terrains d'une forte humidité, sur les images thermiques aériennes se caractérisent, du principe, d'un ton très foncé. Cela est étroitement lié à la basse température de ces terrains.

Les autres terrains de la terrasse jeune d'accumulation sont sensiblement plus clairs ce qui, sans doute, est lié à leur température élevée résultant aussi bien de l'émission limitée que de l'existence des cultures sur les champs. Les différences de tons qu'on y observe sont liées, avant tout, à la valeur du coefficient d'émission de certains ensembles végétaux.

La terrasse d'accumulation plus ancienne dans la partie ouest du terrain visualisé est composée de sable à grains moyens et grossiers avec du gravier. Le premier niveau des eaux souterraines y paraît à la profondeur de 2 à 5 m et parfois, de 10 m environ. La différenciation de tons du gris dans ce terrain est beaucoup moins importante.

Sur le terrain aménagé on ne peut pas pratiquement observer l'influence de la

lithologie sur la grandeur de l'émission du rayonnement infrarouge. La surface du terrain est, dans ce cas, couverte soit par des bâtiments soit par des dalles en béton, par l'asphalte ou par des gazons. C'est pour cela dans le cas des valeurs relativement approchées des coefficients d'émission des objets mentionnés, sauf les gazons, le ton de leur image est déterminée par la grandeur de la température.

A base du thermophotoplan présentant qualitativement les conditions thermales dans la partie méridionale de la ville de Varsovie furent élaborées les cartes illustrant la caractéristique quantitative de la thermique de ce terrain.

Les résultats de l'interprétation des thermogrammes effectués en juin furent rapportés sur une carte à l'échelle de 1:25.000 par la méthode du quadrillage correspondant aux surfaces élémentaires du négatif de l'image thermique analysées par la méthode microphotogrammétrique.

Les images thermales effectuées en juin après le coucher du soleil montrent une amplitude importante des températures sur le terrain de la ville. La température des lieux les plus froids (prairies marécageuses) s'élevait à 14°C et celle des zones les plus chaudes, sur les terrains des quartiers d'habitation en construction, s'élevait à 24,5°C. La température du sous-sol des terrains des constructions anciennes de Varsovie se renfermait entre 22 et 23°C.

L'image thermique de la ville exécutée 4 heures plus tard est un peu différente. Le ton de cette image est, généralement, beaucoup plus foncé et plus homogène. A cause de l'émission intensive de la chaleur on observe sur le terrain étudié un abaissement général de la température, mais le refroidissement n'est pas le même pour toutes les zones de ce terrain. Les terrains de cultures subirent le refroidissement de 2 à 2,5°C, les terrains aménagés — de 0,5 à 1°C. Par contre, dans le cas des prairies marécageuses les changements de température ne furent pas observés.

L'image thermique suivante du sud de Varsovie fut effectuée au mois d'octobre. On rapporta les résultats de l'interprétation de cette visualisation sur une carte à l'échelle de 1:25.000 en attribuant les valeurs moyennes des températures aux zones d'un phototon identique.

Le contraste thermique entre différentes zones de la ville dans les conditions automnales s'élève à 10°C environ. La plus basse température (6°C) est notée sur les terrains des prairies marécageuse tandis que la température des terrains aménagés s'élève à 15°C. Ici, à nouveau, on observe la distinction entre les terrains aménagés nouveaux et anciens. Cette fois également, les bâtiments nouvellement construits s'avèrent beaucoup plus chauds. Cependant l'origine de leur température plus élevée est, dans ce cas, différente et est en rapport, sans doute, avec le chauffage de ces bâtiments et avec la remise par les murs extérieurs et les toits de la chaleur absorbée.

Traduction: Bohdan Jakubowski