

NUMERYCZNE PROGNOZY POGODY

Prognozowanie pogody wymaga znajomości praw rządzących ruchem atmosfery. Obok mechaniki płynów trzeba uwzględnić ruch obrotowy naszej planety, zróżnicowane nagrzewanie jej powierzchni wskutek pochłaniania promieniowania słonecznego, a także procesy parowania wody i kondensacji pary wodnej.

dr hab. inż. Lech Łobocki

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, Politechnika Warszawska

Układ równań dynamiki atmosfery tworzą równania zachowania masy, pędu i energii, zapisane w układzie odniesienia związanym z powierzchnią obracającej się planety, wraz z termodynamicznym równaniem stanu. Ogólne rozwiązanie analityczne tego układu nie jest znane, dlatego prognozy meteorologiczne wykonuje się poprzez *przybliżone* rozwiązanie *przybliżonego* układu równań metodami

numerycznymi. Konstrukcja takich przybliżeń winna uwzględniać dwa pozornie sprzeczne ze sobą postulaty: po pierwsze, winna prawidłowo odzwierciedlać zachowanie się atmosfery w stanach bliskich warunkom równowagi hydrostatycznej i geostroficznej. Po drugie, winna w możliwie dokładny sposób opisywać odchylenia od stanów równowagi – ponieważ to właśnie owe odchylenia decydują o tendencjach zmian sytuacji na przestrzeni kilku dni.

Historia

Na początku XX w. norweski fizyk i meteorolog Wilhelm Bjerknes sformułował dwuetapowy algorytm prognozy meteorologicznej. Wyznaczane w pierwszym kroku pola ciśnienia, gęstości, temperatury, wilgotności i prędkości stanowiły warunek początkowy



Stany atmosfery w warunkach równowagi hydrostatycznej i geostroficznej

Przepływy atmosferyczne napędzane są tzw. siłami gradientu ciśnienia, wynikającymi z różnic ciśnienia powstającymi wskutek nierównomiernego nagrzewania. Bilans sił działających w atmosferze w płaszczyźnie poziomej obejmuje ponadto siły związane z turbulencyjnym transportem pędu (siły tarcia) oraz siły bezwładności – siłę Coriolisa, związaną z ruchem obrotowym Ziemi, siłę odśrodkową powstającą w ruchach wirowych oraz siłę związaną z powstawaniem przyspieszeń lokalnych.

O strukturze ruchu ustalonego w atmosferze swobodnej – poza warstwą graniczną, w której obecne są siły tarcia – decyduje stosunek wartości sił bezwładności, tj. siły odśrodkowej do siły Coriolisa, nazywany liczbą Rossby'ego (Ro). W układach niżowych typowe wartości liczby Rossby'ego mieszczą się w przedziale $0,1-1$, co oznacza, że dominującą rolę odgrywa siła Coriolisa. W przypadku tornad wartości liczby Rossby'ego są duże, rzędu tysiąca, a ruch ma charakter cyklostroficzny (poziomy gradient ciśnienia i siła odśrodkowa są w równowadze). W szczególnym przypadku $Ro = 0$ mamy do czynienia z tzw. ruchem geostroficznym, w którym siła Coriolisa równoważy siłę poziomego gradientu ciśnienia, a ruch odbywa się równoległe do prostoliniowych izobar, prostopadle do kierunku siły gradientu ciśnienia. Istotną konsekwencją działania siły Coriolisa jest ograniczenie poziomego zasięgu ruchów w atmosferze Ziemi, które kształtuje wielokomórkowy układ globalnej cyrkulacji atmosfery. Największe siły działające w pionie – siła ciężenia i siła pionowego gradientu ciśnienia – o kilka rzędów wielkości przewyższają siły działające w poziomie. Siły te równoważą się niemal dokładnie (stan ten określamy mianem równowagi hydrostatycznej) i jedynie w małych skalach przestrzennych obserwuje się istotniejsze różnice ich wartości, które skutkują powstawaniem przyspieszeń pionowych. Można powiedzieć, że obserwowany w dostatecznie dużej skali przestrzennej stan atmosfery nie odbiega znacznie od równowagi hydrostatycznej i geostroficznej.

