

Instytut Geodezji i Kartografii  
Warszawa

Wojciech Bychawski, Andrzej Ciołkosz

## TERMOWIZYJNA METODA WYKRYWANIA OBSZARÓW WYSTĘPOWANIA INWERSJI TERMICZNYCH I MGIEŁ RADIACYJNYCH

Jedną z podstawowych uciążliwości powstających w wyniku działania zakładów przemysłowych jest zanieczyszczenie atmosfery. Znajdujące się w powietrzu pyły i gazy emitowane przez zakłady przemysłowe zmniejszają natężenie promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi. Pyły unoszone w powietrzu rozpraszają promienie słoneczne i przyczyniają się do powstawania jąder kondensacyjnych przyspieszających proces skraplania się pary wodnej. Powoduje to często powstawanie mgieł i zwiększa ilość opadów atmosferycznych.

Intensywność zanieczyszczeń w określonym rejonie zależy nie tylko od ilości emitowanych pyłów i gazów, lecz również od warunków atmosferycznych. Prędkość wiatru przyczynia się do przemieszczania zanieczyszczeń powodując ich usuwanie. Równocześnie jednak przemieszczane zanieczyszczenia atakują obiekty znajdujące się na linii głównych prądów powietrza. W sumie obecność wiatru traktowana jest jako czynnik łagodzący wpływ zanieczyszczeń powietrza na środowisko głównie ze względu na stosunkowo szybko malejącą ich koncentrację w miarę wzrostu odległości od emitora. Na rozmieszczenie i koncentrację zanieczyszczeń wpływa również rozkład temperatury powietrza. Szczególnie istotną rolę w procesie osłabiania wpływu zanieczyszczeń powietrza mają prądy wstępujące, które wynosząc skażone powietrze w górne warstwy atmosfery przyczyniają się do oczyszczenia jej dolnych warstw. Do oczyszczania atmosfery przyczyniają się również opady, które porywają w dół zawieszone w powietrzu cząsteczki pyłów i gazów. Oczyszczający wpływ opadów na atmosferę jest niwelowany ich negatywnymi skutkami wynikającymi z tego, że na powierzchni Ziemi osiadają wraz z wodą opadową liczne, często bardzo toksyczne związki chemiczne powstające w procesie łączenia się gazów z parą wodną.

Stan szczególnego zagrożenia powstaje w czasie występowania

inwersji termicznej. Zjawisko inwersji zachodzi wtedy, gdy skutkiem wypromieniowania dolne warstwy powietrza ochładzają się bardziej niż górne. Sprzyja temu spokojny stan atmosfery oraz bezchmurne niebo. W czasie trwania inwersji pyły i gazy zawieszane w powietrzu tkwią w bezruchu przy powierzchni gruntu zwłaszcza w zagłębieniach, dolinach i obniżeniach terenu zaniezione tam przez spływające zimne a więc ciężkie powietrze.

Inwersja termiczna sprzyja powstawaniu mgieł radiacyjnych, które są skutkiem wypromieniowania ciepła z powierzchni lądu podczas wiatru, przy pogodnym niebie i słabym wietrze. W tych warunkach w nocy oziębia się powierzchnia lądu oraz przylegające do niej warstwy powietrza, co prowadzi do jego ochłodzenia poniżej punktu rosy a więc do skroplenia się pary wodnej. Oprócz mgieł radiacyjnych powstają również mgły przyziemne zalegające nad polami w lecie po zachodzie słońca. Przyczyną powstawania tych mgieł - oprócz wypromieniowania - są opadające jądra kondensacyjne. Zjawisko to występuje wtedy, gdy brak jest prądów wstępujących. Opadające jądra kondensacji składające się z pyłów, dymów, kryształów soli oraz bezwodników kwasów siarkowego, azotowego i fosforowego będących głównymi produktami spalania, absorbują parę wodną tworząc mgłę. Miejsca występowania takich mgieł oznaczają się z natury rzeczy dużą intensywnością zanieczyszczenia atmosfery.

Zlokalizowanie miejsc występowania inwersji, a więc miejsc szczególnie narażonych na skutki zanieczyszczenia atmosfery jest ważne w ogólności z punktu widzenia planowania przestrzennego zaś w szczególności, przy precyzowaniu zasad funkcjonowania stref ochronnych określonych zakładów przemysłowych. Wykrywanie takich miejsc jest trudne głównie ze względu na efemeryczny charakter zjawiska. Jak dotąd wykrywanie miejsc i określanie zasięgu występowania inwersji odbywa się niemal wyłącznie na podstawie analizy topografii terenu z uwzględnieniem zasad mechaniki ruchu mas powietrza w różnych warunkach atmosferycznych.

