

Fotointerpretacja zdjęć satelitarnych pod kątem rozpoznania głównych frontów atmosferycznych i cyklogenezy*

Photo-interpretation of the satellite images for recognizing atmospheric main fronts and cyclogenesis

Introduction. The satellite images as 2-dimensional imagery of 3-dimensional dynamic atmospheric states are the point of special interest of meteorologists. The analysis of cloud organisation is a precious supplement of analysis of actual atmospheric state based on the traditional synoptic material (maps and diagrams). Cloud bands, vortices, streets and clusters of various scales is be observed on the images (Fig. 1).

The application of satellite images for analysis and forecasting is based on the assumption that cloud organisation is the reflex of energetic processes. The cloud bands and vortices are firstly the tracers of atmospheric movements. The satellite images and synoptic maps analysis proves that the location and shapes of cloud bands and vortices are in good correlation with streamlines, i.e. approximately with isohypses.

Secondly, the cloud dislocation states about the dislocation and mutual exchanges of energy in atmosphere, mainly kinetic and potential, which have basic influence on the atmospheric processes development.

Synoptic photo-interpretation of satellite images has the main aims:

- recognition of organised structures and determination of the cause of their arising and existence,
- determination of the features of the structures characteristic for development of specific atmospheric processes,
- the structures evolution evaluation with a sequence of satellite images,
- mutually coupled structures correlation analysis,
- confrontation of the results of synoptic maps and satellite images analysis,
- development of combined analysis of atmospheric state.

Fronts and cyclones occupy most interest in the photo-interpretation of synoptic scale processes.

Atmospheric fronts. Polar front (main) is a narrow zone of large horizontal temperature gradients, usually in the form

of deep meanders of front cloud bands, south of cold air troughs and north of warm air ridges. On satellite images it is observed as long narrow cloud bands of various and variable level of organisation. Both the shapes, compactness and cloud structure are variable. Concentration and intensive kinetic and potential energy exchanges are responsible for the front's composed structure. Upper frontal zone and surface front can be distinguished from the structure (Fig. 2).

Great amount of kinetic energy is the upper frontal zone's feature. It is followed by strengthening upwards winds blowing along the frontal cloud band. In the uppermost part of the front zone the winds may become very intensive and dangerous for aviation jet stream, which presence is be observed in the strips of the highest cloud layer (Fig. 1 — E area). Intensive vertical vortex existing in the upper frontal zone stabilise or destabilise it. The thermally simple vortices (warmer air ascends at the southern side of the front and descends at the northern) stabilise the upper frontal zone. Such a vortices' presence appears in the structure of the cloud band which northern side is sharp and southern is irregular (Fig. 3 — A area).

Streamlines convergence and increased temperature gradient are observed in the area of frontogenesis (Fig. 2), as well as eastward cloud band contraction (part A). In the stable and well organised part of the front, what occurs in compactness of the cloud band, the streamlines and isohypses are usually close to parallel and the gradients are the largest (part B). In the zone of front disintegration the streamlines and isohypsis divergence are observed which is followed by the cloud band widening and compactness decrease (part C).

The curvature of the cloud bands includes information about the front durability. The front is stable when the cloud band is well organised and bent southward. A convex cloud band is usually widened what suggests the possibility of prompt disintegration.

* Pracę wykonano w ramach grantu KBN Nr 2 Z6Z6 012 03p15.

Among the variety of forms of the polar front the evolution ones may be distinguished: basic, wavy, baroclinic zone, vortex, fragmented, diminishing.

The basic form of polar front (Fig. 3) is a well organised cloud band stretched out along the North American coast, then over the Atlantic to the European coast, where it usually disintegrates and vanishes.

The baroclinic zone form (Fig. 5) — the cloud band surrounds in large meanders deep depressions at south side and intensive ridges at north side. The cloud systems are usually more intensive at the eastern side of the trough while at other parts they may be diminishing (area A).

The vortex form (Fig. 6) is usually a mature cyclone that evolved out of the baroclinic zone form of the polar front. Cloud helix (A) and fronts (occlusion (B), warm (C) and cold (D) may be distinguished in front's structure.

Fragmented form (Fig. 7) — polar front appears in a few separate, variously dislocated cloud bands of varied compactness (bands A, B, C). Parallel small size bands are often of similar shape and curvature.

Depressions (cyclones). The cyclones are accompanied by highly organised cloud systems — vortex and three secondary fronts: occlusion, warm and cold (Fig. 8). The analysis of satellite images proves that cyclones create most often on baroclinic zone forms of main fronts, mainly on the eastern parts of deep troughs. Mature cyclones and the processes of their creation (cyclogenesis) and diminishing (cyclolysis) are characterised by extraordinary abundance of forms and courses. American scientists distinguish two types of mature cyclones and four types of cyclogenesis.

Fig. 10 shows the cloud system of A-type mature cyclone. Thin lines — streamlines at 300 hPa level; thick lines — jet stream axis. Two levels of clouds are typical for this type:

- high level cloud layer A, most often Ci or Cs in one or more layers with sharp northern and western edges,
- lower level cloud system B with comma shape, observed only partially from under the higher clouds.

Wstęp

Zdjęcia satelitarne jako płaskie obrazy przestrzennych dynamicznych stanów atmosfery od chwili ich pojawienia się są przedmiotem zainteresowania meteorologów, w tym w szczególności synoptyków. Wysoce zorganizowane struktury chmurowe, głównie w postaci wstęg i wirów, pobudzają wyobraźnię synoptyka, inspirować nowe skojarzenia poznaniowe, a po konfrontacji z tradycyjnymi materiałami synoptycznymi w postaci map i diagramów, tworzą podstawę do wszechstronnej analizy aktualnego stanu atmosfery oraz wzbogacają metodyki prognostyczne. Należy tu wyraźnie podkreślić, że niejednokrotnie symptomy możliwości rozwoju określonego procesu atmosferycznego występują jedynie na zdjęciach satelitarnych i znacznie wyprzedzają takie symptomy na mapach synoptycznych.

Synoptycy i meteorolodzy operują takimi podstawowymi pojęciami, jak fronty, cyklony (niżej) i antycyklony

The cyclones development may be divided into characteristic periods — stadia, however, not every cyclone undergoes all of them. Figs 11–14 show first stadia of the cyclogenesis types as the most interesting and the most characteristic for the types.

Type 1. Baroclinic zone. On the eastern side of a deep trough (Fig. 11) a developed layer of Ci is observed under which a small scale vortex-like disturbances (comma) or the surface front cloud system exist. A small vortex system moving under Ci layer may initialise the development of a cyclone. It is often observed in the area of Ci clouds swirl.

Type 2. Divided flow. Two jet streams are characteristic for this type (Fig. 12). The cyclogenesis usually starts south or south-east of Ci clouds layer connected with the southern jet.

Type 3a. Cold air vortex. The cyclogenesis is initialised by a short-wave small scale disturbance (L-shaped) moving across the trough in the direction of a long Ci cloud belt and medium level clouds on the eastern side (Fig. 13).

