

Wiatr – ruch powietrza

Jan Wacław PARFINIEWICZ



RYСУNKI DO ARTYKUŁU ZNAJDUJĄ SIĘ NA OKŁADCE.

Rysunek 1 prezentuje echo radaru z wysokości 2000 m n.p.m. i poziome linie prądu odtworzonego pola wiatru w ruchu względnym (tzn. po odjęciu prędkości średniej) na tym poziomie. W centrum obszaru znajduje się radar z Legionowa, oś odciętych biegnie z zachodu na wschód, a oś rzędnych z południa na północ.

Na rysunku 2 pokazany jest przekrój wiru z rozkładem temperatury i z liniami ruchu względnego. Oś pionowa skierowana jest od poziomu morza ku górze, rysunek obejmuje zakres od 500 m do 10 km. Oś pozioma przechodzi przez Legionowo i skierowana jest z zachodu na wschód, zakres poziomy przekroju 400 km. Wysokie wartości temperatury w przedniej części wiru wskazują na stratosferyczne pochodzenie mas powietrza, ogrzanych przy adiabatycznym sprężeniu w ruchu zstępującym. W tylnej (zachodniej) części wiru widać wyraźną ścianę chłodnego powietrza pochodzenia arktycznego wlewającego się od północnego-zachodu nad Polskę. Na wysokości około 8,5 km zalega powierzchnia tropopauzy oddzielającej stratosferę (powyżej) od troposfery (poniżej), gdzie dominuje huraganowy cyklon. Na powierzchni tej wiatr wieje najsilniej, dochodząc do 50 m/s. Ruch osiadający dominuje obraz. W pobliżu centrum niżu, gdzie następuje zakrzywienie tropopauzy i załamanie głównego nurtu ruchu powietrza, względny ruch w dół jest szczególnie silny. Warto nadmienić, że w tym czasie, to jest około godziny 12 czasu uniwersalnego, gdy „oko” cyklonu przemieszczało się w rejonie Legionowa, niebo nad Warszawą przez krótki okres stało się prawie bezchmurne.

1. O ruchu gazu idealnego, za jaki przyjmuje się powietrze, traktuje mechanika ośrodka ciągłego (meteorologia dynamiczna). Układ równań powstaje ze zbilansowania pędu i masy:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0,$$

gdzie ρ – gęstość, \vec{v} – wektor prędkości, p – ciśnienie, \vec{g} – natężenie pola grawitacyjnego. W odróżnieniu np. od wody powietrze jest ściśliwe, a jego gęstość zależy istotnie od wysokości, przy czym ciśnienie nie jest jednoznacznie określone przez gęstość. Niezbędne zatem staje się wprowadzenie temperatury, która wiąże, poprzez równanie stanu gazu, ciśnienie i gęstość. Zamknięcie systemu wymaga wówczas zbilansowania energii na gruncie pierwszej zasady termodynamiki. Gdyby nie zmienna gęstość, pole prędkości powietrza dawałoby się zanalizować za pomocą twierdzenia Bernoulliego (całki pierwszej układu) wiążącego energię kinetyczną i potencjalną ρgh z polem ciśnienia.

Można wykazać (np. [1]), że o ile znana jest zależność średnich wartości ciśnienia i gęstości od wysokości, to fluktuacje ciśnienia, gęstości i temperatury wyrażają się przez pole prędkości, czyli rozkład wiatru.

Proste wyjaśnienie ruchu powietrza mogłoby być następujące. W dowolnym momencie dane jest pole prędkości i średnie wartości ciśnienia oraz gęstości. Ruch powietrza powoduje lokalnie w różnych miejscach przyrost lub ubytek masy. Gęstość powietrza, zależna w sposób znaczący od wysokości, zmienia się nieznacznie w poziomie. Ciśnienie w danym miejscu zależne jest od rozkładu gęstości nad tym miejscem. Powoduje to, że te nieznaczne zmiany gęstości prowadzą do istotnych zmian ciśnienia w kierunkach poziomych. Powstają wymuszenia przyspieszające lub opóźniające ruch powietrza. Jednocześnie zmianie ulegają wartości średnie ciśnienia i gęstości. Powstaje nowy obraz ruchu i cykl się powtarza.