Fakt, iż w miejscach występowania inwersji istnieje skłonność do tworzenia się mgieł radiacyjnych pozwolił powziąć koncepcję wykorzystywania zjawiska powstawania i zalegania tych mgieł jako wskaźnika obszarów występowania inwersji.

Powierzchnia Ziemi wraz ze znajdującymi się na niej obiektami jest źródłem długofalowego promieniowania elektromagnetycznego, którego maksimum - zależne od temperatury ciała - przypada na fale o

długości od 4000 do 12 000 nm. Długofalowe promieniowanie podczerwone może być rejestrowane przy użyciu techniki termowizyjnej, która pozwala również na transformowanie wyników tej rejestracji na termalny obraz powierzchni badanego ciała. W procesie tej transformacji istotną kwestią jest określenie i zminimalizowanie wpływu warstwy atmosfery znajdującej się w chwili badania między przedmiotem a detektorem podczerwieni. Głównym czynnikiem osłabiającym natężenie promieniowania podczerwonego przechodzącego przez atmosferę jest para wodna. Ten fakt, utrudniający typowe opracowania termowizyjne, w tym przypadku podnosi użyteczność termowizji, gdyż ułatwia wyodrębnienie z obrazu termalnego obszarów występowania inwersji na drodze pośredniej, poprzez wykrywanie obszarów zalegania mgieł. Czulość urządzeń termowizyjnych jest tak duża, że rejestruje się nie tylko osłabienie promieniowania podczerwonego wywołane obecnością pary wodnej w zalegającej mgle, ale również zmiany natężenia promieniowania spowodowane lokalnym oziębieniem się gruntu i przylegającej do niego warstwy powietrza lecz bez przekroczenia punktu rosy, czyli jeszcze przed powstaniem mgły. Ta właściwość jest o tyle istotna, że pozwala wykrywać miejsca występowania inwersji również i wtedy, gdy natężenie tego zjawiska i towarzyszące warunki nie doprowadzają do powstania mgły radiacyjnej. Inną ważną cechą techniki termowizyjnej jest jej szczególna predyspozycja do wykonywania obserwacji w nocy. Cecha ta wynika stąd, że w godzinach nocnych termalne promieniowanie obiektów nie jest zakłócone odbitym promieniowaniem Słońca i dezorientującym ciemnym chmur.

Termowizyjna metoda wykrywania miejsc występowania inwersji termicznej składa się z trzech głównych elementów postępowania badawczego:

- wyboru warunków i czasu wykonywania obrazu termalnego,
- wykonania lotniczych obrazów termalnych,
- określenia obszarów występowania inwersji na podstawie interpretacji obrazu termalnego.

Metoda ta została opracowana w Zakładzie Interpretacji Zdjęć Lotniczych i Satelitarnych Instytutu Geodezji i Kartografii i próbnie zastosowana przy badaniu zmian zachodzących w środowisku geograficznym w rejonie budowy Huty Katowice. Badania te prowadzone były na zlecenie Biura Projektów Przemysłu Hutniczego "BIPROHUT" w Gliwicach.

Loty badawcze dla wykrycia obszarów występowania inwersji należy wykonywać w okresie pogody wyżowej, przy bezchmurnym niebie

i w stanie ciszy atmosferycznej. Takie to bowiem warunki sprzyjają powstawaniu zjawiska inwersji.

Loty należy wykonywać w późnych godzinach nocnych tuż przed wschodem słońca. Wybór tej pory doby jest podyktowany tym, że bezpośrednio przed wschodem słońca, skutkiem całonocnego wypromiowania, ma się ku końcowi proces ochładzania się dolnych warstw atmosfery, spływania zimnych mas powietrza w zagłębienia terenowe i tworzenie się zastoisk. Wtedy to temperatura powietrza i prężność pary wodnej w atmosferze osiągają minimum, a więc powstają warunki do osiągnięcia stanu nasycenia tej pary czyli warunki do powstania mgły radiacyjnej.

Cennych informacji mogą również dostarczyć loty badawcze wykonywane w lecie, po zachodzie słońca. Wówczas jak wiadomo, powstają warunki do tworzenia się mgieł przyziemnych, będących wynikiem opadania jąder kondensacyjnych. Systematycznie prowadzone badania miejsc występowania takich mgieł mogą wykryć ewentualne prawidłowości w lokalizowaniu się tego zjawiska co byłoby równoznaczne z określeniem obszarów silnie narażonych na działanie skutków zanieczyszczenia atmosfery.

Przy ustalaniu programu lotów badawczych dla wykrywania obszarów koncentracji skażonego powietrza /obszary występowania inwersji oraz opadania jąder kondensacyjnych/ należy przewidzieć nie jeden lecz kilka takich lotów. Chodzi bowiem o wyeliminowanie wpływu zjawisk przypadkowych i wieloznacznych.

