

ANDRZEJ CIOŁKOSZ

528.7.029.672:614.77

Zastosowanie długofalowego promieniowania podczerwonego w badaniach termalnego zanieczyszczenia rzek

SPIS TREŚCI

Wstęp	29
Teledetekcja w długofalowym promieniowaniu podczerwonym	34
Urządzenia służące do pozyskiwania informacji w długofalowym promieniowaniu podczerwonym	41
Charakterystyka jakościowa lotniczych obrazów termalnych otrzymanych za pomocą kamery termalnej AGA Thermovision System 680 oraz Thermoprofile Model THP 1	47
Zasady otrzymywania informacji ilościowych na podstawie obrazów termalnych	52
Badania laboratoryjne nad ustaleniem korelacji między pomiarami temperatury wody metodą kontaktową i bezkontaktową	56
Analiza lotniczych obrazów termalnych odcinka Wisły między elektrownią „Kozienice” a ujściem Pilicy	60
Wnioski	70
Literatura	72

Wstęp

Coraz wyższą cenę zaczyna płać ludzkość za rozwój nowoczesnej cywilizacji przemysłowej. Do wielu ubocznych, niezamierzonych skutków tego rozwoju, zwanych potocznie „chorobami cywilizacyjnymi”, dochodzi następny — degradacja środowiska geograficznego. Wprawdzie symptomy degradacji można było spotkać już dawno, to jednak nigdy na przestrzeni historii ludzkości nie przybrała ona tak zagrażających rozmiarów jak obecnie. Do tej pory przyroda sama potrafiła wyleczyć się z ran zadanych jej ręką człowieka, dziś zachodzi już obawa, że degradacja może mieć następstwa nieodwracalne, które mogą postawić pod znakiem zapytania dalszą egzystencję ludzi na Ziemi.

Pośród wszystkich elementów środowiska geograficznego, ulegających skutkom rozwoju cywilizacji permanentnej degradacji, na pierwszym miejscu trzeba wymienić powietrze atmosferyczne i wodę jako te ele-

menty, których systematyczne zanieczyszczanie ma decydujące znaczenie dla dalszego rozwoju życia na naszej planecie.

Mimo pojawiających się coraz częściej apokaliptycznych wizji przyszłego losu ludzkości w przypadku niezahamowania destrukcyjnych procesów towarzyszących rozwojowi cywilizacji, nie należy przewidywać aby którykolwiek z postulatów nawołujących do radykalnego ograniczenia tego rozwoju mógł być w najbliższej przyszłości realizowany. Nie należy więc oczekiwać ani zmniejszenia urbanizacji z jej komunalnymi ściekami o dużej zawartości detergentów, ani ograniczenia przemysłu i transportu, ani też wreszcie zaprzestania używania pestycydów w rolnictwie, a więc zmniejszenia wpływu tych czynników, którym powietrze atmosferyczne i woda „zawdzięczają” najsilniejsze zanieczyszczenie bądź też skażenie.

Współczesna technika nie jest całkowicie bezradna wobec problemów degradacji środowiska. Wielu groźnych zanieczyszczeń, zwłaszcza komunalnych i przemysłowych, można by uniknąć stosując bądź odpowiednią technologię produkcji, bądź też odpowiednie sposoby oczyszczania wydalanych gazów, pyłów i ścieków. Kłopot tylko w tym, że zarówno zmiana technologii produkcji jak też i budowa urządzeń oczyszczających wymaga ogromnych nakładów, na które nie wszystkie zakłady mogą sobie od razu pozwolić. Znacznie bardziej opłaca się, jak wykazała praktyka, płacić nawet wysokie kary umowne za niszczenie środowiska niż budować filtry i oczyszczalnie, z działaniem których często łączą się dodatkowe kłopoty, nie zawsze jeszcze znajdujące łatwe rozwiązanie (np. składowanie pyłów dymnicowych).

W niektórych jednak przypadkach współczesna technika nie zna jeszcze skutecznych środków oczyszczania emitowanych gazów, czy odprowadzanych ścieków. Wówczas jedynie odpowiednia adaptacja środowiska do nowych warunków może, choć częściowo, zapobiec dewastacji.

„Powrót do natury” wedle idealistycznej recepty Jana Jakuba Rousseau jest całkowitą utopią. Cywilizacja techniczna będzie rozwijała się nadal, ale rozwój ten winien odbywać się pod wzmożoną kontrolą wpływu poszczególnych zakładów przemysłowych na środowisko, a także kontrolą całokształtu warunków środowiskowych, na które, oprócz przemysłu, oddziałują także: urbanizacja, transport oraz zmechanizowane i zchemizowane rolnictwo.

W chwili obecnej znanych jest wiele metod takiej kontroli. Niemal wszystkie one wymagają bezpośredniego kontaktu badacza z analizowanym obiektem czy zjawiskiem. Są to najczęściej metody punktowe, których wyniki podlegają następnie ekstrapolacji na cały obszar występowania zjawiska. W wielu przypadkach subiektywizm badacza ma decydujące znaczenie w uogólnianiu wyników. Są to wreszcie metody pracochłonne i czasochłonne.

W poszukiwaniu nowych metod kontroli wpływu cywilizacji przemysłowej na środowisko geograficzne sięgnięto do teledetekcji, a więc do badań bezkontaktowych, umożliwiających analizę obiektów, zjawisk i procesów zachodzących na powierzchni Ziemi z pokładów samolotów i sztucznych satelitów.

Współczesny stan nauki i techniki pozwala w metodach teledetekcji wykorzystywać zjawiska magnetyzmu, grawitacji, radioaktywności i promieniowania elektromagnetycznego. Nie wszystkie jednak zakresy tego promieniowania są wykorzystywane do zbierania informacji. Stosuje się tu głównie najdłuższe promieniowanie ultrafioletowe, promieniowanie widzialne oraz niektóre zakresy podczerwieni i mikrofal. Wynikiem rejestracji promieniowania elektromagnetycznego są bądź zdjęcia fotograficzne, jeżeli poszczególne zakresy promieniowania rejestruje się bezpośrednio na kliszy fotograficznej, bądź też obrazy, jeżeli do wizualizacji badanych obiektów wymagane jest przetworzenie sygnału niewidzialnego w obraz widzialny.

Najpowszechniej stosowaną metodą teledetekcji jest fotografia lotnicza. W badaniach środowiska geograficznego stosuje się różne jej techniki z fotografią spektrostrefową i wielospektralną łącznie. Obie te techniki wyjątkowo nadają się do analizy wpływu zakładów przemysłowych na środowisko, jako że prócz widma widzialnego wykorzystywana jest tu również bliska podczerwień, dostarczająca znacznie więcej informacji niż promieniowanie widzialne o stanie niektórych elementów tego środowiska.

Jednak nie wszystkie zjawiska mogą być tymi metodami badane. Wiele spośród nich spostrzec można dopiero w długofalowym promieniowaniu podczerwonym. Jednym z takich zjawisk niedostrzegalnych w widmie widzialnym ani bliskiej podczerwieni jest termalne zanieczyszczenie rzek i zbiorników wodnych.

Wzrost wykorzystania wód przez przemysł spowodował zmiany w ich termice. Coraz więcej rzek i jezior przyjmuje ciepłą wodę odprowadzaną z zakładów przemysłowych, przede wszystkim z elektrowni o otwartym obiegu chłodzenia. Zmiany termiki wody wywołują wiele skutków, zarówno negatywnych jak i pozytywnych. Zbyt krótki jest jeszcze okres obserwacji tych zmian, aby definitywnie przesądzić, które z nich przeważają. Wiadomo jednak, że od temperatury wody zależy ilość rozpuszczonego w niej tlenu, który z kolei decyduje o zdolności wody do samooczyszczania się. Im wyższa więc temperatura wody, tym mniejsza jej zdolność do samooczyszczania się, co w warunkach niemal powszechnego zanieczyszczenia wód w naszym kraju ma niebagatelne znaczenie. Odtlenienie wody to także ogromna zmiana jej biocenozy, wyrażająca się przede wszystkim ucieczką ryb i nadmiernym rozwojem fitoplanktonu. Oba te

zjawiska mają ujemne skutki gospodarcze, z których pierwsze nie wymaga komentarza, drugie natomiast powoduje ciągle zatykanie filtrów kolejnych ujęć wody, co zmusza do permanentnego ich oczyszczania.

Zbyt znaczne podgrzanie wody może okazać się niekorzystne także dla samych zakładów przemysłowych wykorzystujących ją w procesie produkcyjnym do chłodzenia maszyn i urządzeń, bowiem ciepła woda nie spełnia należycie roli wymiennika ciepła.

Pozytywnym skutkiem gospodarczym podgrzewania wód w rzekach jest znaczne ograniczenie tworzenia się pokrywy lodowej i związanych z nią powodzi zatorowych. Inne skutki podgrzewania wód w rzekach i zbiornikach, jak np. wytworzenie swoistego mikroklimatu, zwiększenie wilgotności powietrza, przedłużenie okresu wegetacyjnego itp. nie są jeszcze ocenione z gospodarczego punktu widzenia.

Problem kontroli termalnego zanieczyszczenia wód w rzekach i zbiornikach staje się więc coraz poważniejszy. Nic też dziwnego, że poświęca mu się coraz więcej uwagi. Organizuje się specjalne służby, które metodami bezpośrednimi mierzą temperaturę wody w różnych punktach rzeki i na różnych głębokościach. Z otrzymanych wyników pomiarów wnioskuje się o zachowaniu się strumienia wody cieplej w rzece czy zbiorniku, o intensywności mieszania się wody cieplej i zimnej, a także o zasięgu termalnego zanieczyszczenia odbiornika ciepła odpadowego.

Metoda pomiarów bezpośrednich stosowana jest dotąd najczęściej przy tego typu badaniach, obarczona jest jednak wieloma niedoskonałościami, których niesposób było uniknąć. Jest to przede wszystkim metoda wymagająca obecności człowieka niemal że w każdym punkcie pomiarów. Ogranicza to znacznie liczbę punktów, a ponadto w największym stopniu decyduje o niejednoczesności spostrzeżeń. Najsprawniejsza nawet organizacja pomiarów temperatury wzdłuż określonego przekroju rzeki wymaga od kilkudziesięciu minut do kilku godzin. Nawet dla jednego profilu otrzymuje się zatem wyniki, które tylko przy założonych stałych parametrach wielkości przepływu i temperatury wody zrzucanej, a także i wielkości przepływu wody rzecznej, mogą być porównywalne.

W ciągu ostatniego dziesięciolecia do badań termiki wód w rzekach, jeziorach, a także w morzach i oceanach zastosowano termowizję, a więc technikę badawczą rejestrującą długofalowe promieniowanie podczerwone i przetwarzającą sygnały otrzymane w tym zakresie spektrum w obraz widzialny.

Pierwsze zastosowania w badaniach termiki wód znalazła termografia w Stanach Zjednoczonych, Francji, Szwecji, RFN i Japonii. Obrazy termalne dostarczyły wielu informacji jakościowych o zasięgu zanieczyszczeń termalnych w odbiornikach ciepła odpadowego, jak też o granicach prądów morskich, ich przebiegu, temperaturze itp. Później próbowano wy-

korzystać obrazy termalne do badań ilościowych, a więc do pomiaru temperatury wody w poszczególnych punktach zbiornika. O ile informacje jakościowe są stosunkowo łatwo osiągalne, o tyle otrzymanie danych ilościowych wiąże się z pewnymi trudnościami nie zawsze umożliwiającymi uzyskanie wyników, na jakie, wydawałoby się, zezwalają techniczne parametry termografu. W grę wchodzi tu bowiem osłabiający wpływ atmosfery na transmisję promieniowania podczerwonego, zmienność pewnych parametrów meteorologicznych w momencie obrazowania termalnego (np. temperatury otoczenia, prędkości i kierunku wiatru, wilgotności powietrza itp.) oraz dokładna znajomość współczynnika emisji badanej wody. Wszystkie te czynniki komplikują nieco pomiary ilościowe, co ogranicza do pewnego stopnia powszechne zastosowanie obrazów termalnych w badaniach termiki wód powierzchniowych.

Od 1973 r. badania termograficzne zostały rozpoczęte również i w Polsce. Prowadzi je Instytut Geodezji i Kartografii przy współpracy Biura Studiów i Projektów Energetycznych „Energoprojekt” oraz Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Celem badań było opracowanie metody zdalnych pomiarów temperatury wód w rzekach za pomocą szwedzkich urządzeń termowizyjnych AGA Thermovision System 680 oraz AGA Thermoprofile Model THP 1, a także określenie dokładności metody z jakościowego i ilościowego punktu widzenia.

W niniejszej pracy zebrano doświadczenia i wnioski z prac wykonanych w latach 1973—1975 na obiekcie doświadczalnym Elektrowni „Kozienice” oraz przedstawiono własną metodę pomiarów temperatury powierzchniowej warstwy wody w rzekach w oparciu o obrazy termalne dostarczane za pomocą urządzeń termowizyjnych. Oceniono wreszcie dokładność tej metody.

Ponieważ metody teledetekcji, z których jedną jest właśnie termowizja, nie są jeszcze w Polsce zbyt szeroko znane, dlatego w niniejszej pracy pozwalam sobie, w niektórych przypadkach, nieco szerzej omówić analizowane zagadnienia.

Jednocześnie pragnę wyrazić głęboką wdzięczność kolegom z Zakładu Interpretacji Zdjęć Lotniczych i Satelitarnych a w szczególności dr inż. Wojciechowi Bychawskiemu, mgr inż. Zbigniewowi Bochenkowi, mgr Zbigniewowi Goljaszewskiemu i mgr inż. Andrzejowi Nowosielskiemu oraz mgr inż. Andrzejowi Dobrowolskiemu z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej za życzliwą pomoc w przeprowadzeniu badań oraz za uwagi jakich nie szczędzili mi podczas pisania niniejszej pracy.

Teledetekcja w długofalowym promieniowaniu podczerwonym

W ostatnich latach obserwuje się niemal rewolucyjny postęp w dziedzinie rozwoju technologii badawczych. Wiele spośród nich, dotychczas otoczonych ścisłą tajemnicą wojskową, zostaje udostępnione służbom cywilnym. Wśród nowo udostępnionych znalazła się również metoda badawcza, wykorzystująca w procesie poznawania obiektów zjawisko emitowania przez nie długofalowego promieniowania podczerwonego. Wykorzystywana dotychczas głównie do wykrywania urządzeń wojskowych od 1964 roku metoda ta znajduje wiele nowszych, cywilnych zastosowań. Analiza tego zakresu promieniowania elektromagnetycznego ujawniła wiele faktów o obiektach i zjawiskach zachodzących na powierzchni ziemi, które do tej pory były trudno lub wręcz nieosiągalne. Nic też dziwnego, że technika rejestracji długofalowego promieniowania podczerwonego znalazła miejsce wśród wielu metod badawczych stosowanych w zdalnych badaniach środowiska geograficznego.

W technice podczerwieni wykorzystano zjawisko emisji promieniowania podczerwonego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od temperatury bezwzględnego zera. W tej temperaturze ustaje bowiem wszelki ruch molekuł i atomów, który jest źródłem promieniowania. Ilość tego promieniowania zależy od temperatury danego ciała, a także od właściwości emisyjnej jego powierzchni. Promieniowanie to może być rejestrowane przez odpowiednie urządzenia zwane radiometrami, które porównują wielkość promieniowania odbieranego od obiektu z promieniowaniem przyjętym za wzorcowe i na podstawie tej różnicy generują odpowiedni sygnał. Drugim typem urządzeń umożliwiających rejestrację promieniowania podczerwonego są urządzenia przeszukujące, zwane skanerami, które zamieniają odbierane sygnały na obraz widzialny tworzony na ekranie monitora lub na filmie fotograficznym. Obraz taki pod pewnymi względami przypomina konwencjonalną fotografię, choć znaczenie jego tonów jest odmienne.

Obrazy w podczerwieni można rejestrować zarówno w ciągu dnia jak i nocy. Ten system pozyskiwania informacji jest systemem pasywnym, a więc nie wymaga żadnego źródła promieniowania w celu „oświetlenia” obiektów. Nic też dziwnego, że znalazł on tak szerokie zastosowanie w wojsku, umożliwiając wykrywanie nieprzyjaciela i śledzenie jego ruchów pod osłoną nocy, samemu będąc niewidocznym. Należy przy tym dodać, że promieniowanie podczerwone przenika przez mgiełkę i dym, które są nieprzeźroczyste dla promieniowania widzialnego. Natomiast gęste chmury lub mgła są i dla tego zakresu promieniowania nieprzeźroczyste.

Zaskakujące wyda się stwierdzenie, że urządzenia wykrywające obiekty emitujące długofalowe promieniowanie podczerwone znalazły w służ-

bie cywilnej zastosowanie przede wszystkim w rejonach arktycznych, a więc w rejonach najniższych temperatur. Jest oczywiste, że w tych regionach w ciągu nocy polarnej stosowanie obserwacji aerowizualnej bądź fotografii konwencjonalnej jest niemożliwe. Stąd też wartość obrazów termalnych tych obszarów od razu została odpowiednio oceniona.

