

Obserwator

WYDANIE SPECJALNE
30 lat
modeli
w
IMGW-PIB



słowem wstępu

3 Trzydziestolecie modeli w IMGW-PIB

pogoda za chwilę

4 Nowcasting w Polsce – historia napisana przez IMGW

imgw i modelowanie

7 Rozwój numerycznych prognoz pogody w IMGW

met office w polsce

12 Numeryczna prognoza pogody w ICM UW. Unified Model UKMO

przewidzieć przyszłość

18 Polska na mapie historii prognoz długoterminowych

imgw na salonach

22 Konsorcjum COSMO w IMGW-PIB

francusko-polskie

28 ALADIN w IMGW-PIB

modele mezoskalowe

30 ALADIN, ALARO, AROME

trudny początek

34 Asymilacja danych w numerycznej prognozie pogody

2002 rok

38 Krótka historia numerycznych prognoz pogody

Obserwator | Gazeta Obserwatora ISSN: 2658-2716

Wydawca: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, 01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61 | www.imgw.pl

Magazyn Obserwator dostępny jest również w wersji online: <https://obserwator.imgw.pl/>

Zespół Redakcyjny: Zespół Komunikacji IMGW-PIB | **Redaktor Naczelny:** Rafał Stepnowski | **Projekt graficzny i skład:** Michał Seregin | **Kontakt do redakcji:** content@imgw.pl

Redakcja nie zwraca materiałów niezamówionych, zastrzega sobie prawo do skrótów, adiuścacji i redagowania nadesłanych tekstów. Wszystkie materiały publikowane w Obserwator (Gazeta Obserwatora ISSN: 2658-2716) mogą być przedrukowywane wyłącznie za zgodą redakcji. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treść zamieszczanych reklam i ogłoszeń.

Trzydziestolecie modeli w IMGW-PIB

Mariusz Figurski | IMGW-PIB/Dyrektor Centrum Modelowania Meteorologicznego

W tym roku mija 30 lat od wdrożenia w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej pierwszych numerycznych modeli pogody. To odpowiedni moment, aby zajrzeć do historycznych annałów i przypomnieć początki prognoz pogody opracowywanych z użyciem superkomputerów. Ta niezwykła opowieść rozpoczyna się w 1989 roku, gdy w Polsce upada komunizm, a w Niemczech mur berliński – symbol zimnej wojny i podziału świata po II wojnie światowej.



Mariusz Figurski, Dyrektor Centrum Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB

Wraz z budową demokratycznego systemu politycznego i wolnego rynku do naszego kraju dotarło z zachodniej Europy i ze Stanów Zjednoczonych wiele dotąd nieznanymi innowacyjnymi rozwiązaniami w sferze produktowej, organizacyjnej, społecznej i technologicznej. To był czas licznych inicjatyw gospodarczych i naukowych. Przemiany ustrojowe otwierały możliwości współpracy specjalistów z obu stron żelaznej kurtyny również w obszarze działania służb meteorologicznych. Pierwszą tego typu inicjatywą była koncepcja konsorcjum modelowania numerycznego pogody opracowana przez Météo-France w 1990 roku. Polska, reprezentowana przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, była jednym z pierwszych państw, które przystąpiły do projektu i tym samym uzyskały dostęp do modelu ALADIN. Ponieważ Internet nie był wówczas siecią globalną, a dostęp do niego miały wybrane jednostki naukowe i akademickie, pierwsze wersje modelu, na których pracowali polscy naukowcy, przywieziono na nośnikach magnetycznych o niewielkiej pojemności, jakimi były

popularne w tamtym czasie dyskietki. Różnego typu perturbacje spowodowały, że model ALADIN wdrożono w IMGW dopiero w 1998 roku na mocy umowy o współpracy z centrum superkomputerowym Cyfronet. Nie był to jednak pierwszy operacyjnie działający numeryczny model pogody w Polsce. Prekursorem na tym polu było Interdyscyplinarne Centrum Modelowania (ICM) przy Uniwersytecie Warszawskim, gdzie na przełomie 1993 i 1994 roku zespół wywodzący się z IMGW uruchomił na superkomputerze Cray nowoczesny model lokalny brytyjskiego Met Office.

Konieczność dalszego rozwijania wiarygodnych numerycznych modeli prognostycznych w dramatyczny sposób potwierdziła powódź tysiąclecia w 1997 roku. Dlatego w ramach współfinansowanego z funduszy Banku Światowego projektu SMOK (System Monitoringu i Osłony Kraju), którego celem była odbudowa i modernizacja sieci pomiarowo-obszaryjnej IMGW, zaplanowano również implementację niehydrostatycznych numerycznych modeli pogody nowej generacji i wdrożenie pierwszego w Instytucie superkomputera (SGI 3800). U progu nowego tysiąclecia podpisano umowę z DWD, na mocy której IMGW uruchomił na przełomie 2001 i 2002 roku model COSMO-LM. W tym czasie Instytut został członkiem konsorcjum COSMO, pracującego nad stworzeniem niehydrostatycznego modelu prognoz meteorologicznych wysokiej rozdzielczości, który miał być przeznaczony zarówno do zastosowań operacyjnych, jak i badawczych przez kraje członkowskie. Od tego momentu IMGW mógł korzystać z dwóch operacyjnie pracujących modeli mezoskalowych. W 2015 roku w konsorcjum podjęto decyzję o zastąpieniu modelu COSMO nowym, będącym lokalną wersją globalnego modelu ICON (ICOsaedral Non-hydrostatic), który charakteryzuje się zdecydowanie lepszą stabilnością

numeryczną i umożliwia opracowywanie prognoz w wyższych rozdzielczościach przestrzennych niż jego poprzednik.

Równoległe w IMGW trwały prace nad wdrożeniem modeli nowcastingowych, które wykorzystywały pomiary z sieci kontrolno-pomiarowej i radarów meteorologicznych. W 2010 roku Instytut dołączył do europejskiego projektu INCA-CE (INTERREG), w ramach którego austriacka służba meteorologiczna ZAMG udostępniła partnerom własny model INCA służący do nowcastingu podstawowych pól meteorologicznych. Po kilku latach prac na bazie INCA powstała polska wersja - model INCA-PL, który jest z powodzeniem używany w różnych implementacjach do dziś. Nie zapomniano również o probabilistycznych modelach długoterminowych, które w dobie zmian klimatycznych nabierają coraz większego znaczenia dla gospodarki i rozwoju społeczeństwa.

Dotychczasowe osiągnięcia niewielkiego zespołu zajmującego się numerycznymi modelami pogody, obecnie pracującego w Centrum Modelowania Meteorologicznego, nie byłyby możliwe bez szerokiej krajowej i międzynarodowej współpracy w ramach konsorcjów i kontaktów indywidualnych. Dzięki temu wdrażane są nowe rozwiązania w zakresie modelowania i parametryzacji, jak również implementacji numerycznych modeli pogody w meteorologii lotniczej, hydrologii, klimatologii, energetyce i wielu innych obszarach nauki i gospodarki. Trzydzieści lat historii potwierdza, jak trudną drogę przeszło grono wspaniałych ludzi, którzy poświęcili - i nadal poświęcają - życie zawodowe dla zrozumienia mechanizmów rządzących atmosferą i hydrosferą, by rozwijać i budować coraz doskonalsze numeryczne modele pogody. Dzięki ich pracy możemy z dużą dozą prawdopodobieństwa poznać przyszłość w pogodzie, zanim ona nastąpi. ◀

Nowcasting w Polsce

– historia napisana przez IMGW

Jan Szturc | IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego, Zakład Nowcastingu

Najważniejszą cechą prognoz nowcastingowych jest ich wysoka rozdzielczość przestrzenna i czasowa, a także wyjątkowa sprawdzalność przy krótkim czasie wyprzedzenia, rzędu kilku godzin. Z tego względu są niezwykle popularne w modelowaniu poszczególnych pól meteorologicznych, w tym zwłaszcza opadu atmosferycznego związanego z najbardziej groźnymi zjawiskami konwekcyjnymi (burzowymi). Generowanie prognoz tego typu wymaga oczywiście nowoczesnych technik pomiarowych i nie jest możliwe bez radarów meteorologicznych. Dlatego rozwój nowcastingu w Polsce był – i nadal jest – możliwy dzięki powstaniu sieci POLRAD, którą zapoczątkowało uruchomienie w 1996 roku radaru Ramża w pobliżu Katowic.



Spotkanie robocze w ramach projektu RISK-AWARE poświęconego detekcji zagrożeń meteorologicznych (fot. archiwum organizatora, 2006).

Pojedyncze radary meteorologiczne, które działały w Polsce po II wojnie światowej, to głównie urządzenia produkcji radzieckiej, jak MRŁ-5 zainstalowany w Legionowie. Nie tworzyły one jednak sieci umożliwiającej wytwarzanie nowoczesnych, operacyjnych prognoz nowcastingowych. To się zmieniło w 2004 roku, gdy ukończono budowę POLRAD-u, sieci składającej się z ośmiu radarów niemieckiej firmy Gematronik (obecnie LEONARDO Germany).

Pierwsze kroki w nowcastingu. Prace nad systemem nowcastingowym prowadzono początkowo w Biurze Hydrologiczno-Meteorologicznym ówczesnego oddziału IMGW w Katowicach. Brali w nich udział m.in. Anna Jurczyk, Jan Szturc i Katarzyna Osródka. W efekcie uruchomiono proste modele ekstrapolacyjne dla pola opadu, obejmujące obszar w zasięgu około 250 km od radaru Ramża, stosowane na potrzeby macierzystego biura. Wraz z rozbudową sieci POLRAD zasięg przestrzenny modeli stopniowo się powiększał.

Od 2000 roku działania związane z zastosowaniem radarów meteorologicznych roz-

wijano we współpracy międzynarodowej, najpierw w ramach akcji COST 717 (m.in. przygotowano i opublikowano obszerny raport przeglądowy o stosowanych ówczesnie na świecie modelach nowcastingowych opadu), a następnie COST 731 (tu skupiono się głównie na analizie niepewności zawartej w danych radarowych i w prognozach opadu). Na podstawie tych doświadczeń opublikowano liczne prace naukowe, a pracownicy IMGW wzięli udział w opracowaniu monografii poświęconej kontroli jakości danych radarowych w Europie. W tym czasie jedną z głównych specjalności zespołu z Katowic, obok nowcastingu, były zagadnienia operacyjnej kontroli jakości trójwymiarowych danych radarowych. Ścisłe współpracowano ze Stanisławem Moszkowiczem, cenionym w Europie, a zarazem pierwszym w IMGW specjalistą w zakresie wdrażania i interpretacji danych radarowych.

W 2004 roku zespół został włączony do Radarowego Centrum Operacyjnego (obecnie Wydział Teledetekcji Naziemnej, WTN) i w jego ramach koncentrował się na rozwoju własnych wcześniejszych prac. Kontynuowano współpracę zagraniczną w ramach

projektów MUSIC (program ramowy UE) i RISK-AWARE (INTERREG CADSES). WTN zainicjował wkrótce projekt BALTRAD i wzięł udział w jego późniejszej edycji - BALTRAD+ (INTERREG BSR). Pracownicy IMGW, we współpracy z kolegami ze Szwecji i z Finlandii, byli odpowiedzialni za rozwój zaawansowanych algorytmów kontroli jakości danych radarowych, co stanowi kluczowy warunek umożliwiający wykorzystanie tych danych do nowcastingu opadu. W tym czasie pod kierownictwem Katarzyny Osródki podjęto prace nad własnym, zaawansowanym systemem kontroli jakości danych radarowych RADVOL-QC, obecnie stosowanym operacyjnie zarówno w sieci POLRAD, jak i w innych krajach.

Uruchomienie pełnego zakresu prognoz nowcastingowych. W 2010 roku Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej dołączył do europejskiego projektu INCA-CE (INTERREG), w ramach którego austriacka służba meteorologiczna ZAMG udostępniła partnerom własny model INCA służący do nowcastingu najważniejszych pól meteorologicznych. Celem porozumienia były insta-



Warsztaty poświęcone interpretacji danych z radarów o podwójnej polaryzacji wiązki, tzw. dual-pol (fot. Jan Szturc, 2012).



Spotkanie robocze w ramach projektu BALTRAD+, poświęcone instalacji systemu zawierającego m.in. algorytmy kontroli jakości danych radarowych opracowane w IMGW-PIB (fot. Jan Szturc, 2013).

zualizacji obserwacji i prognoz meteorologicznych, a także MeteoFlight dla Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej wspierający kontrolerów ruchu lotniczego informacjami meteorologicznymi z wizualizacją na ekranach kontroli ruchu samolotów.

W 2014 roku pracowników WTN i ZTS, którzy dotychczas zajmowali się prognozami nowcastingowymi, przeniesiono do wydzielonej Sekcji Nowcastingu, przekształconej później w Zakład Nowcastingu (obecnie funkcjonujący w ramach Centrum Modelowania Meteorologicznego). W Zakładzie kontynuowano prace nad SCENE i INCA-PL2. Wśród najważniejszych osiągnięć należy również wymienić utworzenie systemu estymacji pola opadu na podstawie danych z sieci deszczomierzy, radarowych i z satelitów, nazwanego RainGRS, a także systemu SPT detekcji i prognoz typu opadu, w tym groźnych zjawisk konwekcyjnych. Ponadto opracowano MERGE, system łączący prognozy nowcastingowe dostarczane przez SCENE i INCA-PL2 z mezoskalowymi prognozami modelu AROME. ◀

Obecnie pracownicy Zakładu Nowcastingu prowadzą prace nad estymacją pola opadu na podstawie dostępnych danych satelitarnych, przygotowaniem danych wejściowych do systemu prognozowania błyskawicznych wezbrań opadowych, rozwojem systemu ostrzeżeń meteorologicznych MeteoWarn, opartego na danych nowcastingowych, a także utworzeniem zaawansowanego modelu detekcji i prognozowania burz.

Literatura (wyłącznie przeglądana)

Jurczyk A., Szturc J., 2002. System monitoringu intensywnych opadów wykorzystujący dane radarowe. *Gospodarka Wodna*, 62 (4), 152-155.
 Ośrońka K., Jurczyk A., Szturc J., 2004. Using of neural network to precipitation nowcasting based on weather radar data. *Wiadomości IMGW*, 27 (2), 3-15.
 Szturc J., 2004. Teledetekcja satelitarna i radarowa w meteorologii i hydrologii. Wydawnictwo ATH, Bielsko-Biala, 141 s.
 Mecklenburg S., Jurczyk A., Szturc J., Ośrońka K., 2005. Quantitative precipitation forecasts (QPF) based on radar data for hydrological models. *COST Action 717*, Luxembourg, 37 s.
 Jurczyk A., Ośrońka K., Szturc J., 2008. Research studies on improvement in real-time estimation of radar-based precipitation in Poland. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 101, 159-173.
 Jurczyk A., Ośrońka K., Tkocz G., Szturc J., 2009. MeteoGIS: system monitorowania groźnych zjawisk atmosferycznych w województwie śląskim. *Wiadomości IMGW*, 3 (1), 3-16.
 Einfalt T., Szturc J., Ośrońka K., 2010. The quality index for radar precipitation data: a tower of Babel?. *Atmospheric Science Letters*, 11, 139-144.
 Szturc J., 2010. Niepewność w radarowych pomiarach opadu z punktu widzenia hydrologii. *IMGW, Warszawa*, 148 s.
 Ośrońka K., Szturc J., Jurczyk A., 2011. Korekty i ocena jakości danych radarowych sieci radarowej POLRAD. *Wiadomości IMGW*, 5, 49-74.
 Szturc J., Ośrońka K., Jurczyk A., 2012. Quality control algorithms applied on weather radar reflectivity data, [w:] *Doppler Radar Observations – Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*, Intech, 289-306.
 Szturc J., Jakubiak B., Jurczyk A., Ośrońka K., 2014. Asymilacja trójwymiarowej odbiowości radarowej do numerycznego modelu meteorologicznego metodą zespolonego filtra Kalmana: metodyka i eksperyment. *Przegląd Geofizyczny*, 59, 19-38.
 Jurczyk A., Ośrońka K., Szturc J., Giszterowicz M., Przyczynny P., Tkocz G., 2015. MeteoGIS: GIS-based system for monitoring of severe meteorological phenomena. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 3, 49-61.
 Szturc J., Jurczyk A., Ośrońka K., Wyszogrodzki A., Giszterowicz M., 2018. Precipitation estimation and nowcasting at IMGW-PIB (SEINO system). *Meteorology Hydrology and Water Management*, 6, 3-12.
 Szturc J., Ośrońka K., Jurczyk A., Otop I., Linkowska J., Bohonek B., Pasierb M., 2022. Quality control and verification of precipitation observations, estimates, and forecasts. [w:] *Precipitation Science. Measurement, Remote Sensing, Microphysics and Modeling*. Elsevier, 91-133.

lacja i wdrożenie modelu w poszczególnych służbach, a następnie wspólna praca nad jego rozwojem. W projekcie ze strony IMGW, poza zespołem radarowym, wzięli udział przede wszystkim Mateusz Giszterowicz i Paweł Pszeniczny z Zakładu Teledetekcji Satelitarnej (ZTS). Równoległe od 2009 roku Anna Jurczyk prowadziła intensywne prace nad rozwojem nowego, zaawansowanego modelu nowcastingowego opadów SCENE (Storm Cell Evolu-

tion and Nowcasting), uwzględniającego także ewolucję pola opadu. Od tego czasu w Instytucie obliczane są prognozy nowcastingowe opadu i innych pól, przy czym model ten, podobnie jak system INCA, którego polska wersja obecnie nosi nazwę INCA-PL2, jest ciągle udoskonalany. Równoległe opracowywane są systemy komercyjne takie jak: MeteoGIS dla Śląskiego Urzędu Wojewódzkiego w Katowicach, oparty na technikach GIS i służący do wi-

Rozwój numerycznych prognoz pogody w IMGW

Jan Waclaw Parfiniewicz | IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego

Prognozowanie pogody przy użyciu modeli numerycznych stanowi jedno z najważniejszych osiągnięć nauki w zakresie krótko-, średnio- i długoterminowego przewidywania stanu atmosfery.

Tak spektakularny postęp nie byłby jednak możliwy bez wysiłku społeczności badaczy, inżynierów i specjalistów technologii informatycznych, którzy przez niemal 100 lat dokonywali kluczowych odkryć i udoskonaleń. W ich gronie nie zabrakło pracowników polskich instytucji badawczo-rozwojowych, w tym ekspertów z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Pierwszą numeryczną prognozę pogody (NPP) policzono przy użyciu - nowatorskiego w ówczesnym czasie - lampowego komputera ENIAC znajdującego się w Princeton University (USA), a jej twórcami byli J.G. Charney, R. Fjortoft i J. von Neumann (1950). Prognozę pola geopotencjału (wysokości powierzchni) 500 hPa na 24 godziny uzyskano z modelu ekwiwalentno-barotropowego równania wirowości. Teoretyczne podstawy modelu zostały wypracowane przez Charney'a w 1949 roku, a poprzedzone pracą C.G. Rosby'ego, która ukazała się w 1939 roku. Zastosowana metoda numeryczna (w tym analiza stabilności schematu różnicowego) była rezultatem częściowo utajnionych prac, prowadzonych w Los Alamos przez von Neumanna. Wpływ na pracę Rosby'ego mieli współcześni mu F. Exner i H. Ertel (1942), H. Philips (1939), E. Eady (1949, 1952), A. Eliassen (1949), J. Petterssen i J. Bjerknes (1904), twórca meteorologii synoptycznej i teorii rozwoju frontów atmosferycznych).

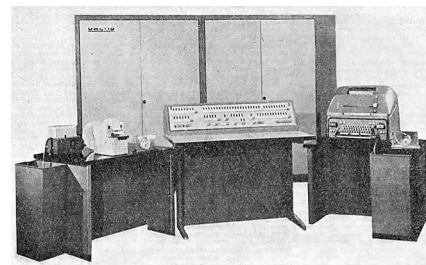
Za fundament NPP, jak również meteorologii dynamicznej uznaje się pracę V. Bjerknesa z 1904 roku, w której prognoza pogody została sformułowana jako zagadnienie początkowo-brzegowe na gruncie fizyki matematycznej (zagadnienie Cauchy'ego). Z kolei prace von Neumanna w zakresie metod numerycznych były poprzedzone fundamentalnymi dziełami H. Philippsa i N. Wienera (1923), R. Couranta, K.O. Friedrichsa i H. Lewy'ego (1928), a także L.F. Richardsona (1911, 1922, 1926). Wielkim przegrany w tym wyścigu był Richardson, twórca podstaw analizy schematów różnicowych dla równań różniczkowych z pochodnymi cząstkowymi, który jako pierwszy za pomocą ręcznych kalkulatorów obliczył prognozę pola ciśnienia. Obarczony grubym błędem wynik spowodował, że jego heroiczny wysiłek został przez współczesnych mu meteorologów zlekceważony.