Do wykonywania obrazów termalnych mających służyć wykrywaniu miejsc występowania inwersji należy wykorzystywać urządzenia termowizyjne AGA Thermoprofile THP 1. Działanie tego urządzenia polega na rejestracji promieniowania elektromagnetycznego w zakresie od 2000 do 5600 nm i zamianie tego promieniowania na modulowany sygnał elektryczny. Urządzenie to składa się z dwóch zasadniczych części: skanera i jednostki obrazującej. Skaner rejestruje promieniowanie podczerwone emitowane przez obiekt oraz zamienia je na odpowiedni sygnał elektryczny. Najważniejsze części skanera to system optyczno-mechaniczny oraz detektor podczerwieni. System optyczno-mechaniczny składa się z dwóch układów optycznych: dla promieniowania podczerwonego oraz dla promieniowania widzialnego wirującego z prędkością 16 obrotów na sekundę. W skład układu optycznego dla promieniowania podczerwonego wchodzi obiektyw krzemowo-germanowy przepuszczający promieniowanie w zakresie 2000 do 5600 nm oraz układ pryzmatów i zwierciadeł kierujących to promieniowanie na detektor podczerwieni.

W detektorze /kryształ antymonku indu/ następuje zamiana promieniowania podczerwonego na równoważny sygnał elektryczny. Sygnał ten jest wstępnie wzmacniany w skanerze, a następnie przesyłany do jednostki obrazującej. Jednostka obrazująca zamienia przysłany ze skanera sygnał elektryczny na sygnał widzialny na ekranie lampy oscyloskopowej monitora. Możliwe są dwa sposoby przedstawienia obrazu na ekranie monitora; jeden z nich daje obraz w postaci linii o modulowanej jasności, drugi zaś w postaci wykresu o modulowanej amplitudzie. W tym przypadku wykorzystuje się tylko obraz przedstawiony w postaci linii o modulowanej jasności. Obraz ten jest fotografowany kamerą szczelinową /Vaisala/ na filmie przesuwającym się ruchem jednostajnym. Dzięki temu możliwe jest otrzymanie obrazu termalnego w postaci wstęgi wzdłuż kierunku lotu samolotu.

Skala lotniczego obrazu termalnego zależy od przyjętego kąta wybierania oraz od wysokości i prędkości lotu. Z uwagi na sposób zapisu obrazu termalnego w kamerze Vaisala, rozróżnia się pojęcie skali obrazu w kierunku poprzecznym i podłużnym do kierunku lotu samolotu. Skala w kierunku poprzecznym zależy od wielkości kąta wybierania i wysokości lotu. Mianownik skali w kierunku poprzecznym lotniczego obrazu termalnego można wyrazić wzorem:

$$M = 100 W \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} ,$$

gdzie:  $W$  - wysokość lotu w metrach,

$\alpha$  - kąt wybierania.

Skala w kierunku podłużnym zależy od wysokości i prędkości lotu oraz od prędkości przesuwania się filmu w kamerze Vaisala. Prędkość przesuwania się filmu w kamerze Vaisala jest stała, a jej wielkość jest tak dobrana, że jeżeli zachowana będzie zależność

$$W = 2,8 V ,$$

gdzie:  $V$  - prędkość lotu w km/h,

jest skalą obrazu termalnego w kierunku podłużnym i będzie odpowiadała skali w kierunku poprzecznym. Należy podkreślić, że podane zależności mają jedynie orientacyjny charakter. Lotniczy obraz termalny tworzony jest w sposób ciągły, w trakcie wciąż zmieniających się wielkości elementów orientacji zewnętrznej skanera. Powoduje to gromadze-

nie się zniekształceń obrazu, których suma może w istotny sposób wpłynąć na rodzaj odwzorowania i skalę obrazu.

Szerokość analizowanego pasa terenu określa zależność:

$$D = 2 W \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} .$$

Największa możliwa szerokość pasa /  $\alpha = 80^{\circ}$  / wynosi

$$D = 1,68 W .$$

Szczególnie przydatny do wykonywania obrazów termalnych jest samolot IŁ-14 w wersji fotogrametrycznej. Użyteczny zakres prędkości lotu tego samolotu /230-300 km/h/ umożliwia wykonywanie badań z wysokości od 600 do 840 metrów. W takich warunkach lotu szerokość odwzorowywanego pasa przy największym kącie wybierania zawiera się w granicach od 1000 do 1400 metrów.

W wyniku lotu badawczego otrzymuje się negatyw termogramu na filmie o szerokości 24 mm. Z tego negatywu można wykonać kopie pozytywowe powiększone do przyjętej skali opracowania.