W rozumowaniu powyższym celowo pominięto efekty związane z lepkością i efekty wypornościowe oraz efekt rotacji układu odniesienia (siła Coriolisa), uwypuklając powiązanie ruchu z rozkładem ciśnienia jako mechanizm dominujący.

2. Związek rozkładu energii potencjalnej z rozkładem ciśnienia jest przez meteorologów wykorzystywany od chwili rozpoczęcia regularnych sondowań atmosfery i analizy tzw. map górnych w troposferze. Zależność ciśnienia od wysokości określa składowa pionowa bilansu wektora pędu

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g,$$

gdzie g – przyspieszenie ziemskie. To równanie zwane jest równaniem hydrostatyki i po scałkowaniu względem z daje podstawową formułę barometryczną służącą do wyznaczania stopnia barometrycznego (zmiany wysokości w zależności od zmian ciśnienia [m/hPa]) i do konstrukcji altimetrów.

Podstawowe trudności z interpretacją danych pomiarowych w meteorologii związane były z dwoma faktami: 1) sondy meteorologiczne (do czasu zastosowania techniki radarowej do pomiaru wysokości) reagowały bezpośrednio na ciśnienie, a nie na wysokość, 2) brakuje pomiaru pionowej składowej prędkości (mierzony jest tylko wiatr poziomy).

Jak wspomniano, ten stan rzeczy ulega stopniowo zmianie przez wprowadzanie techniki radarowej. Do pomiaru wysokości sondy używa się popularnych radarów radiolokacyjnych, natomiast pionowe prędkości ruchu powietrza można wyznaczać za pomocą kosztownych systemów radarów dopplerowskich.

Silna zależność ciśnienia od pionowego rozkładu gęstości pozwala na zamianę współrzędnej z na ciśnienie p . Do tej pory obliczenia meteorologiczne prowadzi

Rysunek 3 ilustruje pionowy przekrój pola ciśnienia ahydrostatycznego w ruchu względnym – pośredni obraz rotującej struktury. Ułożenie osi jak na rysunku 2. W środku obszaru dominują ujemne wartości ciśnienia, a ich przestrzenny rozkład do złudzenia przypomina formy spotykane w trąbach powietrznych (por. film dokumentalny „Fenomeny Pogody: Tornada”, prezentowany na kanale TV „Discovery”). I chociaż skala przestrzenna i czasowa są w obu przypadkach różne, to domniemywać należy, że natura (tj. dynamika) obu procesów jest podobna.

Prezentowane rysunki powstały w trakcie realizacji grantu finansowanego przez KBN.



Jan.Parfiniewicz@imgw.pl Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa

Literatura

- [1] Gal-Chen, T., 1978: *A method for the initialisation of the anelastic equations: Implications for matching models with observations*. Mon. Wea. Rev., 106, 587-606.
- [2] E. Dziekańska, 1998, *Prognozy Meteorologiczne*, CHIP, Magazyn Komputerowy, maj 5/98, 52-59.
- [3] J. Parfiniewicz, 1997, *Asymilacja danych pomiarowych z radaru dopplerowskiego do meteorologicznej analizy i prognozy mezoskalowej*, Sprawozdanie merytoryczne KBN, Projekt badawczy 4/S401 017 07, KBN, Biblioteka IMGW.

się w układzie współrzędnych, w którym pionowa współrzędna geometryczna zamieniona jest na ciśnieniową lub na pewną kombinację współrzędnej geometrycznej i ciśnieniowej. Współrzędna ta z reguły zależna jest od czasu.