Chociaż temperatury w regionach polarnych są często o prawie 80°C niższe od panujących w obszarach zwrotnikowych, to jednak różnicowanie temperatury między obiektami jest tu większe niż w jakimkolwiek innym regionie świata. Na przykład woda w szczelinach lodowych ma temperaturę bliską 0°C , podczas gdy otaczające ją kry lodowe, często pokryte śniegiem, mają temperaturę około -50°C , a nawet niższą. Obrazy wykonane w podczerwieni umożliwiają nie tylko wykrywanie szczelin w pokrywie lodowej, lecz także określenie typów lodu, jego wieku, a nawet grubości, gdyż zależnie od tej wielkości zmienia się ilość ciepła przewodzonego przez warstwę lodu i emitowanego z jego powierzchni. Zmiany ilości przewodzonego ciepła, aczkolwiek bardzo drobne, są wystarczające do uzyskania wyraźnego sygnału w detektorze radiometru czy skanera.

Szerokie zastosowanie znalazły obrazy termalne także w geologii. Zastosowano je przede wszystkim do wykrywania zjawisk charakteryzujących się wydzielaniem dużej ilości ciepła, a więc do badań zjawisk wulkanicznych. W chwili obecnej w regionach żywej działalności wulkanicznej istnieją specjalne służby, które na podstawie permanentnie wykonywanych obrazów termalnych są w stanie przewidzieć zbliżającą się erupcję. Obrazy termalne umożliwiają również wydzielanie granic utworów skalnych, a także zaobserwowanie anomalii strukturalnych nie odfotografowanych na konwencjonalnych zdjęciach lotniczych.

Inna dziedzina zastosowań techniki termalnej to leśnictwo. Tu zastosowano ją do wykrywania pożarów lasów oraz kontroli procesu ich oparowywania. W czasie pożarów lasu tworzą się zwykle wielkie ilości dymu, który będąc nieprzeźroczysty dla promieniowania widzialnego, wyklucza możliwość obserwacji aerowizualnych, a także stosowania konwencjonalnych technik fotograficznych. Długofalowe promieniowanie podczerwone przechodzi natomiast przez tę zasłonę dymną bez większych trudności. Wielkie obszary leśne położone na terytorium Kanady i Stanów Zjednoczonych są dziś stale kontrolowane za pomocą radiometrów umieszczonych na pokładach patrolujących samolotów, a nawet na sztucznych satelitach Ziemi. Warto dodać, że obrazy termalne umożliwiają także badanie stanu zdrowotnego lasów, wydzielanie obszarów porażonych chorobami lub nawiedzonych przez szkodniki leśne.

Najszerze zastosowanie znalazła technika termalna w oceanografii i hydrologii. Umożliwiła ona przede wszystkim dokładne wyznaczenie granic prądów morskich oraz określenie ich temperatury. Za pomocą obra-

zów termalnych poszukuje się dziś z powodzeniem źródeł zimnej, słodkiej wody w płytkich obszarach podmorskich oraz wyznacza wielkość i zasięg wpływu zanieczyszczeń odprowadzanych przez rzeki do mórz. W hydrologii natomiast obrazy termalne zastosowano do badania obszarów podmokłych, zawartości wody w glebie, w poszukiwaniu źródeł pitnej wody, w badaniach procesu tworzenia się pokrywy lodowej, a przede wszystkim do badań wpływu zakładów przemysłowych oraz wielkich aglomeracji miejskich na zanieczyszczenie rzek i zbiorników wodnych.

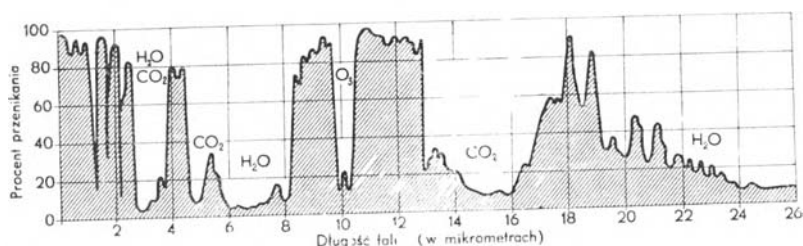
Promieniowanie podczerwone obejmuje znaczną część spektrum elektromagnetycznego, rozciągającą się od długofalowej granicy światła widzialnego aż do mikrofal radiowych. O ile krótkofalowa granica promieniowania podczerwonego została ściśle określona długością fali równą $0,76\ \mu$, o tyle granicę długofalową przyjmuje się umownie przy długości fali równej $1000\ \mu$. Granica ta występuje już w zakresie submilimetrowych fal radiowych. Cały ten ogromny obszar podczerwieni został umownie podzielony na trzy podzakresy, których granice są także określone w sposób umowny. I tak pierwszy podzakres obejmuje promieniowanie o długościach fali $0,76\div 1,5\ \mu$. Jest to tak zwana podczerwień bliska, zwana także niekiedy podczerwienią fotograficzną, gdyż można ją rejestrować na odpowiednio uczulonym filmie fotograficznym. Drugi podzakres stanowi środkowa podczerwień w granicach $1,5\div 10,0\ \mu$. Wreszcie trzeci, od $10,0\div 1000\ \mu$, to długofalowe promieniowanie podczerwone, zwane także daleką podczerwienią.

W zdalnych badaniach środowiska geograficznego wykorzystuje się promieniowanie podczerwone do granicy $14\ \mu$, a więc cały zakres podczerwieni fotograficznej, wybrane pasma podczerwieni środkowej i tylko znikomą część długofalowego promieniowania podczerwonego.

Promieniowanie podczerwone, będąc częścią promieniowania elektromagnetycznego, wykazuje podobne własności jak i inne zakresy spektrum, a więc może ulec odbiciu, pochłonięciu lub zostać przepuszczone przez ciało, na które pada. W przyrodzie największym źródłem promieniowania podczerwonego jest Słońce. Na górnej granicy atmosfery Ziemi otrzymuje od Słońca energię, której wielkość określona stałą słoneczną, wyraża się wartością $1,99\ \text{cal/cm}^2/\text{min}$. Z tej ilości energii do powierzchni Ziemi dociera około 70%, reszta natomiast przy przejściu przez atmosferę ulega odbiciu, rozproszeniu bądź pochłonięciu przez cząsteczki tworzących atmosferę gazów, a także znajdujące się tu cząsteczki pary wodnej jak i zawieszone cząstki stałe. Z energii docierającej do powierzchni Ziemi około 40% przypada na promieniowanie podczerwone.

Pochłanianie promieniowania podczerwonego przez atmosferę ziemską zależy od długości fali i zmienia się wraz z wysokością, osiągając maksimum przy powierzchni Ziemi. Jest to spowodowane zwiększającą się gęs-

tością atmosfery w miarę zmniejszania się wysokości i większą koncentracją cząsteczek gazów jak i zanieczyszczeń. Największy wpływ na pochłanianie promieniowania podczerwonego w atmosferze wykazuje para wodna, następnie dwutlenek węgla a także ozon. Każdy z tych składników atmosfery pochłania podczerwień w różnym stopniu, zależnie od długości fali. Wykres przepuszczalności promieniowania podczerwonego przez atmosferę ziemską przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przepuszczalność promieniowania podczerwonego przez atmosferę ziemską

Jak wynika z rysunku atmosfera ziemską nie jest dla tego zakresu promieniowania zupełnie przezroczysta. Przechodzi ono i dociera do powierzchni Ziemi jedynie w tak zwanych oknach atmosferycznych. A i tu występuje dość poważne osłabienie promieniowania. Jedynie w przedziale $3,4 \div 4,2 \mu$ przepuszczalność dochodzi do 90%. W pozostałych oknach waha się w granicach $50 \div 80\%$.

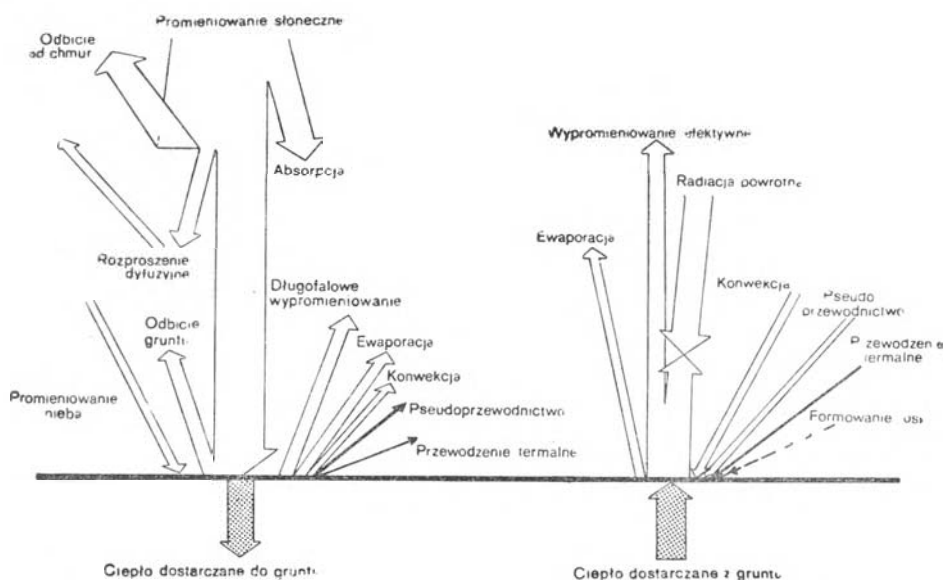
Przy przejściu przez atmosferę ziemską promieniowanie podczerwone ulega nie tylko absorpcji, ale także i rozproszeniu. To zjawisko zachodzi głównie na skutek zawieszonych w atmosferze cząsteczek stałych takich jak pyły, dymy, a także kropelki wody powstałe w wyniku kondensacji pary wodnej. W przypadku bardzo małych cząsteczek, których średnica jest mniejsza od długości fali rozpatrywanego promieniowania, rozpraszanie szybko maleje wraz ze wzrostem długości fali. Oznacza to, że promieniowanie podczerwone jako promieniowanie o większych długościach fal jest mniej rozpraszane w atmosferze w porównaniu z promieniowaniem widzialnym. Dla dużych cząstek, np. kropel mgły czy deszczu, rozpraszanie zwiększa się i przestaje zależeć od długości fali promieniowania. Wynika z tego, że przez silną mgłę, chmury deszczowe czy śniegowe podczerwień, bez względu na długość fali, nie przechodzi i jest w takim samym stopniu rozpraszana jak i promieniowanie widzialne.

Jak już wspomniano, głównym źródłem promieniowania podczerwonego na powierzchni Ziemi jest Słońce. W ciągu dnia promieniowanie to przechodzi przez warstwę atmosfery, w której ulega zarówno absorpcji jak też rozproszeniu i odbiciu. Znaczna jego część dociera jednak do powierzchni Ziemi i tu jest częściowo odbijana od gruntu lub innych obiektów.

tów, częściowo zaś jest przez nie absorbowana i zamienia się w ciepło. Dodatkowa ilość promieniowania podczerwonego dociera do powierzchni Ziemi z tytułu długofalowego promieniowania nieba.

Wszystkie obiekty występujące na powierzchni Ziemi nie tylko pochłaniają padające na nie długofalowe promieniowanie podczerwone, ale pewną jego część wypromieniowują z powrotem w przestrzeń. Promieniowanie to jest możliwe do zarejestrowania przez odpowiednie urządzenia umieszczone nad powierzchnią terenu. Pozostała część promieniowania podczerwonego zużywa się w procesie ewaporacji, konwekcji, przewodnictwa itp.

Po zachodzie słońca głównym źródłem długofalowego promieniowania podczerwonego jest powierzchnia gruntu i występujące na niej obiekty, które w ciągu dnia pochłonęły znaczną część dostarczonej energii zamieniając ją w ciepło i teraz tę energię oddają w postaci promieniowania podczerwonego. Również i w tym przypadku część energii zostaje zużyta w procesie ewaporacji, konwekcji, tworzenia się rosy itp. Jednak znaczna część wypromieniowywanej energii uchodzi w przestrzeń, mimo że część jej odbija się od substancji zawieszonych w atmosferze i ponownie wraca na powierzchnię Ziemi.

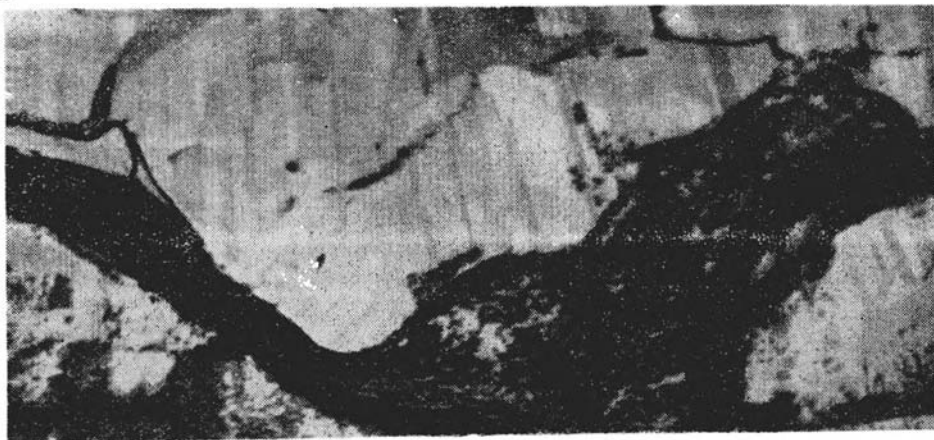


Rys. 2. Budżet ciepła na powierzchni Ziemi w ciągu dnia (a) i nocy (b)

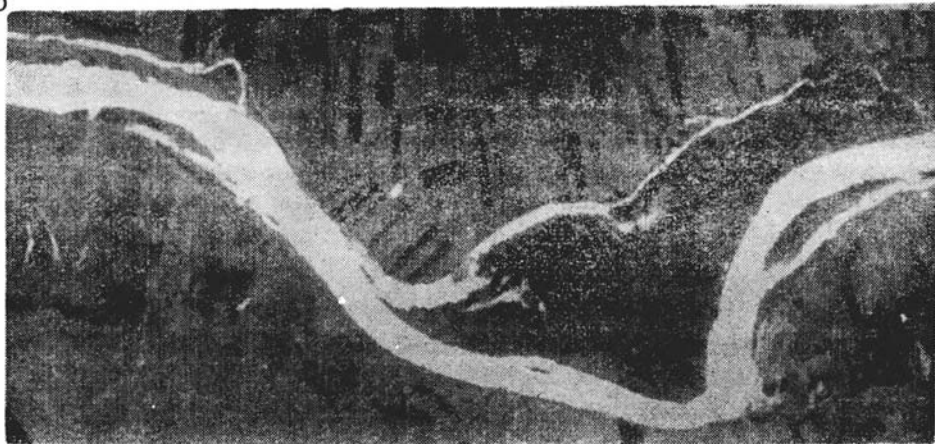
W metodach teledetekcji, opartych na analizie promieniowania podczerwonego, mierzy się wielkość tego promieniowania zarówno w ciągu dnia jak i nocy. W obu bowiem przypadkach radiometry umieszczone na

położenie samolotu są w stanie promieniowanie to zarejestrować. Jednak większość pomiarów wykonuje się w ciągu nocy, gdyż wówczas radiacja długofalowa nie ulega takim zaburzeniom, jak w ciągu dnia i znacznie więcej tej energii może dotrzeć do detektora (rys. 2). Ponadto w ciągu nocy eliminuje się promieniowanie odbite, które w ogromnym stopniu zakłóca obraz termalny. Ale najistotniejszym czynnikiem, który przemawia za nocnymi pomiarami emitowanego promieniowania podczerwonego jest fakt, że w ciągu nocy promieniowanie to jest emitowane bez zakłóceń i dociera do emitującej powierzchni z głębszych warstw gruntu lub obiektów, i na tej podstawie można pełniej wnioskować o naturze danego obiektu, którego wielkość emisji została zarejestrowana przez radiometr.

a



b



Rys. 3. Obrazy termalne tego samego fragmentu terenu wykonane w ciągu dnia (a) i w ciągu nocy (b)

Na rysunku 3 przedstawiono dwa obrazy termalne tego samego fragmentu terenu odwzorowane w ciągu dnia (a) i w ciągu nocy (b). Różnica między tymi dwoma obrazami jest istotna. W ciągu dnia taka sama ilość promieniowania dociera zarówno do wody jak i do lądu. Woda, wskutek swych właściwości przewodzenia i akumulowania ciepła, większą część tej energii elektromagnetycznej zamienionej w ciepło doprowadza do głębszych warstw, co powoduje, że warstwa zewnętrzna jest stosunkowo chłodna. Na obrazie termalnym ma ona w związku z tym ciemny ton. Ląd natomiast ogrzewa się do znacznie mniejszej głębokości, ale ponieważ otrzymuje tę samą ilość energii, więc temperatura jego warstwy zewnętrznej jest znacznie wyższa w porównaniu z wodą. Dlatego też na obrazie termalnym ląd ma ton ogólnie jasny, znacznie jaśniejszy od tonu wody.

Po zachodzie słońca ustaje dostarczanie promieniowania podczerwonego z zewnątrz i rozpoczyna się proces nieznacznie zakłóconego wypromieniowywania. Ląd ogrzany do mniejszej głębokości oddaje ciepło w postaci długofalowego promieniowania podczerwonego bardzo szybko, co powoduje, że w stosunkowo krótkim czasie staje się on znacznie zimniejszy od wody. Natomiast woda, wskutek większej pojemności cieplnej, oddaje ciepło znacznie wolniej. Na obrazie termalnym wykonanym w ciągu nocy woda ma więc jasny ton, ląd natomiast ciemny.