Ponad silniej nagrzanymi obszarami powietrze rozszerza się, przez co zawierająca określoną masę powietrza kolumna o jednostkowym polu przekroju poziomego zwiększa swoją wysokość. Ujawnia się jako uniesienie i nachylenie powierzchni izobarycznych nad nagrzanym obszarem. To zaś oznacza powstanie poziomego gradientu ciśnienia, który powoduje odpływ masy z nad nagrzanego obszaru i obniżenie ciśnienia w jego centrum. Jednocześnie działanie siły Coriolisa odchyła toru ruchu, doprowadzając do ukształtowania się ruchu wirowego wokół centrum niżu. Jest to podstawowy mechanizm powodujący powstawanie ruchów atmosfery o dużej skali przestrzennej.

Istotnym komponentem dynamiki atmosfery są ruchy falowe. Odpływ masy z jednego obszaru wiąże się z jej gromadzeniem w innym. Łańcuch takich zdarzeń możemy postrzegać jako np. falowanie powierzchni izobarycznej wokół położenia równowagi. Z punktu widzenia ewolucji układów barycznych w umiarkowanych szerokościach geograficznych najważniejszym rodzajem ruchów falowych są fale Rossby'ego, których mechanizm wiąże się z zachowaniem momentu pędu w ruchach związanych ze zmianami szerokości geograficznej. Przewidywanie rozwoju i przemieszczania się fal Rossby'ego należy do podstawowych warunków trafności prognoz meteorologicznych.

potrzebny do scałkowania układu równań dynamiki atmosfery w kroku drugim – prognostycznym. Z braku analitycznej lub numerycznej metody rozwiązania Bjerknes skupił się na metodach graficznych.

Pierwszą próbę realizacji prognozy metodą obliczeniową podjął angielski matematyk Lewis Fry Richardson, który przedstawił pełną koncepcję algorytmu prognozy meteorologicznej z wykorzystaniem równań podanych przez Bjerknesa oraz metod numerycznych. Kulminacyjnym punktem pracy Richardsona była próba prognozy pogody nad obszarem Niemiec na podstawie danych aerologicznych zgromadzonych w międzynarodowym dniu baloniarstwa 20 maja 1910 r. Próba ta zakończyła się spektakularną porażką – po wykonaniu jednego kroku całkowania o długości 6 godzin obliczone zmiany ciśnienia o dwa rzędy wielkości przekroczyły obserwowane wartości.


**dr hab. inż.
Lech Łobocki**

Profesor Politechniki Warszawskiej, zajmuje się numerycznym modelowaniem dynamiki atmosfery, specjalizuje się w zagadnieniach turbulencji w granicznej warstwie atmosfery.

lech.lobocki@pw.edu.pl

Richardson trafnie zidentyfikował główną przyczynę problemu – duże błędy pomiaru prędkości wiatru. Niezależnie od błędów pomiarowych prognoza była jednak również skazana na niepowodzenie z powodu zbyt długiego kroku czasowego całkowania.

Niepowodzenie metody Richardsona odstraszało potencjalnych naśladowców. Dopiero w połowie lat 40. XX w. genialny matematyk amerykański i jeden z pionierów informatyki John von Neumann zainteresował się tym problemem. W roku 1946 doprowadził do utworzenia w Princeton Institute for Advanced Studies projektu badawczego. Dołączył do niego w roku 1948 Jule Charney, twórca teorii quasi-geostroficznej. Charney wykazał, że zastosowanie przybliżenia geostroficznego pozwala osiągnąć układ równań dopuszczający jedynie fale Rossby'ego. Powiązanie tego odkrycia z równaniem zachowania wirowości pozwoliło sformułować pierwszy skuteczny, choć prosty, model numerycznej prognozy pogody. W marcu 1950 r. zespół uzyskał na 33 dni dostęp do komputera ENIAC działającego w ośrodku wojskowym w Aberdeen w stanie Maryland, co pozwoliło wykonać cztery 24-godzinne i dwie 12-godzinne prognozy, nadspodziewanie trafne. Sukces ten nie doczekał się jednak szybkiego wdrożenia – pierwsze operacyjne numeryczne prognozy meteorologiczne zostały uruchomione dopiero w 1954 r. w Szwecji, rok później w USA i w 1959 r. w Japonii.

Opracowany przez zespół Charneya i von Neumanna model odzwierciedlał najważniejsze elementy dynamiki atmosfery, jednak pomijał pierwotne przyczyny powstawania zaburzeń. Przyczyny te wyjaśniła teoria quasi-geostroficzna, która dała początek mo-

delom quasi-geostroficznym, uwzględniającym narastanie zaburzeń w układach niżowych przez prądy pionowe oraz zbieżność pola wiatru przy powierzchni ziemi i rozptyw w pobliżu tropopauzy. W USA model quasi-geostroficzny funkcjonował w służbie pogody do 1966 r.