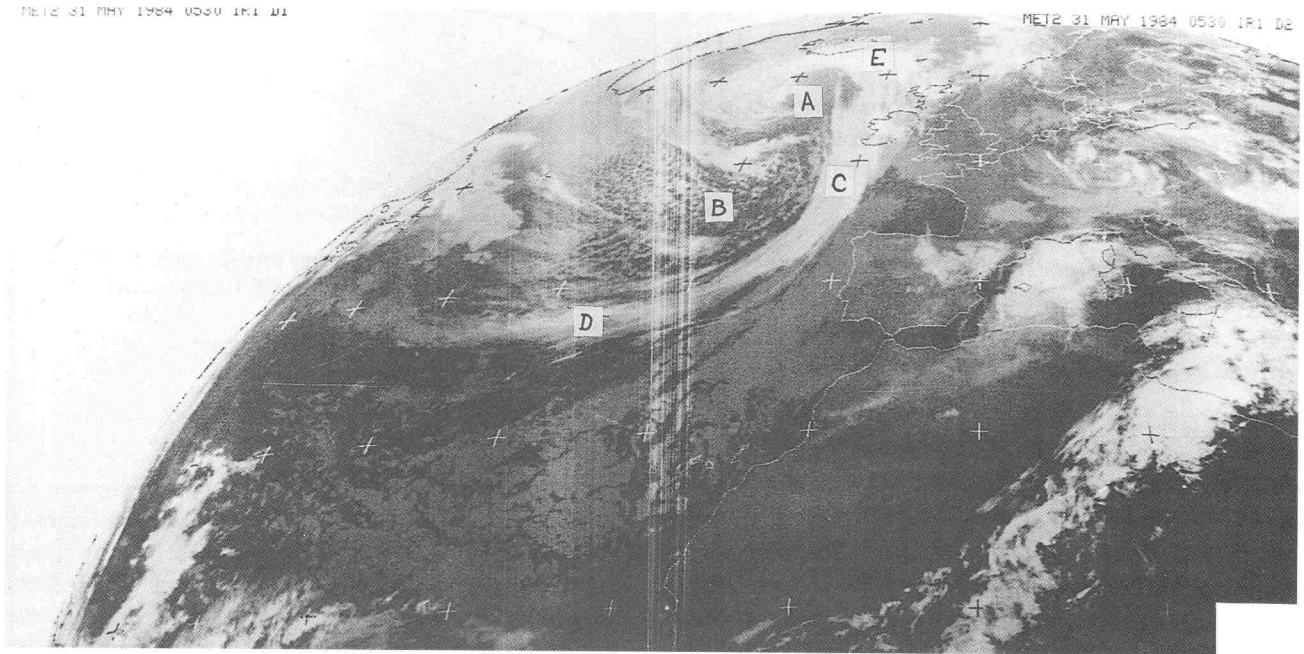
Type 3b. Induced wave. The cyclogenesis' course is similar to that one of the type 3a. The old cloud system (Fig. 14) is located closer to the trough's axis and, being influenced by the creating in the cold air mass vortex system, becomes wavy. This is the most often observed type of cyclogenesis — „front waving”.

Conclusion. The presented satellite images photo-interpretation is an element of long term study of main fronts and cyclones made in Meteorological Department of Military University of Technology. Analyses that confront cloudiness structure and organisation on satellite images with the results of classical synoptic methods are the most beneficial as far as photo-interpretation investigation of atmospheric processes is concerned. In many cases, the analysis of cloudiness organisation gives information that is hardly to be interpreted by synoptic methods. So far investigations indicate, as well, that confrontation of characteristic elements of clouds organisation with the results of theoretical study of atmospheric instabilities is fruitful.

(wyże), zatoki, kliny, prądy strumieniowe, itp. Pojęcia te są dobrze identyfikowalne na mapach synoptycznych w postaci rozkładu izolinii ciśnienia, geopotencjału, temperatury, itp. oraz ich wzajemnego usytuowania. Wprawny meteorolog analizując mapy identyfikuje występowanie ww. tworów dynamicznych. Pozwala mu to określić aktualne lub prognostyczne stany atmosfery.

Na zdjęciach satelitarnych widoczne są zorganizowane i ukształtowane obrazy zachmurzenia różnych skal przestrzennych w postaci wstęg, wirów połączonych ze wstęgami lub odosobnionych, rozległych obszarów mniej zorganizowanego zachmurzenia, itp. Wstęgi są przy tym często mocno powyginane, tworzą ciągi meandrów, które przekształcają się w wiry. Wirom zaś towarzyszą charakterystyczne struktury chmurowe w postaci zwartych, powyginanych wstęg oraz charakterystycznych grzęd chmurowych. Te podstawowe struktury chmurowe są przedstawione na ryc. 1.

Wykorzystanie obrazów zorganizowanego zachmu-



Ryc. 1. W obszarze A widoczny jest rozwinięty wir — dojrzały cyklon; w B widać wyraźne grzędy chmurowe świadczące o intensywnym napływie chłodnej masy powietrza zasilającej energetycznie wir; część C wstęgi chmurowej stanowi front chłodny; część D można traktować jako fragment frontu głównego; E wskazuje obszar prądu strumieniowego.

Fig. 1. A developed vortex is observed in area A — a mature cyclone; streets in B indicate intensive cold air flow energising the vortex; C — part of the cloud band is a cold front; D may be treated as a part of main front; E indicates the area of jet stream

rzenia w analizach stanów atmosfery i prognozach pogody opiera się na przekonaniu, że organizacje te nie są przypadkowe, lecz stanowią odzwierciedlenie przebiegu określonych procesów fizycznych lub inaczej energetycznych. Wstęgi i wiry są po pierwsze „traserami” ruchów atmosferycznych. Zatem ich położenie i kształty powinny pozostawać w dobrej relacji do rozkładu linii prądu, czyli w dobrym przybliżeniu z liniami izohips (izolinie geopotencjału $\Phi = gz$). Na podstawie analiz wielu zdjęć i map można stwierdzić, że rzeczywiście takie relacje mają miejsce.

Po drugie, organizacje zachmurzenia, a więc niejednorodne ich rozkłady świadczą o nierównomiernych rozkładach energii w atmosferze. Chodzi tu głównie o rozkłady energii kinetycznej i potencjalnej lub dokładniej — potencjalnej dostępnej, które mają zasadniczy wpływ na kształtowanie i przebiegi procesów atmosferycznych. Chodzi tu głównie o przemiany energii kinetycznej w potencjalną i odwrotnie. Energia wewnętrzna, która jest równoważna energii kinetycznej ruchu chaotycznego, stanowi głównie rezerwuár do uzupełniania dyssypowanej energii kinetycznej na skutek lepkiej turbulencji atmosferycznej.

Zadania synoptycznej interpretacji zawartości zdjęć satelitarnych są zatem następujące:

- wyodrębnić różnorodne struktury zorganizowane,
- określić przyczyny powstawania bądź istnienia konkretnej struktury zachmurzenia,
- określić cechy charakterystyczne tej struktury wskazujące na tendencję rozwoju konkretnego procesu atmosferycznego,
- ocenić kierunek ewolucji struktury na podstawie sekwencji zdjęć,

— dokonać konfrontacji wyników analizy zdjęć i map synoptycznych,

— opracować łączną, pogłębioną analizę stanu atmosfery.

Fotointerpretacja zdjęć satelitarnych może przebiegać w kilku wersjach:

— ogólna analiza struktur chmurowych widocznych na zdjęciach,

— analiza fotointerpretacyjna tylko niektórych dobrze wyrażonych organizacji zachmurzenia i ich konfrontacja z mapami,

— analiza wzajemnych relacji pomiędzy strukturami chmurowymi w postaci wzajemnie sprzężonych organizacji,

— analiza lokalnych struktur mezoskalowych (np. rejon Polski) na tle sytuacji europejskich.

W kategoriach synoptycznych fotointerpretacji podlegają stosunkowo najłatwiej dobrze ukształtowane fronty, cyklony i antycyklony oraz ich wzajemne usytuowania.