Jak wynika z powyższych rozważań ton obrazu termalnego nie jest stały i może zmieniać się diametralnie. I dlatego w procesie kartowania termalnego obiektów, zjawisk i procesów zachodzących na powierzchni Ziemi często staje się wobec problemu doboru pory wykonywania pomiarów. Z reguły jednak nie stosuje się obrazowania w ciągu dnia z uwagi na wyżej wspomniane zakłócenia emisji, mimo nawet stosowania odpowiednich filtrów antysłonecznych, których zadaniem jest niedopuszczenie do detektora podczerwieni rozproszonej w atmosferze lub odbitej od przedmiotów. Natomiast w ciągu nocy sytuacja jest inna, aczkolwiek też nie jednoznaczna. Inaczej bowiem wygląda ona tuż po zachodzie słońca, a inaczej przed świtem. Po zachodzie słońca występuje okres maksymalnego natężenia wypromieniowywania i maksymalnego kontrastu termalnego między obiektami, który szybko maleje. Przed świtem natomiast kontrast termalny między różnymi obiektami osiąga swoje minimum, ale przez dłuższy czas jest prawie stały. Stąd też w przypadku konieczności uchwycenia maksymalnego zróżnicowania między obiektami lepiej jest wykonywać pomiary termalne tuż po zachodzie słońca, ale pod warunkiem, że obszar badań jest stosunkowo nieduży i będzie go można zobrażować w ciągu kilku minut. W przypadku dużych obszarów przewidzianych do kartowania termalnego obrazy należy wykonywać w godzinach poprzedzających wschód słońca.

Urządzenia służące do pozyskiwania informacji w długofalowym promieniowaniu podczerwonym

Do badań nad możliwością wykorzystania, przy zbieraniu informacji o obiektach, zjawiskach i procesach zachodzących na powierzchni Ziemi, metod bezkontaktowych, rejestrujących długofalowe promieniowanie podczerwone, zastosowano urządzenia produkowane przez szwedzką firmę AGA. Zastosowano zarówno tzw. kamerę termalną — AGA Thermovision System 680, jak również urządzenie AGA Thermoprofile Model THP 1.

AGA Thermovision System 680 jest urządzeniem działającym na zasadzie telewizji przewodowej. Składa się ono z kamery termalnej, zamieniającej emitowane przez badany obiekt promieniowanie podczerwone na równoważny wizyjny sygnał elektryczny, który po wzmocnieniu jest przekazywany za pomocą łączącego kabla do urządzenia obrazującego, w którym zachodzi zamiana sygnału elektrycznego w obraz widzialny utworzony na ekranie lampy oscyloskopowej.

Promieniowanie podczerwone, emitowane przez analizowany obiekt, pada na obiektyw, w który wyposażona jest kamera termalna. Obiektyw ten jest zbudowany albo z soczewek krzemowych, w przypadku, gdy urządzenie przeznaczone jest do pracy w „średniej podczerwieni”, albo też germanowych, w przypadku pracy w „dalekiej podczerwieni”. Kamera zastosowana w niniejszych badaniach była wyposażona w dwa wymienne obiektywy: krzemowy o kącie widzenia $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ i germanowy o kącie widzenia $45^{\circ} \times 45^{\circ}$, pokryte warstwą przeciwoodblaskową.

Za obiektywem, w przedniej części kamery, znajduje się układ wybierający, składający się z dwóch płaskich ośmiościennych pryzmatów, z których pierwszy wiruje w płaszczyźnie pionowej z prędkością 2,85 obrotów na sekundę, drugi natomiast w płaszczyźnie poziomej z prędkością 200 obrotów na sekundę. Obraz rzeczywisty przedmiotu, utworzony przez obiektyw w płaszczyźnie pierwszego pryzmatu, jest analizowany wzdłuż linii pionowych przez pryzmat, który obraca się wokół swej osi poziomej. Rezultatem tego jest utworzenie obrazu liniowego w płaszczyźnie drugiego pryzmatu, wirującego dookoła swej osi pionowej 70 razy szybciej niż pierwszy pryzmat i analizującego otrzymany obraz liniowy w płaszczyźnie horyzontalnej.

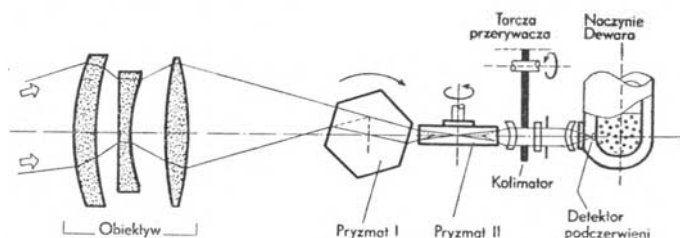
Po przejściu przez układ wirujących pryzmatów promieniowanie podczerwone pada na kolimator, którego układ optyczny składa się z trzech germanowych soczewek. Kolimator przekształca rozbieżny pęk promieni w pęk równoległy, a następnie skupia go na detektorze podczerwieni.

Ponad kolimatorem umieszczony jest przerywacz promieniowania wyposażony w wirującą, wypolerowaną tarczę aluminiową z wyciętym segmentem oraz dwie obrotowe głowice. Ruch obrotowy tarczy aluminiowej

jest zsynchronizowany z ruchem pierwszego pryzmatu wybierającego, a jej wycięty sektor zezwala na swobodny przebieg promieniowania podczerwonego od obiektu do detektora w ciągu 80% czasu wybierania obrazu. Na pozostałe 20% czasu wybierania dopływ promieni do detektora zostaje przerwany, a wypolerowana tarcza działa w tym momencie jako wzorec promieniowania.

W pierwszej z dwóch głowic obrotowych jest umieszczonych siedem przysłon o różnych średnicach. Przysłony te umożliwiają regulację wielkości dopływu promieniowania podczerwonego do detektora. W drugiej natomiast głowicy są otwory, w których umieszcza się specjalne filtry pasmowe, osłabiające natężenie całego zakresu analizowanego promieniowania bądź też przepuszczające tylko jego część.

W omawianej kamerze termalnej detektorem podczerwieni jest czujnik fotowoltaiczny z antymonku indu (InSb) o średnicy powierzchni odbiorczej 0,35 mm i zakresie czułości widmowej 2–5,6 mikronów. W celu uzyskania maksymalnej czułości detektor jest oziębiany do temperatury płynnego azotu, a więc do -196°C . Detektor podczerwieni jest umieszczony pomiędzy podwójnymi ściankami naczynia Dewara i przez szafirowe okienko dociera do niego promieniowanie podczerwone ogniskowane przez układ optyczny kolimatora (rys. 4).

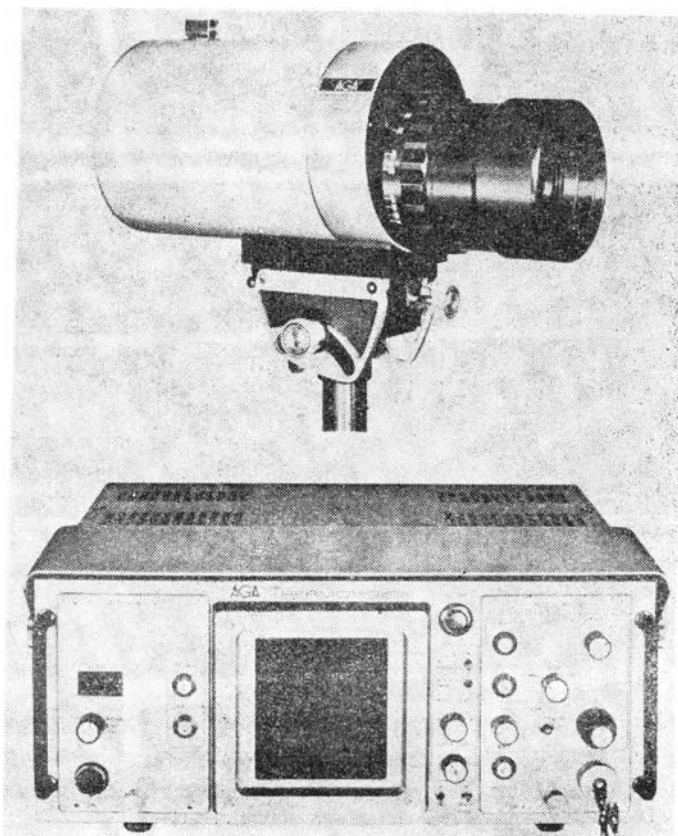


Rys. 4. Schemat kamery termalnej AGA Thermovision System 680

Po przejściu przez układ optyczny i układ wybierający, strumień energii promienistej pada na detektor i wytwarza w nim sygnał elektryczny, którego wielkość jest wprost proporcjonalna do natężenia promieniowania podczerwonego. Sygnał ten jest odpowiednio wzmacniany i za pomocą kabla przesyłany do urządzenia obrazującego, gdzie moduluje intensywność wiązki elektronów w lampie oscyloskopowej, tworząc tym samym obraz widzialny na ekranie tej lampy.

Kamera termalna AGA Thermovision System 680 jest przystosowana do utworzenia obrazu widzialnego w tonach szarych wszystkich tych obiektów, których temperatura powierzchni jest zawarta w granicach -30° do $+850^{\circ}\text{C}$. Utworzenie poprawnego obrazu termalnego jest możliwe dzięki doborowi odpowiedniego zakresu czułości i odpowiedniej przy-

słony. Temperatury w wybranym zakresie są obrazowane w ciągłej skali szarości. W normalnym przypadku w tonie białym oddane są obiekty o najwyższych temperaturach w obrębie analizowanego zakresu temperatur, w tonie ciemnym natomiast obiekty o najniższych temperaturach. Taki obraz utworzony na ekranie lampy oscyloskopowej pozwala na jakościową interpretację rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu. W celu umożliwienia interpretacji ilościowej urządzenie obrazujące zostało wyposażone w dwa izotermiczne układy funkcyjne, służące do wybierania konturów izotermicznych w obrębie obrazu cieplnego. Izotermie ukazują wszystkie miejsca o jednakowych temperaturach w postaci jasnych linii i plam na tle obrazu. Za pomocą tych izoterm można dokładnie zmierzyć występujące na obrazie poziomy temperatur.



Rys. 5. Kamera termalna AGA Thermovision System 680

Kamera termalna AGA Thermovision System 680 (rys. 5) tworzy obraz badanego obiektu w ciągu 1/16 sek., rysując na ekranie monitora 210 linii wraz z przeplotem. Tak duża prędkość wybierania umożliwia tworzenie

obrazów w czasie rzeczywistym. Geometryczną zdolność rozdzielczą kamery określa się w jednostkach kąta bryłowego. Kąt ten, w przypadku obiektywu wąskokątnego, wynosi 1,3 mrad, co oznacza, że przy kontraście temperaturowym równym 50% kamera jest w stanie odróżnić z odległości 1000 m dwa obiekty oddalone od siebie o 1,3 metra.

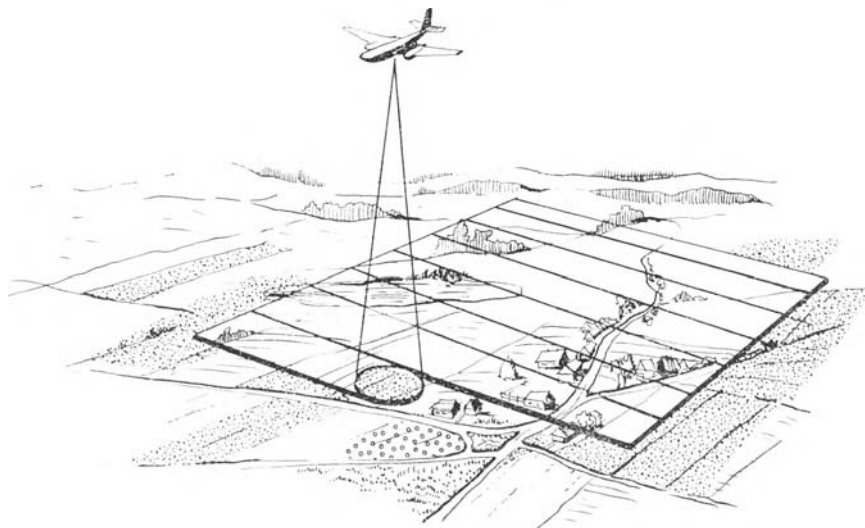
Czułość kamery zależy od przedziału analizowanych temperatur i dla zakresu $+20^{\circ}$ do $+40^{\circ}\text{C}$ wynosi $0,2^{\circ}\text{C}$. Należy przy tym podkreślić, że na czułość kamery nie wpływa odległość między badanym obiektem a detektorem promieniowania podczerwonego i w zwykłych warunkach (średnia wilgotność powietrza, słaby wiatr) można wykonywać pomiary z odległości paruset metrów bez większego wpływu absorpcji atmosferycznej. Układ elektroniczny przeszukiwacza, zbudowany na obwodach scalonych, zapewnia stacjonarną powtarzalność pomiarów temperatury.

AGA Thermoprofile Model THP 1 jest urządzeniem rejestrującym ten sam zakres promieniowania elektromagnetycznego co i kamera termalna. Podobnie jak i ona Thermoprofile Model THP 1 składa się z dwóch części: urządzenia analizującego (skanera) oraz urządzenia obrazującego. Jednak w przeciwieństwie do wspomnianej kamery, na monitorze urządzenia obrazującego nie otrzymuje się obrazu termalnego zapisanego za pomocą 210 linii, lecz tylko jedną linię. W urządzeniu przeszukującym nie ma bowiem podwójnego układu wirujących pryzmatów, które analizują badany obiekt punkt po punkcie, linia po linii. Tym razem urządzenie przeszukujące jest wyposażone w germanowy układ optyczny, wirujący z prędkością 16 obrotów w ciągu jednej sekundy w płaszczyźnie prostopadłej do podłużnej osi skanera. Tak więc urządzenie to może analizować badany obiekt tylko wzdłuż jednego pasa, którego szerokość jest uwarunkowana geometryczną zdolnością rozdzielczą urządzenia, wynoszącą 5 mrad.

Podobnie jak w poprzednim urządzeniu, promieniowanie podczerwone emitowane przez badany obiekt, po przejściu przez wirujący układ optyczny trafia na detektor podczerwieni, gdzie wytwarza sygnał elektryczny o natężeniu proporcjonalnym do ilości padającego promieniowania. Sygnał ten po wstępnym wzmocnieniu zostaje przesyłany do urządzenia obrazującego, które jest wyposażone w dwa niezależne monitory. Pierwszy z nich analizowane wzdłuż określonego pasa promieniowanie podczerwone emitowane przez obiekt przedstawia w postaci linii o modulowanej amplitudzie, drugi natomiast przedstawia je w postaci jednej linii prostej, lecz o modulowanej jasności. Wskazania tego monitora są fotografowane za pomocą kamery szczelinowej, w której przesuwą się film fotograficzny ze stałą prędkością, wynoszącą $1,4\text{ mm/sek}$.

Jeżeli Thermoprofile Model THP 1 zostanie umieszczony na pokładzie statku powietrznego w ten sposób, że podłużna oś skanera będzie równo-

legła do osi samolotu, to wówczas, wskutek ruchu samolotu, za każdym kolejnym obrotem obiektywu przeszukującego będzie analizowany inny fragment terenu (rys. 6). Powstające na ekranie linie o modulowanej jasności zostają za każdym razem odwzorowane na kliszy fotograficznej i sumując się tworzą bezklatkowy termalny obraz terenu, oddany w tonach achromatycznych. Taka rejestracja pozwala tylko na jakościową interpretację rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu.

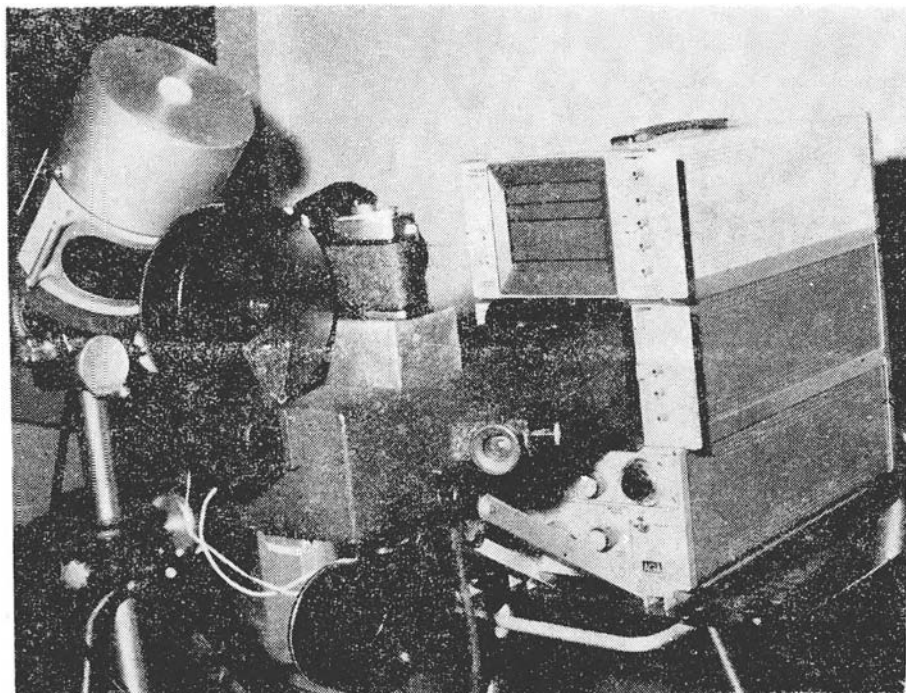


Rys. 6. Schemat wykonywania lotniczych obrazów termalnych za pomocą AGA Thermopile Model THP-1

Dla interpretacji ilościowej niezbędne są wskazania pierwszego monitora, obrazującego wielkość promieniowania podczerwonego emitowanego przez dany obiekt w postaci linii o modulowanej amplitudzie. W urządzeniu sterującym pracą obu monitorów wbudowane jest wzorcowe ciało czarne, z którego promieniowaniem porównywane jest promieniowanie badanego obiektu, a na podstawie różnicy między tymi dwoma wielkościami generowany jest sygnał obrazowany na ekranie monitora. Jednocześnie wielkość tego sygnału jest przeliczana bezpośrednio na wielkość temperatury, przy założeniu zdolności emisyjnej badanego obiektu równej jedności ($\epsilon = 1$). Wygrawerowany na przeźroczystej płytce osłaniającej monitor, układ współrzędnych umożliwia ilościową interpretację każdego punktu odwzorowanego na wykresie temperaturowym (rys. 7).