W 1959 r. Karl-Heinz Hinkelmann zaprezentował udane prognozy wykonane przy użyciu układu równań podobnego do początkowo używanych przez Bjerknesa i Richardsona; kluczem do sukcesu była poprawa jakości danych wejściowych, znaczne skrócenie kroku czasowego całkowania oraz zastosowanie specjalnej procedury uzgadniającej przestrzenne rozkłady poszczególnych pól. Tę ostatnią czynność określamy obecnie mianem inicjalizacji, omawiany układ równań zaś – równaniami pierwotnymi. Modele tego typu zostały wdrożone do pracy operacyjnej w USA i Niemczech w 1966 r., w Wielkiej Brytanii – w 1972 r. Modele obecnie używane do wykonywania prognoz krótko- i średnioterminowych w służbach pogody na całym świecie są oparte na różnych wariantach układu równań pierwotnych, inicjalizację traktuje się zaś jako czynnik warunkujący powodzenie całego przedsięwzięcia.

Przewidywalność

Na początku lat 60. XX w. amerykański matematyk i meteorolog Edward N. Lorenz prowadził eksperymenty obliczeniowe z silnie uproszczonym modelem atmosfery, wykonując kolejne przebiegi z użyciem wyników uzyskanych z poprzednich przebiegów jako danych początkowych. Zauważył, że zaokrąglenia przy zapisie danych pośrednich skutkują drastycznymi zmianami wyników końcowych. Lorenz wykazał, że chaotyczna natura atmosfery, związana z nielinowością systemu, występowaniem dodatnich sprzężeń zwrotnych i niestabilności, sprawia, że przewidzenie jej zachowania w okresie dłuższym niż kilkanaście dni jest niemożliwe – nawet, gdybyśmy dysponowali w pełni dokładnym modelem i znali dokładnie jej stan początkowy. Odkrycie Lorenza jest znane jako „efekt motyla”, wywodzący się z żartobliwie postawionego przez niego pytania, czy trzepotanie skrzydeł motyla w Brazylii może wywołać tornado w Teksasie. Lorenz udzielił odpowiedzi negatywnej, ale wskazał, że drobne, przypadkowe czynniki mogą w istocie przesądzić o umiejscowieniu czy czasie wystąpienia takich zjawisk, choć nie zmienia to prawdopodobieństwa ich wystąpienia.

W czasach tych odkryć osiągnięcie przyzwoitej sprawdzalności dwudniowych prognoz było sporym problemem. Dzisiejsze systemy prognoz praktycznie osiągnęły już horyzont Lorenza. Jednakże wystąpienie niektórych zjawisk, np. Oscylacji Południowej (El Niño), udaje się często przewidzieć z dużo większym, kilkumiesięcznym wyprzedzeniem.

Jak widać, prognozowanie pogody jest niezwykle trudne i nieodłącznie związane z niepewnością. Wyobraźmy sobie postawiony na stole na sztorc na tęym końcu ołówka. W idealnych warunkach mógłby tak stać dowolnie długo. Jeżeli jednak ktoś potrąci stół – oówek upadnie. Bardzo trudno jest jednak przewidzieć, w którą stronę. Zadanie o takim właśnie stopniu trudności rozwiązują meteorolodzy, zajmujący się numerycznym prognozowaniem pogody.

Epoka współczesna

Dążenie do wydłużenia horyzontu czasowego prognoz doprowadziło do wprowadzenia modeli globalnych. W amerykańskiej służbie pogody globalny model atmosfery zaczął funkcjonować w sierpniu 1980 r. W 1985 r. rozpoczął pracę uznawany obecnie za najlepszy na świecie model globalny w Europejskim Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF); na przełomie lat 80. i 90. zbudowano i uruchomiono modele globalne w służbach meteorologicznych Wielkiej Brytanii, Australii i Kanady, a w ciągu następnej dekady: Francji, Japonii i Niemiec.

Zauważona przez Lorenza wrażliwość na warunki początkowe dała początek dwóm ważnym nurtom w prognozach numerycznych. Jednym z nich był rozwój wariacyjnych technik asymilacji danych. Wprowadzenie czterowymiarowej asymilacji wariacyjnej w latach 90. przyniosło skokową poprawę prognoz. Drugim nurtem były prognozy wiązkowe. Polegają one na wykonaniu całej serii prognoz przy niewielu różniących się od siebie sztucznie zaburzanych warunkach początkowych. W ten sposób zamiast pojedynczej prognozy uzyskuje się cały zestaw możliwych scenariuszy. Ich analiza pozwala zwykle ustalić najbardziej prawdopodobny rozwój zdarzeń, a także wytypować scenariusze skrajne, w szczególności przewidujące rozwój sytuacji niebezpiecznych.