Należy wyraźnie podkreślić, że fotointerpretacja stanów atmosfery za pomocą zdjęć satelitarnych jest przedsięwzięciem bardzo złożonym i dającym często wyniki niejednoznaczne. Trudno jest z płaskiego obrazu zachmurzenia określać przestrzenne stany energetyczne atmosfery. Dokonujemy tego bowiem na podstawie skali szarości i światłocieni. Sytuację niekiedy polepsza metoda kolorów umownych, która w pewnej mierze uprzestrzenia obraz, lecz również przy zbyt zagęszczonej skali kontrastów może prowadzić do gubienia się w szczegółach. Dlatego postępy we wszechstronniejszym wykorzystaniu zdjęć do badania struktur przestrzennych są niezadowolające. Pewną nadzieję budzi możliwość upowszechnienia zdjęć stereoskopowych.

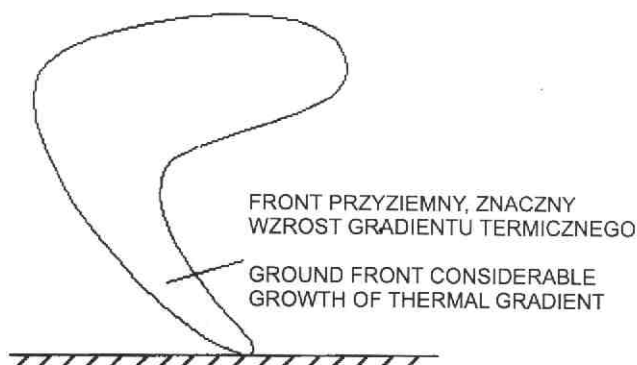
Pomimo tych trudności już dziś można stwierdzić, że obrazy satelitarne zachmurzenia stanowią nieodłączny składnik analizy aktualnego stanu pogody. Widzimy to w codziennych telewizyjnych wiadomościach o pogodzie, które rozpoczyna prezentacja najbardziej aktualnych zdjęć satelitarnych. Przedstawimy obecnie w zwięzły sposób podstawowe wyniki fotointerpretacji na zdjęciach satelitarnych głównych wielkoskalowych struktur chmurowych w postaci frontów, cyklonów i antycyklonów oraz wybranych struktur mezoskalowych.

Fronty atmosferyczne

Fotointerpretacji podlega przede wszystkim front polarny (główny), traktowany najczęściej jako struktura klimatologiczna w postaci wąskiej strefy ostrych poziomych gradientów temperatury rozciągającej się wzdłuż równoleżników 50° – 70° N. Dotyczy to również klimatologicznego frontu zwrotnikowego. Rzeczywiście, synoptyczne postacie frontów są bardzo dynamiczne i zmienne. Przeżywają one stadia rodzenia się, rozwoju i zaniku. Przybierają najczęściej postacie głębokich meandrów frontowych wstęg chmurowych, które okalają od południa zatoki chłodnego, a od północy ciepłego powietrza. Taka dynamiczna struktura pofalowanego frontu polarnego jest permanentna, gdyż za jej pośrednictwem w umiarkowanych szerokościach geograficznych odbywa się transport ciepła od równika do biegunów. W zatokach bowiem powietrze się ogrzewa, a w klinach ochładza.

Fronty główne na zdjęciach satelitarnych są identyfikowalne jako wąskie wydłużone wstęgi zachmurzenia przejawiające mniejszy lub większy stopień organizacji, podlegający ciągłej ewolucji i zmianom. Zmianom tym podlegają zarówno kształty wstęg, jak i ich zwartość oraz struktura zachmurzenia. W tym niezmiernym bogactwie form organizacji zachmurzenia w strefie frontów można wyróżnić jednak szereg prawidłowości. Są to bowiem struktury wysoce zorganizowane. Charakteryzuje je przede wszystkim znaczna koncentracja energii kinetycznej i tzw. dostępnej energii potencjalnej. Oba te rodzaje energii ulegają ciągłym intensywnym wzajemnym przemianom, co powoduje, że fronty charakteryzują się złożoną budową przestrzenną. Można w niej wyróżnić górną strefę frontową (GSF) i front przyziemny (ryc. 2).

Górna strefa frontowa jest doskonale widoczna na zdjęciach satelitarnych w postaci wspomnianych długich, dobrze zorganizowanych wstęg chmurowych. Wstęgi te mają rozwiniętą budowę pionową wyrażoną w strukturze zachmurzenia, które rozciąga się w pionie od 1–2 km aż do tropopauzy (9–11) km. Front przyziemny charakteryzuje się przede wszystkim narastającym w kierunku Ziemi gradientem temperatury. Przy przekraczaniu takiego frontu przyziemnego odczuwa się nagłą zmianę temperatury powietrza, prędkości i kierunku wiatru oraz obserwuje się opady. Dotyczy to w głównej mierze wtórnych frontów chłodnych, które związane są z rozległymi układami niżowymi.



Ryc. 2. Górna strefa frontowa (GSF)