Przedmiotem interpretacji jest fotograficzne zdjęcie lotniczego obrazu termalnego badanego obszaru. Zdjęcie to przypomina swym wyglądem panchromatyczne zdjęcie lotnicze z tym jednak, że znaczenie tonów szarości jest zupełnie odmienne. Ton obrazu termalnego jest funkcją temperatury i emisyjności obiektu. Im obiekt jest cieplejszy, tym ton obrazu jest jaśniejszy.

Na obrazach termalnych wykonanych nocą do najcieplejszych obiektów należą zbiorniki wodne, drogi i budynki. W nocy obszary pokryte roślinnością, ze względu na większą powierzchnię wypromieniowania, są chłodniejsze od obszaru bez takiego pokrycia. Te ogólne prawidłowości nocnego rozkładu temperatury obiektów na powierzchni Ziemi pozwalają przeprowadzić analizę znaczeniową obrazu termalnego, w wyniku której mogą być wyodrębnione główne cechy topografii badanego obszaru. O miejscach występowania inwersji termicznych należy sądzić na podstawie stwierdzonych zakłóceń podanych już cech rozpoznawczych przedmiotów odwzorowanych na obrazie termalnym. Obszary zalegania masy zimnego powietrza oraz obszary zalegania mgieł odwzorują się na obrazie termalnym w tonie ciemniejszym, niż by to wynikało z tonu właściwego określönemu przedmiotowi. Przy analizie takich anomalii, których zasięg ma świadczyć o zasięgu występowania inwersji, trzeba rozważać inne czynniki mogące w sposób przypadkowy za-

kłócić prawidłowość wnioskowania. Dlatego też interpretując obraz termalny należy sięgać do materiałów pomocniczych w postaci aktualnych zdjęć lotniczych i map. Na ogół wyodrębnienie miejsc występowania inwersji i miejsc zalegania mas zimnego powietrza nie następuje wpraw-  
nemu interpretatorowi większych trudności.

Wyciągnięte wnioski muszą być jednak sprawdzone, przy czym ich weryfikacja powinna być przeprowadzona na podstawie obrazów termalnych wykonanych w innym czasie lecz również w warunkach określonych omawianą metodą.

Wynik interpretacji dany w postaci obszarów występowania inwersji zakreślonych na termogramie może być przeniesiony na mapę topograficzną. Przy przenoszeniu treści z termogramu na mapę trzeba mieć na uwadze znaczne niekiedy zniekształcenia odwzorowania obrazu termalnego wywołane zmianami ustalonego stosunku prędkości i wysokości lotu. Wylimitowanie zniekształceń odwzorowania obrazu termalnego jest trudne zwłaszcza w sensie technologicznym. Efemeryczny charakter zjawiska inwersji ma wpływ na dokładność określenia granic jego występowania. Jest ona z reguły mniejsza od graficznej dokładności map średnioskalowych, jak też od wielkości zniekształceń obrazu termalnego wykonanego z pokładu poprawnie pilotowanego samolotu. Dlatego też przenoszenie wyników interpretacji z obrazu termalnego na mapę wystarczy wykonywać metodą przybliżoną, na podstawie zidentyfikowanych szczegółów terenowych położonych w bezpośrednim sąsiedztwie granicy występowania inwersji.

Termowizyjna metoda wykrywania obszarów występowania inwersji została sprawdzona w toku badań środowiska geograficznego prowadzonych przez Instytut Geodezji i Kartografii metodami fotointerpretacji.

Klucz fotointerpretacyjny opracowano na podstawie materiału doświadczalnego uzyskanego w wyniku termalnego odwzorowania obszaru o powierzchni około 80 km<sup>2</sup>.

Od 1975 r. opisana metoda została włączona przez IGIK do zespołu metod inwentaryzowania stanu środowiska geograficznego wokół zakładów przemysłowych.

Wojciech Bychawski, Andrzej Ciołkosz

THE DETECTION OF THE AREA OF TEMPERATURE INVERSION AND  
RADIATION FOG BY MEANS OF INFRARED IMAGES

S u m m a r y

One of the most important consequences which is created by industrial activity is an air pollution. State of peculiar menace by that pollution comes out especially during a time of appearance of temperature inversion. At that time dust and gases suspended in the air are in a state of moveless nearby a surface of terrain, particularly in the area of its depression. Pollutant are carried over there by flowing air.

Temperature inversion favours creation of radiation fog. The areas of such fogs are usually characterized by a great intensity of air pollution.

Detection of fogs, localization and mapping of these areas is possible by means of thermal images forming devices installed on a board of plain or helicopter. In the article are given principles of interpretation of thermal images as well as results of research considering of looking for areas of temperature inversion and fog forming around a big plant. The authors have used a tone of infrared imagery, which is a function of temperature of an object and emissivity of its surface, as a recognition feature of areas with high concentration of water vapour.