Rozwój NPP od lat 50. W działalności związanej z numerycznymi prognozami pogody, prowadzonej od drugiej połowy XX wieku, można umownie wydzielić trzy główne fazy. Okres 1950-1965 to etap stosunkowo słabych komputerów o egzotycznych nazwach: ENIAC, BESK, BESM, później IBM, Strela, Mark II, a także modeli limitowanych liczbą poziomów i założeniami quasi-geostroficzności i adiabaticzności (bez przemian pary wodnej). Dekada liczona od 1965 do 1975

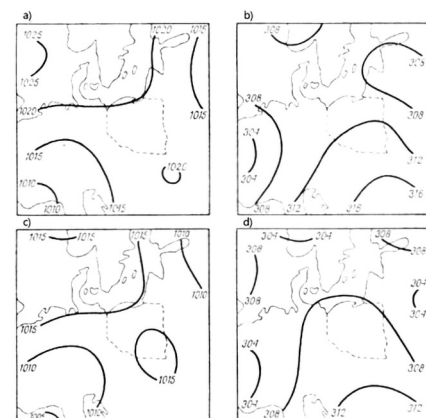
roku charakteryzowała się rozwojem mocy obliczeniowych i powstaniem dużych ośrodków prognostycznych: w Waszyngtonie, Bracknell, Offenbach, Moskwie, Tokio, Melbourne. W tym czasie powołano również Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody (ECMWF). Nastąpiło przejście na pełny (tzw. prymitywny) układ równań (Shuman 1960; Hinkelman 1965), aplikacje do teorii klimatu i stopniowe uwzględnienie przemian fazowych (mikrofizyki). Rozwijały się metody obiektywnej automatycznej kontroli i analizy coraz większej ilości informacji, w tym obserwacji satelitarnych. W 1975 roku zaczęła się era superkomputerów. Intensywny rozwój metod numerycznych i technik asymilacji danych, w tym złożonych metod wariacyjnych, doprowadził do powstania kilkudziesięciopoziomowych modeli globalnych i lokalnych (Limited Area Model, LAM) z pełną fizyką. W pracach wykorzystywano radary i rozwiązywanie zadań odwrotnych. Powstało centrum w Tuluzie, a na znaczeniu stracił ośrodek w Moskwie. Negatywnym zjawiskiem była postępująca koncentracja potencjału technicznego i intelektualnego, komercjalizacja NPP i konkurencja hamująca swobodną wymianę myśli twórczej.

Przyczynek do rozwoju NPP w IMGW. Epoka Wirtha, 1963-1978. Zygmunt Wirth, absolwent Uniwersytetu Warszawskiego, jako pierwszy w Polsce rozpoczął w 1963 roku eksperymenty NPP. Wzorując się na pracy J.G. Charneya (1949) i G.P. Cressmana (1959), pod patronatem Feliksa Wirkusa (który zaadaptował do prognozy pola geopotencjału 700 hPa metodę graficzną), uruchamiał offline model barotropowy na pierwszych w Polsce „egzotycznych” komputerach - Ural-2, lampowym kolosie należącym do PAN i zajmującym pół piętra Pałacu Kultury i Nauki, a także maszynie Elliot w Międzyzylesiu z pamięcią taśmową, karuzelowo-wahadłową. Następnie we współpracy z E. Maron i A. Misiukiewicz przeniósł model na drugi komputer IMGW UMC-10 (pierwszy, UMC-1, nie nadawał się do liczenia), potem na Odrę 1204 i Odrę 1305.

Wyniki modelu były lepsze od 24-godzinnej prognozy wykonanej metodą graficzną i od 1970 roku model uruchamiano operacyjnie raz dziennie. Dane były odczytywane z map synoptycznych. Domena modelu obejmowała na zachodzie znaczną część Atlantyku, na wschodzie sięgała po Ural. Równolegle prowadzono prace badawcze nad



Komputer UMC-10, 1965 (fot. Wikipedia).



Przykład 24-godzinnej prognozy pola ciśnienia 1000 hPa i 700 hPa dla 30 lipca 1977 roku, liczonej modelem trójparametrycznym Xi (panele a, b), będącym udoskonaloną wersją modelu Iljina-Ruchovca, a także BEPA-2, rozwiązującym układ równań Helmholtza (panele c, d). Oba modele wchodziły w skład systemu prognoz numerycznych Predict-1 (Nemec, Parfiewicz 1979).

neutralizacją ujemnego wpływu warunków brzegowych. Programy początkowo były pisane w językach wewnętrznych (W-20), następnie w ALGOL-u, ostatecznie w Fortranie. W tym czasie zaczęły też funkcjonować program WWW, który w ramach struktur WMO pozwalał podwijać modele NCM-ów do modeli ośrodków regionalnych.

Ambicją Wirtha, jako szefa ETO, było scentralizowanie zarządzania infrastrukturą obliczeniową IMGW, połączenie komputera typu mainframe z węzłem łączności IMGW i wdrożenie ruchu całodobowego pod kątem NPP. W tej koncepcji informatyka, będąc narzędziem, miała spinać działalność merytoryczną całego IMGW. Wirth zgromadził wokół siebie grupę wysoko wykwalifikowanych programistów i informatyków, obok wspomnianych Ma-



ron i Misiukiewicz pracowali u niego m.in. W. Czernuszenko, T. Sobczyk, J. Czechowicz i B. Jakubiak. Do zespołu dołączył wkrótce J. Karpiński, twórca mikrokomputerów ZAM i MOMIK, który razem z Sobczykiem miał się zająć komputeryzacją łączności dalekopisowej (wspólnie z niezapomnianym cichociemnym Henrykiem Ostrowińskim).

Strukturę ETO tworzyły komórki informacyjne obsługujące prognozy (meteorologiczne krótko- i długoterminowe, prognozy agro- i hydrologiczne), grupa teleinformatyki, grupa roczników i eksploatacja. Całości patronował S. Reinchart. Od 1975 roku zespół napotykał poważne problemy w realizacji założeń Wirtha - począwszy od metodyki interpretacji synoptycznej NPP, poprzez uwarunkowania polityczne utrudniające kontakt z Zachodem, skończywszy na odejściu pracowników

ETO do zakładów merytorycznych i widmie totalnej komputeryzacji systemami typu PC. Ostatecznie bezpośrednią przyczyną upadku idei scentralizowanych komputerów z wielodostępem typu mainframe (horse computer) był konflikt Wirtha z operatorami Odry odmawiającymi pracy nocą.

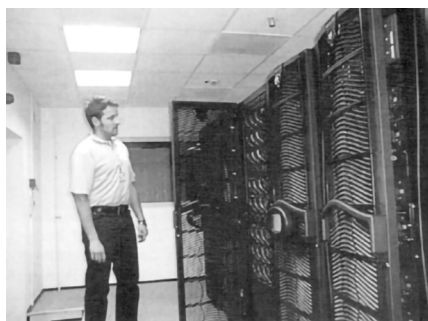
Epoka Predictu, 1975-1985. Koncepcja w pełni zautomatyzowanego systemu NPP zaimplementowanego na Odrze 1305 była ściśle uzależniona od dwuparametrycznego modelu baroklinowego Iljina-Ruchovca, udostępnionego przez rosyjski zespół z Petersburga. Wstępne przetwarzanie taśm dalekopisowych opracowali współpracownicy T. Sobczyka (E. Sosnowska i W. Piętaś). Metodę tzw. kompleksowej kontroli danych stworzył J. Parfiniewicz (1975) pod kierunkiem L.S. Gan-

dina, a do obiektywnej analizy zaadaptowano metodę optymalnej interpolacji (OI, Gandin 1963). W zespole programistów, będących jednocześnie pracownikami merytorycznymi, znaleźli się również B. Jakubiak i W. Sławiński.

Efektowne osiągnięcia informatyczne stopniowo ujawniały braki logistyczne. Był to okres, w którym rosyjska technologia zaczęła odstawać od zachodniej. Braki techniczne nadrabiano sofistycznymi koncepcjami, tworząc m.in. skomplikowane schematy NPP, co było możliwe dzięki świetnie przygotowanej merytorycznie kadrze naukowej zakotwiczonej jeszcze w dorobku Akademii Petersburskiej (Gandin uczeń Yudina, Yudin - Kibela, Kibel - Fridmana, Fridman - Czapyłgina, Czapyłgin - Żukowskiego, który z kolei czerpał od Eulera i Bernoulliego sprowadzonych do Rosji jeszcze przez Pio-



foto: Maksym Harbar on Unsplash



Superkomputer Origin 3800 zainstalowany w IMGW (fot. archiwum autora).

tra I). O poziomie rosyjskich badaczy świadczy to, że znaczna ich część wyemigrowała w latach 80. na Zachód, gdzie zajmowali li czące się pozycje w środowisku naukowym.

O ile prace poświęcone doskonaleniu modelu małoparametrycznego (które autor prowadził razem z L.V. Ruchovcem, 1977-1981) mają dziś ograniczone znaczenie praktyczne, o tyle przedstawione ówczesnie rozwiązania związane z kontrolą danych (1973-1981) pozostają aktualne (konceptje Lorentza (1990) z założeniem apriorycznej wiedzy o zachowaniu się grubych błędów są dyskusyjne), a zapoznanie się z technologią OI pozwoliło na ich twórczą aplikację (1983-1998). Na zagrożenia wynikające z uzależnienia się od rosyjskiej myśli technicznej wskazywał K. Haman. Zaniechanie koncepcji Wirtha, niższa od niemieckich i angielskich jakość prognoz i nadejście epoki PC spowodowały zarzucenie projektu Predict i wstrzymanie rozwoju NPP w IMGW.

Rozwój po 1985. Euforia związana z dostępem do komputerów typu PC zaowocowała w IMGW rozwojem automatycznych systemów przetwarzania informacji meteorologicznej. Grupa T.S. (późniejszy T&S) stworzyła system wspomaganie synoptyka (SWS), a S. Kozłowski i P. Ignatowicz uruchomili system POGODA. W obu narzędziach wykorzystano elementy kontroli i analizy wypracowane w projekcie Predict. W ramach współpracy z WMO natomiast powstały systemy MSDAD i SVARD (1987-1991), w których główny nacisk położono na wizualizację pól skalarnych i wektorowych, co pozwalało opracowywać oryginalne algorytmy obliczania izolinii i linii prądu. W 1994 roku zespół w składzie: A. Kadłubowski, L. Herman-Iżycki, M. Łazanowicz i A. Chmielewski wdrożył RADMET - narzędzie do interpretacji wielkoskalowych



Absolwenci PW z 1969 roku na kierunku meteorologia, biorący udział w wydarzeniach opisanych powyżej. Od góry od lewej: Marek Uliasz, Wojciech Raczyński, Jan Parfiniewicz, Bogumił Jakubiak, Lech Łobocki, Zbigniew Sorbjan (brak: Hanny Miksy, Macieja Ostrowskiego, Kazimierza Wąsika) – dalej wykładowcy: Henryk Piwkowski, Jerzy Pruchnicki (fot. archiwum autora).

prognoz dostępnych via GTS. Początkowo RADMET cieszył się sporą popularnością jako system adresowany bezpośrednio do użytkownika z pominięciem synoptyków. Jednak z chwilą uruchomienia superkomputera CRAY w ICM UW i uzyskania możliwości aplikacji na nim modelu LAM UKMO z pracy nad systemem RADMET zrezygnował L. Herman-Iżycki, który wraz z B. Jakubiakiem przeszedł do ICM. Z kolei A. Kadłubowski realizował się w modelu hydrologicznym opartym na zasadzie de Saint-Venanta. W tym czasie J. Parfiniewicz poświęcał się rozwojowi metodyki asymilacji danych radarowych (1996-1998), jak również aplikacji koncepcji wirowości potencjalnej do analizy i diagnozy szczególnie intensywnych procesów meteorologicznych (których od czasu wichury i powodzi 1997 roku nie brakowało). Tymczasem w Krakowie zespół pod kierunkiem M. Jerczyńskiego uruchomił francuski model LAM (ARPEGE/ALADIN). W ramach koncepcji projektu SMOK planowana była implementacja modelu niehydrostatycznego nowej generacji, który został pozyskany z DWD (LM).

W tym czasie zaplecze środowiskowe prac prowadzonych w IMGW stanowiły instytuty naukowe: IGF UW, IGF PAN i IIS PW. Należy odnotować w tym kontekście sukcesy na arenie międzynarodowej, niedosięgane m.in. przez P. Smolarkiewicz (metody numeryczne), P. Flatau (radiacja), Z. Sorbjana, L. Łobockiego (warstwa graniczna), M. Uliasz, P. Bartnickiego (dyfuzja zanieczyszczeń) i W. Grabowskiego (mikrofizyka, modele klimatu). Prowadzo-

ne w IGF UW seminaria środowiskowe pod kierunkiem K. Hamana i z udziałem J. Borkowskiego niewątpliwie miały wpływ na podniesienie poziomu prac prowadzonych w IMGW.

Tekst powstał dzięki inicjatywie i wsparciu merytorycznemu i edytorskiemu dr hab. Andrzeja Wyszogrodzkiego, za co serdecznie mu dziękuję. ◀

Literatura w porządku chronologicznym

- ODNIESIENIA DO LITERATURY ŚWIATOWEJ**
- Bjerknes V., 1904. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteorologische Zeitschrift*, 21, 1-7.
- Richardson L.F., 1911. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations with an application to the stress in a masonry dam. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 210, 459-470. DOI: 10.1098/rsta.1911.0009.
- Richardson L.F., 1922. *Weather Prediction by Numerical Process*, Cambridge University Press.
- Richardson L.F., 1926. Atmospheric diffusion shown on a distance-neighbor graph. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 110 (756), 709-737. DOI: 10.1098/rspa.1926.0043.
- Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H., 1928. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik. *Mathematische Annalen*, 100, 32-74. DOI: doi.org/10.1007/BF01448839.
- Philipp H., 1939. Die Abweichungen vom geostrophischen Wind. *Meteorologische Zeitschrift*, 56, 460-483.
- Ertel H., 1942. Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteorologische Zeitschrift*, 59, 271-281.
- Neumann von J., 1944. Proposal and analysis of a new numerical method for the treatment of hydrodynamical shock problems. [w:] *Committee Report, Applied Mathematical Panel, National Defense Research Committee*.
- Early E.T., 1949. Long waves and cyclone waves. *Tellus A*, 1 (3), 33-52. DOI: 10.1111/12153-3490.1949.tb01265.x.
- Eliassen A., 1949. The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable. *Geophysikalische Publikationen*, 17 (3), 5-44.
- Charney J.G., 1949. On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 6 (6), 371-385. DOI: 10.1175/1520-0469(1949)006<0372:OAPBPN>2.0.CO;2.
- Charney J.G., Fjortoft R., Neumann von J., 1950. Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation. *Tellus A*, 2 (4), 237-254. DOI: 10.3402/tellusa.v2i4.8607.
- Early E.T., 1952. Note on weather computing and the so-called 2.5-dimensional model. *Tellus A*, 4 (3), 157-167. DOI: 10.3402/tellusa.v4i3.8776.
- Fjortoft R., 1952. On a numerical method of integrating the barotropic vorticity equation. *Tellus A*, 4 (3), 179-194.
- Cressman G.B., 1959. An operational objective analysis system. *Monthly Weather Review*, 87 (10), 367-374. DOI: 10.1175/1520-0493(1959)087<0367:A00AS>2.0.CO;2.
- Lax P., Wendroff B., 1960. Systems of conservation laws. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13 (2), 217-237. DOI: 10.1002/cpa.3160130205.
- Gandin L.S., 1963. Objective analysis of meteorological fields. *Gidrometeorol. Zhurnal*.
- Hinikelman K., 1965. Primitive equations. [w:] *Lectures on Numerical Short-Range Weather Prediction*. Hydrometeorological.
- Shuman F.G., 1965. A multi-level primitive equation model suitable for operational numerical weather prediction (a collection of three papers with introduction). [w:] *Lectures on Numerical...*, op. cit.
- Lorenc A.C., 1990. Bayesian approach to Quality Control, parts I & II. *Mesoscale Data Assimilation, 1990 Summer Colloquium*, Boulder, NCAR.
- PRACE WŁASNE AUTORA ZWIĄZANE Z ROZWOJEM NPP**
- Parfiniewicz J. i in., 1976. The prediction of air mass thunderstorms and halls. [w:] *WMO symposium on the interpretation of the broad scale NWP products for local forecasting purposes*, WMO, No. 450.
- Gasiorowski G., Parfiniewicz J., 1977. Poszukiwanie optymalnego czasu odjęcia dopływu informacji w podsystemie Predict-1. *Przeegląd Geofizyczny*, 3-4, 253-258.
- Parfiniewicz J., 1977. Możliwość zastosowania wyników operacyjnych prognoz pogody dla celów prognozowania dyspersji zanieczyszczeń w atmosferze. *Sesja naukowa Meteorologiczne aspekty skażenia atmosfery*, Komisja AN KS ds. Planetarnych Badań Geofizycznych.
- Parfiniewicz J., Ruchovec L.V., 1977. Koncepcja wielopozomowego modelu prognozy geopotencjału opartego na trzech parametrach. *Przeegląd Geofizyczny*, 3-4, 263-273.
- Parfiniewicz J., 1979. Hydrodynamiczne modele IMGW dostosowane do krótkoterminowych operacyjnych prognoz geopotencjału na standardowych powierzchniach izobarycznych. *Wiadomości IMGW*, 3-4, 3-13.
- Nemec J., Parfiniewicz J., 1979. Eksperymenty numeryczne z modelem makroskalowym. *Wiadomości IMGW*, 3-4, 23-35.
- Parfiniewicz J., 1979. Objektivizacja systemu meteorologicznych prognoz krótkoterminowych IMGW. [w:] *Materiały z sesji naukowej: 60 lat IMGW*, Warszawa.
- Parfiniewicz J., 1983. Zastosowanie metod optymalnej interpolacji i filtru Kalmana do krótkoterminowego prognozowania. [w:] *Materiały z XXXI Zjazdu Gazowników Polskich*, Warszawa.
- Parfiniewicz J., 1984. A diagnosis of vertical motions in the atmosphere: choice of the model and specification of boundary conditions. The relation with precipitation. *Acta Geophysica Polonica*, 32 (1), 89-103.
- Bobitski E., Parfiniewicz J., 1993. Linking atmospheric and hydrological models over a basin in mountainous area. [w:] *Macroscale Modeling of the Hydrosphere*, Proceedings of the Yokohama Symposium, IAHS Publication, 14.
- Parfiniewicz J., Uliasz M., 1993. Application of the mesoscale dispersion modeling system to investigation of air pollution transport in southern Poland. [w:] *Air Pollution Modeling and its Application X*, Springer US.
- Parfiniewicz J., 1994. Lokalne prognozy pogody dla Polski. *Konferencja Naukowo-Techniczna*, IMGW.
- Parfiniewicz J., 1997. Asymilacja danych radaru meteorologicznego. *Wiadomości IMGW*, 1, 83-100.
- Parfiniewicz J., 1997. Zarządzanie informacją meteorologiczną w „czasie rzeczywistym” na przykładzie systemu PC RADMET w kontekście asymilacji danych radarowych. [w:] *Współczesne problemy inżynierii środowiska*, ISIS, PW.
- Parfiniewicz J.W., 1999. Przyczynek do rozwoju numerycznych prognoz pogody w IMGW. [w:] *Nauka dla służby hydrologicznej i meteorologicznej (SH-M)*, IMGW, Warszawa.





Numeryczna prognoza pogody

w ICM UW. Unified Model UKMO

Leszek Herman-Iżycki | Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego (ICM), Uniwersytet Warszawski

Unified Model (UM) jest jednym z pierwszych numerycznych modeli prognozy pogody uruchomionych w Polsce, regularnie dostarczającym prognozę pogody aż do dzisiaj. Został opracowany przez brytyjską służbę meteorologiczną Met Office (UKMO), gdzie operacyjnie działa od 1991 roku.

