

# Obserwator

## MODELE KLIMATYCZNO-PROGNOSTYCZNE INNYCH ŚWIATÓW

*Tajemnice pogodowe wszechświata*



**METEO**  
IMGW-PIB  
meteo.imgw.pl

ZESPÓŁ IMGW-PIB WPROWADZA  
INNOWACYJNY RDZEŃ DYNAMICZNY DO  
MODELU PROGNOZY POGODY COSMO > str. 20

NIEŁATWE PRZEWIDYWANIE  
POGODY – MODELE, PROGNOZY  
I SUPERKOMPUTERY > str. 12

CZY DŁUGOTERMINOWE  
PROGNOZY POGODY MAJĄ SENS? > str. 22  
Szybciej, dalej i lepiej



## meteo

- 3** Historia numerycznego prognozowania pogody – powstanie konsorcjum ALADIN  
Jak to się wszystko zaczęło?

## technologie

- 8** Nietatwe przewidywanie pogody – modele, prognozy i superkomputery  
Nauka przez duże „N” w prognozie

## meteo

- 14** Nowcasting, czyli o pogodzie za chwilę  
Przewidywanie pogody i bezpieczeństwo

## technologie

- 20** Zespół IMGW-PIB wprowadza innowacyjny rdzeń dynamiczny do modelu prognozy pogody COSMO  
Polscy naukowcy w światowej elicie

## nauka

- 24** Modele klimatyczno-prognostyczne innych światów  
Tajemnice pogodowe wszechświata

## meteo

- 34** Czy długoterminowe prognozy pogody mają sens?  
Szybciej, dalej i lepiej

## nauka

- 38** Jeszcze o pogodzie – kilka słów o przyszłości  
Czy prognozowanie może być doskonałe?

**Obserwator**  
Gazeta Obserwatora ISSN: 2658-2716

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

**Redaktor prowadzący:** Rafał Stepiński  
**Grafik prowadzący:** Michał Seredin

**Zespół Redakcyjny:** Zespół Komunikacji IMGW-PIB  
**Kontakt do redakcji:** content@imgw.pl

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



Szanowni Państwo,

zanim będziemy mogli przewidzieć pogodę, musimy odkryć skąd ona pochodzi, ale aby to zrobić należy spojrzeć w niebo i zrozumieć procesy zachodzące w atmosferze. Długie jesienne wieczory w dobie szalejącego koronawirusa to idealna pora, by podjąć się takiego intelektualnego wyzwania.

Prognozowanie pogody stało się integralną częścią naszego codziennego życia i chyba nie wyobrażamy sobie dnia bez sprawdzenia, jaka będzie dziś pogoda. Wczesne prognozy były ograniczone i opierały się na wytrwałości obserwatorów lub założeniu, że przeszłość systemu dyktuje jego przyszłe warunki. Wytrwałość to dobry sposób na przewidywanie pogody, gdy okoliczności są stałe, a lokalny klimat nie zmienia się codziennie. Jednak taka prosta technika nie uwzględnia czynników nagłych, takich jak np. burze konwekcyjne.