Założenie hydrostatyczności wykorzystywane jest aktualnie we wszystkich operacyjnych modelach numerycznych stosowanych do prognozowania pogody. Modele hydrostatyczne zastąpiły w latach 70. mniej dokładne modele bezźródłowe ($\text{div } \vec{v} = 0$), zwane quasi-solenoidalnymi lub quasi-geostroficznymi, gdzie poziomy wiatr wyznaczany był bezpośrednio przez gradient ciśnienia. Tym samym „dozwolono” w nowej generacji modeli na zaburzenia związane z rozbieżnością i zbieżnością linii prądów powietrza. Ze względu na związek dywergencji prędkości z rozkładem masy powietrza w polu siły ciężkości zaburzenia te nazywa się grawitacyjnymi.

Prognoza pogody, oparta na całkowaniu względem czasu układu równań różniczkowych, realizowana jest zatem w złożonym (krzywoliniowym i nieortonormalnym) i zmiennym w czasie układzie współrzędnych w następującym schemacie. W chwili początkowej z pomiarów uzyskuje się pola poziomych składowych prędkości wiatru, temperatury i ciśnienia. Z równania bilansu masy oblicza się prędkość pionową (przy założeniu lokalnej nieściśliwości). Znając trójwymiarowe pole ruchu, można rozwiązać zagadnienia prognozy temperatury i poziomych składowych prędkości wiatru przy odpowiednio dobranym kroku całkowania numerycznego względem czasu. Wyliczony rozkład temperatury pozwala z równania hydrostatyki wyliczyć ciśnienie. Rozkład ciśnienia definiuje współrzędną pionową i cykl całkowania względem czasu powtarza się.

Numeryczne prognozowanie pogody wyparło tradycyjne, subiektywne (synoptyczne) procedury. Pomimo braku dowodu istnienia rozwiązania skomplikowanego układu równań opisujących ruch powietrza (podstawowy szkielet prognoz pogody), na systemy prognostyczne niektóre kraje przeznaczają olbrzymie środki i angażują znaczny potencjał intelektualny. Zauroczenie prognozami meteorologicznymi wynika z faktu, że: 1) są one potrzebne, 2) są ciekawe i skomplikowane, 3) sprawdzają się w znacznej mierze i 4) zaspokajają zapotrzebowanie uczonych na sukces praktyczny. Następna generacja modeli jest gotowa i intensywnie testowana. Są to modele ahydrostatyczne. Więcej informacji o numerycznym prognozowaniu pogody i sprawdzalności prognoz – patrz [2].

3. Efekty ahydrostatyczne manifestują się w gwałtownie przebiegających procesach pogodowych związanych z cyklonami tropikalnymi, huraganami, tornadami i pospolitymi burzami. W tych obszarach fluktuacje ciśnienia, gęstości (i temperatury) wyrażają się poprzez pole prędkości, czyli rozkład wiatru.

Zostało to potwierdzone przez autora [3] na przykładzie przypadku wichury z dnia 28.03.97. Wówczas to intensywny wir atmosferyczny (gwałtownie rozwinięty cyklon) został uchwycony przez radar meteorologiczny w Legionowie, mieszcząc się o godzinie 12 GMT prawie idealnie w polu widzenia radaru, to jest w obszarze 400×400 km. Przemieszczenie echa radaru pozwoliło na dokładną analizę pola wiatru. W rezultacie trójwymiarowe pola ciśnienia, temperatury i wiatru zostały odtworzone na siatce o kroku poziomym 4 km i pionowym 100 m. Interpretacja wizualna tych pól pozwoliła wykryć pewne, wydaje się, interesujące osobliwości i w ogólności potwierdziła uznany powszechnie pogląd o wpływie stratosfery na proces gwałtownego tworzenia cyklonów.

Na narzędzia numeryczne, pozwalające analizować (asymilować) duże ilości danych, składają się programy interpolacyjne, oprogramowanie zagadnienia wariacyjnego tzw. metodą sprzężonych gradientów oraz oprogramowanie odtworzenia fluktuacji ciśnienia i gęstości. Ważnym elementem procedury asymilacyjnej jest algorytm obliczania pionowej składowej ruchu w naturalnym, kartezyjskim układzie współrzędnych z dowolnie skomplikowaną geometrią rzeźby terenu.