Prognozowanie pogody w Polsce

Przed rokiem 1980 polska służba meteorologiczna używała modelu quasi-geostroficznego. Później, wobec braku możliwości odnowienia sprzętu obliczeniowego, postawiono na produkty prognostyczne pochodzące z ośrodków zagranicznych. W pierwszej połowie lat 90. w Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego zainstalowano miniaturowy superkomputer Cray EL-98 wyposażony w osiem procesorów wektorowych, na którym w czerwcu 1994 r. uruchomiono brytyjski model UM (*Unified Model* – Model Zunifikowany) w konfiguracji regionalnej. Model ten znakomicie sprawdził się podczas powodzi w 1997 r., prognozując wystąpienie silnie zlokalizowanych intensywnych opadów w dorzeczu górnej Odry,

które spowodowały wystąpienie drugiej fali powodziowej, a które uznano za niemożliwe do przewidzenia metodami synoptycznymi.

Po powodzi zapadła decyzja o wzmocnieniu systemu osłony hydrometeorologicznej kraju. Dzięki temu Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) zakupił m.in. system radarów oraz komputer Origin firmy Silicon Graphics, na którym zainstalowano regionalny model COSMO-LM, rozwijany przez skupione wokół niemieckiej służby meteorologicznej konsorcjum COSMO. Model ten stanowi obecnie podstawę krajowego systemu prognoz. Nieco wcześniej krakowski oddział IMGW podjął współpracę z konsorcjum ALADIN, utworzonym przez Météo-France, i rozpoczął użytkowanie modelu o tej samej nazwie. Również pod koniec lat 90. zespół naukowców z Politechniki Warszawskiej wszedł we współpracę z zespołem z Uniwersytetu York w Toronto, rozwijającym zaawansowany model chemii atmosfery na bazie kanadyjskiego regionalnego modelu badawczego MC2. Po wdrożeniu w kanadyjskiej służbie pogody globalnego następcy MC2 – modelu GEM, zintegrowany model meteorologiczno-chemiczny GEM-AQ był przez następną dekadę używany w pracach badawczych i ulepszany po obu stronach oceanu. Na początku ostatniego dziesięciolecia GEM został wdrożony do pracy operacyjnej przy prognozowaniu jakości powietrza. Od początku 2019 r. system ten działa w Instytucie Ochrony Środowiska – Państwowym Instytucie Badawczym, dostarczając krótkoterminowej prognozy jakości powietrza, upowszechnianej przez Główny Inspektorat Ochrony Środowiska. Model ten również dostarcza prognoz do ogólnoeuropejskiej, ogólnodostępnej wiązkowej prognozy jakości powietrza w ramach serwisu Copernicus Atmospheric Monitoring Service. Ubocznym rezultatem tych działań jest... prognoza meteorologiczna, wykonywana dla obszaru całego globu, Europy oraz Polski.

W ostatnich latach wzrosło zainteresowanie problemem zanieczyszczenia atmosfery. W kilku ośrodkach wykorzystywany jest w tym celu zintegrowany model amerykański WRF-Chem (Weather Research and Forecast). Jest to model zasadniczo przeznaczony do prac badawczo-rozwojowych związanych z rozwojem prognoz pogody. Jako tzw. model społecznościowy jest udostępniany bezpłatnie i szczególnie łatwy do uruchomienia, dzięki dobrej dokumentacji, bogatemu zestawowi przygotowanych do użycia danych wejściowych i gotowemu systemowi analizy i wizualizacji wyników. Bywa uruchamiany i utrzymywany w ruchu przez entuzjastów-amatorów. Można dziś zatem, dysponując nawet zwykłym komputerem, pewną wiedzą techniczną, wolnym czasem i determinacją, uruchomić na własny użytek skromną wersję współczesnego systemu prognozy pogody.

LECH ŁOBOCKI

Chcesz wiedzieć więcej?

Łobocki L. (2018), *Podstawy dynamiki atmosfery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

<https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem>

Krishnamurti T.N., Bounoua L. (1995), *An Introduction to Numerical Weather Prediction Techniques*, CRC Press.