W latach 60. ubiegłego wieku prognozowanie numeryczne pogody i klimatu było traktowane rozdzielnie. I o ile w obszarze zagadnień klimatycznych od samego początku rozumiano konieczność globalnego podejścia, o tyle modele pogody były w tym czasie liczone na krótki okres i na ograniczonym obszarze.

Pierwszy globalny model prognozy pogody powstał pod koniec lat 70. XX wieku i był wzorowany na modelu klimatu, z którego wykorzystał zaawansowane parametryzacje procesów fizycznych; na nowo jednak został wówczas opracowany schemat całkowania umożliwiające szybkie obliczenia. W rezultacie w latach 80. w brytyjskiej służbie meteorologicznej Met Office używano dwóch globalnych modeli - klimatu i pogody. Dodatkowo w użyciu operacyjnym był niehydrostatyczny lokalny model obejmujący obszar Wielkiej Brytanii. Modele te rozwijano osobno, ponieważ stawiano im inne cele.

Modele globalne zostały napisane w języku specyficznym dla komputera CDC CYBER 205¹. Ze względu na koszty i czas przenoszenia kodu na nowe maszyny obliczeniowe konieczna okazała się unifikacja modeli. Ostatecznym im-

pulsem, który spowodował podjęcie tej decyzji, było wycofanie się Control Data Corporation z dostarczenia następcy superkomputera CYBER 205. W takich okolicznościach w ciągu dwóch lat powstał Unified Model, z którego użyciem możliwe było prognozowanie zarówno klimatu, jak i pogody - w konfiguracji globalnej i na ograniczonym obszarze. Model napisano w języku Fortran z niewielkim dodatkiem specyficznym dla maszyny instrukcji niskiego poziomu. Konfiguracja modelu była definiowana w plikach kontrolnych w ten sposób, że różne do tej pory modele używały różnych ustawień i jednego kodu. UM został uruchomiony operacyjnie w wersji globalnej w czerwcu 1991 roku, a w wersji mezoskalowej - na ograniczonym obszarze - wystartował pod koniec 1992 roku².

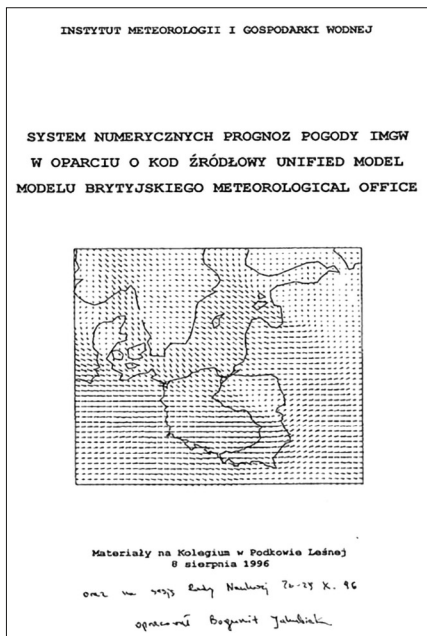
Narodziny numerycznej prognozy pogody (NPP) w Polsce. W tym samym czasie, a więc na początku lat 90., w Polsce nie dysponowano jeszcze numeryczną prognozą pogody w wersji mezoskalowej. W opracowaniu „System Numerycznych Prognoz Pogody IMGW w oparciu o kod źródłowy Unified Model modelu brytyj-

¹ https://doi.org/10.1007/978-3-642-84020-3_8.

² <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00018.1>.



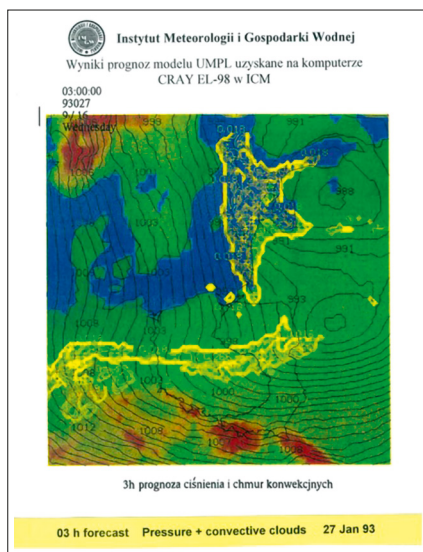
Kaseta z taśmą magnetyczną z kodem modelu UM dostarczona przez Met Office w 1994 roku (fot. archiwum autora).



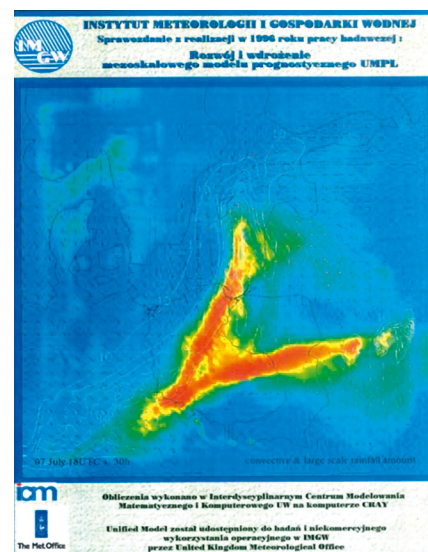
Opracowanie wyników testów modelu UM.

skiego Meteorological Office³ napisano: „Problem rozwoju własnego systemu numerycznych prognoz pogody jest wyzwaniem, jakie stoi przed Instytutem, i należy dołożyć wszelkich starań, by je zrealizować możliwie szybko i na odpowiednim poziomie”, a także: „W IMGW podstawowym argumentem niepodjęcia prac w dziedzinie NWP był brak odpowiedniego komputera do obliczeń”.

Próby budowy systemu NWP (numerycznych prognoz pogody) w Instytucie podjął się dr Bogumił Jakubiak, kierownik Zakładu Prognoz Długoterminowych IMGW. Wykorzystał on fakt powstania nowej jednostki na Uniwersytecie Warszawskim - Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Kompu-



Wyniki prognozy liczone modelem UM uzyskane dla przypadku badawczego sytuacji meteorologicznej z 27 stycznia 1993 roku (po lewej). Wyniki prognozy liczone modelem UM uzyskane dla przypadku badawczego sytuacji meteorologicznej z 7 lipca 1996 roku (po prawej).



terowego (ICM UW), gdzie zainstalowano pierwszy w Polsce superkomputer. Był to 8-procesorowy Cray EL-98. Jakubiak dla potrzeb systemu numerycznych prognoz wybrał model UM. Istotną okolicznością było to, że superkomputer dla ICM dostarczyła firma Cray, która wyposażała w swoje komputery Cray YMP-8 i Cray C90 również Met Office. Ułatwiło to późniejszą instalację kodu: wersja UM uruchomiona w 1997 roku na maszynie Cray YMP-4E została skompilowana na Cray C90 w Met Office.

Uruchomienie modelu UM w ICM

UW. W czerwcu 1994 roku w porozumieniu z Met Office dr Jakubiak zainstalował model UM w wersji 3.2 na komputerze ICM. W październiku uzyskano licencję na wersję mezoskalową dla celów badawczych, jednakże wersja globalna musiała zostać użyta jako źródło warunków brzegowych i warunku początkowego dla modelu mezoskalowego. Model globalny został uruchomiony w wersji N144 (siatka 288×217, rozdzielczość około 90 km na średnich szerokościach) na 19 poziomach na okres 36 godzin. Model regionalny był liczony na siatce z obroconym biegunem, tak że równik przecinał środek dome-

ny obliczeniowej. Siatka miała rozmiar 92×92 w poziomie i 30 poziomów wysokościowych. Oczko siatki było kwadratem o boku 0,15 stopnia, zatem rozdzielczość pozioma wynosiła około 17 km. Współrzędna pionowa była hybrydowa. Poziomy modelu podążały za powierzchnią terenu do pewnej wysokości, a pozostałe poziomy były na stałej wysokości nad poziomem morza. Równania modelu były w przybliżeniu hydrostatycznym.

Do połowy 1996 roku trwały testy modelu, które obejmowały okres 25-28 stycznia 1993 roku. Wyniki eksperymentu były obiecujące, następnym krokiem więc było testowe uruchomienie modelu w trybie quasi-operacyjnym. Model regionalny nad Polską był zasilany przez model liczony w Met Office. Dane brzegowe i początkowe były codziennie przesyłane z Met Office do ICM łączem internetowym. Wyniki modelu publikowano w Internecie, na specjalnie do tego stworzonej stronie. Test w trybie quasi-operacyjnym trwał trzy miesiące (od listopada 1996 do stycznia 1997). Prognoza była liczona raz na dobę, na 36 godzin do przodu.

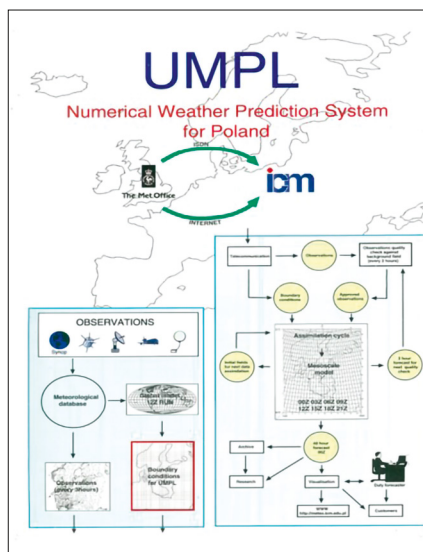
Eksperyment pokazał techniczne możliwości uruchomienia w IMGW systemu numerycznych prognoz we współpracy z part-

³ B. Jakubiak, 1996. System numerycznych prognoz pogody IMGW w oparciu o kod źródłowy Unified Model modelu brytyjskiego Meteorological Office, [w:] Materiały na Kolegium w Podkowie Leśnej 8 sierpnia 1996 oraz na sesji Rady Naukowej, 28-29 X 1996.

nerem zagranicznym przy wykorzystaniu infrastruktury ICM. W tym czasie w ICM został już zainstalowany nowy komputer Cray YMP-4E, na którym również uruchomiono model UM. Mimo tych pozytywnych doświadczeń nie doszło do dwustronnego porozumienia między Met Office i IMGW. Jednym z powodów fiaska budowy systemu NWP z wykorzystaniem modelu UM były zapewne koszty licencyjne, jakie musiałyby ponieść Instytut. W tej sytuacji dyrektor ICM, prof. Marek Niezgodka, angażując zespół z IMGW, podjął się liczenia prognoz numerycznych we współpracy z Met Office.

Maj 1997, ponowne uruchomienie modelu. Po modyfikacji ustawień Unified Model zaktualizowano do wersji 4.0. Domena obliczeniowa modelu została powiększona o obszar Bałtyku. Nowa siatka obliczeniowa miała rozmiar 144×116 przy dotychczasowej rozdzielczości 0,15 stopnia oczka siatki. Model został uruchomiony wraz z asymlacją danych obserwacyjnych, dzięki czemu wykorzystywał on własną prognozę, zmodyfikowaną w wyniku asymlacji jako pole startowe. Przyczyniło się to do poprawy wyników prognoz. Dane obserwacyjne były dostarczane osiem razy na dobę, przez co model był uruchamiany ośmiokrotnie w ciągu doby w cyklu asymlacyjnym. Długość prognozy została wydłużona do 48 godzin. Dostarczane warunki brzegowe pochodziły z modelu regionalnego z godziny 18 UTC, który był drugim modelem w kaskadzie modeli. Model ten był zagnieżdżony w modelu globalnym N144 z godziny 12 UTC. Otrzymywane warunki brzegowe zawierały prognozę od T+3 do T+54 z krokiem 3-godzinny, aby pokryły okres asymlacji danych zarówno od 3. godziny przed nominalnym startem prognozy, jak i 48-godzinna prognozę.

W lutym następnego roku zmieniono model prowadzący. Został nim model globalny N216 na siatce 432×325 o rozdzielczości około 60 km na średnich szerokościach geograficznych. Warunki brzegowe zostały wydłużone o 24 godziny, by ewentualne problemy z transmisją nie blokowały policzenia kolejnej prognozy. Dostarczano prognozę od T+9 do T+84 z krokiem 3-godzinny. Te wydłużone warunki brzegowe pozwoliły na stopniowe uruchamianie w następnych miesiącach prognoz startujących o innych niż 00 UTC godzinach.



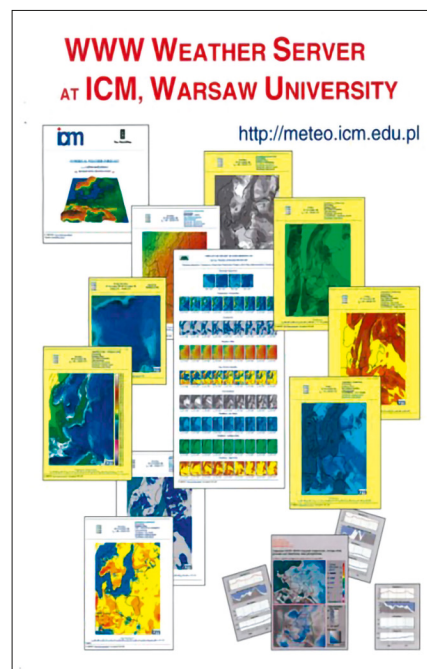
Poster z 1998 roku. Na schemacie widoczne jest zapasowe łącze telefoniczne (ISDN) ICM z Met Office (w tym czasie przepustowość łączy internetowych do Met Office była bardzo słaba).

Publikacja wyników numerycznej prognozy pogody była w owym czasie nowością. Początkowo dostępne były tylko mapy wybranych elementów pogody. Później serwis uzupełniono o pierwsze w Polsce meteorogramy, a także mapy przeglądowe pokazujące kilka elementów jednocześnie. Został udostępniony film w formacie MPEG pokazujący prognozę godzinna po godzinie. Prognoza była publikowana w „Gazecie Wyborczej” i prezentowana w formie dynamicznej w TVP, w programie śniadaniowym „Kawa czy Herbata”.

Współpraca z IMGW. Od początku istnienia zespołu meteo w ICM kontakty z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej były podtrzymywane z różną intensywnością. Mimo że potencjalnie działalność obu jednostek mogłaby być komplementarna, a prognozy z modelu UM wykorzystywane przez IMGW do bieżącej oceny sytuacji meteorologicznej, porozumienie w tej kwestii zawarto dopiero w grudniu 2016 roku. Na przełomie wieków działalność zespołu meteo postrzegana była raczej jako konkurencja w zakresie prognozowania meteorologicznego. Jednocześnie przedstawiciele IMGW byli zwolennikami stosowania francuskiego modelu ALADIN, z którego użyciem opracowano pierwsze numeryczne prognozy

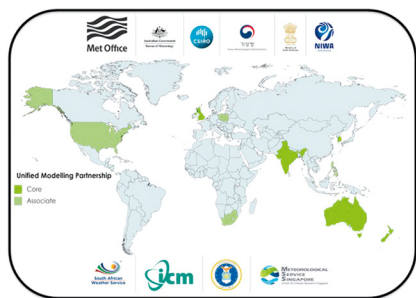


Pierwsza strona internetowa, na której publikowano wyniki prognoz modelem UM. Na stronie widnieje jeszcze logo IMGW (1997).



Poster z 1998 roku prezentujący zawartość strony WWW. Były już na niej dostępne meteorogramy i zbiorcze mapy. Zobrazowania dokonywano przy użyciu programów Vis5d i AVS Express.

w Instytucie w 1998 roku. ICM UW kontynuowało prace na modelu brytyjskim. Z uwagi na to, że IMGW nie zgadzało się, aby ICM UW korzystało ze sformułowania „prognoza pogody”, zespół meteo.pl stosował nazewnictwo „numeryczna prognoza pogody” („numeryczna prognoza pogody” nie miała akceptacji merytorycznej synoptyków IMGW).



Konsorcjum Unified Model Partnership.
 Członkowie: Bureau of Meteorology/CSIRO (Australia), MoES/NCMRWF (Indie), NEA/MSS/CCRS (Singapur), NIWA (Nowa Zelandia), KMA (Korea Południowa), Met Office (Wielka Brytania).
 Członkowie stowarzyszeni: ICM (Polska), SAWS (Republika Południowej Afryki), US Air Force (USA).

Pod koniec lat 90. XX wieku w Polsce wystąpiły silne opady powodujące powódzie, skutkujące ofiarami w ludziach i ogromnymi stratami materialnymi. Niektóre NPP opracowywane wówczas przez ICM UW charakteryzowały się wysoką sprawdzalnością, inne się nie sprawdziły. Po jednej z takich nietrafionych prognoz IMGW zamieścił komunikat podpisany przez zastępcę dyrektora IMGW ds. prognoz meteorologicznych Ryszarda Klejnowskiego (obecnie jednego z synoptyków w ICM), w którym „informuje, że nie bierze odpowiedzialności za rzeczywiste i potencjalne skutki prognoz i ostrzeżeń opracowywanych i przekazywanych przez [...] ICM UW władzom państwowym, samorządowym i instytucjom oraz publikowanych w mediach i Internecie”⁴. Niewątpliwie podejmowane ówczesnie przez ICM próby zainteresowania władz państwowych budową „systemu wczesnego ostrzegania, w którym informacje uzyskane z modelu pomogąłyby w podejmowaniu decyzji” – jak pisał w odpowiedzi na komunikat IMGW dyrektor ICM UW – nie były dobrze przyjmowane przez dyrekcję Instytutu i skutkowały brakiem współpracy pomiędzy jednostkami przez kolejnych kilkanaście lat.

Nietrafione prognozy stały się impulsem do uzupełnienia serwisu o komentarz synoptyka. W zamyśle miała to być syno-

ptyczna weryfikacja opublikowanej numerycznej prognozy pogody, jednak z czasem komentarz ewoluował w kierunku synoptycznej oceny aktualnej i prognozowanej pogody. Obecnie komentarz jest nie tylko szerszą analizą prognozy, ale również cennym źródłem wiedzy na temat zjawisk meteorologicznych.

W grudniu 2016 roku ówcześni dyrektorzy ICM UW i IMGW-PIB, prof. Marek Niezgódka i dr Przemysław Łagodzki, podpisali porozumienie dotyczące współpracy „w celu stałego dążenia do poprawy jakości osłony meteorologicznej”. Na bazie tego porozumienia ICM UW dostarcza do IMGW-PIB bieżące prognozy z modelu UM o rozdzielczości 4 km w trybie operacyjnym w celu wykorzystania prognoz do statutowych działań Instytutu.

Model UM w XXI wieku. W następnych latach prognoza była opracowywana częściej niż raz na dobę i ostatecznie – od lipca 2001 roku – przygotowywano ją cztery razy na dobę. Na początku 2003 roku jej długość została wydłużona do 60 godzin. Model UM w wersji hydrostatycznej, z ciągłą asymilacją danych, był eksploatowany w ICM do 7 października 2008 roku. W chwili wyłączenia modelu UM był on w przestarzałej wersji. W Met Office już w 2002 roku został uruchomiony model w wersji 5.x (operacyjna wersja to 5.2), w którym wprowadzono „nową dynamikę” (new dynamics). Była to dynamika semi-Lagrange’owska w sformułowaniu niehydrostatycznym. Jednocześnie w modelu zmieniono wiele parametryzacji fizycznych.

W ICM model z nową dynamiką uruchomiono w wersji 6.0, a później w wersji 8.5. Najistotniejszą modyfikacją konfiguracji była zmiana rozdzielczości modelu z 17 km na 4 km i zwiększenie rozdzielczości w pionie do 38 poziomów. System liczenia prognoz został całkowicie przebudowany. Wyłączona została asymilacja danych obserwacyjnych, co spowodowało, że każda prognoza wymagała dostarczenia pola startowego przez model prowadzący. Generacja warunków brzegowych została przesunięta z Met Office do ICM. Warunek początkowy i brzegowy użyty do symulacji pochodził z tej samej prognozy z modelu prowadzącego.

Poprzednio warunki brzegowe były zmieniane raz na dobę, teraz były dostarczane cztery razy na dobę. Każda prognoza stała się niezależnym procesem, do którego dane dostarczał model prowadzący uruchamiany w Met Office. Asymilacja danych była prowadzona jedynie do modelu prowadzącego. Takie ustawienie obliczeń miało negatywny wpływ na jakość pierwszych kilku-, kilkunastu godzin prognozy, zwłaszcza na poprawność prognozowania opadów konwekcyjnych. W 2012 roku model UM zaczął używać dodatkowych pól w przeznaczonej mu rozdzielczości. Są to temperatura wody (SST, sea surface temperature), pokrywa lodowa morza, pokrywa śnieżna lądu i parametry wilgotnościowe gruntu. Dane te pochodzą z modeli liczonych w Met Office – OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) i SURF (Land Surface Data Assimilation). W takim ustawieniu model działa do dzisiaj.