W urządzeniu AGA Thermopile Model THP 1 istnieje możliwość zmiany kąta wybierania obrazu, a także zmiany czułości, co umożliwia pomiar temperatury obiektów z teoretyczną dokładnością wynoszącą $0,1^{\circ}\text{C}$.

W oryginalnym urządzeniu dostarczonym przez firmę AGA nie przewidziano fotograficznego rejestrowania wskazań monitora modulującego amplitudę wykresu temperaturowego, co w zasadzie uniemożliwia ilościową interpretację otrzymywanych obrazów termalnych. Dlatego też In-



Rys. 7. AGA Thermoprofile Model THP-1 z kamerą szczelinową Vaisala

stytut Geodezji i Kartografii zmuszony był dokonać kilku uzupełnień w konstrukcji układów rejestrujących wskazania obu monitorów. Należało przede wszystkim dołączyć dodatkowy aparat fotograficzny, który rejestrowałby wskazania monitora modulującego amplitudę wykresu temperaturowego, a także zaznaczyć moment tej ekspozycji na filmie przesuwającym się w kamerze szczelinowej. W związku z tym do kamery szczelinowej wprowadzono punktowe źródło światła, które w momencie ekspozycji wskazań górnego monitora naświetla punkt na perforacji filmu, na którym tworzy się obraz termalny. Umożliwia to dopasowania wykresów temperaturowych do obrazu termalnego z dokładnością rzędu 0,5 mm w skali obrazu. Wykres temperaturowy jest profilem przeprowadzonym prostopadłe do kierunku lotu samolotu i tym samym do linii nadirowej obrazu termalnego.

Charakterystyka jakościowa lotniczych obrazów termalnych, otrzymanych za pomocą kamery termalnej AGA Thermovision System 680 oraz Thermoprofile Model THP 1

Kamera termalna AGA Thermovision System 680 nie jest w zasadzie przeznaczona przez producenta do pracy na pokładzie statku powietrznego. Nie oznacza to jednak, że nie może ona w takich warunkach pracować. W niniejszych badaniach wykorzystano tę kamerę do pracy na pokładzie helikoptera Mi-4 oraz samolotów AN-2 i Ił-14.

Obraz utworzony na ekranie monitora urządzenia obrazującego, w przypadku umieszczenia go na pokładzie statku powietrznego, charakteryzuje się poprawną jakością, jednak nie jest możliwy do zarejestrowania na filmie w sposób zadowalający. Wynika to z prostej przyczyny. Otóż wyposażenie kamery w obiektyw standardowy o 10° kącie widzenia i geometrycznej zdolności rozdzielczej wyrażającej się wielkością 1,3 mrad powoduje, że z wysokości około 1000 m na ekranie lampy oscyloskopowej tworzy się obraz badanego terenu w skali około 1 : 2000. W celu zarejestrowania tego obrazu na filmie fotograficznym wymagana jest jego ekspozycja przynajmniej w ciągu 1/4 sekundy. W tym czasie samolot lecący z minimalną bezpieczną prędkością wynoszącą około 180 kilometrów/godzinę przebywa drogę około 12,5 metrów, czyli prawie 1/10 wielkości obrazu mierzonej w kierunku lotu.

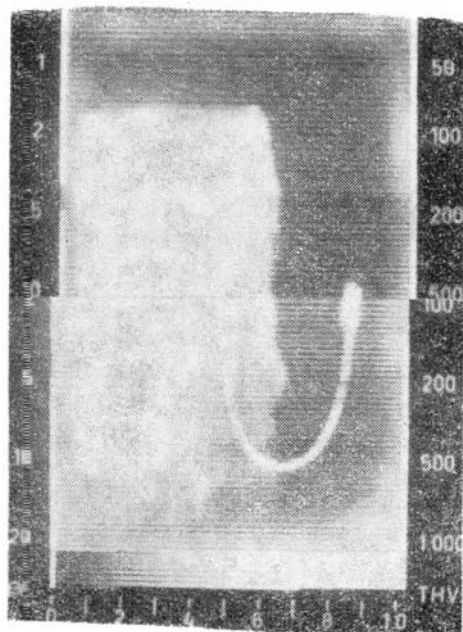
Tak długa ekspozycja prowadzi do rozmazania obrazu fotograficznego. Skrócenie czasu ekspozycji powoduje niedoświetlenie negatywu bądź też utworzenie obrazu tylko na fragmencie kadru.

Rozmazanie obrazu można by znacznie zmniejszyć zmniejszając prędkość samolotu lub też zwiększając wysokość lotu. W przypadku samolotu pierwsza ewentualność nie wchodzi w rachubę, gdyż ograniczenie i tak niewielkiej prędkości lotu byłoby zbyt niebezpieczne. Zwiększenie natomiast wysokości lotu wpływa na zmniejszenie geometrycznej zdolności rozdzielczej, co w rezultacie wpływa na obniżenie jakości lotniczego obrazu termalnego.

Chcąc zatem za pomocą kamery termalnej AGA Thermovision System 680 otrzymać w miarę poprawne termalne obrazy lotnicze, trzeba by zapewnić prędkość lotu, przy której rozmazanie obrazu odfotografowanego na filmie nie przekroczyłoby 3÷4 linii obrazowych. Takiemu założeniu odpowiada prędkość lotu około 20 kilometrów/godzinę. Prędkość taką teoretycznie może zapewnić helikopter. Teoretycznie tylko, praktycznie bowiem może on bądź „zawisnąć” nad określonym punktem, bądź też poruszać się z minimalną prędkością, która jednak jest znacznie większa od wyżej wspomnianej. Z tego względu kamera termalna AGA Thermovision System 680, wyposażona w obiektyw o największej zdolności rozdzielczej

(1,3 mrad), nie zapewni poprawnego¹ obrazu wykonywanego z pokładu samolotu lecącego na wysokości nie przekraczającej 1000 metrów.

Dla badań rozkładu temperatury na powierzchni rzek i zbiorników wodnych duża zdolność rozdzielcza nie odgrywa tak poważnej roli jak w przypadku obrazowania powierzchni terenu. Można więc do tego celu stosować obiektyw o większym kącie widzenia (45°), który utworzy na ekranie monitora obraz w skali znacznie mniejszej, jednak przy jednoczesnym zmniejszeniu geometrycznej zdolności rozdzielczej do 5 mrad. Wówczas obraz termalny, wykonany z wysokości 1000 metrów, będzie miał na ekranie monitora skalę około 1 : 8300. Tak więc naświetlenie monitora w ciągu 1/4 sekundy wywoła rozmazanie mieszczące się w granicach 3÷4 linii obrazowych, a więc na przestrzeni około 1 milimetra w skali zdjęcia (co odpowiada około 9 m w terenie), co nie wpływa w zasadniczy sposób na jakość obrazu termalnego powierzchni wodnych. Powyższe wielkości są obliczone dla samolotu poruszającego się z prędkością 180 kilometrów/godzinę. W przypadku helikoptera, który już dla prędkości około 80 kilometrów/godzinę charakteryzuje się wystarczającą stabilnością lotu, jakość lotniczego obrazu termalnego ulega znacznej poprawie. Ilustruje to obraz termalny fragmentu Wisły (rys. 8), wykonany z helikoptera za



Rys. 8. Obraz termalny przyrzutowego brzegu odcinka Wisły poniżej Elektrowni „Kozienice” otrzymany za pomocą kamery termalnej AGA Thermovision System 680 z pokładu helikoptera z wysokości około 1000 m (22.06.1973 r., godz. 13.00)

¹ Tzn. o podobnych parametrach, jakimi charakteryzuje się obraz termalny otrzymany za pomocą tej samej kamery, pracującej jednak w warunkach stałości układu: obiekt—kamera.

pomocą kamery termalnej AGA Thermovision System 680, wyposażonej w obiektyw o 45° kącie rozwarcia.

Należy tu wspomnieć, że helikopter Mi-4 nie jest statkiem powietrznym odpowiednim do prowadzenia termalnej rejestracji powierzchni ziemi, gdyż przewody odprowadzające gazy wydechowe z silnika przebiegają pod kadłubem, co wprowadza znaczne zakłócenia w toku rejestracji promieniowania podczerwonego emitowanego przez obiekty terenowe. Znacznie bardziej przydatny dla tych celów jest helikopter Mi-2 z silnikiem umieszczonym ponad kadłubem, z którego w najbliższej przyszłości będą prowadzone lotnicze badania termalne.

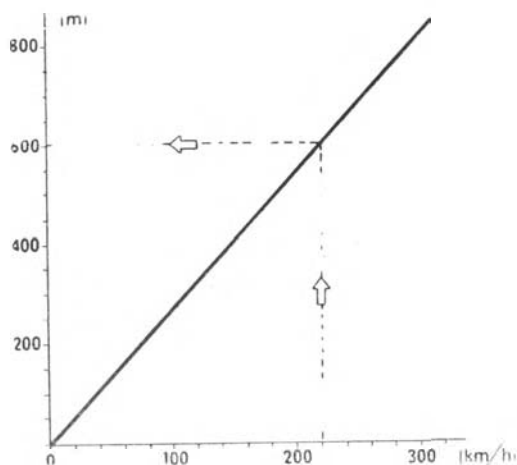
W porównaniu z innymi dostępnymi urządzeniami rejestrującymi długofalowe promieniowanie podczerwone, dającymi daleko lepsze obrazy, kamera termalna AGA Thermovision System 680 ma jedną niewątpliwą zaletę, gdyż zezwala na jednoczesne otrzymanie obrazu termalnego i izotermalnego w czasie rzeczywistym. Nie jest to może najistotniejsze w przypadku obrazowania terenu, lecz w przypadku obrazowania powierzchni wodnych ma to duże znaczenie, gdyż na ekranie barwnego monitora powstaje od razu obraz izotermalny, na którym odpowiednie przedziały temperatur zostają oddane w różnych barwach, co znacznie ułatwia i przyspiesza proces interpretacji.

W odróżnieniu od kamery AGA Thermovision System 680, Thermoprofile Model THP 1 jest urządzeniem, które już z założenia jest przeznaczone do wykonywania obrazów termalnych z pokładu samolotu.

Inny sposób tworzenia obrazów niż w kamerze termalnej eliminuje wspomniane uprzednio trudności. Wskazania monitora, który analizowany pas powierzchni terenu przedstawia w postaci linii prostej o modulowanej jasności, uzależnionej od ilości emitowanego promieniowania podczerwonego, zostają odfotografowane na filmie fotograficznym umieszczonym w kamerze szczelinowej. Film ten przesuwają się w kamerze w sposób ciągły ze stałą prędkością, co przy zachowaniu odpowiednich parametrów lotu prowadzi do otrzymania poprawnego bezklatkowego obrazu. Ponieważ prędkość przesuwu filmu w kamerze, jak i prędkość, z jaką wiruje układ optyczny, są stałe, więc w celu otrzymania obrazu terenu, na którym skala poprzeczna byłaby równa skali podłużnej, należy zapewnić dla danej wysokości lotu odpowiednią prędkość samolotu. Właściwy dobór tych parametrów ilustruje rysunek 9. Należy jednak zaznaczyć, że nawet zachowanie tych warunków nie eliminuje zniekształceń, jakim podlega lotniczy obraz termalny, gdyż wynikają one z zasad odwzorowania w rzucie dynamiczno-walcowym.

Jak już poprzednio wspomniano, geometryczna zdolność rozdzielcza Thermoprofile Model THP 1 wynosi 5 mrad. Oznacza to, że pole najmniejszego jednoczesnego widzenia, w przypadku gdy urządzenie to pracuje

na pokładzie samolotu lecącego na wysokości 1000 metrów nad powierzchnią terenu, ma średnicę 5 metrów. To najmniejsze pole znajduje się prostopadle pod samolotem. W miarę ruchu obiektywu przeszukującego



Rys. 9. Zależność między wysokością lotu a prędkością samolotu, której zachowanie jest niezbędne dla otrzymania poprawnego obrazu termalnego

wielkość pola jednoczesnego widzenia zmienia się wraz ze zmianą kąta wybierania. Zależność tę można ująć wzorem:

$$P = H \cdot \Delta\omega \cdot \frac{1}{\cos \Phi},$$

gdzie

P — średnica pola jednoczesnego widzenia (na powierzchni terenu),

H — wysokość lotu,

$\Delta\omega$ — geometryczna zdolność rozdzielcza układu przeszukującego w mrad (kątowna wielkość pola jednoczesnego widzenia),

Φ — kąt wychylenia obiektywu układu przeszukującego w stosunku do normalnej.

Tak więc, przy wspomnianej wysokości lotu, średnica pola jednoczesnego widzenia zmienia się w granicach od 5,0 do 6,5 metrów (w przypadku zastosowania maksymalnego kąta wybierania).

Skala lotniczego obrazu termalnego wykonanego za pomocą AGA Thermoprofile Model THP 1 zależy od przyjętego kąta wybierania oraz od wysokości lotu. Z uwagi na sposób tworzenia i zapisu obrazu termalnego rozróżnia się pojęcie skali obrazu w kierunku poprzecznym (prostopadłym do kierunku lotu) oraz podłużnym (zgodnym z kierunkiem lotu).

W przypadku zachowania stałego stosunku wysokości lotu do prędkości skale w obu kierunkach są takie same i można wyrazić je wzorem:

$$S = \frac{2 \cdot W \cdot \operatorname{tg} \frac{\omega}{2}}{b},$$

gdzie

S — skala obrazu termalnego,

W — wysokość lotu (w m),

ω — kąt wybierania,

b — szerokość obrazu na filmie.

Na ekranie monitora modulującego jasność linii obrazowej jedna linia jest tworzona w ciągu 1/16 sekundy. Linia ta odfotografowuje się na filmie umieszczonym w kamerze szczelinowej i przesuwającym się w niej ruchem jednostajnym, z prędkością 1,4 milimetra/sekundę. Tak więc na jednym milimetrze filmu zostaje odfotografowanych 11 linii obrazowych i 10 przerw między nimi. Zatem obraz termalny otrzymany za pomocą Thermoprofile Model THP 1 składa się z linii o szerokości 0,09 milimetra. Zapewnia to poprawną jakość obrazu fotograficznego, zbliżonego już swym wyglądem do zdjęcia panchromatycznego.

Thermoprofile Model THP 1 nie ma urządzenia dostosowującego prędkość przesuwu filmu do aktualnej prędkości lotu ani też możliwości zmiany prędkości przesuwu w kamerze szczelinowej. Z tego też względu, chcąc otrzymać optyczny obraz w sensie odwzorowania kartometrycznego, należy zachować stały stosunek prędkości lotu do jego wysokości (V/H), który w przypadku omawianego urządzenia wynosi 0,36. Tak więc przy szybkości 360 kilometrów/godzinę samolot musi lecieć na wysokości 1000 metrów nad powierzchnią obrazowanego terenu. Utrzymanie tego stosunku V/H w sposób stały jest praktycznie niemożliwe, gdyż podmuchy wiatru zmniejszają lub zwiększają założoną prędkość samolotu. Trudne jest również wyeliminowanie przypadkowych ruchów samolotu, takich jak znoszenie, przechyły poprzeczne czy podłużne itp. Dlatego lotniczy obraz termalny, oprócz zniekształceń właściwych odwzorowaniu dynamiczno-walcowemu, obciążony jest wieloma innymi zniekształceniami, które ograniczają jego kartometryczność.

W niniejszej pracy nie analizowano tych zniekształceń, natomiast w toku rozpatrywania zjawisk termalnych, po wstępnej interpretacji przenoszono ich obraz na podkład kartometryczny lub fotogrametryczny, używając jako punktów dostosowania sytuacji topograficznej odwzorowanej na brzegach lub w korycie rzeki.

Zasady otrzymywania informacji ilościowych na podstawie obrazów termalnych

Kamera termalna AGA Thermovision System 680 rejestruje rozkład intensywności promieniowania podczerwonego na powierzchni badanego obiektu. Obraz utworzony na ekranie monitora urządzenia obrazującego jest odzwierciedleniem rozkładu intensywności tego promieniowania przedstawionym w ciągłej skali szarości. Bezpośrednia ilościowa interpretacja obrazu termalnego jest w zasadzie niemożliwa z uwagi na nieliniową zależność między intensywnością radiacji a temperaturą obiektu. Ponieważ intensywność radiacji jest oddana na monitorze określonym stopniem szarości, stąd też chcąc na podstawie tego stopnia wnioskować o temperaturze danego obiektu, trzeba korzystać z odpowiednich wzorów wyrażających temperaturę obiektu w funkcji jego radiacji.