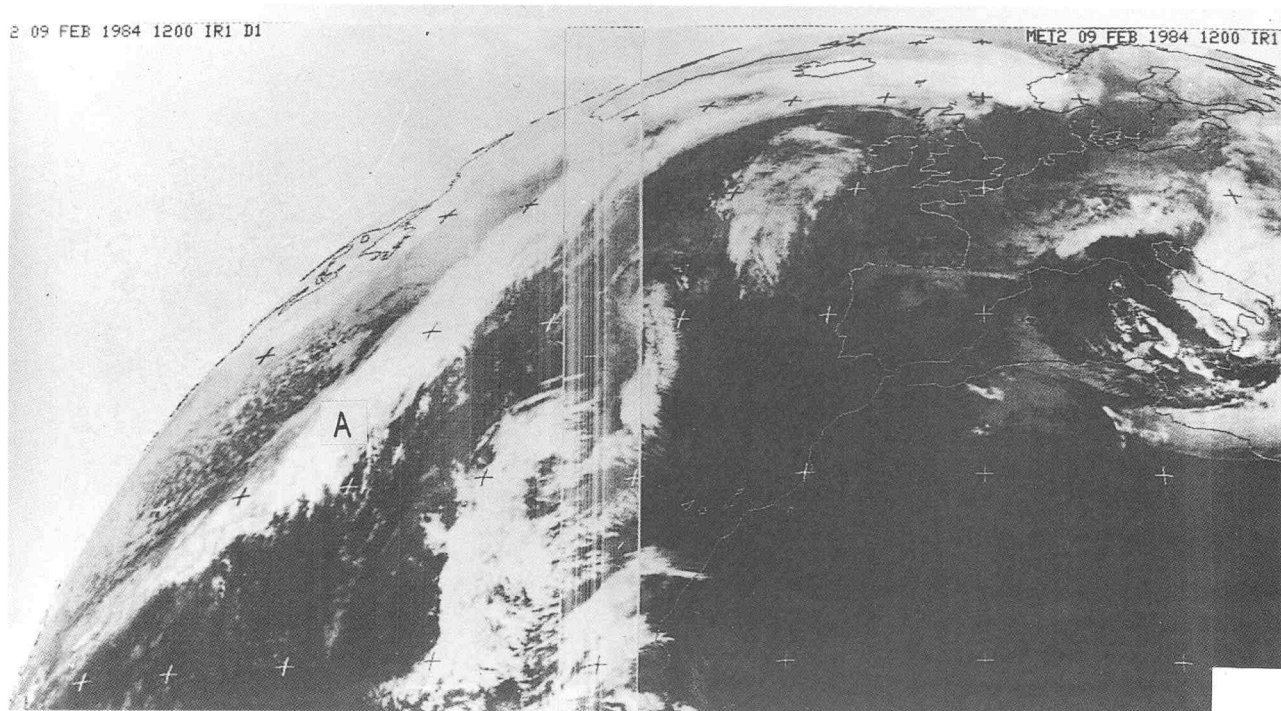
Fig. 2. The upper frontal zone

Górna strefa frontowa charakteryzuje się wysokim zasobem energii kinetycznej. Towarzyszą temu narastające z wysokością wiatry wiejące wzdłuż frontowej wstęgi zachmurzenia. W najwyższej położonej części frontu mogą one przejść w bardzo intensywny wiatr, zwany prądem strumieniowym, niebezpieczny dla wysoko latających samolotów. Obecność prądu strumieniowego przejawia się w pasmowatości najwyższej warstwy chmur (patrz ryc. 1 — obszar E). W górnej strefie frontowej, poza znacznie podwyższonym poprzecznym do frontu polarnego gradientem temperatury i silnymi wiatrami wiejącymi wzdłuż frontu, występują intensywne wiry pionowe, które stabilizują bądź powodują rozpad wąskiej osobliwej energetycznie strefy górnego frontu. Wiry te mogą być dwójako skierowane. W pierwszym przypadku, stabilizującym górną strefę frontową, ciepłe powietrze zalegające po stronie południowej frontu „wślizguje się” ku górze i opada po północnej stronie strefy frontowej. Jest to wir stabilizujący front (wir termicznie prosty). Jego obecność wyraża się w strukturze wstęgi chmurowej, która ma ostrą krawędź zachmurzenia po stronie północnej oraz nieco rozmytą i poszarpaną po stronie południowej (ryc. 3 — obszar A).

Podobne spostrzeżenia odnoszą się do frontów chłodnych stanowiących część autonomiczną rozległych niżów i oddzielających napływające z północnego zachodu chłodne masy powietrza od mas ciepłych znajdujących się po stronie południowo-wschodniej, za frontem ciepłym.

Fronty główne, tj. polarny i zwrotnikowy, widoczne na zdjęciach w postaci bardzo rozciągniętych lub pofalowanych wąskich wstęg chmurowych są tworamii bardzo zmiennymi, ulegającymi dynamicznym transformacjom oraz powstawaniu, rozwojowi i zanikowi. W obszarach, gdzie front się kształtuje obserwujemy zbieżność linii prądu i zagęszczenie izoterm (ryc. 4).

Towarzyszy temu zwężanie wstęgi chmurowej przy przemieszczaniu się w kierunku wschodnim (część A). W części frontu stabilnej i dobrze zorganizowanej, co wyraża się w zwartości wstęgi chmurowej, linii prądu i izoterm są najczęściej niemal równoległe i najbardziej zagęszczone (część B, ryc. 4). Wreszcie w strefie rozpadu frontu obserwujemy rozbieżność linii prądu i izoterm. W zachmurzeniu wyraża się to znacznym poszerzeniem

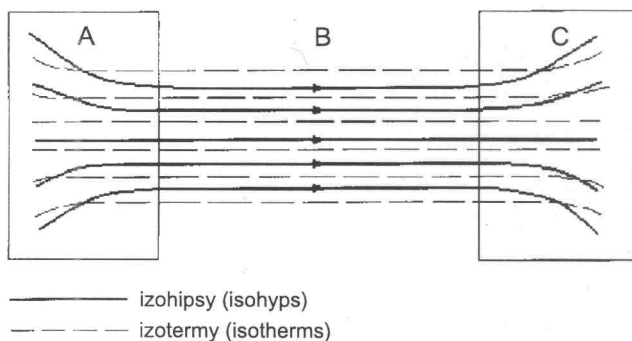


Ryc. 3.

Fig. 3.

wstęgi chmurowej i spadkiem zwartości zachmurzenia (część C, ryc. 4).

Do istotnych cech frontowych struktur zachmurzenia, które zawierają informacje o trwałości frontów należą krzywizny wstęg chmurowych. Jeżeli wstęga chmurowa jest wklęsła (patrząc w kierunku bieguna) i dobrze zorganizowana, to front wykazuje stabilność (trwałość) na tle przepływu równoleżnikowego. Jeżeli wstęga jest wygięta ku północy, czyli wypukła, to ulega ona znacznemu poszerzeniu, co świadczy o możliwości szybkiego jej rozpadu.



Ryc. 4. Przebieg linii prądu i izoterm w strefie frontu głównego

Fig. 4. The streamlines and isotherms course in the main front zone

Front polarny zwany często głównym w odróżnieniu od frontów wtórnych związanych autonomicznie z niżami, tj. chłodnych, ciepłych i okluzji, będąc strukturą bardzo dynamiczną, ulega wielu ewolucyjnym przemianom postaci. Bogactwo tych postaci jest bardzo duże i można na pierwszy rzut oka dojść do wniosku, że nie ma dwóch frontów głównych podobnych. Jednak w wyniku wielu obserwacji można dojść do wniosku o moż-

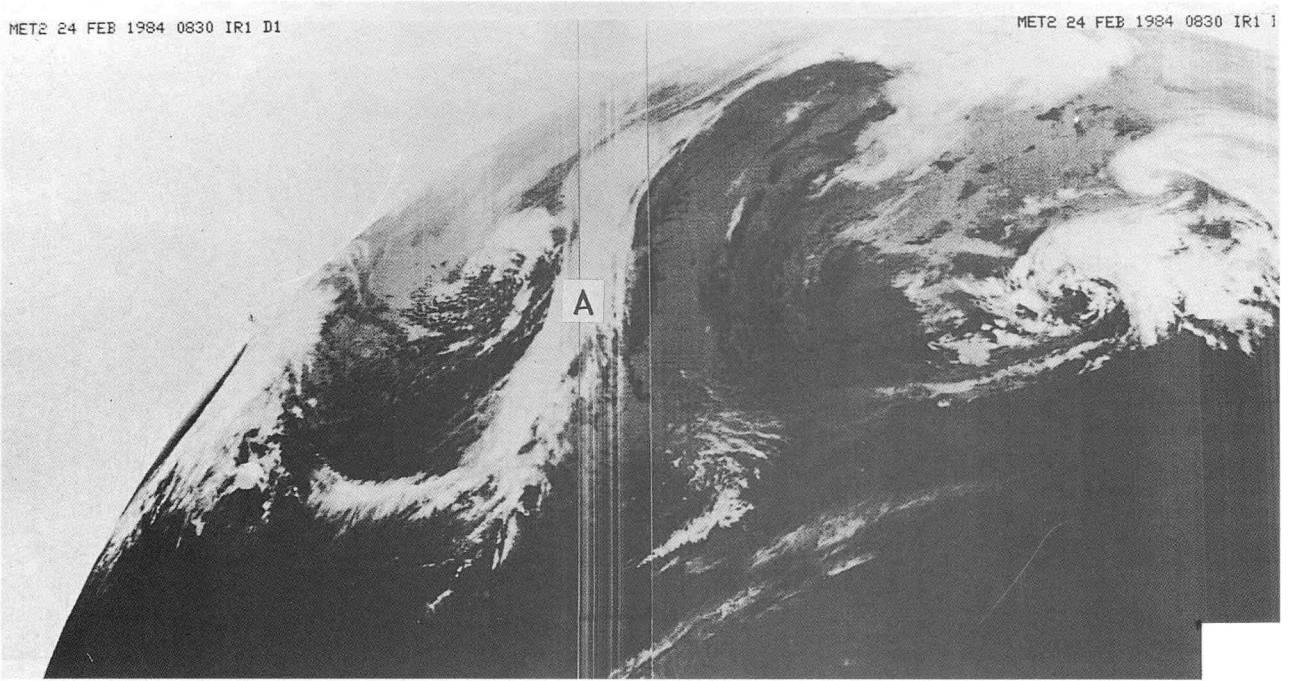
liwości wyróżnienia następujących jego postaci ewolucyjnych: podstawowej, zafalowanej, zatokowej, wirowej, sfragmentaryzowanej i rozpadowej.