Model dostarczający dane do narzędzia ICM zmieniał się w zależności od rozdzielczości modelu globalnego i zagnieżdżonych w nim modeli regionalnych w Met Office. Poniżej przedstawiono daty uruchomienia modeli globalnych w brytyjskiej służbie wraz z ich rozdzielczościami przestrzennymi:

- 2005, model globalny N320 na siatce 640×480 (~40 km) i 50 poziomach;
- 2009, zmiana liczby poziomów na 70;
- 2010, model N512 na siatce 1024×769 (~25 km);
- 2014, model N768 na siatce 1536×1152 (~17 km);
- 2017, model N1280 na siatce 2560×1920 (~10 km), działający w tej rozdzielczości do chwili obecnej.

Model UM w ICM prowadził model globalny albo model regionalny NAE (North Atlantic & European) liczony początkowo w rozdzielczości 20 km, a od 2005 roku w rozdzielczości 12 km. Obecna konfiguracja modelu UM liczonego w ICM jest wzorowana na EURO4, który ma rozdzielczość około 4 km (podobną do rozdzielczości modelu w ICM) i jest uruchamiany w Met Office również bez asymilacji. Kolejnym modelem UM uruchomionym w ICM był model w nowej rozdzielczości 1,5 km w środku domeny obliczeniowej,

⁴ „Gazeta Wyborcza”, 29 lipca 1998.

4 km na jej brzegu i 38 poziomach wysokościowych. Siatka modelu ma rozmiar 1472×1024 . Domena obliczeniowa nowego modelu jest taka sama jak modelu 4 km. Model także jest zasilany tymi samymi danymi, z wyjątkiem dodatkowych pól, które otrzymuje we właściwej sobie rozdzielczości. Model na zmiennej siatce jest obecnie liczony operacyjnie dwa razy na dobę na 78 godzin do przodu dla startu w godzinach 00 i 12 UTC.

W 2014 roku UM otrzymał nowe jądro dynamiczne (UM 10.x) - tzw. Even New Dynamics - ENDGame. W ICM nowa wersja weszła do użytku w 2017 roku. Jednocześnie modele UM (zarówno 4 km, jak i 1,5 km) zaczęły być liczone w rozdzielczości pionowej 70 poziomów przy zachowanej wysokości atmosfery do 40 km. Latem 2019 roku została wydłużona długość prognozy. Obecnie model w rozdzielczości 4 km jest liczony dwa razy na dobę (o godzinie 00 i 12 UTC) na 120 godzin. Wyniki wydłużonych prognoz dostępne są na stronie mapy.meteo.pl.

Model UM jest używany jako operacyjny przez wiele służb meteorologicznych i innych. Jest on uruchamiany zarówno w wersji globalnej, jak i na ograniczonym obszarze (Limited Area Model, LAM) lub tylko LAM (tak jak w ICM). W wypadku wersji LAM modelem prowadzącym z reguły jest również model UM (w wersji globalnej), choć może być stosowany inny model, np. ECMWF (tak jak ma to miejsce w Singapurze w MSS). Organizacje używające model UM są członkami konsorcjum Unified Model powołanego przez Met Office⁵. Od 2015 roku ICM jest jego członkiem stowarzyszonym (associate partner). ◀



⁵ <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/collaboration/unified-model/partnership>.

Polska na mapie historii prognoz długoterminowych

Krystyna Pianko-Kluczyńska, Krystyna Konca-Kędzińska, Adam Jaczewski, Alan Mandal, Radosław Drożdź, Marcin Wdowikowski,
Zofia Baldysz, Weronika Wrońska, Karina Kózka, Grzegorz Nykiel, Tomasz Strzyżewski, Marta Gruszczyńska
IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego, Zakład Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych

Prognozowanie długoterminowe stanowiło jedno z największych wyzwań XX wieku. Najtrudniejsze zadanie przypadło tym, którzy zajmowali się obszarami położonymi w strefach klimatycznych o cechach przejściowych lub pośrednich, czyli np. polskim naukowcom. Polska jest podręcznikowym przykładem klimatu umiarkowanego ciepłego przejściowego, charakteryzującego się bardzo dużą zmiennością warunków pogodowych.



foto: Daria Tumanova on Unsplash

Pierwsze polskie prognozy zostały opracowane w latach 50. ubiegłego wieku, gdy do przewidywania pogody zaczęto używać programów komputerowych. W Państwowym Instytucie Hydrologiczno-Meteorologicznym (PIHM), dziś IMGW-PIB, powołano w 1956 roku Zakład Długoterminowych Prognoz Pogody, którym kierował Józef Lityński. Rok później w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN skonstruowano pierwszy w Europie analogowy analizator harmoniczny (AAH). Projektem kierował inż. Jacek Karpiński, wybitny elektronik i informatyk. Analizator składał się z 650 lamp elektronowych, miał wymiary 1,5×2 m i wykonywał obliczenia dużych zbiorów danych z wykorzystaniem analizy harmonicznej Fouriera. Urządzenie umożliwiało tworzenie statystycznych modeli długoterminowych, za pomocą których przygotowywano prognozy średniej miesięcznej temperatury powietrza i sumy opadów atmosferycznych dla Warszawy. To był przełom, poparty licznymi opracowaniami naukowymi. W 1965 roku w raporcie Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO) opublikowano artykuł „Statistical methods in long-range weather forecasting” (Statystyczne metody w długoterminowym prognozowaniu pogody) autorstwa Zdzisława Kaczmarska i Józefa Lityńskiego, zawierający opis analizatora i efektów jego obliczeń.

Kluczem modele statystyczne. Od początku działalności Zakładu Długoterminowych Prognoz Pogody zespoły meteorologów, klimatologów, geofizyków i matematyków poznawały tajniki procesów zachodzących w atmosferze i mających wpływ na pogodę w Polsce. Przy opracowaniu algorytmów do modeli statystycznych opierano się na metodzie prognozowania analogowego. Ta metoda przewidywania pogody bazuje na założeniu, że podobne procesy atmosferyczne prowadzą do podobnych skutków, a porównanie aktualnych procesów atmosferycznych z procesami zaistniałymi w przeszłości umożliwia przygotowanie prognozy na pewien okres, np. miesiąca lub sezonu.

Kluczową rolę w stosowanych metodach odgrywał dobór odpowiednich zmiennych opisujących procesy atmosferyczne zachodzące w czasie poprzedzającym okres prognozowany (predyktorów) i zmiennych opisujących przebieg pogody w okresie prognozowanym (predyktandów). Najczęściej za predyktory przyjmowano średnie miesięczne i sezonowe



Jacek Karpiński przy maszynie AAH (fot. Lucjan Fogiel).

we, dobowe wartości wskaźników cyrkulacji atmosferycznej i ciśnienia atmosferycznego w wybranych punktach Europy i północnego Atlantyku, temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie, a także pola geopotencjału 500 hPa i topografii względnej między 500 hPa a 1000 hPa w węzłach siatki gridowej na półkuli północnej. Predyktandami były średnia miesięczna temperatura powietrza i suma opadów atmosferycznych w Warszawie. Doboru predyktorów i predyktandów dokonywano na podstawie licznych badań przeprowadzanych w latach 60. i 70. m.in. przez Marię Wodzińską, Zdzisława Kaczmarska, Jana Malickiego i Albina Cisaka. Bezpośredni wkład do tych badań wniosły dwa systemy klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej opracowane przez Blanę Osuchowską-Klein i Józefa Lityńskiego.

Na podstawie pozyskanej wiedzy i dzięki szybko rozwijającym się technikom obliczeniowym pod koniec lat 70. Zakład Długoterminowych Prognoz Pogody zapoczątkował opracowywanie miesięcznej i sezonowej prognozy średniej temperatury powietrza i sumy opadów atmosferycznych dla większej liczby punktów, tj. dla 18 miast w Polsce (wcześniej tylko dla Warszawy). Był to niewątpliwie kolejny przełom w doskonaleniu prognoz dłu-

goterminowych. Rozpoczęto także badania nad nowymi modelami, m.in. w latach 80. uruchomiono spektralny model hemisferyczny dla półkuli północnej z wykorzystaniem nowoczesnego komputera serii Odra. W latach 90. podjęto próbę zastosowania sieci neuronowych i teorii chaosu. Na początku XXI wieku typy cyrkulacji atmosferycznej według Lityńskiego ponownie znalazły zastosowanie w modelach prognostycznych. Prace te wiązały się z udziałem w projekcie dotyczącym harmonizacji i zastosowań klasyfikacji typów pogody w Europie w ramach Europejskiego Programu Współpracy w Dziedzinie Badań Naukowo-Technicznych (COST ACTION 733, 2014) i zaowocowały aktualizacją typów cyrkulacji przeprowadzoną przez Krystynę Pianko-Kluczyńską.

Wielki krok w XXI wiek. Na początku obecnego stulecia Zakład Długoterminowych Prognoz Pogody, którym po Józefie Lityńskim kierowali kolejno Maria Wodzińska, Bogumił Jakubiak i Stanisław Ryszard Kozieł, przestał istnieć, a jego obowiązki przejęło Centralne Biuro Prognoz Meteorologicznych. W 2009 roku ponownie utworzono komórkę organizacyjną pod nazwą Zakład Modelowania Klimatycznego i Prognoz Sezonowych (jej kierownikiem

WARTO WIEDZIEĆ

COST – The European Cooperation in Science and Technology (Europejski Program Współpracy w Dziedzinie Badań Naukowo-Technicznych), <https://www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka/europejski-program-wspolpracy-w-dziedzinie-badan-naukowo-technicznych-cost>, <https://www.cost.eu/>.

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody), <https://www.ecmwf.int/>.

IMGW-TWS – Numeryczno-statystyczny model prognostyczny, opracowany i rozwijany w IMGW-PIB. Opiera się na zaawansowanych metodach logiki rozmytej. Do obliczeń używane są dane z reanaliz NCEP/NCAR, modelu GFS 1° i ze stacji meteorologicznych IMGW-PIB. Model pozwala prognozować zakresy minimalnej i maksymalnej temperatury powietrza, liczbę dni z opadem i liczbę dni z opadem zawierającym śnieg, jakie powinny wystąpić w każdej z trzech kolejnych dekad, w okresach prognostycznych zaczynających się od 1., 11. i 21. dnia miesiąca. Prognoza jest wykonywana dla 87 stacji meteorologicznych w Polsce. Obecnie IMGW-PIB udostępnia wyniki dla 13 stacji górskich w serwisie gory.imgw.pl.

IMGW-Reg – Numeryczno-statystyczny model prognostyczny, opracowany i rozwijany w IMGW-PIB. Prognozuje wartość średniej miesięcznej temperatury powietrza i sumy miesięcznej opadów wraz z odchyleniem standardowym (+/-) prognozowanej wartości. Model używa metody regresji cząstkowej, za predyktory przyjmując pola kwantyli wybranych zmiennych meteorologicznych z reanaliz NCEP/NCAR. Prognoza jest liczona dla 20 wybranych miast w Polsce. Wyniki modelu są wykorzystywane przy opracowywaniu eksperymentalnej prognozy długoterminowej temperatury i opadu.

IMGW-Bayes – Statystyczny model prognostyczny, opracowany i rozwijany w IMGW. Opiera się na teorii prawdopodobieństwa i twierdzeniu Bayesa (nאיwny klasyfikator Bayesa). Prognozowane jest prawdopodobieństwo wystąpienia miesięcznej średniej temperatury powietrza i miesięcznej sumy opadów w klasach: powyżej normy, w normie i poniżej normy (wyniki modelu nie zawierają informacji, o ile prognozowana wartość jest niższa od dolnej granicy normy lub wyższa od górnej granicy normy). Do obliczeń używane są dane z reanaliz NCEP/NCAR, które dotyczą wybranych pól meteorologicznych z różnych poziomów troposfery i stratosfery. Prognoza jest wykonywana dla 87 stacji meteorologicznych w Polsce. Wyniki modelu wykorzystuje się przy opracowywaniu eksperymentalnej prognozy długoterminowej temperatury i opadu.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Narodowa Służba Oceaniczna i Atmosferyczna), <https://www.noaa.gov/>.

WMO – World Meteorological Organization (Światowa Organizacja Meteorologiczna), <https://public.wmo.int/en>.

WRF-CFS – Długoterminowy deterministyczny model pogody wykorzystujący numeryczny model pogody WRF (Weather Research and Forecasting Model) i wyniki modelu globalnego CFS (Climate Forecast System), <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>, <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/climate-forecast-system>.



został Adam Jaczewski), a w 2015 roku kompetencje w zakresie prognoz długoterminowych przejęło Centrum Meteorologicznej Osłony Kraju. Wraz z rozwojem technik numerycznych i szerszym dostępem do informacji prognostycznej z różnych światowych ośrodków meteorologicznych zmieniały się metody prognostyczne. W metodach statystycznych zaczęto korzystać z wyników modeli numerycznych. W 2016 roku Krystyna Pianko-Kluczyńska opracowała statystyczny model częściowo probabilistycznych prognoz 30-dniowych IMGW-TWS, wykorzystujący na wejściu prognozy numeryczne GFS. Model, opierając się na zaawansowanych metodach logiki rozmytej, prognozuje prawdopodobieństwo wystąpienia klas: poniżej normy, w normie i powyżej normy dla średniej temperatury, sumy opadów i liczby dni z opadem dla całego okresu prognostycznego, a także - dla każdej z trzech kolejnych dekad miesiąca - zakresy minimalnej i mak-



fol. Pierre van Combrughe on Unsplash

symalnej temperatury powietrza, liczbę dni z opadem i liczbę dni z opadem zawierającym śnieg. W 2018 roku powstał wiązkowy model statystyczny IMGW-Reg autorstwa Krystyny Koncy-Kędzierskiej. Z wykorzystaniem metody regresji cząstkowej przewiduje on średnią miesięczną temperaturę powietrza, sumę opadów atmosferycznych i liczbę dni z opadem do sześciu miesięcy w przód. W tym samym roku Pianko-Kluczyńska zaproponowała pierwszą wersję probabilistycznego, statystycznego modelu IMGW-Bayes, który korzysta z teorii prawdopodobieństwa i twierdzenia Bayesa (nauwicy klasyfikator Bayesa). Prognozuje się w nim, do maksymalnie pięciu miesięcy w przód, prawdopodobieństwo wystąpienia miesięcznej średniej temperatury powietrza, miesięcznej sumy opadów i liczby dni z opadem w trzech klasach: powyżej normy, w normie i poniżej normy. Kolejna, wiązkowa wersja modelu IMGW-Bayes została wdrożona w 2021 roku.

W 2020 roku w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej utworzono Centrum Modelowania Meteorologicznego, którego dyrektorem został Mariusz Figurski. W strukturach tej jednostki, pod kierownictwem Marty Gruszczynskiej, powołano Zakład Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych, który realizuje cele związane m.in. z opracowaniem pierwszego wiązkowego numerycznego modelu długoterminowego dla obszaru Polski (model WRF-CFS), rozwijaniem obecnych modeli statystyczno-numerycznych (IMGW-TWS, IMGW-Reg) i statystycznych (IMGW-Bayes), analizą sprawdzalności i możliwości wykorzystywania wyników globalnych modeli długoterminowych (modele ECMWF i NOAA), wypracowaniem nowego sposobu prezentacji prognoz, a także wdrażaniem najnowszych rozwiązań technologicznych, np.

multimodelu integrującego wiele modeli z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. ◀

Bibliografia

- Cisak A., Wodzińska M., 1967, Zależności prognostyczne między temperaturą w Polsce a rozkładem temperatury na półkuli północnej (dla okresu zimowego), *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, 3-4 (71-72), 49-54.
- Cisak A., Wodzińska M., 1970, Wykorzystanie procesów atmosferycznych w długoterminowych prognozach pogody.
- COST ACTION 733, 2014, Harmonization and Applications of Weather Types Classifications for European Regions, <http://cost733.geo.uni-augsburg.de/cost733wiki>.
- Kaczmarek Z., 1969, O metodach doboru zespołu zmiennych prognozujących, *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, 3 (79), 11-21.
- Kaczmarek Z., Lityński J., 1964, Statistical methods in long-range weather forecasting, *WMO Technical Note*, 66, 263-273.
- Konca-Kędzierska K., 2018, Application of partial regression methods to long range forecasts, *Przegląd Geofizyczny*, 4, 353-362.
- Kozielec R., 1997, Doskonalenie operacyjnych prognoz meteorologicznych. Temat M-1: syntetyczny opis wykonanych prac, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Malicki J., 1962, Przyczynek do opracowania długoterminowej prognozy surowości zimy w rejonie Bałtyku, [w:] 40-lecie Polskiej Służby Synoptycznej.
- Osuchowska B., 1962, O wschodnich typach cyrkulacji w zimie, [w:] 40-lecie Polskiej Służby Synoptycznej.
- Pianko-Kluczyńska K., 2015, Związek między cyrkulacją atmosferyczną według Lityńskiego i sezonowymi opadami w Polsce, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 24 (2), 167-177.
- Wodzińska M., 1962, Miesięczne i sezonowe typy pogody, [w:] 40-lecie Polskiej Służby Synoptycznej.
- Wodzińska M., 1974, Opracowanie podstaw do 30-dniowej prognozy pogody sporządzonej co dekadę, IMGW, Zakład Prognoz Meteorologicznych Długoterminowych.
- Wodzińska M., 1976, Miesięczna prognoza temperatury powietrza i opadów atmosferycznych dla centralnej Polski na podstawie rozkładów, *Wiadomości Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 1, 31-44.
- Wodzińska M., 1979, Postać predyktanda w sezonowej prognozie temperatury powietrza w Polsce, *Przegląd Geofizyczny*, 24 (2), 159-163.

Konsorcjum COSMO w IMGW-PIB

Andrzej Wyszogrodzki, Jan Parfiniewicz, Andrzej Mazur, Michał Ziemiański, Grzegorz Duniec, Witold Interewicz,
Marek Łazanowicz, Joanna Linkowska, Zbigniew Piotrowski, Bogdan Rosa, Damian Wójtak
IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego, Zakład Prognoz Numerycznych COSMO
Adam Jacewski | IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego, Zakład Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych

W latach 90. XX wieku nastąpiły zasadnicze zmiany dotyczące koncepcji rozwoju i zastosowania metod prognozowania pogody w IMGW-PIB. Instytut w obliczu tych wyzwań dokonał tytanicznego wysiłku i w ciągu zaledwie jednej dekady dzięki zaangażowaniu, wiedzy i doświadczeniu pracowników stał się pełnoprawnym członkiem międzynarodowej społeczności modelarzy pogody.

Prowadzone przez lata prace własne ekspertów IMGW-PIB zostały zwieńczone uruchomieniem w 1994 roku modelu RADMET, będącego narzędziem do interpretacji wielkoskalowych prognoz numerycznych dostępnych przez sieć GTS. Przy wdrażaniu tego systemu pracował samodzielny zespół w składzie: Jan Parfiniewicz, Andrzej Kadłubowski, Leszek Herman-Iżycki, Marek Łazanowicz i Andrzej Chmielewski. RADMET był dostosowany do dostępnych w tym czasie komputerów klasy PC i nie mógł konkurować z innymi modelami prognostycznymi rozwijanymi w człołowych europejskich ośrodkach, takich jak brytyjski Met Office, Météo-France czy DWD w Niemczech.

Z chwilą uruchomienia w Interdyscyplinarnym Centrum Modelowania (ICM) UW (1993/1994) superkomputera Cray Y-MP/EL98 podjęto decyzję o aplikacji na tym systemie nowoczesnego modelu lokalnego. Wybór padł na model Met Office. Zadanie to zostało wykonane przez Bogumiła Jakubiaka (ówczesnego kierownika Zakładu Prognoz Długoterminowych) i Leszka Herman-Iżyckiego. Równolegle w Krakowie zespół pod kierunkiem Marka Jerczyńskiego uruchomił francuski model lokalny (ARPEGE/ALADIN), którego obliczenia były prowadzone w centrum komputerowym Cyfronet. W wyniku braku dwustronnego porozumienia pomiędzy IMGW a Met Office (jednym z powodów były wysokie koszty licencyjne) model UK-Met został w 1997 roku przejęty przez ICM, gdzie jest stosowany do tej pory.