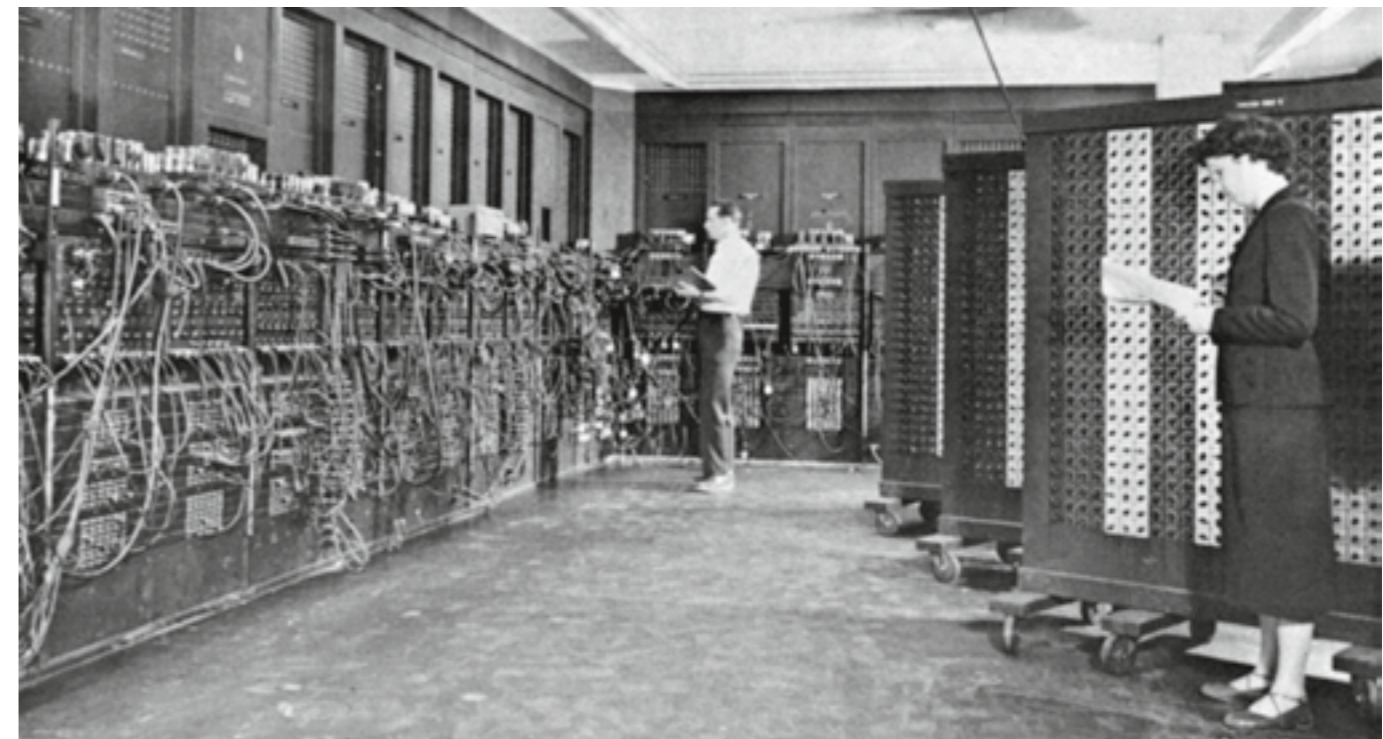
Na szczęście obecnie dysponujemy coraz lepszymi metodami przewidywania przyszłości. Dzisiejsze prognozy pogody nie są tworzone przez ludzi obserwujących niebo, ale przez potężne komputery. Dlatego zasadne jest zadanie sobie innych pytań. A mianowicie kiedy człowiek zostanie wyeliminowany z procesu prognozowania pogody? Czy jest to w ogóle możliwe lub czy będzie możliwe w najbliższej przyszłości? Na łamach Obserwatora nie udzielimy jeszcze jednoznacznych odpowiedzi, ale z pewnością przybliżymy kuchnię komputerowego modelowania pogody.

prof. Mariusz Figurski

Dyrektor Centrum Modelowania Meteorologicznego

# Historia numerycznego prognozowania pogody

## – powstanie konsorcjum ALADIN



ENIAC (źródło: US Army)