Front polarny w klasycznej postaci (ryc. 3) ma charakter dobrze zorganizowanej wstęgi chmurowej, rozciągającej się wzdłuż wybrzeży Ameryki Północnej, a następnie przez Atlantyk aż do wybrzeży Europy, gdzie najczęściej ulega rozpadowi lub zanikowi. W tak zorganizowanej postaci front polarny występuje stosunkowo rzadko.

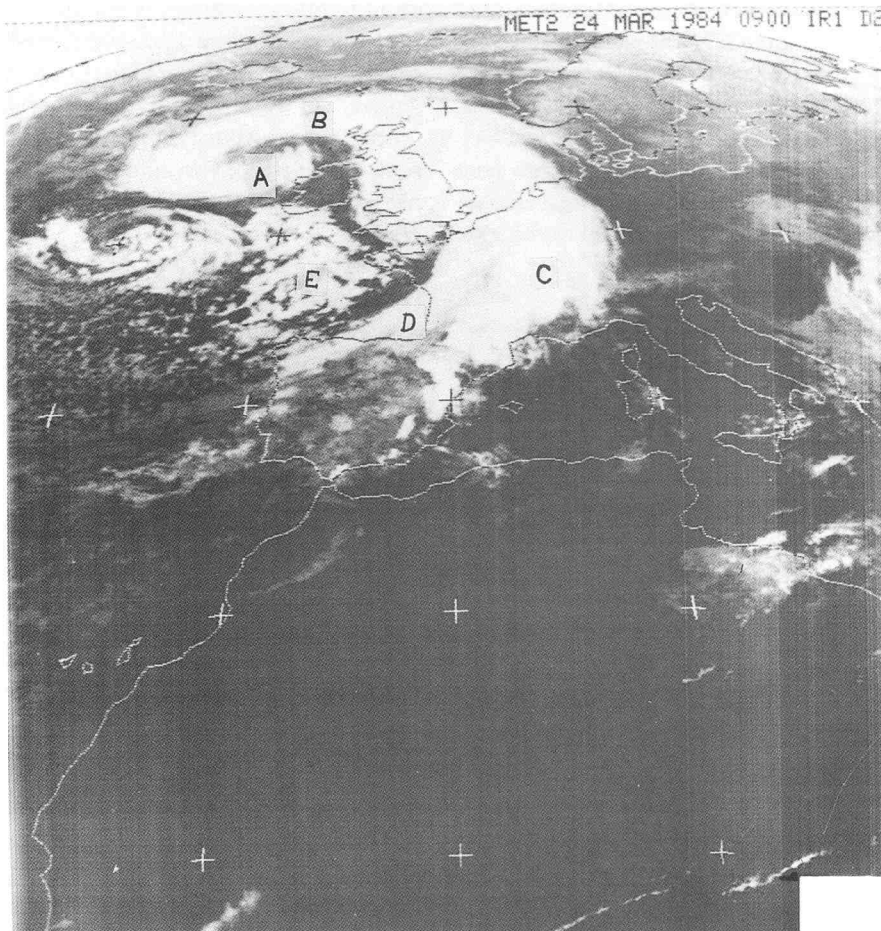
Postać zatokowa (ryc. 5) — ciągła struktura zachmurzenia zostaje w podstawowej części zachowana, jednak wstęga chmurowa doznaje znacznych meandrów. Okala ona często od południa głębokie zatoki i od północy intensywne kliny. Zachmurzenie może też ulegać na pewnych odcinkach znacznemu osłabieniu lub zanikowi. Zwykle jest ono intensywniejsze na wschodnich stronach zatok, co świadczy o znacznym poziomie baroklinowości i, co się z tym wiąże, małej stabilności oraz podatności na przebudowę (ryc. 5 — obszar A).

Postać wirowa (ryc. 6) — można w niej wyróżnić spiralę chmurową A i fronty (okluzji B, ciepły C i chłodny D). Jest ona najczęściej dojrzałym, rozwiniętym cyklonem, który powstaje wskutek ewolucji postaci zatokowej frontu.

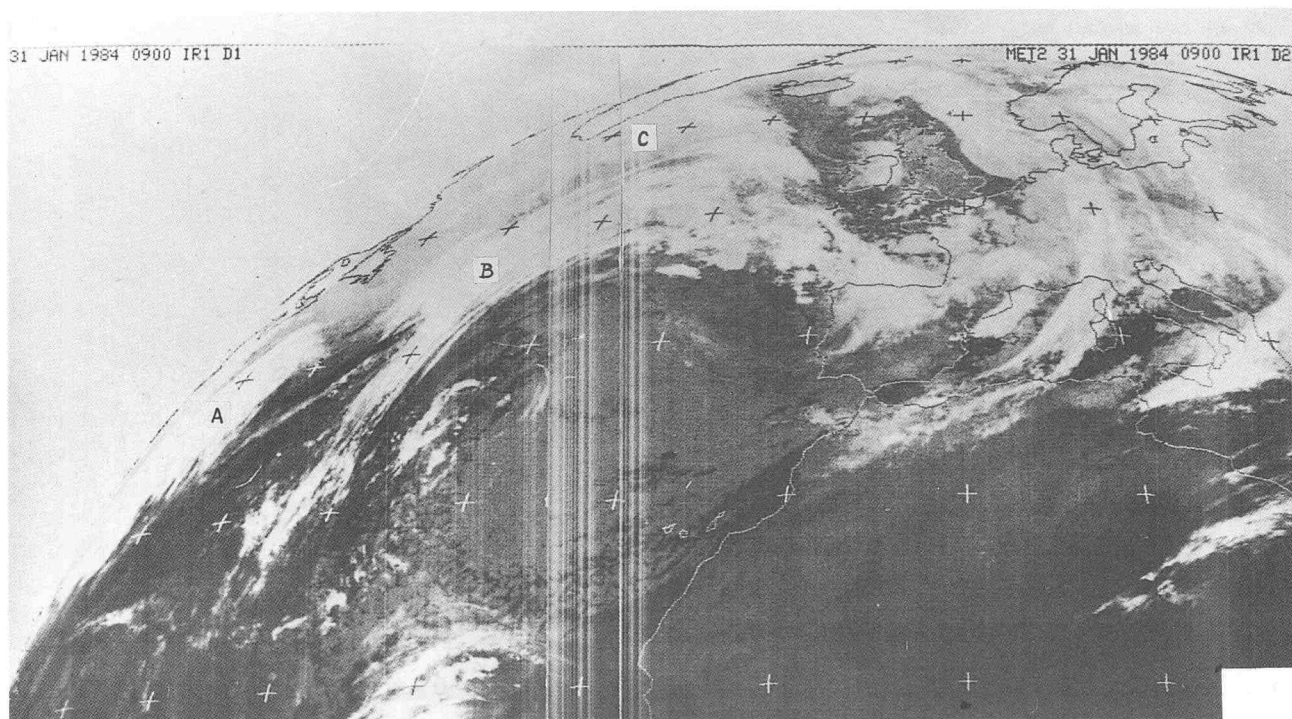
Postać sfragmentaryzowana (ryc. 7) — front nie ma formy jednej ciągłej wstęgi chmurowej, lecz kilku oddzielnych wstęg różnorodnie ułożonych względem siebie oraz o zróżnicowanej zwartości (wstęgi A, B, C). Równoległe wstęgi niewielkich rozmiarów mają bardzo często podobne kształty i krzywizny. W wielu sytuacjach wstęgi chmurowe ulegają takiemu poszerzeniu, że nie można rozstrzygnąć czy jest to wstęga deformacyjna, czy obszar zachmurzenia słabo zorganizowanego o pochodzeniu niedeformacyjnym.