SMOK i konsorcja numerycznych modeli prognoz pogody.

W wyniku powodzi stulecia z 1997 roku IMGW znalazł się w krytycznej sytuacji niedoboru wiarygodnych modeli prognostycznych, mogących w przyszłości efektywnie przeciwdziałać podobnym katastrofom naturalnym. W efekcie w 1999 roku, w ramach nowego projektu SMOK (System Monitoringu i Osłony Kraju) współfinansowanego z funduszy Banku Światowego, zaplanowano implementację modelu niehydrostatycznego nowej generacji. W tym czasie, tj. pod koniec lat 90., powstało w Europie kilka międzynarodowych konsorcjów rozwijających modele prognoz pogody, np. HIRLAM, ALADIN, UKMO. Konsorcja te wymieniały się doświadczeniami na spotkaniach SRNWP (Short Range Numerical Weather Prediction) odbywających się pod agendą EUMETNET.

Na sympozjum SRNWP w Offenbach (25-27 października 1999), w którym udział wzięli Jan Parfiniewicz i Leszek Herman-Iżycki (reprezentujący już wtedy ICM), nawiązano kontakt z Detlewem Majewskim, kierującym zespołem numerycznego modelowania pogody w DWD. Organizacja ta była wówczas zainteresowana rozbudową własnego konsorcjum NWP i wyraziła zgodę na dostęp IMGW do produktów modelu globalnego GME i modelu prognostycznego o dużej rozdzielczości (HRM/DWD) sprzężonego z węzłem telekomunikacyjnym Instytutu. System ten został wdrożony w IMGW przez Jana Parfiniewicza, Marka Łazanowicza i Jana Orłowskiego. Otrzymano także pakiet graficzny GrADS (wersja brazylijska, w języku portugalskim) umożliwiający zdekodowanie wyników modelu HRM, uzyskiwanych w formacie GRIB, i otrzymanie (jak na ówczesne możliwości) wysokiej jakości produktów graficznych.

W 2000 roku podczas wizyty Majewskiego w Polsce uzgodniono i podpisano umowę dwustronną pomiędzy DWD i IMGW - „Agreement on the delivery/release of simulation software development at the DWD for scientific/operational duty purposes, 21 March 2000”. Równolegle trwały prace w ramach projektu SMOK, polegające na instalacji nowego superkomputera (SGI 3800) i wdrożeniu numerycznego mezoskalowego modelu prognostycznego LM. Ten został uruchomiony jesienią 2001 roku, a w 2002 roku wdrożono go do pracy operacyjnej w Instytucie.

IMGW-PIB członkiem COSMO. Konsorcjum określane jako COSMO formalnie powstało w 1999 roku - memorandum w sprawie międzynarodowej współpracy naukowej w dziedzinie modelowania niehydrostatycznego zostało podpisane w marcu tego roku przez dyrektorów krajowych służb meteorologicznych: MeteoSwiss (Szwajcaria), UGM/ARPA-SIM (Włochy), HNMS (Grecja) i DWD (Niemcy). Ostateczna umowa regulująca współpracę, a także wewnętrzne i zewnętrzne relacje konsorcjum została podpisana wiosną 2001 roku.

Ogólnym celem COSMO jest opracowanie, rozwój i utrzymanie niehydrostatycznego modelu prognoz meteorologicznych wysokiej rozdzielczości, który ma być używany zarówno do zastosowań operacyjnych, jak i badawczych przez kraje członkowskie



konsorcjum. Początkowo opierało się ono na modelu Lokal-Modell (LM) DWD z odpowiednim systemem asymilacji danych. Partnerzy konsorcjum są zobowiązani do aktywnego wkładu w rozwój modelu poprzez zapewnienie zasobów kadrowych i udziału we współpracy badawczej. Od każdego partnera wymagana jest aktywność na poziomie minimum dwóch pełnych etatów w obszarach badawczo-rozwojowych.

COSMO od momentu powstania było otwarte na współpracę z innymi zespołami rozwijającymi modele prognoz pogody, instytutami badawczymi i uniwersytetami, jak również na akces nowych członków. Korzystając z tej sposobności, we wrześniu 2000 roku IMGW złożył formalny wniosek o członkostwo. W uroczystości podpisania deklaracji, która odbyła się 4 lipca 2002 roku, wzięli udział przedstawiciele instytucji członkowskich COSMO: Massimo Capaldo, przewodniczący komitetu sterującego i zastępca dyrektora włoskiego Głównego Urzędu Meteorologii (UGM), Udo Gärtner, prezes Niemieckiej Służby Pogodowej (Deutscher Wetterdienst, DWD), Gerhard Adrian, kierownik Działu Badawczo-Rozwojowego DWD, Chryssoula Gagaoudaki, zastępca dyrektora Greckiej Narodowej Służby Meteorologicznej (HNMS), i Georges Sakellarides, szef Działu Badawczo-Rozwojowego HNMS. Ze strony polskiej przedstawicielem Państwowego Komitetu Badań Naukowych był Jan Calak. W skład zespołu odpowiedzialnego za współpracę



w ramach konsorcjum w pierwszych latach członkostwa wchodził Jan Parfiniewicz, Zbigniew Sorbjan, Witold Interewicz, Marek Łazanowicz, Katarzyna Starosta, Błażej Krzemiński, Joanna Linkowska, Jerzy Achimowicz i Andrzej Mazur. W kolejnych latach konsorcjum nadal intensywnie się rozwijało na arenie międzynarodowej, a do jego struktur dołączyły kolejne kraje: Rosja, Rumunia i Izrael.

Prace w strukturach konsorcjum.

Pracownicy IMGW-PIB są zobowiązani do aktywnego wspierania działań konsorcjum, zarówno w prowadzonych na bieżąco projektach naukowo-badawczych, jak i w formalnych strukturach organizacyjnych, takich jak grupy robocze (working groups, WG) i komitet sterujący (steering committee, STC). Delegowani pracownicy IMGW, a w szczególności Zakładu COSMO, reprezentowali Instytut w pracach STC: Ryszard Klejnowski/Jan Parfiniewicz/Andrzej Mazur/Zbigniew Sorbjan (do 2006), Michał Ziemiański/Andrzej Mazur (2007-2011), Rafał Bąkowski/Andrzej Mazur (2012-2013), Andrzej Wyszogrodzki/Andrzej Mazur (od 2014).

Podczas spotkania COSMO General Meeting w Rzymie we wrześniu 2011 roku Michał Ziemiański otrzymał z rąk Detleva Majewskiego z DWD „czarodziejską różdżkę” (przezroczystą, plastikową, z metalowymi końcówkami) na znak przejęcia obowiązków

scientific project managera (SPM) w latach 2012-2016. Scientific project manager jest operacyjnym szefem konsorcjum, odpowiedzialnym za nadzór i koordynację realizacji wszystkich projektów naukowych, nadzór nad rozwojem kodu źródłowego modelu, pracą grup roboczych, wkładem poszczególnych organizacji narodowych, wypracowywaniem nowych planów naukowych i wdrożeniowych. Okres od 2012 do 2016 roku był szczególnie interesujący pod tym względem, ponieważ został wówczas wypracowany nowy plan naukowy na lata 2015-2020, związany z docelową strategią zastosowania metod wiązkowych dla krótkoterminowych regionalnych konwekcyjno-skalaowych prognoz pogody. Jednocześnie konsorcjum intensywnie wypracowywało nowe formalne zasady swojego funkcjonowania, łącznie z umową konsorcyjną, zasadami działania wewnętrznych ciał konsorcjum, regułami rozwoju kodu modelu czy wprowadzaniem narzędzi internetowych do koordynowania prowadzonych prac. Innym istotnym aspektem było włączenie w 2017 roku do COSMO nowego partnera - Izraela. Był więc to czas tyleż ciekawy, co intensywny.

W 2017 roku na dwuletnią kadencję przewodniczącego konsorcjum (chairman of the steering committee) wybrany został reprezentant IMGW-PIB Andrzej Wyszogrodzki. Funkcja ta wiąże się z podejmowaniem kluczowych decyzji odnośnie do



działalności konsorcjum, w tym aprobowaniem nowych projektów naukowych (priority task, priority project) i organizowaniem walnych zgromadzeń krajów członkowskich (COSMO General Meetings). W zakresie kompetencji przewodniczącego leży także aprobowanie wniosków wymagających wykorzystania funduszy, jakie konsorcjum posiada ze sprzedaży praw licencyjnych i usług. Duża część tych funduszy jest przeznaczana na wspomaganie działalności naukowej w postaci refundacji wyjazdów konferencyjnych i opłat za publikacje.



foto: Marek Piwnicki on Unsplash

COSMO General Meetings w Polsce.

Jednym z zobowiązań krajów członkowskich konsorcjum jest coroczna organizacja COSMO General Meetings. Spotkania te służą wymianie informacji o postępach w projektach organizowanych przez grupy robocze, raportowaniu wyników i planowaniu prac na następny rok. Oprócz spotkań grup roboczych (WG) odbywają się spotkania komitetu sterującego (STC). Na sesjach plenarnych prezentowane jest podsumowanie działań w ramach projektów i grup roboczych. Kraje członkowskie ponoszą solidarnie wysi-

łek cyklicznej organizacji spotkań; pierwsze zostało zorganizowane w 1999 roku w Bolonii we Włoszech.

Pierwsze walne zgromadzenie COSMO zorganizowane przez IMGW (a czwarte w ogóle) odbyło się w Warszawie w dniach 25-27 września 2002 roku. Było to niezwykle stymulujące spotkanie z wieloma interesującymi prezentacjami i dyskusjami, na których poruszono szereg tematów związanych z konkretnymi projektami prowadzonymi w ramach konsorcjum. Spotkanie rozpoczął dyrektor IMGW Jan Zieliński wraz

z zastępcą dyrektora IMGW ds. prognoz Ryszardem Klejnowskim. Ze strony COSMO przewodniczący komitetu sterującego Massimo Capaldo przedstawił opis prac STC, natomiast kierownik naukowy (SPM) Günther Doms (DWD) podsumował działania i projekty prowadzone w roku poprzedzającym walne zgromadzenie.

Dziesiąty COSMO General Meeting również został zorganizowany w Polsce. Wydarzenie, które odbyło się 15-19 września 2008 roku w Krakowie, dobrze odzwierciedlało sukces rozwoju i wykorzystania



foto: Philipp Katzenberger on Unsplash

modelu COSMO, a także owocną współpracę w ramach konsorcjum. Na przestrzeni pierwszych 10 lat spotkania systematycznie się rozwijały: od dwudniowego spotkania z listą uczestników mieszczącą się na jednej kartce papieru po całotygodniowe wydarzenia z równoległymi sesjami, w których uczestniczyło nawet 100 osób. Walne zebrania organizowane w krajach członkowskich to także możliwość zacieśniania nieformalnych więzi pomiędzy uczestnikami; dla przykładu od wielu lat żeńska część konsorcjum wybiera Mistera COSMO i wręcza laureatowi tytułu specjalne insygnia. Jest to także okazja do zapoznania się z kulturą i historią danego regionu - i tak podczas spotkania w Krakowie uczestnicy zwiedzili kopalnię soli w Wieliczce.

Siedem lat później, w 2015 roku, COSMO General Meeting zawiązał do Wrocławia. W wydarzeniu, które odbyło się w dniach 7-10 września, wzięło udział około 90 osób, w tym pierwszy raz delegacja kraju aplikującego do konsorcjum - Izraela. Uczestnicy konferencji mieli okazję zwiedzić Zamek Książ w okolicach Wałbrzycha.

KAMIENIE MIŁOWE W ROZWOJU MODELI COSMO W IMGW-PIB

Implementacja i rozbudowa systemu asymilacji danych pomiarowych.

Jedno z zadań projektu KLIMAT, prowadzonego w latach 2008-2012, nosiło nazwę „Rozwój metod prognozowania i systemów ostrzegania przed groźnymi zjawiskami hydrologicznymi i meteorologicznymi oraz wykorzystanie ich do osłony kraju” i było koordynowane przez Michała Ziemiańskiego. Polegało na wdrożeniu do działalności operacyjnej systemu asymilacji danych w modelu regionalnym COSMO. Nad zadaniem pracował zespół w składzie: Andrzej Mazur, Witold Interewicz, Joanna Linkowska, Piotr Drzewiecki, Marek Łazanowicz, Grzegorz Duniec i Rafał Kielar.

System ten opiera się na cyklu analizy i asymilacji danych (CAAD) umożliwiającym poprawę jakości pól analizy używanych do inicjalizacji modelu i prowadzącym do zmniejszenia błędu prognozy w sensie statystycznej weryfikacji. Działanie CAAD polega na cyklicznym wykonywaniu (mię-

dzy głównymi terminami liczenia prognozy modelu COSMO) krótkich, kilkugodzinnych przebiegów prognostycznych z uwzględnieniem lokalnych danych obserwacyjnych i pomiarowych. Pierwszy przebieg jest zasilany polem analizy pochodzącym z modelu globalnego. Kolejne przebiegi CAAD są już zasilane polami analizy pochodzącymi z poprzedniego, krótkiego przebiegu modelu regionalnego i uwzględniającymi najświeższe dane obserwacyjne pochodzące z depesz: PILOT, TEMP, SYNOP, AMDAR, BUOY i SHIP, otrzymanych z sieci GTS/WMO.

W modelu COSMO do asymilacji danych stosuje się metodę zwaną nudgingiem, polegającą na wprowadzeniu do równań modelu dodatkowego członu odpowiedzialnego za wymuszenie (czyli dopasowanie lub dosłownie nagięcie wartości prognozowanych do danych obserwacyjnych). Człon ten jest odpowiednio uzależniony od asymilowanych danych pomiarowych. Zasadniczym elementem umożliwiającym działanie CAAD jest zakupiony komercyjnie system Sky Globus (Basler + Partner GmbH), służący do akwizycji i konwersji danych pomiarowych do formatu BUFR, a następnie do formatu NetCDF, zgodnego z systemem asymilacji danych pomiarowych modeli COSMO.

Budowa nowego rdzenia dynamicznego COSMO-EULAG.

We wrześniu 2008 roku w Krakowie, podczas deszczowego spotkania w ramach COSMO General Meetings, podjęto decyzję o rozpoczęciu nowego programu badawczego w celu wypracowania i implementacji przyszłego rdzenia dynamicznego dla modelu COSMO. Na początku 2009 roku uruchomiono odpowiedni priorytetowy projekt konsorcjum, Conservative Dynamical Core (CDC), silnie wspierany przez nowy zespół IMGW tworzony przez młodych naukowców z Instytutu Geofizyki UW: Marcina Kurowskiego, Zbigniewa Piotrowskiego i Bogdana Rosę, współpracujących z Michałem Ziemiańskim. Podczas długoterminowej zagranicznej wizyty naukowej Zbigniewa Piotrowskiego do zespołu dołączył Damian Wójcik, absolwent fizyki i informatyki UW. Marcin Kurowski natomiast po kilku latach pracy w zespole przeniósł się do Jet Propulsion Laboratory w Pasadenie.

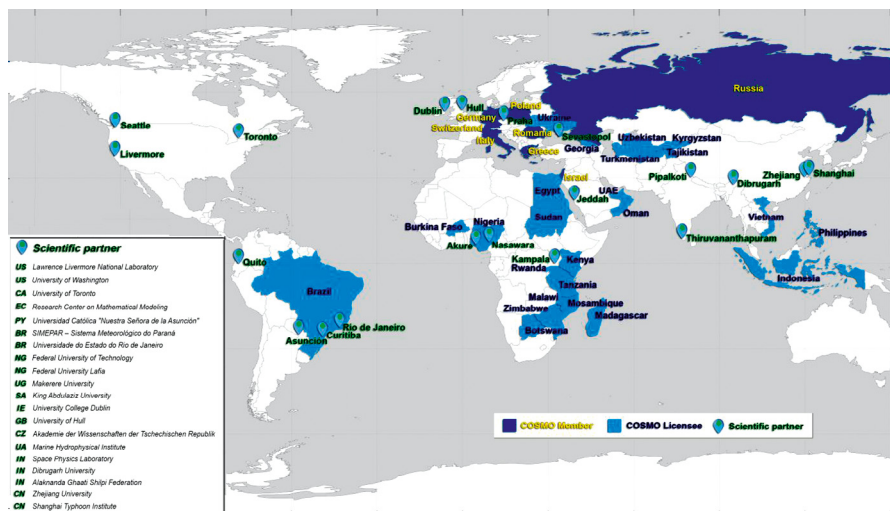
Zespół zajmował się implementacją w modelu COSMO badawczego rdzenia dynamicznego EULAG, opracowanego w Narodowym

Centrum Badań Atmosfery (NCAR) w USA przez Piotra Smolarkiewicza, współpracującego z Wojciechem Grabowskim, Andrzejem Wyszogrodzkiem i wieloma innymi naukowcami. Zespół IMGW korzystał z doświadczeń amerykańskich partnerów poprzez bieżące konsultacje, w wyniku czego anelastyczna wersja EULAG-a została z sukcesem wprowadzona do modelu COSMO na przełomie 2014 i 2015 roku. W zespole podjęto też prace nad dostosowaniem EULAG-a do nowych architektur superkomputerowych, w tym opartych na kartach graficznych. Nawiązano w tym celu współpracę z naukowcami z Politechniki Częstochowskiej i Poznańskiego Centrum Superkomputerowo-Sieciowego (PCSS). Rozszerzono także współpracę z MeteoSwiss, który w tym czasie był pionierem rewolucji w użyciu tego typu architektur superkomputerowych do operacyjnej produkcji prognoz numerycznych.

Tymczasem Piotr Smolarkiewicz ze współpracownikami opracował nową wersję EULAG-a, opartą na ściślejszych równaniach ruchu, a prace nad praktyczną aplikacją tej metody do modelu pogody podjął zespół w ECMWF w Reading. W ślad za tym COSMO zaproponowało zespołowi IMGW implementację ściślejszego EULAG-a do modelu COSMO wraz z przygotowaniem w pełni operacyjnej wersji takiego modelu. Powstała wówczas interesująca sytuacja, kiedy wprowadzeniem nowego typu rdzenia dynamicznego do numerycznych modeli pogody zajmowały się równoległe dwa zespoły - jeden w ECMWF, dla zastosowań globalnych, i drugi w IMGW, dla prognoz regionalnych - zachowujące podstawowy kontakt umożliwiający wymianę idei i doświadczeń.

Zadanie konsorcjum zostało zrealizowane i od 2020 roku model COSMO ze ściślejszym EULAG-iem pracuje operacyjnie w IMGW-PIB. Warszawski zespół udowodnił przy tym, że ściślejszy rdzeń dynamiczny EULAG ma szczególne właściwości zwiększające dokładność prognoz i zapewniające wysoką odporność numeryczną obliczeń. Model ten jest także ważnym narzędziem do prowadzenia prac rozwojowo-badawczych w Instytucie oraz implementacji prognoz pogody o bardzo wysokiej rozdzielczości (nawet z krokiem siatki poziomej rzędu 100 m) w obszarach o realistycznej orografii.

Warto podkreślić, że prowadzone w IMGW-PIB prace nad implementacją EULAG-a do modelu COSMO miały istotne szersze znacze-



nie dla Instytutu: pozwoliły na poszerzenie i pogłębienie współpracy naukowej, w tym ze światowej rangi ośrodkami badawczymi, miały wpływ na rozwój naukowy kadry Instytutu (m.in. na habilitacje i doktoraty), umożliwiły też udział IMGW-PIB w zewnętrznych projektach badawczych. Kontynuacja tych prac powinna przynieść Instytutowi dalszy rozwój naukowy i korzyści operacyjne.

Dalszy rozwój modeli regionalnych wysokiej rozdzielczości. Od 2015 roku konsorcjum podejmowało wysiłki w celu zastąpienia COSMO nowym modelem będącym lokalną wersją globalnego modelu ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) pracującego na siatce niestrukturalnej. Główną zaletą ICON-LAM (Local Area Model) w porównaniu z COSMO jest elastyczna opcja dwukierunkowego zagnieżdżenia siatki i zwiększona stabilność numeryczna obliczeń w wysokiej rozdzielczości horyzontalnej w obszarach o stromej topografii, co w wypadku wysokich Alp oznacza możliwość zwiększenia rozdzielczości siatki horyzontalnej znacznie poniżej 1 km. W kolejnych latach poczyniono zdecydowane postępy w poprawie jakości prognoz ICON-LAM, co zaowocowało w 2019 roku wprowadzeniem tego modelu do działalności operacyjnej DWD i udostępnieniem go do zastosowania w pozostałych krajach członkowskich COSMO. W celu kontynuowania prac nad rozwojem modelu ICON-LAM w marcu 2020 roku podpisano nową umowę partnerską pomiędzy DWD a COSMO. DWD reprezentuje w tej umowie instytucje,

które oryginalnie rozwijały globalną wersję modelu ICON: Deutscher Wetterdienst (DWD), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) i Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ) w Hamburgu. Na mocy porozumienia kraje członkowskie COSMO otrzymały prawo na niewyłączne, bezpłatne i nieograniczone korzystanie z modelu ICON do niekomercyjnych badań i rozwoju, jak również do zadań statutowych.