W zakresie temperatur $+20^{\circ}\text{C} \div +40^{\circ}\text{C}$ odczyt temperatury badanego obiektu sprowadza się do określenia stopnia szarości jego obrazu na ekranie monitora i porównania tej wartości ze stopniem szarości obiektu przyjętego za wzorcowy. Obiektem wzorcowym jest najczęściej model ciała doskonale czarnego, które w kontrolowany sposób doprowadza się do ściśle określonej temperatury. Z różnicy stopni szarości obu ciał zobrazowanych na ekranie monitora, tzn.: ciała doskonale czarnego i badanego obiektu, można obliczyć temperaturę tego ostatniego. Ten sposób bezpośredniego pomiaru temperatury jest ograniczony nie tylko do podanego wyżej zakresu temperatur, ale ponadto jest poprawny tylko w przypadku tych obiektów, których współczynnik emisji jest zbliżony do jedności.

W praktyce częściej mamy do czynienia zarówno z innym zakresem temperatur, jak też z ciałami, których współczynnik emisji niekiedy znacznie odbiega od jedności. Wówczas pomiar temperatury takich obiektów jest bardziej skomplikowany i wymaga zarówno korzystania z krzywych kalibracyjnych kamery, odpowiednich dla różnych wielkości otworu przysłony, przez którą promieniowanie podczerwone pada na detektor, jak też i odpowiednich wzorów umożliwiających przeliczenie stopni szarości ekranu monitora na stopnie Celsjusza. W takim przypadku, dla określenia rzeczywistej wartości temperatury należy również korzystać z pomocy wyskalowanego źródła promieniowania podczerwonego, które zostaje wprowadzone w pole widzenia kamery, a stopień natężenia szarości jego obrazu termalnego jest możliwy do określenia na podstawie wzorcowej skali szarości odwzorowanej na ekranie lampy oscyloskopowej monitora.

W celu precyzyjnego określenia tego stopnia szarości kamera termalna AGA Thermovision System 680 ma wbudowany układ izotermiczny, zezwalający na określenie, jakiej wartości na wzorcowej skali odpowiada stopień szarości analizowanego obiektu. Znając tę wartość dla ciała wzor-

cowego oraz dla badanego obiektu, można, z pomocą wykresu kalibracyjnego, określić temperaturę rzeczywistą tego obiektu.

Obiekty występujące w przyrodzie różnią się zwykle bardzo od teoretycznego ciała doskonale czarnego, jeśli chodzi o ich właściwości emisji promieniowania podczerwonego. Stąd też na ekranie monitora kamery termalnej, analizującej np. powierzchnię ziemi, występuje przerysowanie skał szarości obiektów, uniemożliwiające bezpośredni, bezkontaktowy pomiar temperatury ich powierzchni. W praktyce oznacza to pojawienie się na ekranie monitora tonalnie jasnych obiektów, których ton przeliczony bezpośrednio na temperaturę wykazuje nierealnie wysokie lub też niskie jej wartości.

Ponieważ większość obiektów występujących w przyrodzie jest nieprzeźroczysta dla promieniowania podczerwonego, stąd też najważniejszą właściwością obiektów, wyjątkowo istotną w termografii lotniczej, jest ich zdolność emisji długofalowego promieniowania elektromagnetycznego. Tę zdolność określa się współczynnikiem emisji, który definiuje się jako stosunek ilości energii promienistej emitowanej przez dane ciało do energii emitowanej w tym samym czasie przez ciało doskonale czarne o tej samej powierzchni i tej samej temperaturze.

Z teorii promieniowania podczerwonego wiadomo, że istnieją trzy wzajemnie oddziałujące czynniki, które uniemożliwiają obiektom występującym w przyrodzie zachować się jak teoretyczne ciało doskonale czarne. Tymi czynnikami są: absorpcja (α), odbicie (ϱ) i transmisja (τ). Wiadomo także, że

$$\alpha + \varrho + \tau = 1,$$

ale ponieważ $\alpha = \varepsilon$ (współczynnik emisji), stąd powyższe równanie może także przyjąć postać

$$\varepsilon + \varrho + \tau = 1.$$

Zdalne pomiary temperatury za pomocą kamery termalnej komplikuje fakt, że ogólna ilość promieniowania podczerwonego emitowanego przez dany obiekt składa się z trzech różnych składowych. Te składowe są uwa-runkowane wymienionymi wyżej czynnikami i obejmują:

- promieniowanie emitowane przez dany obiekt, wynikające z jego temperatury (T_c),
- promieniowanie odbite od obiektu, będące wynikiem temperatury otoczenia (T_o),
- promieniowanie przepuszczane przez obiekt, będące wynikiem temperatury podłoża (T_p).

Kiedy niewielka ilość energii emitowanej przez obiekt dociera do detektora podczerwieni, znajdującego się w kamerze termalnej, wywołuje w nim sygnał, który jest sumą wszystkich wyżej wymienionych czynni-

ków. W tym przypadku równanie kompleksowego sygnału reakcji kamery S może zostać zapisane w następującej postaci:

$$S = \varepsilon \cdot f(T_c) + \varrho \cdot f(T_o) + \tau \cdot f(T_p). \quad (1)$$

Jeśli obiekt nie jest przeźroczysty, co jest najczęstszym przypadkiem w przyrodzie, jego transmisja $\tau = 0$, stąd też powyższe równanie przyjmie postać

$$S = \varepsilon \cdot f(T_c) + \varrho \cdot f(T_o). \quad (2)$$

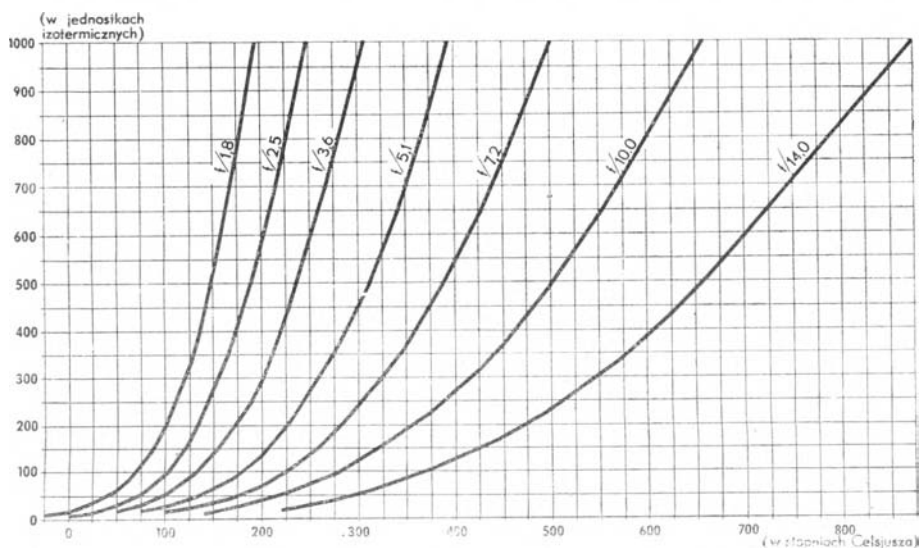
A więc, jeżeli $\tau = 0$, to $\varrho = 1 - \varepsilon$. Podstawiając to wyrażenie do równania (2), otrzymujemy wyrażenie dla wielkości sygnału, które jest tylko funkcją emisji i temperatury:

$$S = \varepsilon \cdot f(T_c) + (1 - \varepsilon) \cdot f(T_o). \quad (3)$$

Zależność między sygnałem utworzonym w kamerze termalnej a krzywą charakterystyczną temperatury ciała czarnego ma formę funkcji wykładniczej, którą można zapisać w postaci

$$S_{cc} = f(T_{cc}).$$

Rysunek 10 przedstawia krzywe kalibracyjne kamery termowizyjnej wykreślone na podstawie zależności $S_{cc} = f(T_{cc})$, obliczonych dla siedmiu różnych wielkości przysłony kamery od $f/1,8$ do $f/14$. Dla wygody, zamiast w jednostkach napięcia prądu elektrycznego oś rzędnych układu jest wykalowana w umownych „jednostkach izotermicznych”. Skala jednostek



Rys. 10. Krzywe kalibracyjne kamery termalnej AGA Thermovision System 680 wyznaczone dla różnych wielkości przysłony

izotermicznych wyraża idealną reakcję kamery na zmiany rzeczywistej temperatury ciała doskonale czarnego (T_{cc}).

Stosując teraz pojęcie jednostki izotermicznej, wielkość sygnału wytworzonego w kamerze termalnej, w wyniku rejestracji promieniowania podczerwonego, można zapisać w bardziej przystępny sposób, podstawiając oznaczenie I (jednostka izotermiczna) zamiast używanego wcześniej $f(T)$. Otrzymujemy więc dwa równania odpowiednio dla temperatury obiektu i wzorca

$$S_c = \varepsilon_c I_c + (1 - \varepsilon_c) I_o; \quad (4)$$

$$S_w = \varepsilon_w I_w + (1 - \varepsilon_w) I_o. \quad (5)$$

Widzialnym rezultatem przesyłania sygnałów elektrycznych do jednostki obrazującej są obrazy termalne obiektu i wzorca temperatury. Staje się więc oczywiste, że jednostki izotermiczne są równoważne przesyłanym sygnałom elektrycznym. Zatem różnica jednostek izotermicznych ($i_c - i_w$) jest równoważna różnicom sygnałów elektrycznych ($S_c - S_w$).

Wykorzystując oznaczenie Δi_{cw} na $i_c - i_w$ otrzymujemy

$$\Delta i_{cw} = S_c - S_w. \quad (6)$$

Następnie, podstawiając do wzoru (6) wyrażenia (4) i (5), otrzymujemy

$$\Delta i_{cw} = \varepsilon_c I_c - \varepsilon_w I_w + (1 - \varepsilon_c) \cdot I_o - (1 - \varepsilon_w) \cdot I_o. \quad (7)$$

Przekształcając to równanie, otrzymujemy

$$\Delta i_{cw} = \varepsilon_c I_c - \varepsilon_w I_w + \varepsilon_w I_o - \varepsilon_c I_o. \quad (8)$$

Dzieląc to równanie przez ε_c otrzymujemy

$$I_c = \frac{\Delta i_{cw}}{\varepsilon_c} + \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_c} I_w + \left(1 - \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_c}\right) \cdot I_o, \quad (9)$$

gdzie

I_c — odczytana z wykresu liczba jednostek izotermicznych, odpowiadająca temperaturze badanego ciała,

I_w — liczba jednostek izotermicznych, odpowiadająca temperaturze obiektu przyjętego za wzorcowy,

I_o — liczba jednostek izotermicznych, odpowiadająca temperaturze otoczenia,

ε_w — współczynnik emisji obiektu przyjętego za wzorcowy,

ε_c — współczynnik emisji badanego obiektu,

Δi_{cw} — różnica w położeniu izoterm na wzorcowej skali szarości ekranu monitora ($i_c - i_w$) między obrazem termalnym danego obiektu a obrazem obiektu wzorcowego.

Na podstawie wzoru (9) oraz krzywych kalibracyjnych kamery można obliczyć, przy znajomości współczynnika emisji danego ciała (ϵ_c), jego temperaturę. W badaniach termalnych powierzchni ziemi, prowadzonych z pokładu samolotu, rozpiętość analizowanych temperatur jest stosunkowo mała (rzędu kilkudziesięciu stopni), co pozwala stosować najmniejszą przysłonę (największy otwór względny), jak też i duże czułości kamery, zezwalające na otrzymanie dokładności pomiarów w granicach $0,8 \div 0,4^\circ\text{C}$.

Dokładność wyznaczenia temperatury obiektu za pomocą kamery termalnej zależy od dokładności wyznaczenia współczynnika emisji, dokładności określenia temperatury wzorca i temperatury otoczenia, a także wyznaczenia wartości jednostek izotermicznych I_w , I_o dla wartości temperatur T_w i T_o oraz dokładności przeliczenia jednostek izotermicznych I_c na wartość temperatury T_c . Z doświadczenia wynika, że ta dokładność dla temperatur w zakresie $+20 \div +40^\circ\text{C}$ wynosi $0,5^\circ\text{C}$.

W przypadku kamery termalnej AGA Thermovision System 680 dokładności wyznaczenia temperatury nie można już zwiększyć, gdyż nie pozwala na to dokładność graficzna, z jaką wykreślono empirycznie ustalone krzywe kalibracyjne kamery.

W celu zwiększenia dokładności wyznaczania temperatury metodą bezkontaktową w niniejszych badaniach wykorzystano także opisany poprzednio Thermoprofile Model THP 1. W tym urządzeniu jest już wbudowany wzorzec temperatury, w stosunku do którego porównuje się temperaturę badanego obiektu. Wyniki pomiarów odczytuje się bezpośrednio na pokrętle poziomu sygnału. Dla uzyskania właściwych wskazań należy i w tym przypadku uwzględnić także współczynnik emisji obiektu i temperaturę otoczenia. Wskutek przedstawienia rozkładu temperatury na powierzchni badanego obiektu nie tylko w formie obrazu, ale także i wykresu możliwe jest zwiększenie dokładności odczytu wartości temperatury aż do $0,1^\circ\text{C}$.

Badania laboratoryjne nad ustaleniem korelacji między pomiarami temperatury wody metodą kontaktową i bezkontaktową

Teoretyczne rozważania dotyczące dokładności pomiarów temperatury obiektów za pomocą kamery termalnej nie zostały jednak potwierdzone w praktyce. Temperatura wody, obliczona na podstawie lotniczych obrazów termalnych wykonanych za pomocą AGA Thermovision System 680, różniła się od temperatury zmierzonej termistorem o ponad 2°C , a więc o dużo więcej, niżby to wynikało z teoretycznego błędu dokładności metody. Należy przy tym podkreślić, że metodą termowizyjną otrzymywano

wyższe wartości temperatury niż metodą kontaktową. Nie można było więc tej różnicy przypisać zjawisku osłabienia natężenia promieniowania podczerwonego przy przejściu przez stosunkowo znaczną warstwę atmosfery dzielącą badaną powierzchnię wody od detektora podczerwieni. Wprawdzie konstruktorzy kamery termalnej zapewniają, że odległość między obiektem a kamerą w przeciętnych warunkach meteorologicznych nie ma wpływu na dokładność pomiarów, ale nie sprecyzowali parametrów tych „przeciętnych warunków”. Można było więc przypuszczać, że pomiary temperatury powierzchni wodnych są prowadzone w warunkach „nieprzeciętnych”, wskutek np. zbyt dużej zawartości pary wodnej w słupie atmosfery przylegającej do zbiornika wodnego. Wiadomo, że para wodna w zdecydowany sposób wpływa na osłabienie transmisji promieniowania podczerwonego przez atmosferę ziemską, nawet jeśli pod uwagę bierze się tylko okna atmosferyczne, w których pracują detektory kamer termalnych.

Jak wynika z rysunku 1, okno atmosferyczne, w którym pracuje kamera AGA Thermovision System 680, przepuszcza 80% promieniowania podczerwonego dostarczanego przez słońce, a więc może, niemal w tym samym procencie, osłabiać promieniowanie podczerwone emitowane przez powierzchnię ziemi, zanim przejdzie ono przez warstwę atmosfery i dotrze do detektora kamery umieszczonej na pokładzie samolotu. Warto zwrócić uwagę, że ten parametr osłabienia natężenia promieniowania podczerwonego na skutek zawartości w atmosferze ziemskiej pary wodnej nie jest brany pod uwagę we wzorze (9).

Zakładając więc ujemny wpływ pary wodnej na wielkość natężenia promieniowania podczerwonego, otrzymywałoby się niższe wartości temperatury powierzchni wody niż wynikałoby to z pomiarów kontaktowych. Tymczasem, jak już zaznaczono, wszystkie pomiary przeprowadzone na podstawie lotniczych obrazów termalnych wykazywały wartości wyższe. A zatem przyczyna tego faktu musiała być inna. Te rozbieżności pomiarów skłoniły Instytut Geodezji i Kartografii do podjęcia współpracy z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej w zakresie porównania wyników pomiarów temperatury wody prowadzonych w warunkach laboratoryjnych metodą kontaktową i bezkontaktową.

Pomiary przeprowadzono w Zakładzie Hydrauliki IMGW na modelu hydrotermicznym, nad którym na wysokości około 2,5 metra zostały umieszczone urządzenia termowizyjne AGA Thermovision System 680 i AGA Thermoprofile THP 1. Równolegle z pomiarami termowizyjnymi były prowadzone pomiary wody metodą kontaktową przy użyciu termistorów. Już pierwsze pomiary wykazały dość znaczne zróżnicowanie wyników otrzymanych za pomocą obu metod. Ilustruje to tablica 1.

W przeprowadzonych kilkudziesięciu seriach obserwacji otrzymano zawsze podobne różnice, przy czym nie zaobserwowano ich związku z temperaturą otoczenia.

W następnych eksperymentach wprowadzono do badanego strumienia wody rodaninę w różnych stężeniach, rejestrując każdorazowo jego obraz termalny. Zmiana koloru wody wyraźnie obserwowana w promieniowaniu widzialnym nie wpływała w żadnym stopniu na wielkość emisji promieniowania podczerwonego ani na zmianę współczynnika emisji wody. Dopiero zanieczyszczenie badanego strumienia wody oliwą wpłynęło zdecydowanie na zmianę współczynnika emisji, powodując znaczne zmniejszenie jasności obrazu termalnego na ekranie monitora, a więc pozorne obniżenie temperatury wody.