Ryc. 5.
Fig. 5.



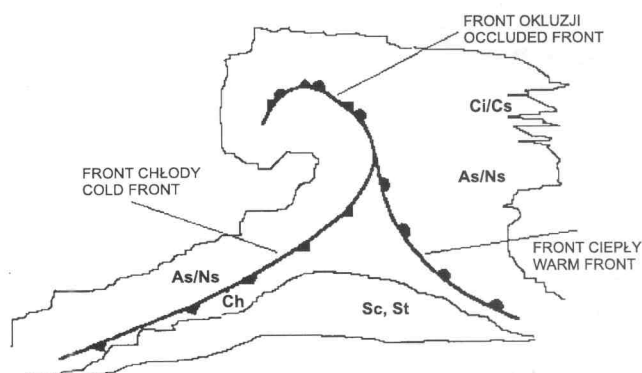
Ryc. 6.
Fig. 6.



Ryc. 7.
Fig. 7.

Niże (cyklony), ich powstawanie i zanik

Struktury atmosferyczne zwane potocznie niżami w literaturze meteorologicznej noszą nazwę cyklonów umiarkowanych szerokości (w odróżnieniu od cyklonów tropikalnych, które mają inną budowę i genezę). Niżom, zwanym dalej cyklonami, towarzyszą charakterystyczne, wysoce zorganizowane układy chmurowe. Składają się one z wiru oraz trzech frontów wtórnych: okluzji, ciepłego i chłodnego. Fronty te wraz z wirem stanowią całość strukturalną wyrażającą się w zintegrowanym układzie zachmurzenia (ryc. 8). Wir przechodzi, jak

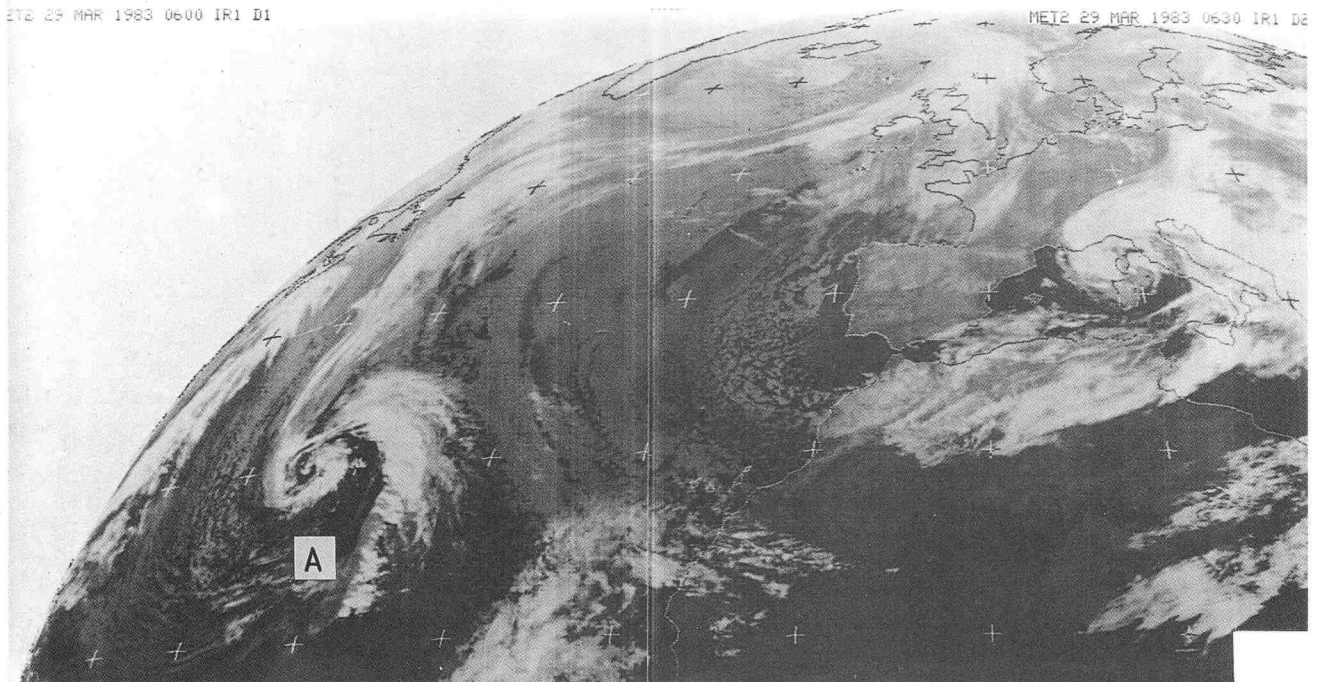


Ryc. 8. System zachmurzenia wiru i układu frontów wtórnych
Fig. 8. The cloud system of the vortex and of the secondary fronts system

widzimy, we front okluzji, od którego odgałęzają się fronty ciepły i chłodny. Fronty te poza swoją istotą (wąskie obszary rozdzielające różnie nagrzane obszary atmosfery) charakteryzują się swoistą genezą i organi-

zacja. Dotyczy to takich elementów jak: wzajemne nachylenie powierzchni izoentropowych (stała temperatura potencjalna) i powierzchni utworzonych z linii prądu, które określają zjawisko adwekcji skośnej. Adwekcji tej towarzyszą przemiany energii potencjalnej w kinetyczną, bądź odwrotnie. Rodzaj takiej przemiany zależy w znacznej mierze od rozkładu i intensywności prądów pionowych w strefie prądów ciepłego i okluzji. Tu też obserwujemy występowanie intensywnego zachmurzenia warstwowego, któremu towarzyszą najczęściej obfite opady. Front chłodny, stanowiący odgałęzione przedłużenie frontu okluzji, charakteryzuje się dywergencyjną (rozpływową) strukturą deformacyjną. Pod tym względem różni się on od frontu głównego, gdzie występuje głównie konwergencyjne pole przepływu. Dywergencyjne pole deformacji przepływu widoczne jest doskonale na zdjęciach satelitarnych (ryc. 9 — obszar A). Napływające z północy i północnego zachodu chłodne masy powietrza wyrażone w grzędach chmurowych ulegają wyraźnemu rozpływowi w pobliżu północnej strony frontu chłodnego. Część tego chłodnego powietrza o znacznym poziomie tzw. dostępnej energii potencjalnej zasila energetycznie wir chmurowy przedłużając znacznie czas jego istnienia (regeneracja cyklonów). Widać to również na ryc. 6, obszar E.

Jak wykazują liczne badania, a szczególnie analizy zdjęć satelitarnych frontów głównych, cyklony powstają najczęściej na tych frontach, a właściwie na ich postaciach zatokowych (patrz pkt. o postaciach frontów). Dotyczy to głównie wschodnich stron głębokich zatok. Tam bowiem sływ z północy mas o wysokiej wirowości cyklonalnej powoduje asymetryzację zatoki, co prowadzi



Ryc. 9.