W listopadzie 2021 roku przygotowano i udostępniono ostatnią oficjalną wersję modelu COSMO (v6.0), zawierającą wszystkie dotychczasowo rozwijane algorytmy i parametryzacje. Wersja ta pozostanie zamrożona, w następnych latach przewiduje się jedynie wprowadzanie poprawek (do napotkanych błędów i wsparcie organizacyjne dla użytkowników wykorzystujących model COSMO na całym świecie (p. mapa).

Kraje używające dotychczas modelu COSMO będą stopniowo przechodzić na nowy, stabilniejszy ICON-LAM z udoskonalanymi parametryzacjami fizycznymi. Na najbliższe lata planowane są dalsze działania mające na celu rozwój modelu ICON-LAM, a zespół kierowany przez Michaela Baldaufa (DWD) pracuje obecnie nad kolejną, nowoczesną wersją rdzenia dynamicznego. IMGW-PIB zaś zamierza rozwijać perspektywiczną wersję modelu COSMO-EULAG, który umożliwi prowadzenie stabilnych i dokładnych obliczeń numerycznych dla obszarów o stromej topografii z wykorzystaniem bardzo gęstych siatek obliczeniowych o poziomym kroku siatki rzędu 100 m. ◀



ALADIN, ALARO, AROME

Marek Jerczyński

W latach 90. XX w. większość służb meteorologicznych Europy już operacyjnie eksploatowała numeryczne, mezoskalowe modele prognozy pogody. Obecnie modele te cechuje horyzontalna rozdzielczość rzędu 10 km, co pozwala z powodzeniem symulować procesy mezo- β -skalowe.



foto: wasek on Unsplash

Problem w tym, że wiele kluczowych z punktu widzenia wpływu na działalność gospodarczą i społeczną człowieka procesów to procesy konwekcyjnoskalowe, dla których adekwatne skale przestrzenne rozciągają się od 1 do 10 kilometrów. Wśród nich przede wszystkim należy wymienić procesy głębokiej konwekcji prowadzące do zjawisk, takich jak ekstremalne opady czy burze gradowe. Inną, istotną grupą procesów typowych dla tej skali są procesy związane z wymuszeniem orograficznym i lokalne procesy wymiany prowadzące na przykład do formowania się i dyssypacji mgły. Do grupy zjawisk zależnych od procesów drobnoskalowych - choć tu istotna jest już

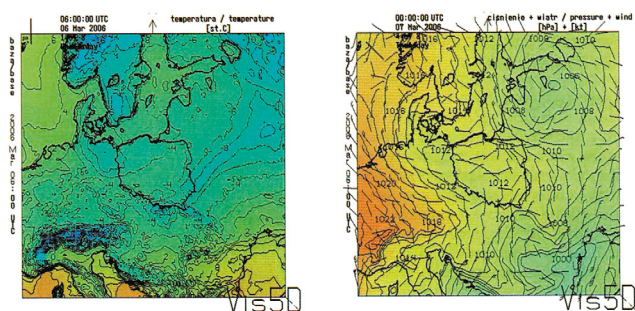
skala pionowa - należałoby zaliczyć te związane z występowaniem niskich chmur warstwowych. Niemożność rozwiązywania wymienionych procesów we współczesnych modelach powoduje, że w wielu sytuacjach pogodowych musimy się liczyć z tym, że numeryczna prognoza będzie po prostu mało wiarygodna. Na przełomie poprzedniej i obecnej dekady czołowe służby europejskie podjęły prace nad stworzeniem modeli mezoskalowych nowej generacji, modeli przystosowanych do pracy z rozdzielczością horyzontalną ok. 2-3 km i większą. Programy tego typu uruchomiono w Niemczech, Wielkiej Brytanii i Francji.

Meteo-France decydując się na stworzenie modelu konwekcyjnoskalowego dysponowała już operacyjnym modelem mezoskalowym konsorcjum ALADIN oraz rozwijanym w centrum naukowym CNRM modelem badawczym meso-NH. Dla przyspieszenia prac rozwojowych i wdrożeń inwestycji oraz maksymalnego wykorzystania wcześniejszych inwestycji w budowę kadr i oprogramowanie zdecydowano się na uruchomienie projektu, którego celem jest zbudowanie modelu wykorzystującego najlepsze elementy obydwu istniejących już, a wspomnianych wcześniej, modeli. I tak z modelu ALADIN zdecydowano się wziąć przede wszystkim pakiet dynamiki niehydrostatycznej - obecnie najbardziej efektywny z istniejących na świecie, oraz pakiet wariacyjnej asimilacji danych 3D-Var. Z modelu meso-NH wybrano pakiety parametryzacji procesów fizycznych. Oczywiście fuzja obu rozwiązań wymaga dokonania licznych adaptacji i stworzenia odpowiednich interfejsów. Model będący efektem fuzji nazwano AROME.

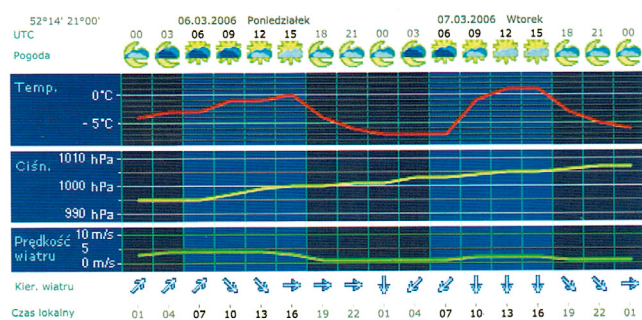
W modelu AROME zachowano opracowane dla modelu ALADIN pakiety: całkowania równań adwekcji oparte na późniejszych schematach semi-lagrangowskich oraz dynamiki niehydrostatycznej - 90% kodu opisującego procesy dynamiczne to kod przygotowany wcześniej dla niehydrostatycznej wersji modelu ALADIN. Mimo że AROME dziedziczy większość kodu modelu ALADIN, to jednak występują istotne różnice. Przede wszystkim różna jest liczba zmiennych prognostycznych - w AROME jest ich 12 (dla porównania ALADIN - 5). Są to 3 składowe wiatru, masa, temperatura, wilgotność, 5 hydrometeorów oraz TKE. Dodatkowe zmienne są związane dynamiką niehydrostatyczną oraz zaawansowanymi parametryzacjami procesów fizycznych przeniesionych z modelu meso-NH. Przede wszystkim trzeba wymienić parametryzacje procesów mikrofizycznych, turbulencji, promieniowania, procesów powierzchniowych czy płytkiej konwekcji. Przyjrzyjmy się bliżej niektórym zmianom:

- parametryzacja procesów mikrofizycznych opisuje procesy związane z przemianami wody atmosferycznej - teraz opisanej przez 6 zmiennych: para wodna + 5 hydrometeorów (woda chmurowa, woda opadowa, lód chmurowy, śnieg i krupa); uwzględnia ona kilkadziesiąt różnych procesów fizycznych;
- parametryzacja turbulencji opisuje procesy mieszania w warstwie granicznej; w AROME zastosowano parametryzację z domknięciem rzędu 1,5 zaproponowaną przez Beaugeaulta i Lacarrere'a;
- parametryzacja procesów powierzchniowych opisuje wymianę energii, momentu pędu, wody, gazów i ewentualnie aerozoli między powierzchnią i atmosferą; w AROME eksternalizowano tę parametryzację - teraz to autonomiczny pakiet oprogramowania mogący być wykorzystany w różnych modelach prognozy pogody.

Po analizie kosztów i problemów eksploatacyjnych zdecydowano, że w modelu AROME wykorzysta się dla asimilacji danych metodę 3D-VAR-FGA T. Zostanie zaadaptowany pakiet przygotowany dla modelu ALADIN, zmodyfikowany pewnymi elementami z meso-NH - w przypadku asimilacji danych, aż 99% kodu pochodzi z modelu ALADIN. Będzie możliwa asimilacja danych z konwencjonalnych i automatycznych stacji naziemnych, sondaży atmosfery, z sieci radarowych, satelitów orbitujących EPS, NPOESS, EOS czy geostacjonarnego MSG, z sieci czujników wyładowań atmosferycznych, systemu GPS, lidarów i wielu innych źródeł. Model AROME wymaga dysponowania wyraźnie większymi zasobami oblicze-



Numeryczna prognoza temperatury oraz ciśnienia i wiatru z modelu ALADIN.



Prognoza z modelu ALADIN w formie wykresu.



Obrady Nadzwyczajnego Posiedzenia Generalnego Partnerów Konsorcjum ALADIN.

niowymi - szacuje się, że kilkadziesiąt razy większymi w stosunku do modelu ALADIN, niezbędnymi do operacyjnego wykorzystania modelu. Większe wymagania sprzętowe są związane zarówno z wyraźnie większą rozdzielczością modelu i w związku z tym z krótszym krokiem całkowania, jak i z większą liczbą zmiennych modelu oraz z dużo bardziej zasobochłonnymi, zaawansowanymi parametryzacjami. Meteo-France planuje w 2008 r. rozpocząć operacyjne wykorzystywanie AROME dla potrzeb służby meteorologicznej. W praktyce to wdrożenie AROME będzie oznaczać skokowe przejście od prognozowania z rozdzielczością 10 km do prognozowania z rozdzielczością 2,5 km, skokowa będzie też zmiana jakości opisu procesów fizycznych. W rezultacie należy oczekiwać bardzo dużej poprawy sprawdzalności i wiarygodności prognoz.

Konsorcjum ALADIN grupuje kraje, które w większości mogą mieć problemy z dostosowaniem się do Meteo-France - jednej z czołowych służb meteorologicznych Europy - dotyczącym wdrażania modelu

nowej generacji do rutynowej eksploatacji. Z tego powodu zdecydowano, by przygotować alternatywne, pośrednie rozwiązanie - model ALARO. Pozwoli on na elastyczne dopasowanie konkretnych, numerycznych rozwiązań do posiadanych możliwości obliczeniowych. Specjalnie przygotowana wersja pakietu fizyki umożliwi efektywną symulację w „szarej” strefie rozdzielczości: 4-7 km. Projekt ALARO jest znany również pod akronimem ALADIN-2. Oczekuje się, że kraje członkowskie konsorcjum ALADIN w najbliższych latach zaczną wdrażać u siebie model ALARO, natomiast później, w latach 2011-2018, będą już dysponowały mocami obliczeniowymi wystarczającymi do eksploatacji modelu AROME. Kiedy konkretnie będzie możliwe wdrożenie modelu AROME w Polsce, tego w tej chwili jeszcze nie wiadomo, prawdopodobnie będzie to około 2016 r.

Nadzwyczajne Posiedzenie Generalne ALADIN. 23 i 24 lutego w Brukseli odbyło się Nadzwyczajne Posiedzenie Generalne Partnerów Konsorcjum ALADIN. W spotkaniu wzięli udział dyrektorzy 15 służb meteorologicznych i hydrometeorologicznych krajów członkowskich ALADIN (Francja, Czechy, Węgry, Belgia, Rumunia, Słowacja, Maroko, Chorwacja, Słowenia, Austria, Polska, Portugalia, Bułgaria, Tunezja i Algieria), dyrektor Europejskiego Centrum Meteorologicznych Prognoz Średnioterminowych (ECMWF), reprezentanci konsorcjum HIRLAM oraz dyrektorzy służb aplikujących do ALADIN (Turcja, Macedonia i Mołdowa). Omówiono stan zaawansowania prac nad rozwojem modelu oraz podpisano nową wersję Porozumienia (MoU), uwzględniającą udział w pracach Konsorcjum grupy modelowania HIRLAM. Podjęto decyzje dotyczące zakresu zadań Kierownika Projektu (PM), Doradczego Komitetu Programowego (PAC) oraz organizacji i koordynacji prac badawczych i wdrożeń, szczególnie w zakresie rozwoju modelu niehydrostatycznego, udzielania licencji, wykorzystania wyników modelu w działalności komercyjnej zgodnie z regulacjami ECOMET. Przedyskutowano różne wersje poziomu finansowego i merytorycznego udziału służb krajów członkowskich w pracach nad rozwojem modelu. ◀

Artykuł pierwotnie ukazał się na łamach Gazety Obserwatora IMGW, 2, 2006.





fol. Krzysztof Kolkowicz on Unsplash



Asymilacja danych

w numerycznej prognozie pogody

Błażej Krzeziński

Numeryczna prognoza pogody może być traktowana jako proces przetwarzania danych obserwacyjnych w kilkudniową prognozę stanu atmosfery. Obliczenie takiej prognozy to zadanie modelu numerycznego. Symuluje on procesy zachodzące w atmosferze, rozwiązując metodami numerycznymi równania różniczkowe (nazywane również równaniami prognostycznymi).

Równania te opisują ewolucję stanu atmosfery w czasie.



foto: Robynne Hu on Unsplash

Równania prognostyczne pozwalają „przewidzieć” stan atmosfery w przyszłości pod warunkiem, że znamy ten stan w chwili początkowej. Zatem obliczenie numerycznej prognozy pogody to rozwiązanie zagadnienia początkowego¹.

W modelu regionalnym LM pracującym w IMGW atmosfera jest reprezentowana przez siatkę punktów (węzłów), w których określa się lokalne wartości tzw. zmiennych prognostycznych opisujących stan atmosfery: ciśnienia, temperatury, składowych wektora wiatru, zawartości pary wodnej oraz wody w stanie ciekłym i stałym (chmury). Gęsta siatka węzłów obejmująca ograniczony obszar atmosfery tworzy tzw. domenę modelu (rys. 1).

Czy to jest asymilacja danych? Wykonanie symulacji prognostycznej musi być poprzedzone wyznaczeniem początkowego stanu modelu, tzn. wartości wszystkich zmiennych prognostycznych w każdym z węzłów siatki. Oczywiście, jeżeli chcemy otrzymać dobrej jakości prognozy, stan początkowy modelu powinien jak najlepiej odzwierciedlać rzeczywistą sytuację w atmosferze.

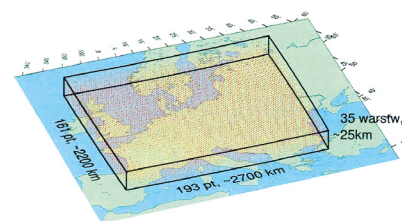
Źródłem informacji o stanie atmosfery jest pomiar. Proces, w którym na podstawie pomiarów wyznacza się zgodny z rzeczywistością, chwilowy „obraz” atmosfery, nosi nazwę asymilacji danych. Rezultat asymilacji – wysokiej rozdzielczości pola ciśnienia, temperatury i pozostałych parametrów – nazywamy polami analizy lub po prostu analizą. Podstawowym zadaniem asymilacji danych jest wyznaczenie warunku początkowego dla prognozy numerycznej.

Rola pomiaru w asymilacji danych.

Uzyskanie wysokiej rozdzielczości pól analizy na podstawie pomiarów nie jest proste. Jednym z problemów jest stosunkowo mała ilość danych obserwacyjnych. Domena typowego modelu regionalnego to ok. 106 węzłów, zaś liczba obserwacji z pojedynczego terminu synoptycznego dla obszaru domeny nie przekracza 103. Potrzebujemy zatem jakiegoś dodatkowego źródła danych.

Może nim być model numeryczny. Załóżmy, że chcemy wyznaczyć analizę dla godziny 12:00. Oprócz obserwacji z godziny 12:00, dysponujemy również analizą wyznaczoną dla godziny 9:00 (pomiary na razie kwestię, w jaki sposób została obliczona). Inicjując model taką analizą i wykonując trzygodzinną prognozę, uzyskamy nowy stan modelu będący „prognozą” stanu atmosfery na godzinę 12:00. Wyznaczyliśmy w ten sposób parametry atmosfery dla każdego węzła.

A co z pomiarami z godziny 12:00? W asymilacji danych rola pomiaru sprowadza się do udoładnienia stanu modelu otrzymanego z krótkiej prognozy. Pola modelu – kandydaci do poprawki – nazywane są tłem lub pierwszym przybliżeniem. Rezultat udoładnienia tła to właśnie poszukiwana analiza.



Rys. 1. Domena modelu regionalnego LM.

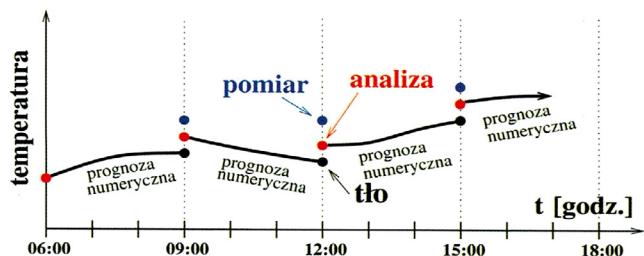
Błędy. Zastanówmy się przez chwilę, co właściwie rozumiemy przez udoładnienie tła wartością otrzymaną z pomiaru. Dlaczego, dysponując w danym punkcie pomiarem, nie możemy po prostu przyjąć, że reprezentuje on poszukiwany przez nas rzeczywisty stan atmosfery?

Zarówno tło, jak i pomiar informują o stanie atmosfery. W przypadku pomiaru jest to informacja „bezpośrednia”, w przypadku tła – wartość symulowana przez model numeryczny na podstawie pomiarów wcześniejszych. Z drugiej strony pomiar i tło zawsze są obciążone pewnym błędem (przy czym nie chodzi o błąd systematyczny, który można skorygować, ale o błąd o charakterze losowym).

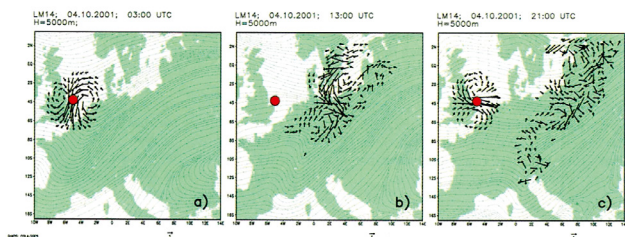
Gdybyśmy dysponowali idealnym modelem oraz bezbłędnymi obserwacjami, pomiar byłby zgodny z tłem i z rzeczywistością. Niestety, model numeryczny nie może z dowolną dokładnością reprezentować tak złożonego systemu, jakim jest atmosfera – dotyczy to zwłaszcza zjawisk w małych skalach. Kiedy więc wyznaczamy rzeczywisty stan atmosfery, interesuje nas rzeczywistość „z punktu widzenia modelu”, tzn. zjawiska o rozmiarach kilku i więcej kilometrów. Drobniejsze szczegóły nie mogą być przez model reprezentowane i są uśredniane. W stosunku do tak rozumianej rzeczywistości pomiar zawsze będzie obciążony błędem, ponieważ stan atmosfery mierzymy zazwyczaj w punkcie – pomiar reprezentuje lokalną fluktuację stanu atmosfery. Błąd tego rodzaju nazywany jest błędem reprezentacji pomiaru. W kontekście asymilacji danych występuje zawsze, nawet jeżeli pomiar sam w sobie jest bardzo dokładny.

Niedoskonałości modelu numerycznego, a także fakt, że prognoza opiera się na obserwacjach zawierających błędy powodują, że również tło jest obciążone

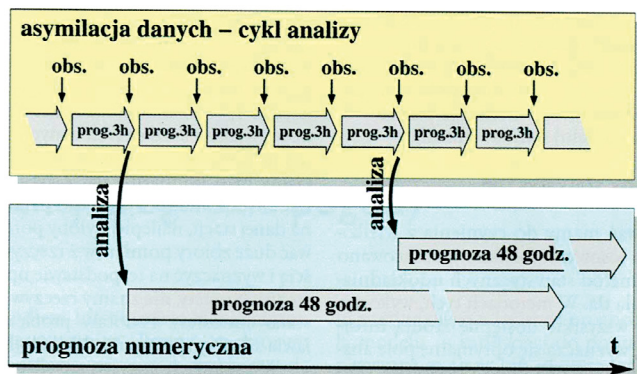
¹ Model regionalny do obliczenia prognozy potrzebuje także tzw. bocznych warunków brzegowych. Boczny warunek brzegowy opisuje zjawiska zachodzące na brzegu domeny, zwłaszcza napływanie mas powietrza z zewnątrz. Źródłem warunków brzegowych dla modeli regionalnych są modele numeryczne obejmujące większy obszar, najczęściej cały glob (tzw. modele globalne)



Rys. 2. Analiza jako wypadkowa tła i pomiaru, na przykładzie zmian temperatury w wybranych punkcie domeny.