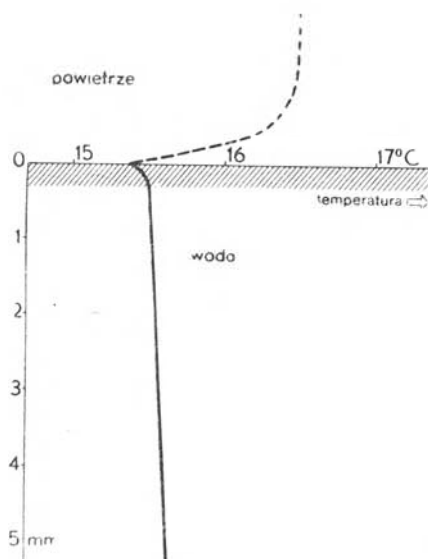
Tablica 1

Wyniki pomiarów temperatury wody		Δt °C	t otoczenia °C
metoda kontaktowa °C	metoda bezkontaktowa °C		
22,6	24,5	+1,9	18,8
20,1	22,0	+1,9	20,6
18,8	21,0	+2,2	20,2
19,2	21,5	+2,3	19,2
20,2	22,1	+1,9	19,8
20,6	22,7	+2,1	21,7

W kolejnym eksperymencie zbadano wpływ zawartości pary wodnej w powietrzu atmosferycznym na dokładność pomiarów metodą bezkontaktową. Nie zakończone jeszcze badania wskazują istotnie na pewne zależności, które można ująć stwierdzeniem: im mniejsza prężność pary wodnej, tym większa ilość promieniowania podczerwonego dociera do detektora i tym pozornie wyższa temperatura wody zmierzona za pomocą kamery termalnej. Jednak w warunkach laboratoryjnych, a więc przy nieznacznej grubości warstwy powietrza między kamerą a badaną powierzchnią wody, różnice między pomiarami nie przekraczają kilku dziesiątych stopnia C.

W badaniach laboratoryjnych prowadzonych przez Sellina i Svensona do pomiaru temperatury wody w jej przypowierzchniowej warstwie grubości 5 milimetrów użyto mikrotermometru kontaktowego. Wyniki badań przedstawia rysunek 11. Z rysunku wynika, że temperatura wody na powierzchni jest najniższa i wzrasta w miarę wzrostu głębokości. W przy-

padku niniejszych badań stosowano termistory, które mierzyły temperaturę wody na głębokości kilku milimetrów, a zatem ta temperatura powinna wykazywać wyższe wartości w porównaniu z metodą bezkontaktową.



Rys. 11. Profil temperatury przypowierzchniowej warstwy wody zmierzonej za pomocą mikrotermometru

Z przeprowadzonych badań wynika więc, że za pomocą tradycyjnych metod kontaktowych mierzy się inne zjawisko niż za pomocą metod termowizyjnych. W pierwszym przypadku, za pomocą różnego rodzaju termometrów mierzy się punktowo temperaturę wody, która wyraża jej ciepłość, natomiast w drugim przypadku mierzy się radiację emitowaną w pewnym zakresie długości fal z powierzchni wody. Te wielkości, aczkolwiek związane ze sobą, nie są jednak takie same. O ile więc za pomocą termometrów mierzy się tradycyjnie pojmowaną temperaturę wody, o tyle za pomocą metod bezkontaktowych zostają zmierzone zmiany energetyczne zachodzące nieprzerwanie w cienkiej warstewce nasyconej parą wodną, a odgraniczającej powierzchnię wody od powietrza atmosferycznego. Wydaje się, że właśnie temu faktowi należy przypisać różnice między wynikami pomiarów. Należy także stwierdzić, że tradycja tylko i wynikające z niej przyzwyczajenia każą z większą wiarygodnością przyjmować wyniki pomiarów temperatury wody otrzymane za pomocą termometrów kontaktowych i w stosunku do nich rozpatrywać wyniki otrzymane innymi metodami.

Z hydrodynamicznego punktu widzenia istotniejsze wydają się zmiany energii odbywające się w powierzchniowej warstwie wody, na granicy

dwóch ośrodków. Tu przecież zachodzą takie zjawiska, jak parowanie, ogrzewanie, chłodzenie, zamarzanie, i dlatego pomiary wielkości energii emitowanej z powierzchni wody powinny mieć większe znaczenie praktyczne.

Zanim jednak hydrołodzy przekonają się do pomiarów bezkontaktowych, trzeba metodę termowizyjną zaadaptować do aktualnych przyzwyczajeń i potrzeb. Tej adaptacji dokonano w niniejszej pracy, wychodząc naprzeciw aktualnym potrzebom wielkopowierzchniowej kontroli stanu termalnego zanieczyszczenia rzek i zbiorników wodnych.

Analiza lotniczych obrazów termalnych odcinka Wisły między Elektrownią „Kozienice” a ujściem Pilicy

Po zakończeniu doświadczeń zmierzających do otrzymania poprawnych lotniczych obrazów termalnych zdecydowano się zobrazować Wisłę na odcinku: Elektrownia „Kozienice” — ujście Pilicy. Do tego celu użyto urządzenia termowizyjnego AGA Thermoprofile Model THP 1, które zostało zainstalowane na pokładzie samolotu Il-14. W celu zobrazowania całego koryta Wisły, wybrano maksymalną wysokość lotu, możliwą do przyjęcia przy założeniu maksymalnej prędkości samolotu — 300 kilometrów/ godzinę. Wysokość ta wyniosła 830 metrów, co przy kącie wybierania urządzenia termowizyjnego równym 80° pozwoliło na odwzorowanie pasa szerokości 1390 metrów.

Obrazy termalne zdecydowano wykonać w momencie maksymalnego kontrastu temperaturowego, a więc tuż po zachodzie słońca. W celu ułatwienia procesu interpretacji termogramów wykonano także panchromatyczne zdjęcia lotnicze, obejmujące ten sam odcinek Wisły. Zdjęcia te zostały wykonane 19 sierpnia 1974 roku w godzinach południowych, natomiast obrazy termalne wykonano w dzień później, 20 sierpnia między godziną 19.17 a 19.26. Lot nad badanym odcinkiem rzeki trwał 8 minut 30 sekund. Jednocześnie z badaniami prowadzonymi z pokładu samolotu były prowadzone przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej kontrolne pomiary temperatury w kilku wybranych punktach.

W trakcie lotu badawczego, oprócz obrazu termalnego Wisły rejestrowano także wskazania monitora obrazującego intensywność emisji promieniowania podczerwonego w postaci wykresu o modulowanej amplitudzie. Tym sposobem dla badanego odcinka otrzymano 21 profilów, w przybliżeniu prostopadłych do koryta rzeki.

Obrazy termalne badanego odcinka Wisły wykonano w skali około 1 : 66 000 i powiększono je do skali około 1 : 8000 (rys. 12).

Poczynione uprzednio uwagi na temat zniekształceń lotniczych obrazów termalnych dotyczą tylko sytuacji, w których lot odbywa się po linii prostej. Natomiast w przypadku wijącej się rzeki samolot wykonuje ciągle skręty, chcąc utrzymać badany obiekt w polu widzenia ka-



Rys. 12. Obraz termalny fragmentu badanego odcinka Wisły poniżej zrzutu ciepłej wody z Elektrowni „Kozienice”, wykonany za pomocą AGA Thermoprofile Model THP-1 (19. 08. 1974 r., godz. 19.17)

mery, i wprowadza tym samym znaczne zniekształcenia obrazu. Najbardziej wymownym tego faktem jest „wyprostowanie” rzeki i zwężenie jej szerokości w przypadku ostrych zakrętów. Ponieważ ruchy samolotu nie są rejestrowane, nie ma więc praktycznie żadnej możliwości obliczenia zniekształceń obrazu w poszczególnych jego fragmentach. Dlatego też w niniejszej pracy zdecydowano się przenieść zjawiska odwzorowane na obrazach termalnych na fotoszkiełko wykonany z aktualnych zdjęć lotniczych. Przenoszenia dokonano kierując się sytuacją topograficzną, odwzorowaną zarówno w korycie rzeki, jak też na jej brzegach.

Analizując otrzymane obrazy termalne stwierdzono, że strumień ciepłej wody wykazuje cechy charakterystyczne dla dyfuzji w warunkach przepływu turbulentnego. Na styku strumienia ciepłej wody zrzutowej z zimniejszą wodą rzeczną rozwijają się makroturbulencyjne zawirowania i w konsekwencji szerokość strumienia ciepłego zmienia się w czasie i wraz z odległością od miejsca zrzutu.

Po wyjściu z kanału zrzutowego szerokość strumienia nie przekracza 60 metrów aż do odległości około 1000 metrów poniżej zrzutu. Na tym odcinku granica między ciepłą a zimną wodą zaznacza się bardzo wyraźnie. Na obrazie termalnym woda ciepła ma zupełnie biały ton, natomiast woda zimna ma ton ogólnie ciemnoszary z wyraźniejszymi miejscami ciemniejszymi i jaśniejszymi. To zróżnicowanie tonalne obrazu zimnej wody świadczy o jej niejednorodnej temperaturze, a wahania w obrębie strumienia zimnej wody przekraczają $0,5^{\circ}\text{C}$.

W odległości około 2000 metrów strumień ciepłej wody napotyka na wyspę i dzieli się na dwie odnogi: węższą, opływającą wyspę od strony zachodniej, oraz znacznie szerszą — od strony wschodniej. Około 5000 metrów poniżej zrzutu ciepłej wody przez elektrownię wpada do Wisły Ra-

domka. Wprowadza ona wodę nieco zimniejszą od zimnej wody wiślanej. Jednak z uwagi na niewielką ilość wprowadzanej wody, Radomka nie wpływa w zauważalny sposób na obniżenie temperatury ciepłego strumienia. Przyparta do brzegu przyrzutowego na przestrzeni kilkudziesięciu metrów całkowicie miesza się z wodą ciepłą, nie wywołując najmniejszej zmiany tonalnej na obrazie termalnym. Strumień ciepłej wody płynie w dalszym ciągu przy lewym brzegu Wisły, natrafiając raz po raz na mniejsze i większe wyspy oraz łachy piaszczyste, które opływa po obu stronach, po czym ponownie łączy się w jeden. Mimo rozbicia na wiele wąskich niekiedy odnóg nie obserwuje się wyraźnej zmiany tonalnej obrazu termalnego ciepłego strumienia, co oznacza, że nie traci on ciepła w sposób dostrzegalny przez kamerę termalną.

W odległości około 6000 metrów poniżej zrzutu strumień ciepłej wody trafia na jedną z większych wysp występujących na badanym odcinku, której nie opływa jak zwykle po obu stronach, lecz zostaje przyparty do brzegu przyrzutowego i płynie odnogą szerokości zaledwie około 100 metrów na przestrzeni prawie 1,5 kilometra.

Na 13 kilometrze poniżej elektrowni Wisła skręca pod ostrym kątem na północny wschód. Strumień ciepłej wody odbija się więc w tym miejscu od lewego brzegu i wypełnia większą część koryta, przypierając strumień zimnej wody do prawego brzegu. Rzeka płynie w tym kierunku na przestrzeni prawie 3 kilometrów, aby ponownie, pod ostrym kątem, skręcić w kierunku północno-zachodnim. Teraz z kolei strumień zimnej wody odbija się od prawego brzegu przypierając strumień ciepły do brzegu przyrzutowego. Obrazy termalne obu strumieni są w dalszym ciągu wyraźne i nie ma żadnej wątpliwości co do przebiegu granicy między nimi.

Strumień ciepły płynie dalej wzdłuż lewego brzegu i rozbijając się na licznych wyspach i łachach traci swe ciepło, co przejawia się powolną zmianą fototonu. Niemniej do ujścia Pilicy oba strumienie różnią się wyraźnie.

Podobnie jak Radomka, tak i Pilica wprowadza do Wisły wodę znacznie zimniejszą od zimnej wody wiślanej. Znacznie większa w tym przypadku ilość wody powoduje, że przy lewym brzegu wytwarza się teraz strumień zimny, który płynie, przypierany do brzegu przez ciepłą wodę, na przestrzeni około 2 kilometrów zaznaczając się wyraźnie na obrazie termalnym. Poniżej ujścia Pilicy granica strumienia ciepłej wody staje się coraz mniej wyraźna, ale jednocześnie obraz zimnej wody staje się jaśniejszy, co sugeruje podniesienie się jej temperatury. Mimo tego na lotniczym obrazie termalnym w dalszym ciągu można zauważyć dwa strumienie aż do końca badanego odcinka, a więc około 40 kilometrów poniżej Elektrowni „Kozienice”.

Należy jeszcze dodać, że w momencie wykonywania obrazów termalnych z pokładu samolotu obraz termiki rzeki odpowiada warunkom średnich stanów wody w Wiśle, przy zrzucie wody ciepłej z elektrowni, stanowiącym około 7% przepływu rzecznoego, przy temperaturze wody naturalnej $t_n = 21,9^{\circ}\text{C}$ i podgrzaniu wody zrzutowej około 10 deg ponad t_n .

Lotnicze obrazy termalne dostarczają, jak widać, ogromnej ilości informacji jakościowych, które są niemal nieporównywalne z informacjami osiąganymi metodami tradycyjnymi. Z dotychczasowej praktyki wynika, że ten odcinek Wisły był badany przez IMGW w pięciu przekrojach, w odległościach 300 metrów, 1000 metrów, 5500 metrów, 15 500 metrów i 38 600 metrów poniżej zrzutu. Na podstawie danych otrzymanych dla poszczególnych przekrojów interpolowano przebieg ciepłego strumienia.

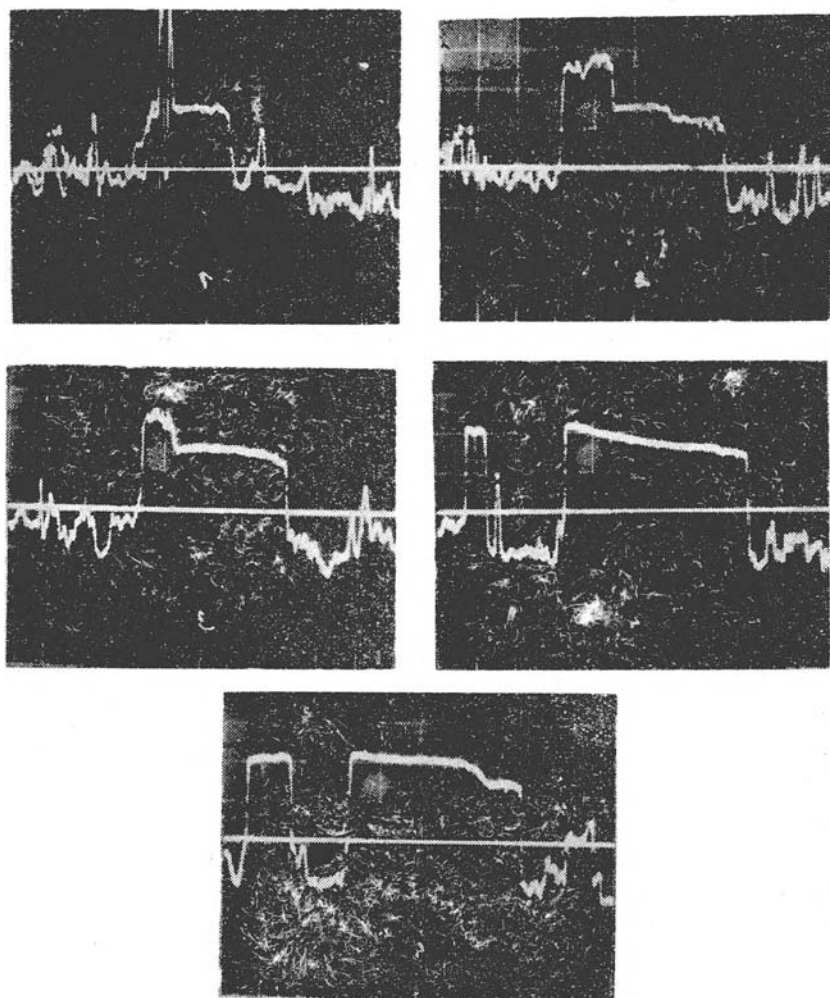
Jak już wspomniano, obraz termalny wykonany za pomocą Thermopile Model THP 1 składa się z linii, których na 1 milimetr przypada 11. Badany odcinek rzeki został zobrazowany na filmie o długości 714 milimetrów, a zatem składa się z 7854 linii, podczas gdy dotychczas obraz konstruowano na podstawie 5 linii przekrojowych, a więc na podstawie 1570 razy mniejszej liczby danych. Należy przy tym podkreślić, że wzdłuż każdej linii Thermopile Model THP 1 analizuje temperaturę wody w sposób ciągły, podczas gdy w tradycyjnych przekrojach pomiarów dokonuje się co 10, 20, a nawet co 50 metrów.

W celu interpretacji ilościowej można było otrzymać negatyw obrazu termalnego zmikrofotometrować, ażeby jego gęstości optyczne przyporządkować określonej temperaturze. W tym jednak przypadku wykorzystano możliwość rejestracji wskazań monitora obrazującego intensywność promieniowania podczerwonego w postaci wykresu. Jednocześnie moment odfotografowania ekranu tego monitora był zaznaczony na perforacji filmu przesuwającego się w kamerze Vaisala. Każdy więc wykres temperatury w przekroju poprzecznym do kierunku lotu samolotu został przyporządkowany określonym punktom obrazu termalnego.