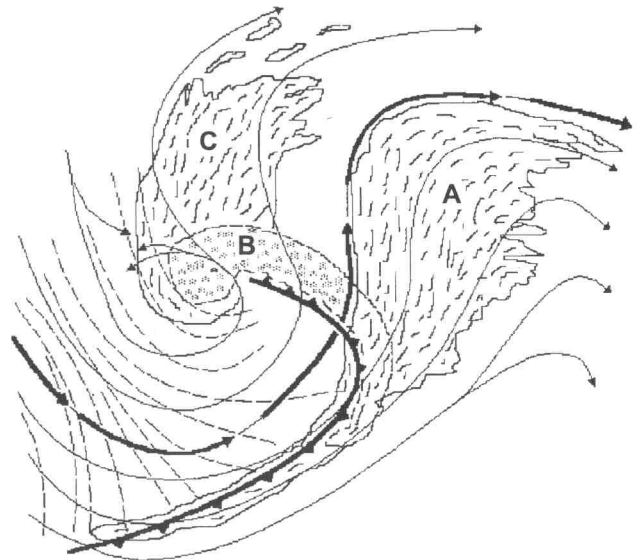
Fig. 9.

do pochylenia osi zatoki na zachód i przebudowę postaci zatokowej frontu głównego w postać wirową, czyli w dojrzały cyklon z wirami i frontami. W ten sposób nazwa „postać zatokowa” frontu polarnego staje się umowna, gdyż cyklon charakteryzuje się, jak stwierdziliśmy, złożoną strukturą autonomiczną pozostającą w odległej relacji do struktury postaci zatokowej frontu głównego. Jedynie front chłodny, pomimo dywergencyjnej postaci pola deformacji przepływu, przejawia strukturę zbliżoną do frontu głównego. Chodzi tu głównie o strukturę komórki wiru poprzecznego. Dlatego często na zdjęciach zachmurzenia frontu chłodnego łączy się z zachmurzeniem frontu głównego, tworząc jedną całość.

Należy stwierdzić na podstawie analizy bardzo wielu zdjęć i filmów animujących dynamikę atmosfery, że zarówno dojrzałe cyklony, jak i procesy ich tworzenia się (cyklogeneza) i zaniku (cykloliza) odznaczają się niezwykle bogactwem form i przebiegów. Rodzi to przekonanie o niemożliwości ich klasyfikacji. Dopiero wnikliwa obserwacja przywraca wiarę w celowość postępowania klasyfikującego. Na tej podstawie Amerykanie wyróżnili dwa typy dojrzałych cyklonów oraz 4 typy cyklogenezy.

Rycina 10 przedstawia pole zachmurzenia dojrzałego cyklonu typu A. Charakterystyczne jest w tym przypadku występowanie dwóch poziomów zachmurzenia:

- warstwy chmur piętra wysokiego, oznaczonej literą A, najczęściej *cirrus* lub *cirrostratus* w jednej lub kilku warstwach, o wyraźnie zaznaczonej północnej i zachodniej krawędzi. Struktura tego zachmurzenia pozostaje w dobrej zgodności z koncepcją stref deformacyjnych oraz położeniem prądów strumieniowych;
- układu zachmurzenia niższych pięter, oznaczonego B. Przedstawiono późniejsze, ukształtowane stadium układu wirowego typu *comma shape*, często wi-



Ryc. 10. System zachmurzenia dojrzałego cyklonu typu A

Fig. 10. The cloud system of a mature A-type cyclone

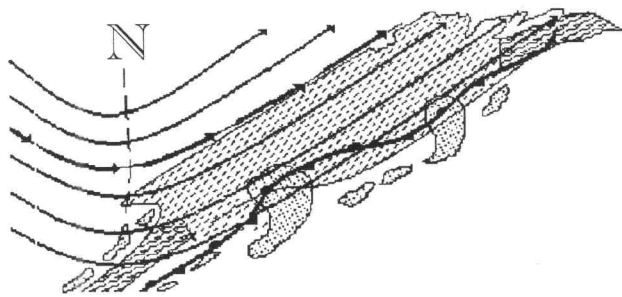
doczne tylko fragmentarycznie spod chmur wyższych warstw. Rozwijające się w tym obszarze chmury konwekcyjne mogą sięgać wierzchołkami do warstwy chmur *cirrus*.

Na ryc. 10 zaznaczono linie prądu na poziomie 300 hPa (cienkie linie) oraz położenie osi prądu strumieniowego (grube strzałki).

W rozwoju cyklonów można wyróżnić charakterystyczne etapy — stadia, jednak nie każdy cyklon przez nie wszystkie przechodzi. Na ryc. 5–8 przedstawione zostały pierwsze stadia różnych typów cyklogenezy, jako najbardziej interesujące i najbardziej reprezentatywne dla tych typów.

Typ 1. Południkowej zatoki (strefy baroklinowej)

Zatoka (ryc. 11) ma dużą rozciągłość południkową, a prąd strumieniowy ma przebieg skanalizowany, tj. równoległy do linii prądu. Na wschodniej stronie zatoki widoczna jest rozciągła górna strefa baroklinowa w po-

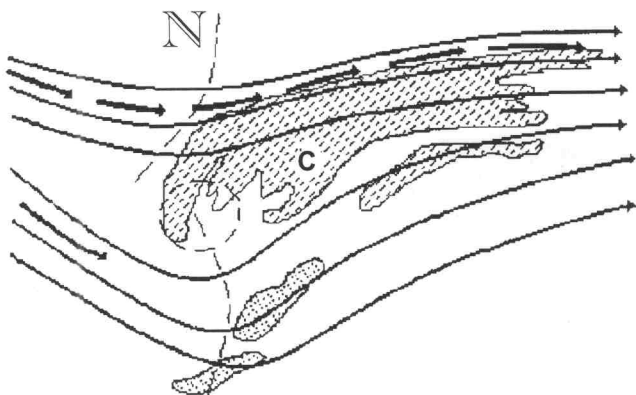


Ryc. 11. Cyklogeneza typu południkowej zatoki
Fig. 11. Baroclinic zone-type cyclogenesis

staci warstwy chmur *cirrus*, pod którą mogą występować małej skali zaburzenia wirowe (*comma*) lub warstwa zachmurzenia związanego z frontem przyziemnym. Jest to stadium poprzedzające właściwą cyklogenezę. Przebudowę pola prowadzącą do cyklonu może zainicjować niewielki układ wirowy poruszający się wzdłuż strefy baroklinowej pod warstwą chmur *cirrus*. Z tego względu określenie miejsca wystąpienia cyklogenezy jest znacznie utrudnione. Niekiedy można zaobserwować niewielki zawirowany obszar chmur *cirrus* i wtedy istnieje podstawa do lokalizacji początku cyklogenezy.

Typ 2. Rozdzielonego przepływu

Cechą charakterystyczną sytuacji wyjściowej jest wyraźne rozdzielenie przepływu (ryc. 12) — obserwuje się tu występowanie dwóch prądów strumieniowych,



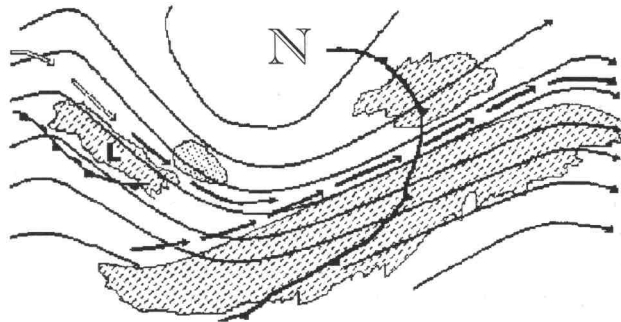
Ryc. 12. Cyklogeneza typu rozdzielonego przepływu
Fig. 12. Divided flow-type cyclogenesis

z których jeden ma wyraźną składową południową. Z tą gałęzią, jako energetycznie bardziej aktywną, łączy się zwykle rozpoczęcie cyklogenezy. W pierwszym stadium rozwoju cyklonu obserwuje się głównie cyklonalnie ugiętą warstwę chmur *cirrus* C, niekiedy również chmury

piętra średniego. Właściwa cyklogeneza rozpoczyna się zwykle na południe lub południowy wschód od warstwy chmur *cirrus*.