Rys. 3. Rozprzestrzenienie informacji; a) na podstawie pomiaru wprowadzono poprawkę do pola wiatru metodą nudgingu; b), c) po kilku godzinach efekty poprawki widoczne w znacznej odległości od punktu obserwacyjnego; c) wprowadzono poprawkę na podstawie nowego pomiaru. Ilustracje przedstawiają różnice między polami wiatru prognozowanymi z uwzględnieniem (analiza) i bez uwzględnienia pomiarów.



Rys. 4. Cykl analizy jako źródło warunku początkowego dla prognozy numerycznej.

błędem. Mamy zatem dwa źródła dla informacji - pomiar i tło; niestety, każde z nich jedynie z pewnym prawdopodobieństwem odpowiada rzeczywistości (z punktu widzenia modelu) stanowi atmosfery.

Metody statystyczne. Ponieważ mamy do czynienia z wielkościami losowymi (błędami), opracowano wiele metod statystycznych udokładniania pola tła. W metodach tych, wykorzystując wszystkie dostępne źródła informacji, wyznacza się optymalne pole analizy (najbardziej prawdopodobny stan atmosfery). Jeżeli

więc w rozpatrywanym punkcie przestrzeni dysponujemy np. temperaturą uzyskaną z pomiaru oraz temperaturą przewidzianą przez model, odpowiednia kombinacja tych dwóch wielkości da nam oszacowanie rzeczywistej temperatury powietrza (rys. 2). Wkład pomiaru i tła do oszacowania powinien być proporcjonalny do prawdopodobieństwa, z jakim każda z tych danych odpowiada rzeczywistości.

Najistotniejszy dla nas jest fakt, że taka kombinacja z większym prawdopodobieństwem odpowiada rzeczywistości niż każda składowa z osobna, czyli rezultat kombinacji będzie potencjalnie obciążony mniejszym błędem. Asymilacja danych jest więc rodzajem filtra redukującego poziom szumu (błąd pomiaru) w sygnale wejściowym (pomiar). Uściślając, chodzi więc nie tyle o poprawianie tła wartością pomiaru, co raczej o użycie obu tych źródeł informacji do uzyskania nowej, dokładniejszej wiedzy na temat rzeczywistego stanu atmosfery.

Wśród najczęściej stosowanych metod można wymienić interpolację optymalną, trójwymiarowe metody wariacyjne, oraz bardziej zaawansowane: czterowymiarowe metody wariacyjne czy rozmaite odmiany tzw. filtru Kalmana.

Metody statystyczne mają poważną „wadę” - są trudne do zastosowania w praktyce. Trudność wynika stąd, że oprócz wartości pomiaru i tła, musimy w jakiś sposób określić stopień niepewności, z jakim każda z tych danych opisuje rzeczywistość, czyli oszacować potencjalny błąd pomiaru i tła. Żeby oszacować błąd pomiaru wybranego parametru na danej stacji, najlepiej byłoby porównywać duże zbiory pomiarów z rzeczywistością i wyznaczyć na tej podstawie np. błąd średni. Niestety, nie znamy rzeczywistego stanu atmosfery. Podobny problem pojawia się przy szacowaniu błędów tła.

W metodach statystycznych operuje się precyzyjnym językiem matematyki - opis błędów ma ściśle określoną postać tzw. macierzy kowariancji błędów. W przypadku pola tła elementy takiej macierzy opisują błędy w każdym z węzłów modelu, a także zależności (korelacje) między błędami w różnych węzłach (dla każdej możliwej kombinacji par węzłów). Jak można sobie wyobrazić, wyznaczenie takiej macierzy jest trudne, a jej rozmiary mogą przyprawić o zawrót głowy - dla domeny składającej się z 106 węzłów, liczba elementów wynosi ok. 1012. W praktyce, aby metoda mogła być zastosowana, wprowadza się szereg uproszczeń, np. zakłada się, że korelacja błędów dla dwóch dowolnych węzłów należy tylko od odległości między nimi, a nie od ich położenia w domenie i oblicza się korelację za pomocą odpowiednio dobranej funkcji tej odległości, zamiast wyznaczać każdy element macierzy doświadczalnie.

Metody empiryczne. Obok metod statystycznych, w asymilacji dość często są stosowane tzw. metody empiryczne. Naśladują one efekty działania uproszczonych metod statystycznych; nie wymagają przy tym stosowania rachunku macierzowego - są łatwiejsze w realizacji. Można wśród nich wymienić metodę kolejnych przybliżeń (Successive Correction Method) opracowaną jeszcze w latach 50., przed pojawieniem się metod statystycznych, oraz metodę tzw. nudgingu, stosowaną między innymi w modelu LM. Metody te dają dobre rezultaty, a jednocześnie nie wymagają dużych mocy obliczeniowych.

Rozprzestrzenianie informacji. Procedura udokładniania pola tła ma oczywiście sens tylko w tych obszarach domeny, w których dysponujemy pomiarami. W obszarach nie objętych obserwacją analiza jest równa polu tła. Nie oznacza to jednak, że obszary te pozostają „nietknięte” przez obserwacje. System asymilacji radzi sobie z problemem małej liczby obserwacji niejako w naturalny sposób - wykorzystuje fakt, że atmosfera jest w ciągłym ruchu.

Model numeryczny, symulując zjawisko adwekcji, rozprzestrzenia informację z obszarów pokrytych gęstą siecią obserwacyjną na tereny nie objęte pomiarami (rys. 3).

Oczywiście parametry atmosfery oszacowane w miejscu dokonania pomiaru mogą podczas przemieszczania się symulowanej masy powietrza ulec znacznej zmianie (w wyniku oddziaływania z podłożem lub otoczeniem oraz przemian wewnątrzmasowych). Zmiana ta będzie jednak ściśle uzasadniona prawami fizyki, wyrażonymi przez zastosowane w modelu równania prognostyczne. Użycie modelu numerycznego do „zagęszczania” informacji daje znacznie bardziej realistyczne rezultaty niż jakkolwiek metoda interpolacyjna bazująca jedynie na obserwacjach. Proste metody interpolacyjne nie są dobrymi modelami prognozy przyszłego stanu atmosfery.

Cykl analizy. W praktyce system asymilacji danych jest realizowany w formie cyklu analizy - szeregu następujących po sobie, krótkich prognoz; każda z nich startuje po zgromadzeniu zestawu obserwacji z odpowiedniego przedziału czasu. Końcowy rezultat takiej prognozy udokładnia się zebranymi pomiarami. Rezultat udokładnienia - pole analizy - jest warunkiem początkowym dla następnej, krótkiej prognozy. Prognoza ta generuje pola dla kolejnego zestawu obserwacji, rozprzestrzeniając jednocześnie rezultaty zastosowania wcześniejszych pomiarów itd. Po odpowiednio długim procesie wprowadzania poprawek cała domena zostanie „wypełniona” informacją.

Podsumowując, użycie obserwacji rozłożonych w czasie oraz modelu jako mechanizmu rozprzestrzeniania informacji pozwala na uzyskanie dobrej jakości pól analizy, nawet jeżeli dysponujemy stosunkowo niewielką liczbą punktów pomiarowych w przestrzeni.

Cykl analizy „pamięta” wprowadzoną informację przez ograniczony czas (ok. 2 dni), po którym zostaje ona zniesiona przez adwekcję poza obszar domeny. Pola modelu są jednak nieustannie nasycone najświeższymi dostępnymi pomiarami. Jednorazowo za inicjowany cykl analizy może być kontynuowany przez wiele lat. Należy podkreślić, że system generujący pola analizy jest niezależny od systemu generującego prognozy długoterminowe, choć w obu przypadkach narzędziem jest model numeryczny.

Pola analizy są wykorzystywane jako warunek początkowy inicjujący prognozę długoterminową (rys. 4). Analiza, będąc z definicji możliwie wiernym obrazem atmosfery, jest również stosowana do monitorowania jakości prognoz.

Asymilacja danych w systemie COSMO-LM. Pola analizy nie muszą być generowane przez model, którego docelowo używa się w prognozie numerycznej. W rozwiązaniu zastosowanym w IMGW warunki początkowe dla modelu LM pochodzą z cyklu

analizy modelu globalnego GME pracującego w Deutscher Wetterdienst (Niemcy).

Cykl analizy modelu GME przebiega podobnie jak na rys. 4; pojedyncza symulacja trwa 3 godziny, po jej zakończeniu oblicza się analizę - obserwacje są łączone z polem tła metodą Interpolacji Optymalnej. Analizy są liczone 8 razy na dobę, z czego dwie (00:00 UTC, 12:00 UTC) przesyłane do IMGW. Takie rozwiązanie znacznie upraszcza realizację systemu numerycznej prognozy pogody - zadanie asymilacji danych jest wykonywane przez podsystem asymilacji modelu GME. Jednak dla użytkownika modelu LM rozwiązanie takie ma również pewne wady:

- użytkownik nie ma wpływu na to, jakie obserwacje oraz w jaki sposób są wprowadzane do analizy. Spora ilość obserwacji dostępnych z lokalnych źródeł pozostaje niewykorzystana;
- model GME nie potrafi symulować zjawisk mezoskalowych. Informacja o zjawisku mezoskalowym (np. mezocyklonie) zawarta w pomiarach zostanie zignorowana przez cykl analizy GME - mezocyklon nie będzie odwzorowany w analizie. Model LM, inicjowany analizą GME, może mieć problemy z poprawnym prognozowaniem tego typu gwałtownych zjawisk;
- modele numeryczne mają tendencję do zaniżania lub zawyżania symulowanej wilgotności (dry/wet bias) względem rzeczywistej średniej klimatologicznej. Inicjowanie modelu LM polami analizy modelu GME prowadzi często do zbyt dużej ilości opadów w pierwszych kilku godzinach prognozy - model lokalny usiłuje „pozbyć się” w ten sposób nadmiaru wody obecnej w analizie.

Opisane ograniczenia i problemy nie występują, jeżeli analiza jest wykonywana przez ten sam model lokalny, którego używamy do obliczania prognozy numerycznej.

Cykl analizy w modelu LM opiera się na metodzie nudgingu. Możliwa jest asymilacja obserwacji konwencjonalnych: temperatury, wiatru i wilgotności z pomiarów w górnej atmosferze (radiosondy, samoloty), oraz ciśnienia, wiatru i wilgotności ze stacji naziemnych. Istnieje również eksperymentalna wersja modelu z asymilacji danych radarowych metodą Latent Heat Nudging. Trwają prace nad wykorzystaniem obserwacji satelitarnych.

Jesteśmy świadkami pojawiania się nowych systemów i metod pomiarowych. Coraz większą rolę odgrywają, obok pomiarów konwencjonalnych, obserwacje satelitarne, radary meteorologiczne i inne metody teledetekcyjne. Włączenie tych źródeł danych do analizy daje szansę na zwiększenie dokładności prognoz numerycznych, ale też stwarza nowe problemy: jak interpretować pomiary, dla których nie istnieją proste zależności między wskazaniami przyrządu a temperaturą, ciśnieniem czy prędkością wiatru. Wszystko to powoduje, że asymilacja danych to wciąż ewoluująca i ciekawa dziedzina. ◀

W artykule wykorzystano:

1. E. Kalnay, Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability
2. X. Huan, H. Vedula, An introduction to Data Assimilation
3. A. C. Lorenc, Analysis methods for numerical weather prediction
4. C. Schraff, R. Hess, LM Documentation, part III: Data Assimilation

Artykuł pierwotnie ukazał się na łamach Gazety Obserwatora IMGW, 1, 2005.



foto: Sophie Greve Williams on Unsplash

Krótką historia numerycznych prognoz pogody

Zbigniew Sorbjan

W ubiegłym roku* zainstalowano w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie nowy superkomputer amerykańskiej firmy SGI Origin 3800 ze 100 procesorami i olbrzymią pamięcią wewnętrzną i peryferyjną. Do pamięci komputera wprowadzono kod modelu prognostycznego, który został opracowany przez Niemiecką Służbę Pogody w Offenbachu. Te dwa wydarzenia są ważnym etapem rozwoju polskiej meteorologii. Przy tej okazji warto przypomnieć, jak w ciągu wieków rozwijała się na świecie idea prognozowania pogody.

Przepowiednie ludowe. Od stuleci ludzie pragnęli przepowiadać pogodę. W tym celu uważnie obserwowali aurę i rejestrowali reakcje roślin, zachowanie się zwierząt, kolory nieba. Rolnicy, myśliwi, rybacy i żeglarze, których praca i życie zależy od pogody, łączyli zmiany natury z rytмами i przejawami zjawisk pogodowych. Ich obserwacje zostały utrwalone w postaci wielu przysłów i powiedzonek, często rymowanych, które łatwo zapadały w pamięci i były często cytowane w odpowiednich sytuacjach. Przysłowia te były przekazywane z pokolenia na pokolenie, wrastając w kulturę i odzwierciedlając modrość chwili, w której powstawały.

Wiele powiedzeń i przepowiedni zapisano na stronach starych traktatów i annałów. Zarówno Stary, jak i Nowy Testament zawiera przepowiednie o pogodzie. Czasami są one przeciwstawne. W Księdze Joba (Hioba) czytamy, że „Dobra pogoda przychodzi z północy”, zaś w Księdze Przysłów, że „Wiatr północny przynosi deszcz”. W Ewangelii wg św. Mateusza (16.2-3) znajdujemy następujący opis: „Gdy nastanie wieczór i niebo się czerwieni, jutro będzie pogoda; a rano: dziś będzie niepogoda, bo się niebo czerwieni i jest zachmurzone”. WVI w. p.n.e. chiński filozof Lao-tsu w swej księdze „Nauczanie” pisał „Ulewny deszcz nie pada przez cały dzień”. Starożytny Grek, Aratos z Soli (III wiek p. n. e.),

utrzymywał, że „Piękna pogoda nastanie, gdy sierp księżyca jest wyraźny i ostry. Kiedy księżyc ma czerwoną otoczkę, będzie wietrznie, kiedy jego kształt jest niewyraźny, oznacza to że nadchodzi silny deszcz”.

W wiekach średnich często cytowano autora greckiego Theophrastusa z IV w. p.n.e., autora księgi „Znaków pogody”. W księdze tej podał on 80 różnych znaków deszczu, 50 - burzy, 45 - wiatru i 24 - dobrej pogody. Wiele jego „znaków” było sensownych, ale wiele nie miało żadnych podstaw. Przykładowo, uważał on, że „gdy jest mgła, to nie ma dużego deszczu”, co jest zgodne z prawdą. Naiwnie stwierdzał jednak, że „kiedy spada dużo gwiazd, oznacza to silny deszcz lub wiatr, które przyjdą z tej części nieba, gdzie gwiazdy spadają”.

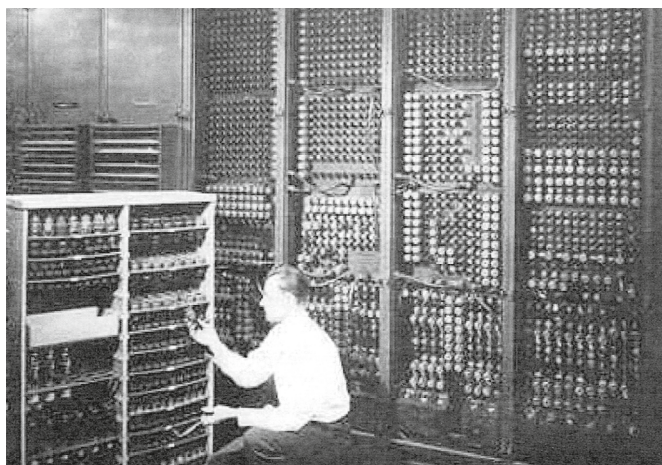
Bardziej współczesne przysłowia i przepowiednie ludowe zawierają niezliczone ilości wskazówek i reguł. Są zadziwiająco mieszaniną rozsądnych obserwacji przyrody z niemądrymi zabobonami. Przysłowia, które są wynikiem obserwowania pogody przez wiele pokoleń, mają niezaprzeczalną wartość, która przeszła wieloletnie testy i niesie wiarygodną informację. Powiedzenia, które odnoszą się do wyglądu nieba, ruchu i wyglądu chmur, mają szansę sprawdzenia się. Natomiast te, które odnoszą się do ściśle określonych dat, sprawdzają się tylko wskutek szczęśliwego zbiegu okoliczności lub nie sprawdzają się wcale.

Na przykład beskidzcy górale wróżą pogodę na następny rok na podstawie przebiegu zjawisk atmosferycznych w okresie od Świętej Łucji (13 XII) do Wigilii Bożego Narodzenia. Każdy z 12 dni miał odpowiadać kolejnemu miesiącowi w nadchodzącym roku:

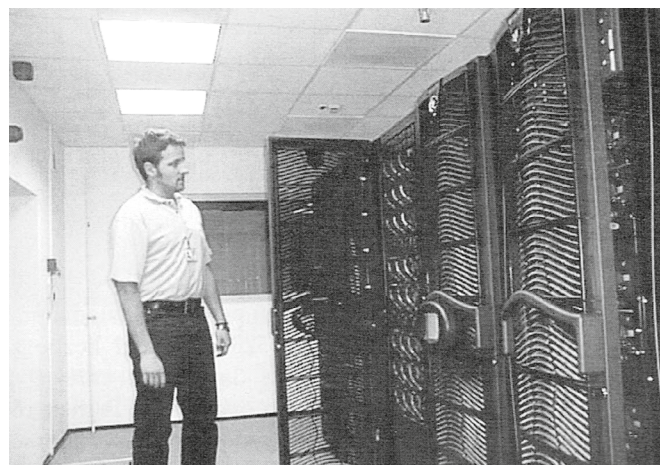
Dni dwanaście od Łucji
Policz sobie do Wilyi,
Patrz na słońko i na gwiazdy,
A przepowiesz miesiąc każdy.

Oczywiście wróżb tych nie należy traktować poważnie. Przepowiednie odnoszące się do dat, rocznic, zmian miesięcznych lub sezonowych nie mogą sprawdzać się zawsze i wszędzie. Klimat jest bowiem zmienny w przestrzeni i czasie, a pogoda nie wykazuje pełnej jednorodności. Ponadto klimat zmienia się nieustannie i pewne reguły, charakteryzujące przeciętny przebieg pogody nawet kilkadziesiąt lat temu, nie muszą dziś obowiązywać.

Fabryka prognoz pogody. Pierwsze kroki w kierunku stworzenia matematycznych metod prognoz pogody zostały podjęte przez Norwega Vilhelma Bjerknesa (1862-1951) i Anglika Levisa Fry Richardsona (1881-1953). W 1904 r. V. Bjerknes napisał: „Jeśli prawda jest, w co każdy uczonec obecnie wierzy, że następne stany atmosfery wynikają ze stanów po-



ENIAC – Elektroniczno-Numeryczny Integrator i Kalkulator.



Superkomputer IMGW – SGI Origin 3800

przednich zgodnie z prawami fizyki, to jest rzeczą oczywistą, że warunki konieczne i dostateczne dla racjonalnego rozwiązania problemu prognozy pogody są następujące:

1. wystarczająco dokładna wiedza stanu atmosfery w stanie początkowym,
2. wystarczająco dokładna wiedza praw, wg których stany atmosfery ewoluują jedno w drugie”.

Mysł tę poparł uczony angielski, Lewis Fry Richardson. Wierzył, że pogodę można przewidywać, rozwiązując złożony układ równań różniczkowych, które opisują ruch atmosfery. Metodę rozwiązania problemu opisał w książce „Prognozowanie pogody metodami numerycznymi”. Pierwsza jej wersja powstała w maju 1916 r., a kolejne korekty czynione były w latach 1916-1918, w czasie I wojny światowej. Richardson pracował wtedy jako wolontariusz w charakterze kierowcy ambulansu wojskowego. W kwietniu 1917, w czasie bitwy w Szampanii, Richardson przesłał jedyną kopię książki na tyły i kopia ta zaginęła. Szczęśliwie odnalazła się kilka miesięcy później pod zwalem węgla i została wydana w 1922 r.