Na badanym odcinku Wisły wykonano 21 profilów temperatury. Posłużyły one do interpretacji ilościowej obrazu termalnego. Rysunek 13 przedstawia kilka wybranych profilów, których przebieg zaznaczono na rysunku 12.

Otrzymane termogramy nie wskazywały temperatury wody, gdyż jak stwierdzono w poprzednich rozważaniach, kamera termalna rejestruje tylko intensywność emisji promieniowania podczerwonego z powierzchni badanego obiektu, która jest oczywiście funkcją jego temperatury i zdolności emisji. Wartości otrzymane w toku rejestracji wskazań monitora postanowiono zatem doprowadzić do wartości temperatury wody mierzonej tradycyjnym sposobem. Wymagało to wprowadzenia określonego

współczynnika, który umożliwiłby przeliczenie wartości energii promienistej emitowanej z powierzchni wody na jej temperaturę, uwzględniając jednocześnie wszystkie czynniki wpływające na osłabienie natężenia promieniowania podczerwonego, a więc zawartość pary wodnej w atmosf-



Rys. 13. Profile temperatury wykonane za pomocą AGA Thermoprofile Model THP-1

rze zawartość CO_2 , temperaturę otoczenia, współczynnik emisji wody, a także uwzględniając stałą kalibracyjną kamery. W celu obliczenia wielkości tego współczynnika postanowiono wykorzystać kontaktowe pomiary temperatury wody.

Jak już wspomniano, jednocześnie z badaniami prowadzonymi z pokładu samolotu były prowadzone badania terenowe. Jednak w momencie przelotu samolotu nie wykonywano pełnych pomiarów wzdłuż określonych przekrojów, co byłoby fizyczną niemożliwością z uwagi na czas przelotu nad określonym punktem, lecz zmierzono temperaturę wody w kilku miejscach, zarówno w strumieniu wody cieplej jak i zimnej.

Pierwszy z tych punktów, zwanych punktami kontrolnymi, został zlokalizowany w strumieniu zimnej wody, po przeciwnej stronie ostrogi odgraniczającej kanał zrzutowy od rzeki. W tym miejscu temperatura wody wynosiła $21,9^{\circ}\text{C}$ i za taką przyjęto ją też na profilu temperaturowym przechodzącym przez ten punkt. W stosunku do tego punktu kontrolnego, przyjętego za punkt dostosowania, obliczono na podstawie termogramów temperaturę w pozostałych pięciu punktach, w których rzeczywiste wartości temperatury były znane, gdyż zostały zmierzone termometrami kontaktowymi. Przy obliczeniach wykorzystano układ współrzędnych znajdujących się na ekranie monitora. Rzędne poszczególnych punktów wykresu temperaturowego odczytywane na wykresie są funkcją temperatury. Skalę rzędnych natomiast określa przyjęta czułość urządzenia termowizyjnego, która określa jednocześnie amplitudę skali szarości na obrazie termalnym.

Znając skalę rzędnych oraz odczytując z licznika urządzenia termowizyjnego temperaturę punktu odwzorowanego na termogramie, a którego temperatura rzeczywista jest znana, można obliczyć współczynnik dostosowania k , który pozwoli pomiary termowizyjne wyrazić w wartościach temperatur otrzymywanych metodą kontaktową. A zatem

$$k = \frac{t_t}{t_k},$$

gdzie

t_t — temperatura punktu na powierzchni wody zmierzona za pomocą urządzenia termowizyjnego,

t_k — temperatura tego samego punktu zmierzona termometrem kontaktowym.

Wyniki pomiarów w punktach kontrolnych otrzymane za pomocą obu metod zestawiono w tablicy 2.

Różnice temperatury w punktach kontrolnych upoważniają do przeprowadzenia dokładności pomiaru temperatury wody metodą termowizyjną za pomocą AGA Thermoprofile Model THP 1.

Średnia arytmetyczna wielkość Δt wynosi $+0,04^{\circ}\text{C}$. Wielkość ta może być traktowana jako wielkość systematycznego błędu opracowania. Wiadąc, że błąd ten określa liczba zaniedbywalnie mała wobec wielkości różnic Δt . Oznacza to, że opracowanie jest praktycznie wolne od błędów sy-

Tablica 2

Nr punktu kontrolnego	Temperatura w °C		Różnice $\Delta t = t_t - t_k$
	pomiar kontaktowy t_k	pomiar termowizyjny t_t	
1	21,9	—	—
2	24,1	24,2	+0,1
3	23,0	23,2	+0,2
4	22,0	22,1	+0,1
5	23,4	23,4	0,0
6	21,2	21,0	-0,2

stematycznego. Stwierdzenie to upoważnia do traktowania wielkości Δt jako przypadkowych błędów opracowania, które mogą być użyte do określenia wielkości błędu średniego.

Przyjmując założenie, że pomiary bezpośrednie są obarczone błędem średnim znacznie mniejszym od $0,1^\circ\text{C}$, wielkości Δt można traktować jako błędy prawdziwe pomiaru termowizyjnego. W takim razie błąd pomiaru termowizyjnego wynosi

$$m = \pm \sqrt{\frac{\Delta t \cdot \Delta t}{n}} = \pm 0,1^\circ\text{C}.$$

Po sprawdzeniu dokładności pomiarów przystąpiono do interpretacji pozostałych profili temperaturowych. Należy podkreślić, że profile te umożliwiły zwiększenie ilości informacji jakościowych, gdyż ich przebieg wskazywał na znacznie subtelniejsze zmiany rozkładu promieniowania podczerwonego niż sam obraz termalny. Zmiany te były na tyle znikome, że nie wywoływały wystarczającego zróżnicowania natężenia jasności strumienia elektronów na ekranie monitora, aby mogło być ono oddane zmianą gęstości optycznej negatywu obrazu termalnego.

Na podstawie wykonanych profili temperaturowych stwierdzono, że w kanale zrzutowym temperatura powierzchni wody przekracza 30°C . Dokładnej temperatury nie można było wyznaczyć, ponieważ w przyjętej czułości urządzenia (a tym samym w określonej skali rzędnych układu) wykres temperatury nie zmieścił się na ekranie monitora.

W odległości 400 m poniżej zrzutu temperatura wody wynosi $28,6^\circ\text{C}$, a w odległości 700 m maksymalna temperatura spada do $24,4^\circ\text{C}$. Na przestrzeni następnych 1500 metrów chłodzenie ciepłego strumienia odbywa się stosunkowo wolno, gdyż maksymalna temperatura wody spada zaledwie o $0,5^\circ\text{C}$. W momencie gdy strumień ciepłej wody napotyka wyspę i dzieli się na dwie odnogi, maksymalną temperaturę obserwuje się w jego prawej części, a nie, jak dotąd, w pobliżu brzegu przyrzutowego. Zja-

wisko to ilustruje profil 4 na rysunku 13. Jednocześnie obserwuje się wyrównany spadek temperatury powierzchni wody postępujący w kierunku prawego brzegu rzeki. Natomiast 400 metrów dalej, gdy strumień ciepłej wody rozlewa się na szerokości prawie 650 metrów, daje się zauważyć spadek temperatury wody przy brzegu przyrzutowym o $0,2^{\circ}\text{C}$ w stosunku do temperatury maksymalnej, która w dalszym ciągu utrzymuje się w prawej odnodze strumienia. Tym razem granica między strumieniem ciepłym a zimną wodą wiślaną zaznacza się bardzo wyraźnie, gdyż na przestrzeni 40 metrów temperatura wody spada o $1,3^{\circ}\text{C}$.

Kolejny profil temperatury został wykonany w odległości 6 kilometrów poniżej zrzutu, a więc w miejscu, gdzie strumień ciepłej wody opływa wyspę tylko po jej zachodniej stronie. Z analizy obrazu termalnego wynika, że po prawej stronie wyspy nie ma ciepłej wody.

Tymczasem na profilach obserwuje się niewielki strumień wody cieplejszej o temperaturze o $0,3^{\circ}\text{C}$ wyższej od temperatury wody zimnej. Strumień ten ma szerokość około 10 metrów. Nieodfotografowanie się jego na obrazie termalnym należy tłumaczyć tzw. zjawiskiem brzegowym, występującym w procesie fotograficznym. Strumień okazał się po prostu zbyt wąski, ażeby przy dużych kontrastach tonalnych zarówno obrazu wyspy, jak i obrazu zimnej wody, a więc obiektów występujących po obu jego brzegach, mógł zostać zarejestrowany.

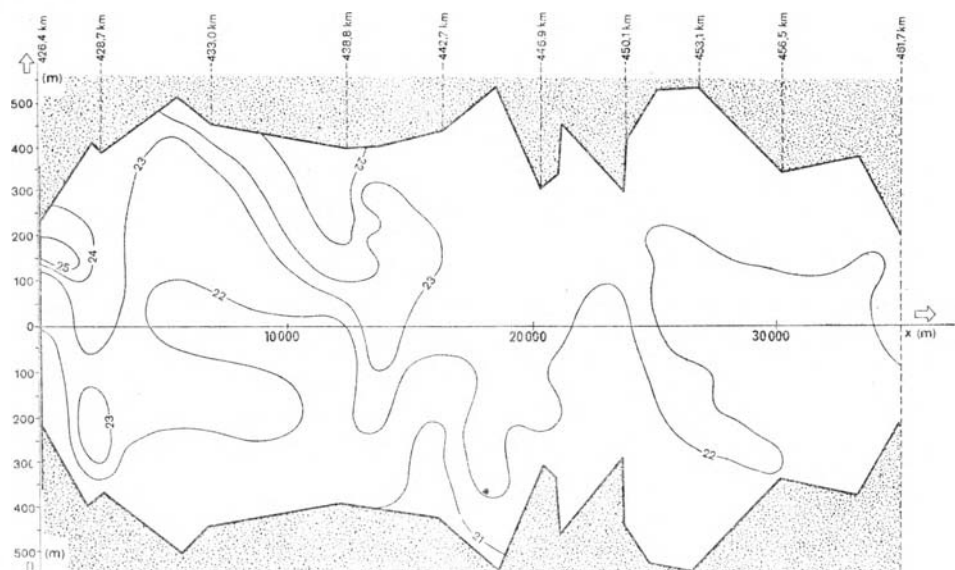
Kolejne profile, wykonane w odległościach 7,0 kilometrów, 12,8 kilometrów, 14,1 kilometrów oraz 16,7 kilometrów, wskazują, że maksymalna temperatura wody utrzymuje się w granicach $23,4 \div 23,1^{\circ}\text{C}$, przy czym występuje ona w środkowej części strumienia, a nie przy brzegu przyrzutowym.

Na uwagę zasługuje fakt, że maksymalna temperatura powierzchni wody nie spada w sposób ciągły w miarę wzrostu odległości od zrzutu. I tak na przykład w profilu wykonanym na 12,8 kilimetrze maksymalna temperatura wody wynosi $23,1^{\circ}\text{C}$, natomiast na 14,1 kilimetrze maksymalna temperatura wody wzrasta do $23,4^{\circ}\text{C}$, a więc o $0,3^{\circ}\text{C}$. To zjawisko, wydaje się, można tłumaczyć zarówno samą dynamiką strumienia ciepłej wody, jak i czynnikami lokalnymi, na przykład obecnością źródeł zimnej wody, która może punktowo obniżać temperaturę wody ciepłej.

Począwszy od 19 kilometra poniżej zrzutu maksymalna temperatura powierzchni warstwy wody nie osiąga już $23,0^{\circ}\text{C}$ i na przestrzeni następnych 17 kilometrów utrzymuje się w granicach $22,9 \div 22,6^{\circ}\text{C}$.

Dopiero poniżej 34 kilometra od zrzutu maksymalna temperatura wody spada poniżej $22,4^{\circ}\text{C}$, gdy tymczasem temperatura wody zimnej wynosi $22,1^{\circ}\text{C}$. Tak więc jeszcze w odległości 40 kilometrów poniżej Elektrowni „Kozienice” występuje wyraźne różnicowanie między wodą podgrzaną a wodą o temperaturze naturalnej.

Na podstawie przekrojów temperaturowych została wykreślona mapa izotermalna (rys. 14). Z analizy tej mapy wynika, że istnieją trzy etapy chłodzenia się podgrzanej wody. W pierwszym zaznacza się gwałtowne chłodzenie.



Rys. 14. Rozkład temperatury powierzchniowej odcinka Wisły między Elektrownią „Kozienice” a ujściem Pilicy (wg pomiarów termowizyjnych wykonanych 20. 08. 1974 r.)

Po wyjściu z kanału zrzutowego podgrzana do ponad 30°C woda styka się z wodą wiślaną i ulega gwałtownemu ochłodzeniu do 25°C , a więc o ponad 5°C . Izoterma łącząca punkty o tej samej temperaturze sięga zaledwie 600 metrów poniżej zrzutu. Warto przy tym zwrócić uwagę, że strumień najcieplejszej wody nie dotyka brzegu przyzrzutowego.

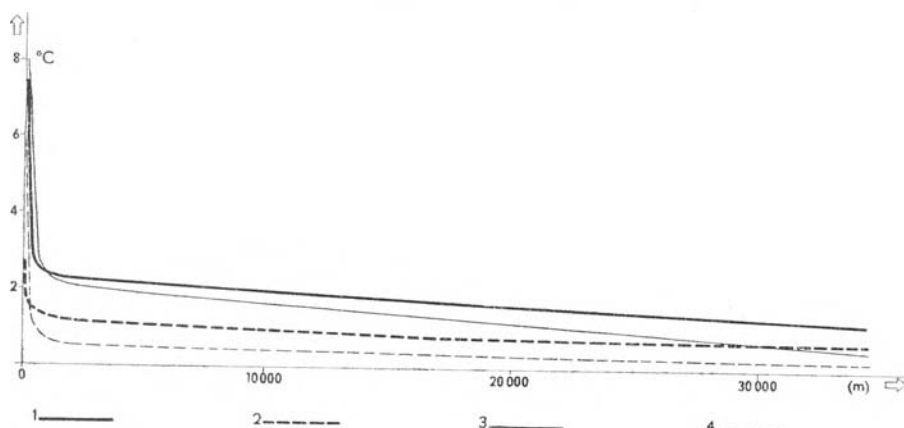
Drugi etap to spadek temperatury o dalsze 2°C . Do około 2 kilometrów najwyższa temperatura wody przekracza 24°C , natomiast temperatura wody 23°C utrzymuje się aż do odległości 16 kilometrów poniżej zrzutu.

W trzecim wreszcie etapie strumień podgrzanej wody jest cieplejszy zaledwie o około 1°C od zimnej wody wiślanej. Proces chłodzenia na tym etapie przebiega już bardzo wolno, mimo dzielenia się strumienia ciepłego na wiele wąskich niekiedy odnóg, co wydawałoby się, ułatwia proces wymiany ciepła i to nawet mimo przyjęcia zimnej wody z Pilicy.

Przeprowadzona wyżej ilościowa analiza rozkładu temperatury wody zrzuconej przez Elektrownię „Kozienice” do Wisły została przeprowadzona na podstawie 21 profilów, na których wybrano 118 punktów. Należy jednak stwierdzić, że możliwości techniczne metody są znacznie większe.

Temperaturę badanego odcinka Wisły można bowiem przeanalizować znacznie dokładniej, gdyż rejestracji przekrojów dokonuje się co 1 sekundę, a lot nad tym odcinkiem trwa, jak już wspomniano, 510 sekund.

Na podstawie wyników otrzymanych z analizy wykresów temperaturowych skonstruowano podłużny profil przyrostów temperatury powierzchni wody na badanym odcinku rzeki. Profil ten przedstawia rysunek 15. Jednocześnie otrzymany profil porównano z profilem zestawionym na



Rys. 15. Profil podłużny przyrostów temperatury powierzchni wody w Wiśle na odcinku Elektrownia „Kozienice” — ujście Pilicy.

- 1 — maksymalna temperatura wody (wg metody termowizyjnej),
- 2 — średnia temperatura wody (wg metody termowizyjnej),
- 3 — maksymalna temperatura wody (wg metody kontaktowej),
- 4 — średnia temperatura wody (wg metody kontaktowej)

podstawie wyników badań kontaktowych, prowadzonych przez IMGW. Przebieg obu profilów jest niemal identyczny co do kształtu, natomiast niezgodny co do wartości temperatury. Wyniki otrzymane metodą kontaktową są średnio o około 1°C niższe od wyników pomiarów termowizyjnych. Niezgodność ta wynika z niejednoczesności obserwacji. Jak już wspomniano, metodą bezkontaktową zbadano wspomniany odcinek rzeki w ciągu 8 minut 30 sekund. Natomiast pomiary prowadzone przez IMGW na tym samym odcinku rzeki trwały 3 dni. Ponieważ Elektrownia „Kozienice” nie pracuje równomiernie w ciągu całej doby, więc zmianom ulega ilość ciepłej wody odprowadzanej do Wisły. W ciągu dnia, przy mniejszym obciążeniu elektrowni, mniejsza ilość ciepłej wody zostaje zrzucona i stąd ulega ona szybszemu ochłodzeniu. Pomiary kontaktowe były więc wykonywane w ciągu dnia, natomiast pomiary termowizyjne zostały wykonane w momencie szczytowego obciążenia elektrowni, a więc przy większej ilości wody odprowadzanej do Wisły. Fala ciepłej wody

płyńie z prędkością około 3 kilometrów/godzinę. Tak więc w momencie wykonywania obrazów termalnych oraz pomiarów kontrolnych czoło fali znajdowało się około 5 kilometrów poniżej zrzutu. Natomiast pod koniec badanego odcinka rzeki samolot „dogonił” jeszcze falę z poprzedniego szczytowego obciążenia elektrowni.