Typ 3a. Wiru chłodnego powietrza

Stanem wyjściowym tego typu cyklogenezy jest baroklinowa strefa zachmurzenia na wschodniej stronie zatoki (ryc. 13). Występuje ona w postaci długiej, odpowiednio ukształtowanej przez prąd strumieniowy wstęgi

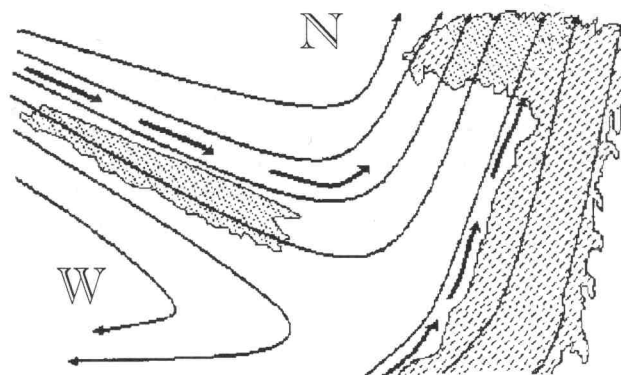


Ryc. 13. Cyklogeneza typu wiru chłodnego powietrza
Fig. 13. Cold air vortex-type cyclogenesis

chmur *cirrus* i chmur piętra średniego. Krótkofalowe zaburzenie małej skali (w kształcie L) przesuwa się przez zatokę. Strefa zbieżności towarzysząca temu zaburzeniu jest tworzona przy udziale strefy silnych wiatrów istniejących w masie chłodnego powietrza oraz starego prądu strumieniowego kształtującego strefę baroklinową. Dla tego typu cyklogenezy charakterystyczny jest skręt nowego prądu strumieniowego w taki sposób, że w części wschodniej staje się on równoległy do starego prądu strumieniowego.

Typ 3b. Indukowanej fali

Sytuacja wyjściowa i przebieg cyklogenezy są tutaj podobne do typu 3a, jednak stara strefa baroklinowa znajduje się bliżej osi zatoki (ryc. 14). Różny jest też stan końcowy, gdzie stary i nowy układ łączą się. Ponadto układ starej strefy baroklinowej pod wpływem tworzącego się w chłodnej masie powietrza układu wirowego



Ryc. 14. Cyklogeneza typu indukowanej fali
Fig. 14. Induced wave-type cyclogenesis

doznaje wyraźnego zafalowania. Ten typ jest najczęściej spotykanym typem cyklogenezy, jest to znana cyklogeneza klasyczna zwana „cyklogenezą przez zafalowanie frontu”.

Dla obu wariantów typu 3 zaburzenie krótkofalowe istotne dla zainicjowania cyklogenezy przecina zatokę i dociera do znajdującej się na wschodniej stronie zatoki strefy baroklinowej — odmiennie jak w typie 1, gdzie zaburzenie przesuwa się wzdłuż strefy baroklinowej. W ten sposób źródło cyklogenne tworzy się w masie chłodnego powietrza i przemieszczając się w kierunku wschodnim powoduje zafalowanie strefy baroklinowej, która jest często frontem o znacznej rozciągłości.

Zakończenie

Przedstawione fotointerpretacje zdjęć satelitarnych są elementem wieloletnich badań prowadzonych w Zakładzie Meteorologii Wojskowej Akademii Technicznej w oparciu o bogate archiwum zdjęć satelitarnych z satelitów meteorologicznych orbitujących i geostacjonarnych. Dotyczą one dwóch podstawowych dynamicznych struktur atmosferycznych — frontów głównych i cyklonów umiarkowanych szerokości geograficznych (niżów). Badania fotointerpretacyjne polegają na analizach organizacji i struktury zachmurzenia, które są dobrymi wskaźnikami procesów atmosferycznych. W trakcie badań stwierdzono, że szczególnie owocne są analizy, w których dokonuje się konfrontacji organizacji zachmurzenia na zdjęciach satelitarnych z wnioskami płynącymi z klasycznych metodyk synoptycznych. Zauważono również, że w wielu przypadkach analiza organizacji zachmurzenia dostarcza informacji, które są trudno interpretowalne metodami synoptycznymi. Dotyczy to m.in. takich sytuacji, gdy rozwój procesu atmosferycznego widoczny jest na zdjęciach, a nie występuje w innych danych synoptycznych. Dotychczasowe badania

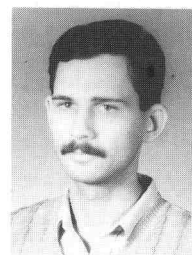
wskazują również, że owocne są konfrontacje charakterystycznych elementów organizacji zachmurzenia z wynikami teoretycznych badań niestabilności atmosferycznych.

Literatura

- Arakawa A., Schubert W. H., 1974: Interaction of a Cumulus Cloud Ensemble with the Large-Scale Environments. Part I, *J. Atmos. Sci.* 31, 674–701.
- Barret E. C., 1974: *Climatology from Satellites*. Methuen Co Ltd., London.
- Johnson R. H., 1977: The Role of Convective-Scale Precipitation Downdrafts in Cumulus and Synoptic-Scale Interactions. *J. Atmos. Sci.* 34, 359–366.
- Jasiński J. M., 1991: *Badanie wybranych rodzajów niestabilności atmosferycznych w oparciu o standardowe dane cyfrowe i teledetekcyjne*. Rozprawa doktorska, WAT, Warszawa.
- Jasiński J. M., 1986: *Wykorzystanie zdjęć satelitarnych do badania dynamiki frontu polarnego i cyklogenezy*. WAT, Warszawa.
- Rymarz Cz., 1988: Fronts and Cyclons Evolutions on Photographs from Meteosat Satellite and Their Interpretation as Unstable Processes. *Application of Satellite Data in Modeling and Forecasting Atmospheric Phenomena*. Praha, 320–326.
- Rymarz Cz., 1989: Wybrane problemy badań dynamiki atmosfery z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych. *Przegląd Geofizyczny*, 1, 3–12.
- Rymarz Cz. i inni, 1985: *Dynamika atmosfery na zdjęciach satelitarnych. (Analizy i ich wykorzystanie w praktyce synoptycznej)*. WAT, Warszawa.
- Rymarz Cz., Jasiński J. M., 1995: Wykorzystanie zdjęć satelitarnych do prognozowania stanów atmosfery w warunkach ograniczonego dopływu informacji meteorologicznej. *Biul. Meteo.*, nr 10, WLOP, Warszawa.
- Weldon R. B., 1987: *Basic Cloud System as Viewed by the Infrared Satellite Data*. NESS, NOAA, Washington–Maryland.
- Weldon R. B., 1975: *Cloud Patterns and the Upper Air Wind Fields*. NESS, NOAA, Washington–Maryland.
- Weldon R. B., 1975: *The Structure and Evolution of Winter Storm as Viewed by the Infrared Satellite Data*. NESS, NOAA, Washington–Maryland.



Prof. dr hab. inż. Czesław Rymarz, urodzony 26 XI 1930 r., ukończył Wojskową Akademię Techniczną w roku 1958. Ukończył również studia: na Wydziale Filozofii Uniwersytetu Warszawskiego w roku 1965 oraz na wydziale Matematyczno-Fizycznym Uniwersytetu Warszawskiego w roku 1966. Stopień naukowy doktora uzyskał w roku 1967, a tytuł profesora w roku 1982. Pracuje w Wojskowej Akademii Technicznej w Zakładzie Meteorologii.



Dr inż. Janusz Jasiński, urodzony 7 XII 1962 r., ukończył Wojskową Akademię Techniczną w roku 1986. Tytuł naukowy doktora uzyskał w roku 1991. Pracuje w Wojskowej Akademii Technicznej w Zakładzie Meteorologii.