Richardson uważał, że dane do prognozy pogody mogłyby pochodzić z 2000 stałych stacji meteorologicznych mierzących stan atmosfery na całej Ziemi i ponad nią. Powierzchnia Ziemi mogłaby być podzielona na pasy równoleżnikowe i południkowe, jak szachownica. Jeżeli szerokość pasów południkowych wynosiłaby 200 km, to około 200 pasów pokryłoby całą

Ziemię. Przyjmując, że nad każdym polem takiej szachownicy byłoby 10 poziomów, atmosferę można byłoby reprezentować za pomocą $200 \times 10 = 2000$ elementów składowych. Jeśli obliczenia dla każdego elementu prowadziłyby 32 rachmistrzów, to prognoza pogody na całym globie wymagałaby pracy $32 \times 2000 = 64\ 000$ ludzi i tyle samo kalkulatorów mechanicznych. Dla zwiększenia sprawności taka ilość obliczeń mogłaby być zorganizowana w „fabryce prognoz pogody”. Richardson wyobrażał sobie swoją fabrykę w hali podobnej do sali teatralnej. Na ścianach sali byłaby wymalowana mapa Ziemi, na suficie odwzorowane obszary polarne, a zarysy Antarktyki mieściłyby się na parterze. Jeden kalkulator byłby użyty do rozwiązania jednego równania lub jego części. Wyniki obliczeń byłyby wyświetlane na specjalnych ekranach, każdy wynik widoczny w 3 sąsiednich strefach dla utrzymania łączności, praca każdej strefy byłaby koordynowana przez wyższego rangą urzędnika. W środku hali wznosiłaby się wieża, równa połowie wysokości sali. Na wieży siedziałby człowiek kierujący obliczeniami. Byłby on otoczony asystentami i posłańcami. Do jego obowiązków należałoby utrzymywanie właściwej i niezakłóconej prędkości obliczeń we wszystkich częściach hali. Kierujący obliczeniami używałby czerwonego światła do spowolnienia operatorów, którzy pracowaliby za szybko i niebieskiego do przyspieszenia obliczeń.

Richardson dokonał próbnych obliczeń, używając danych początkowych na dzień 20 maja 1910. Niestety w wyniku akumu-

lacji błędów numerycznych w czasie 6-godzinnej prognozy jej wynik okazał się nie-realistyczny, wskazując na wzrost ciśnienia o 145 milibarów. Z tego powodu metodę Richardsona zarzucono na dwadzieścia lat.

Współczesne prognozy numeryczne. Marzenie Richardsona o numerycznych prognozach pogody ziściło się dopiero pod koniec lat 40. W tym czasie skonstruowano pierwszy komputer o nazwie ENIAC (Elektroniczno-Numeryczny Integrator i Kalkulator). Maszyna była zaprojektowana przez dwóch inżynierów amerykańskich Johna W. Mauchly'ego i Johna P. Eckarta, Jr. ENIAC ważył 30 t i zajmował przestrzeń 150 m². Po wynalezieniu ENIAC-a meteorologzy zaproponowali użycie go do prognozowania pogody. Zadania podjęła się grupa kierowana przez znanego matematyka Johna von Neumanna (1903-1957) z Uniwersytetu w Princeton. Pierwszy test oparty na modelu opracowanym przez meteorologa Jule'a Charneya (1917-1981) przeprowadzono w marcu 1950, okazał się on pomyślny.

Na marginesie można tu przytoczyć zabawną anegdotę dotyczącą Johna von Neumanna. Otóż był on znany ze swego poczucia humoru. Kiedyś zażartował sobie z dziennikarza, który przeprowadzał z nim wywiad. Neuman użył akronimu „MANIAC” dla określenia ludzi dokonujących ręcznych obliczeń (MANIAC - Ręczny Integrator i Kalkulator), w przeciwieństwie do ENIAC-a (Elektroniczno-Numeryczny Integrator i Kalkulator), w czym dziennikarz przeprowadzający wywiad nie połąpał się.

Wywiad ukazał się w „World Digest” pod koniec lat 40. Można było w nim znaleźć następujący fragment: „Profesor Neumann z Uniwersytetu w Princeton w USA wyjawiał, że 40% spośród 800 naukowców i techników zatrudnionych przy konstruowaniu pierwszego „elektronicznego mózgu” ostrażało zmysły. Większość z tych maniaków umieszczono w wojskowych domach dla umysłowo chorych, gdzie manualnie dokonują skomplikowanych obliczeń arytmetycznych”.

Pierwszej na świecie, rutynowej realizacji numerycznych prognoz pogody podjęła się Służba Pogody Królewskich Szwedzkich Sił Lotniczych w Sztokholmie. Użyto do tego modelu matematycznego opracowanego przez uczonego szwedzkiego Carla-Gustafa Rossby'ego w Instytucie Meteorologii Uniwersytetu Sztokholmskiego. Począwszy od grudnia 1954 r., prognozy na region Północnego Atlantyku opracowywano 3 razy w tygodniu na szwedzkim komputerze BESK.

W Polsce realizację pierwszych prognoz numerycznych rozpoczęto w latach 60. na maszynie UMC-10. Następnie zainstalowano w IMGW Odrę 1204 i Odrę 1305.

Sprawdzalność prognoz pogody. Sto lat temu angielski pisarz Jerome K. Jerome w noweli „Trzech panów w łódce nie licząc psa” pisał z irytacją: „Wśród wszystkich głupstw i irytujących bzdur, jakie nas dręczą, oszustwo zwane „prognoza pogody” należy do najbardziej cynicznych, przepowiada się akurat to co było wczoraj lub dwa dni temu, a zawsze coś wręcz odwrotnego niż to co będzie dzisiaj”. Wiek później można by zapytać, czy ten stan sprawdzalności prognoz pogody jest dalej aktualny?

Z każdym rokiem numeryczne prognozy stają się coraz to doskonalsze. Ich obecna średnia sprawdzalność wynosi od 90% do 95% przy prognozie na 24 godziny. Dodajmy, że sprawdzalność prognozy inercyjnej, że jutro będzie tak jak dziś jest stosunkowo wysoka i wynosi 75%. Tak więc współczesne prognozy pogody muszą być lepsze niż owe 75%, aby mogły być traktowane poważnie.

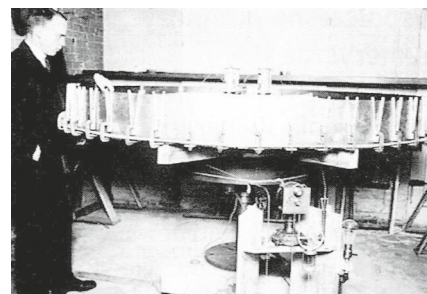
Sprawdzalność prognoz pogody jest większa, jeśli okres prognozy jest krótszy i dużo gorsza, jeśli wydłuża się. Okazuje się bowiem, że istnieją granice limitujące prognozowalność pogody. Granice te wynikają z faktu, że równania różniczkowe (równania tendencji czasowych podstawowych

parametrów meteorologicznych, takich jak prędkość wiatru, temperatura, ciśnienie itp.) opisujące rozwój pogody są bardzo czułe na warunki początkowe. Wskutek tej czułości prognozy pogody mają praktycznie sens tylko na okres do ok. 7 dni. Po dłuższym okresie jakość prognoz numerycznych gwałtownie pogarsza się z powodu tzw. „efektu motyla”. Prognozy na okres miesiący nie mają dużej wiarygodności, gdyż mówiąc obrazowo, nawet nieprzewidziany ruch motyla może zaburzyć lokalnie stan atmosfery i po dłuższym czasie pokrzyżować trafność prognozy.

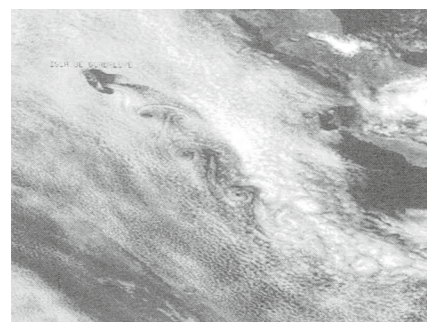
Aby wyjaśnić powyższy fakt, wspomnijmy francuskiego matematyka i filozofa Piera Simona de Laplace'a (1749-1827). Uważał on, że istnieją obiektywne prawa rządzące naturą, w tym także i pogodą. Prawa te określają, w jaki sposób obecny stan układu (np. pogody) zależy od tego, co było wcześniej. Jeśli uda nam się poznać wszystkie zasady i relacje rządzące Wszechświatem, wtedy będziemy mogli przewidzieć jego stan w dowolnej chwili w przyszłości.

Inny punkt widzenia zaprezentował fizyk francuski Jules Henry Poincare (1845-1912), który uważał, że jeśli nawet prawa natury nie byłyby dla nas tajemnicą, to w dalszym ciągu będziemy znali jedynie przybliżony stan początkowy do takiej prognozy. Może się więc tak zdarzyć, że mały błąd w przyjętych warunkach początkowych z czasem urośnie do znacznych rozmiarów, zniekształcając końcowy wynik prognozy. Innymi słowy, małe odchylenie na początku spowoduje ogromny błąd na końcu obliczeń.

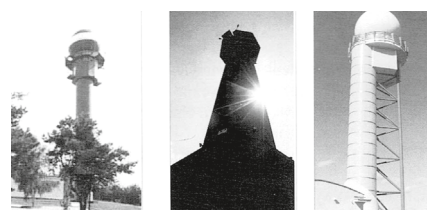
Edward Lorenz (ur. 1917), profesor meteorologii w Massachusetts Institute of Technology, potwierdził doświadczalnie idee Poincare'a. W 1961 r. prowadził obliczenia z modelem numerycznym konwekcji atmosferycznej. Pewnego dnia wygenerował dwie symulacje swojego modelu. Pierwszą z nich obliczył w całości, natomiast drugą podzielił na dwie części, przy czym wyniki z pierwszej części wykorzystał jako warunki początkowe dla drugiej. Wyniki obu symulacji: pełnej i podzielonej powinny być identyczne i tego właśnie spodziewał się Lorenz. Był więc niezwykle zdziwiony, gdy okazało się, że oba rozwiązania różniły się znacznie. Ponieważ zarówno równania, jak i wszystkie współczynniki były identyczne, w pierwszej chwili pomyślał, że zawiódł komputer. Po dalszej jednak analizie stwierdził, że przy-



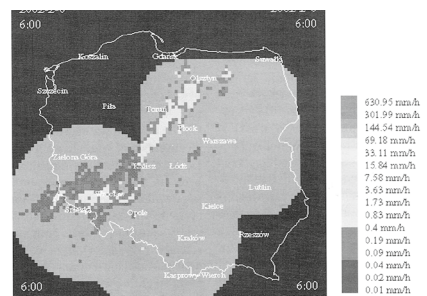
Carl-Gustaf Rossby przed aparatem do studiowania cyrkulacji atmosferycznej.



Zdjęcie z wahadłowca amerykańskiej Agencji NASA: Wiry Karmana.



Radary w Legionowie, na Ramży i w Pastewniku (fot. R. Klejnowski).



Zbiorcza mapa radarowa z sieci POLRAD.

czyną otrzymanych rozbieżności była dokładność warunków początkowych w drugiej części symulacji. Dla zaoszczędzenia sobie czasu, Lorenz dokonał małego zaokrąglenia liczb. I tak, zamiast wpisać do komputera liczbę z sześcioma cyframi po przecinku, dla przykładu 0,452385, wpisał liczbę

zaokrągloną do trzech miejsc po przecinku, czyli 0,452. Te małe różnice spowodowały opisywaną rozbieżność rozwiązań.

Doświadczenia Lorenza wykazały, że istnieją granice prognozowalności pogody i równocześnie otworzyły nowy dział badań matematyczno-fizycznych pod nazwą „teorii chaosu”.

Pomiary satelitarne i radarowe. Cytowane wyżej słowa wypowiedziane przez Bjerknesa ok. 100 lat temu są ciągle aktualne zarówno co do konieczności znajomości stanu początkowego atmosfery, jak i procesów w niej zachodzących. Zwłaszcza stan atmosfery budzi troskę meteorologów. Stan ten jest określany na podstawie pomiarów na stacjach meteorologicznych. Obecnie światowa sieć meteorologicznych stacji pomiarowych składa się z 10 000 punktów zlokalizowanych na wszystkich kontynentach, jak również 6700 punktów pływających na morzach i oceanach. Pomiary są wykonywane co godzinę na stacjach przyziemnych i co 12 godzin na stacjach sondujących pionową strukturę atmosfery. Zarówno liczba stacji, jak i częstotliwość pomiarów jest imponująca, lecz w dalszym ciągu zbyt skąpa, by sprawdzalność prognoz pogody była 100-procentowa. Dotyczy to zwłaszcza obszarów morskich i oceanicznych pokrywających 3/4 naszego globu, gdzie gęstość obserwacji jest zdecydowanie za mała.

Dla polepszenia jakości informacji meteorologicznej współczesna meteorologia wykorzystuje wiele skomplikowanych narzędzi teledetekcyjnych. Należą do nich m. in. satelity i radary meteorologiczne. Obserwacje satelitarne z kosmosu w świetle widzialnym i w podczerwieni pozwalają określać chmury nad lądami i morzami. Można również w sposób ciągły obserwować tory burz, huraganów i tajfunów oraz wydawać odpowiednie ostrzeżenia o ich nadejściu. Niższe chmury można łatwo rozpoznawać na zdjęciach w podczerwieni, ponieważ są one cieplejsze i przez to emitują więcej promieniowania długofalowego niż chmury wyższe. Na zdjęciach satelitarnych w podczerwieni chmury niskie wydają się szare, zaś chmury wysokie białe. Pierwszym meteorologicznym satelitą był Tiros wysłany w kosmos przez USA w 1960 r.

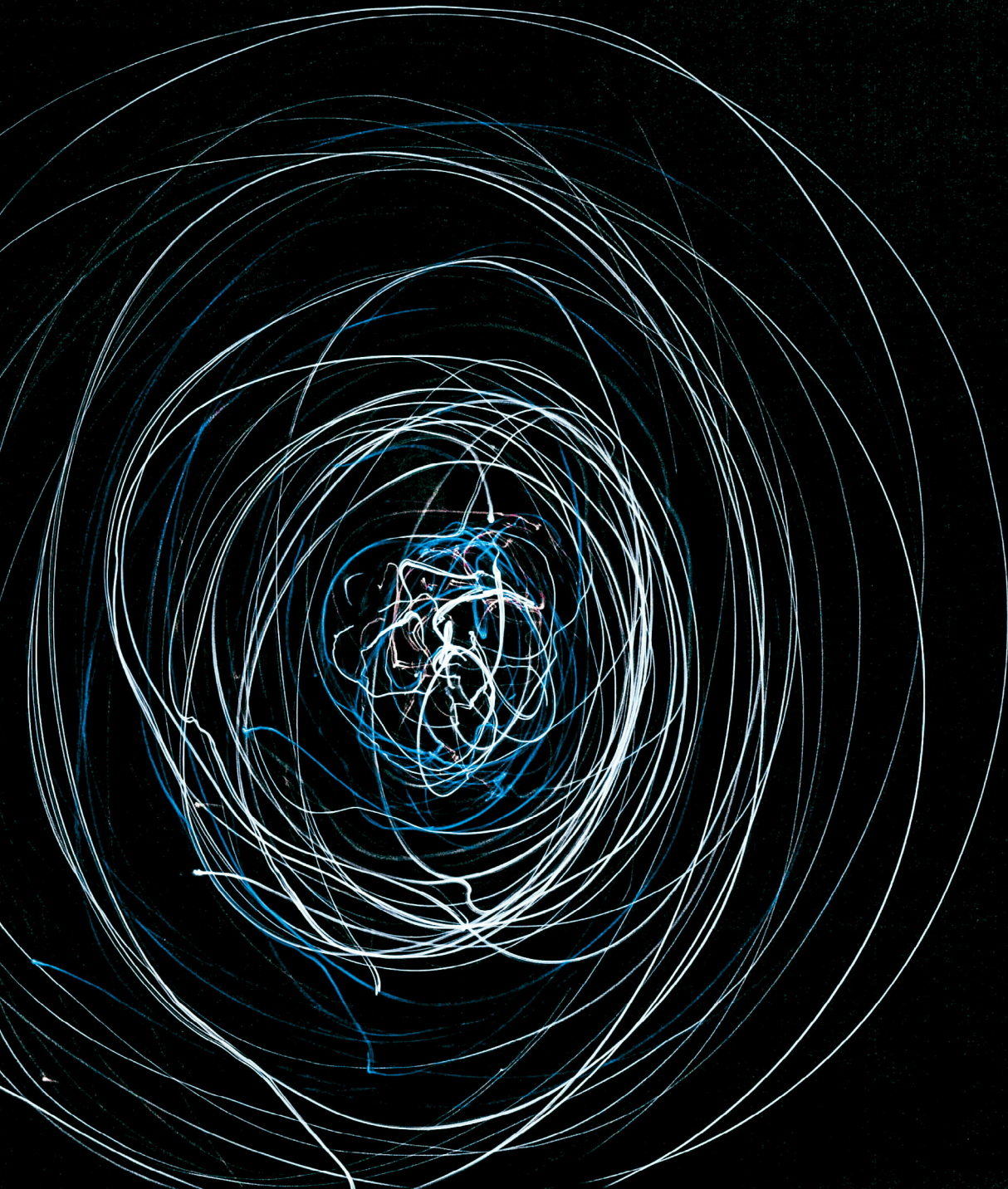
Innym popularnym narzędziem pomiarowym w meteorologii jest radar. Został wynaleziony w 1935 r. przez Roberta Watsona Watta pracującego w Brytyjskich Królewskich Zakładach Samolotowych w charakterze głównego meteorologa. Pierwotnie radar miał na celu detekcję burz, ale w czasie II wojny światowej został skutecznie użyty do celów wojskowych. Współczesny radar meteorologiczny stał się ważnym narzędziem w badaniach dotyczących burz, opadów nawalnych, śnieżyc i tornad.

Radary dopplerowskie są w stanie określić składowe prędkości wiatru. W 1995 r. na Ramży koło Katowic oddano do użytku pierwszy dopplerowski radar meteorologiczny. Jest on przeznaczony do wykrywania burz oraz obfitych opadów deszczu, umożliwia prognozowanie powodzi, a także ostrzega przed jej następstwami, jest całkowicie bezobsługowy i sterowany z Katowic. Co 15 minut skanuje obszar o promieniu 150-200 km, co pozwala na wczesne wykrywanie burz i opadów. Przekaz danych odbywa się przez satelitę do Katowic i Warszawy. Taki sam radar meteorologiczny zamontowano w Pastewniku koło Wrocławia. Trwa budowa systemu radarów meteorologicznych obejmujących obszar całego kraju.

Plany na przyszłość. Dane do prognoz pogody, które realizuje się na nowym sprzęcie komputerowym w IMGW w Warszawie, są codziennie przesyłane szybkimi łączami z Offenbachu. Pochodzą z modelu regionalnego opracowywanego przez DWD (Służba Meteorologiczna Niemiec). Dla zwiększenia sprawdzalności prognoz lokalnych dane te muszą być wsparte obserwacjami lokalnymi z terenu Polski. Nie jest to jednak łatwe zadanie. Do jego rozwiązania planuje się utworzenie zespołu naukowego, który zajmie się asymilacją danych do prognozy oraz nawiązywania szerokiej współpracy międzynarodowej. Dane te będą pochodziły z obserwacji naziemnych na terenie Polski. Dodatkowo będzie brana pod uwagę informacja radarowa i satelitarna. Asymilacja ta będzie odbywała się przy wykorzystaniu skomplikowanych metod matematycznych. ◀

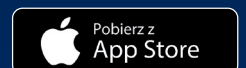
* Artykuł pierwotnie ukazał się na łamach Gazety Obserwatora IMGW, 2, 2002.

foto: Gertrauda Vlasovic/dlute on Unsplash



CHCESZ WIEDZIEĆ CO CZEKA CIĘ W POGODZIE?

ZAINSTALUJ APLIKACJĘ MOBILNĄ
POGODA DLA POLSKI OD IMGW-PIB



METEO
IMGW-PIB
meteo.imgw.pl