W trakcie badań metodą kontaktową, prowadzonych w dniach 19—21. VIII. 1974 r. w godzinach południowych, za każdym razem dokonywano pomiarów po minięciu danego przekroju przez falę szczytowego zrzutu. Nie było celowe unikanie tej fali, lecz wynikło ono z przyjętej organizacji i harmonogramu pracy, a także z konieczności zachowania niezbędnych warunków jej bezpieczeństwa.

Wnioski

Zaprezentowana wyżej metoda badania rozkładu temperatury na powierzchni wody w rzekach obciążonych termicznie ma niewątpliwie wiele zalet. Jest, przede wszystkim metodą umożliwiającą prowadzenie badań na dużym obszarze, w czasie nieporównywalnie krótszym w stosunku do metody tradycyjnej. Zezwala zatem na niemal jednoczesne spojrzenie na analizowane zjawisko, co poprzednio mogło być osiągalne tylko ogromnym nakładem kosztów i pracy i praktycznie nie było realizowane. Warto dodać, że tą metodą zbadano już także rozkład temperatury powierzchniowej warstwy wody w Wiśle na odcinku od ujścia Soły do ujścia Sanu, a więc na odcinku ponad 200 km. Czas lotu wyniósł zaledwie 83 minuty. Ilość informacji zdobyta tą metodą jest nieporównywalna z ilością informacji otrzymywanych przy stosowaniu metod kontaktowych.

Osiągnięta w trakcie badań dokładność pomiaru temperatury, wynosząca $0,1^{\circ}\text{C}$, dorównuje dokładności metod kontaktowych. Należy tu jednak zaznaczyć, że tak wysoka dokładność została osiągnięta dla stosunkowo krótkiego odcinka rzeki (ok. 40 km) i w warunkach stabilności zjawisk meteorologicznych w trakcie badań. W przypadku dłuższych odcinków lub zmienności warunków atmosferycznych należy liczyć się ze zmniejszeniem stopnia dokładności pomiarów temperatury powierzchni wody.

Z pomiarów okresowych i ekspedycyjnych prowadzonych od wielu lat metodami kontaktowymi wynika, że w przypadku rzek nie podpartych, a więc gdy przepływ wody w rzece odbywa się swobodnie, stratyfikacja temperatury ma charakter poziomy (układ strumieniowy). Oznacza to, że dla danego profilu temperatura zmierzona na dowolnej głębokości jest taka sama, jak i na powierzchni wody. To stwierdzenie podnosi wartość metody termowizyjnej, która, jak wiadomo, dostarcza informacji o tem-

peraturze tylko na powierzchni badanego obiektu. Inaczej przedstawia się ta sprawa w przypadku, gdy odbiornikiem ciepła odpadowego jest jezioro lub rzeka podparta. Wówczas pomiar temperatury na powierzchni odbiornika nie jest reprezentatywny dla całej masy wody. Badania nad tym zagadnieniem zostaną w najbliższej przyszłości podjęte w Instytucie Geodezji i Kartografii przy współpracy Zakładu Fizyki Wody Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Kolejną niewątpliwą zaletą metody termowizyjnej jest możliwość powtarzania badań w niemal dowolnym czasie. Jednak w takim przypadku konieczne jest każdorazowe korygowanie „współczynnika dostosowania”, co wymaga naziemnych pomiarów kontrolnych przynajmniej w jednym punkcie.

Słabą stroną termowizyjnej metody badania temperatury wody w rzekach i zbiornikach jest konieczność wykonywania lotów badawczych w ciągu nocy. Ten fakt utrudnia bowiem znacznie nawigowanie samolotu, zwłaszcza w przypadku mniejszych rzek o krętym przebiegu, kiedy niemożliwe jest prowadzenie statku powietrznego według wskazań przyrządów pokładowych. Przewiduje się jednak, że w najbliższej przyszłości samolot z aparaturą termowizyjną na pokładzie zostanie wyposażony w noktowizor, który umożliwi pilotowi obserwację terenu i kierowanie samolotem tak, aby badany obiekt znajdował się cały czas w polu widzenia kamery termalnej.

Drugą słabą stroną omawianej metody są stosunkowo wysokie koszty związane z jej wykorzystaniem. Gros kosztów pochłania eksploatacja samolotu, a przede wszystkim dołot do miejsca badań. Według obowiązujących przepisów 1 godzina lotu samolotu Ił-14 wynosi około 20 000 złotych. Lot badawczy nad badanym w trakcie niniejszej pracy odcinkiem rzeki trwał 8 minut 30 sekund, a więc kosztował około 2800 złotych, podczas gdy samolot był w powietrzu ponad jedną godzinę. W przypadku miejsc bardziej odległych od lotniska Okęcie, z którego, jak dotąd, startują samoloty na nocne termowizyjne loty badawcze, koszt dołotu może dochodzić nawet do 90% ogólnych kosztów związanych z prowadzeniem badań.

Wydaje się, że w najbliższym czasie koszt eksploatacji samolotów nie ulegnie wydatnemu obniżeniu, jednak biorąc pod uwagę nieporównywalnie większą liczbę otrzymywanych informacji odnośnie termiki wód, zwłaszcza wobec narastającego problemu ich wykorzystania jako odbiornika ciepła odpadowego, trzeba liczyć się z ponoszeniem stosunkowo dużych opłat.

L I T E R A T U R A

- [1] AGA Thermovision System 680: Operating manual. Lidingö.
- [2] AGA Thermoprofile Model THP-1: Operating manual. Lidingö.
- [3] Ciołkosz A., Dobrowolski A.: Badanie za pomocą lotniczych obrazów termalnych rozkładu temperatury wody w Wiśle poniżej zrzutu wód podgrzanych z elektrowni „Kozienice”. *Gospodarka Wodna*, Nr 12, 1974, str. 453—457.
- [4] Hirt F.H.: Infrarot-Wärme-Messungen vom Flugzeug aus ihre Anwendbarkeit für die Gewässerüberwachung. *Wasser und Boden*, Nr 9, 1973, str. 273—277.
- [5] Instytut Geodezji i Kartografii, Zakład Interpretacji Zdjęć Lotniczych i Satelitarnych: Wykonanie i interpretacja lotniczych obrazów termalnych odcinka rzeki Wisły w rejonie zrzutu wód podgrzanych z elektrowni „Kozienice”. Warszawa, 1973, maszynopis.
- [6] Instytut Geodezji i Kartografii, Zakład Interpretacji Zdjęć Lotniczych i Satelitarnych: Technologia wykonywania obrazów termalnych z pokładu samolotu Il-14 przy użyciu Termoprofilu THP-1. Warszawa, 1974, maszynopis.
- [7] Instytut Geodezji i Kartografii, Zakład Interpretacji Zdjęć Lotniczych i Satelitarnych: Zastosowanie lotniczych obrazów termalnych do badania rozkładu temperatury wód zrzutowych w rzekach i zbiornikach. Warszawa, listopad 1974, maszynopis.
- [8] Instytut Geodezji i Kartografii, Zakład Interpretacji Zdjęć Lotniczych i Satelitarnych: Opracowanie metodyki pomiarów rozkładu temperatury wody na modelach hydrotermicznych przy użyciu techniki termowizyjnej — etap I. Warszawa, 1975, maszynopis.
- [9] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Gospodarowania Wodą: Wpływ zrzutu wód podgrzanych z elektrowni „Kozienice” na reżim termiczny rzeki Wisły w okresie od uruchomienia elektrowni do końca sierpnia 1973 r. Warszawa listopad 1973, maszynopis.
- [10] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział Gospodarowania Wodą: Wpływ zrzutu wód podgrzanych z elektrowni „Kozienice” na reżim termiczny rzeki Wisły w okresie od 1.09.1973 do 30.10.1974. Warszawa, listopad 1974, maszynopis.
- [11] Lopik, van, J.R., Pressman A.E., Ludlum R.L.: Mapping pollution with infrared. *Photogrammetric Engineering*, Vol. XXXIV, Nr 6, 1968, str. 561—564.
- [12] Nunnally N.R.: Introduction to remote sensing: The physics of EL radiation. Summer Short Course in the Geographic Applications of Remote Sensing. University of Tennessee 1969.
- [13] Sabins F.F.: Flight planning and navigation for thermal — IR Surveys. *Photogrammetric Engineering*, Vol. XXXIX, Nr 1, 1973, str. 49—58.
- [14] Sabins F.F.: Recording and processing thermal IR imagery. *Photogrammetric Engineering*, Vol. XXXIV, Nr 8, 1973, str. 839—844.
- [15] Saunders P.M.: Aerial measurement of sea temperature in the infrared. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 72, Nr 16, 1967, str. 4109—4117.
- [16] Saunders P.M.: The temperature of the ocean-air interface. *Journal of Atmospheric Sciences*, Nr 24, 1967 str. 269—273.
- [17] Scarpace F.L., Green T.: Dynamic surfaces temperature structure of thermal plumes. *Water Resources Research* Vol. 9, Nr 1, 1973, str. 138—153.
- [18] Sellin L., Svenson H.: Airborne termography. *Journal of Physical, Human and Regional Geosciences*. *Geoforum* 2/1970, str. 49—60.
- [19] Schneider S., Dewes E., Krause A., Kroesch V., Lorenz D., Miosga G.: Gewäs-

- serüberwachung durch Fernerkundung. Die mittlere Saar. Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung. Bonn-Bad Godesberg. 12/1974.
- [20] Taylor J. I., Stingelin R. W.: Infrared Imaging for water resources studies. Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the Am. Society of Civil Engineering. 95, 1969.
- [21] Thackrey D. E.: Research in infrared sensing. University of Michigan. Research News. Nr 2, 1968.
- [22] Tuyahov A. J., Holz R. K.: Remote sensing of a Barrier Island. Photogrammetric Engineering Vol. XXXIX. Nr 2, 1973, str. 177—188.
- [23] Viezee D.: A method for computing infrared transmission through atmospheric water vapour and CO₂. Journal of Geophysical Research. Vol. 69 1964 str. 3785—3794.
- [24] Whipple J. M.: Surveillance of water quality. Photogrammetric Engineering, Vol. XXXIX, Nr 2, 1973, str. 137—145.
- [25] Williams R. S.: Thermography. Photogrammetric Engineering Vol. XXXVIII, Nr 9, 1972, str. 881—883.

Recenzował: doc. dr hab. Edward Tomaszewski

Rękopis złożono w Redakcji w maju 1975 r

АНДЖЕЙ ЦИОЛКОШ

ПРИМЕНЕНИЕ ДЛИННОВОЛЬНОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕРМАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕК

Резюме

Одним из проявлений загрязнения географической среды в настоящее время является термальное загрязнение рек и водохранилищ в результате впускания в них теплой воды из электростанций с открытой циркуляцией охлаждения. Проблема контроля этого загрязнения становится все более существенной, а размер явления превышает возможности традиционных исследовательских методов. Поэтому разыскиваются сейчас другие методы, дающие возможность получать информацию о загрязнении вод значительно быстрее. Одним из этих методов является регистрация длинноволнового инфракрасного излучения эмиттированного с поверхности исследуемых объектов.

В представленных исследованиях для регистрации этого рода излучения применено термальную камеру AGA Thermovision System 680, а также аппаратуру AGA Thermoprofile Model THP-1.

Термальная камера действует по принципу проводного телевидения и регистрируя инфракрасное излучение с длиной волны 2,0—5,6 м, создает изображение изучаемого объекта в действительном времени. Изображение это своим видом припоминает панхроматический снимок, но значение его тонов здесь другое и выражает интенсивность инфракрасного излучения эмиттированного изучаемым объектом. AGA Thermoprofile Model THP-1 анализирует исследуемый объект только вдоль одной линии, указывая интенсивность эмиссии инфракрасного излучения или в виде диаграммы с модулированной амплитудой, или в виде прямой линии с модулированной яркостью.

В доставленном фирмой приборе AGA Thermoprofile Model TNP-1 не предусмотрено возможности фотографической регистрации показаний монитора, изображающего распределение интенсивности эмиттированного инфракрасного излучения в виде диаграммы.

По этому в Институте геодезии и картографии сконструировано дополнительное устройство, дающее возможность фотографировать изображение монитора, а также экспонировать пункт на перфорации пленки с термальным изображением, к которому относится зарегистрированная диаграмма. Это дает возможность приспособления температурных диаграмм к термальному изображению с точностью 0,5 мм в масштабе снимка.

Измерения температуры поверхности воды, произведенные с помощью упомянутой аппаратуры, показывали систематическую разницу примерно 2°C по отношению к температуре измеренной контактным термометром. Модельные исследования, проведенные в Отделе гидравлики Института метеорологии и водного хозяйства, показали, что с помощью термовизионного метода измеряется другое явление, чем с помощью контактного метода. Поскольку во втором случае определяется температура воды по точкам, постольку с помощью термовидения измеряется радиация эмиттированная в некотором диапазоне спектра с поверхности воды, то есть измеряются энергетические изменения происходящие непрерывно в тонком слое, насыщенном водяным паром и ограничивающем поверхность воды от атмосферного воздуха.

С гидродинамической точки зрения более существенными являются изменения энергии, происходящие в поверхностном слое воды, то есть на границе двух сред. Здесь происходят ведь такие явления, как испарение, нагревание, охлаждение, замерзание, и поэтому результаты измерения температуры термовизионным методом должны считаться как более существенные, чем непосредственные измерения температуры.

С помощью AGA Thermoprofile Model TNP-1 сделано с борта самолета термальные изображения фрагмента Вислы между электростанцией „Козенице” и устьем Пилицы. Изображения эти в свою очередь подвергались качественному и количественному анализу. Одновременно, на основе исследований проведенных контактным методом, определено „коэффициент приспособления” результатов термовизионных измерений к контактным измерениям. В этом коэффициенте учтено все факторы, влияющие на точность термовизионного измерения (содержание водяного пара в атмосфере, содержание CO₂, температура окружающей среды, коэффициент эмиссии воды, а также калибрационная постоянная камеры). В результате анализа измерений воды контактным и термовизионным методом установлено, что измерения термовизионным методом лишены систематических ошибок, а средняя ошибка измерения составляет $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

APPLICATION OF LONGWAVE INFRARED RADIATION IN ANALYSES OF THERMAL RIVER POLLUTION

Summary

Thermal pollution of rivers and water reservoirs as a result of taking off hot water to them from power stations with open cooling circulation is one of the symptoms of geographical environment pollution. Problems connected with control of the pollution have become more and more important. The range of it however cannot be overcome by conventional experimental methods. That is why new methods that would allow to get information about water pollution in more effective way are searched for. One of them is recording of longwave infrared radiation emitted from the source of examined objects.

For the experiments concerning the recording of this range of radiation a thermal camera AGA Thermovision System 680 and the system AGA Thermoprofile Model THP-1 were used.

The thermal camera operates on principles of cable television and while recording infrared radiation of 2,0—5,6 μ wavelength it creates an image of an examined object in real time. The appearance of this image reminds a panchromatic picture, however the significance of its tones is different here and denotes the intensity of infrared radiation emitted by an examined object. AGA Thermoprofile Model THP-1 makes analyses of the object only along one line showing the intensity of the emission of infrared radiation either in the form of a diagram of modular amplitude or as a straight line of modular brightness. It is not possible to make photographic recording of monitor's indication showing disintegration of the intensity of emitted infrared radiation in the form of a diagram with the supplied by the firm AGA Thermoprofile Model THP-1.

That was the reason why a complementary system enabling to take pictures of an image of monitor and illumination of a spot on perforation of the film with a thermal image to which relates the recorded diagram was developed in the Institute of Geodesy and Cartography. This system provides the possibility of adjusting thermal diagrams to a thermal image with accuracy of 0,5 mm in the scale of picture. Taking temperature of water surface with the above mentioned systems showed that a systematic difference is 2°C in comparison to temperature taken with a contact thermometer. Model experiments held in the Applied Hydraulic Department of the Institute of Meteorology and Water Economics showed that a different phenomenon is analysed with a thermovision method than with a contact method. If in case of the latter method temperature of water is punctually determined, in case of thermovision system the radiation emitted in some parts of spectrum from water surface is measured, that is the energetic differences that occur constantly in the thin film saturated with vapour which separates the water surface from free air is measured.

From the point of view of hydrodynamics changes of energy in the surface film of water, that is on the boundary of two media, seems to be more important. Because such phenomena as evaporation, heating, cooling and freezing take place here, the results of measurements of temperature with thermovision method should be regarded as more essential than direct measurements of temperature.

Thermal images of a part of Vistula river between the power station „Kozienice” and the mouth of Pilica river were taken with AGA Thermoprofile Model THP-1 from a plane board. These images were undergone the quantitative and qualitative analyses. In the same time, on the basis of the experiments performed with a contact method, an „adjustment coefficient” of the results of thermovisual measurements to the contact measurements was determined. This coefficient includes all effects that have an influence on the accuracy of thermovision measurement (vapour contents in the free air, the amount of CO₂, temperature of an ambiency, water emission coefficient and the calibration constant of the camera). As a result of the analyses of the measurements of water temperature with a contact and thermovision method it was found out that the measurements performed with thermovision is free from systematic errors and the mean error is $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.