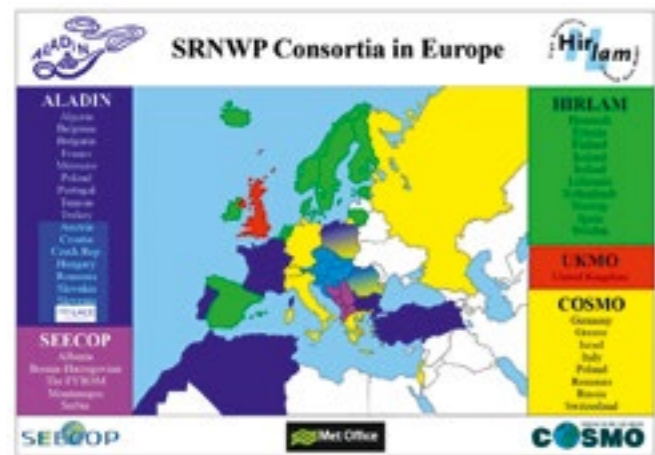
Marcin Kolonko – IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego

**Wiosną 1998 roku w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej przygotowano pierwsze operacyjne prognozy pogody na bazie modelu ALADIN. Obliczenia wykonano na komputerze IBM RS/6000 SP w Akademickim Centrum Obliczeniowym Cyfronet, skąd wyniki transmitowano za pomocą łącza telefonicznego do Instytutu, w którym następnie je zwizualizowano. Dzisiaj prognozy przygotowuje się w centrum obliczeniowym IMGW-PIB z wykorzystaniem m.in. modeli konsorcjum ALADIN następnej generacji – ALARO i AROME. Poznajcie historię jednego z najważniejszych na świecie systemów programistycznych do prognozowania pogody.**

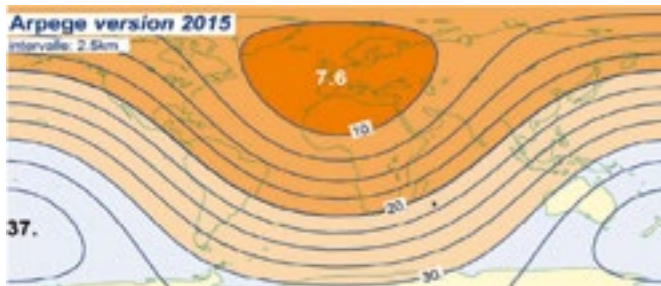




Ilustracja „fabryki pogody” Lewisa Fry Richardsona (źródło: UCD News, François Schuiten)



Mapa podziału Europy na poszczególne konsorcja; w 2021 roku kraje konsorcjum ALADIN, HIRLAM i LACE połączą się w jedną grupę (źródło: Eumetnet, Patricia Pottier)

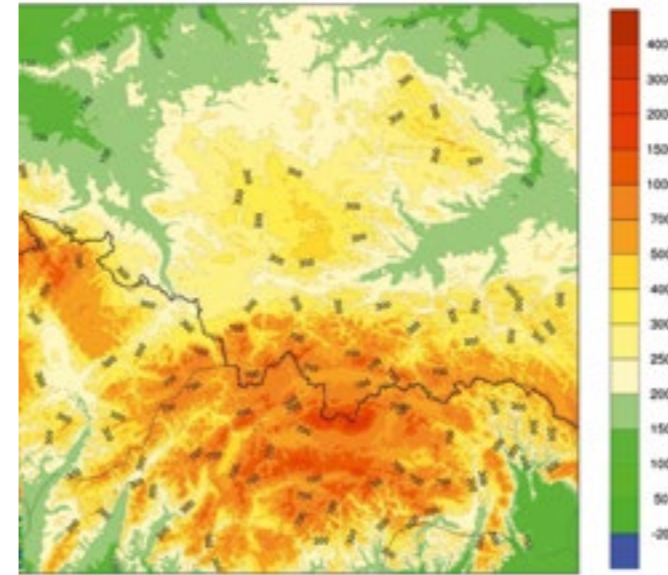


Siatka modelu globalnego ARPEGE; najlepsza rozdzielczość, z jaką prognozuje model (7,6 km), dotyczy Europy (źródło: Centre National de Recherches Météorologiques, France)

Pierwszym, który dostrzegł możliwość użycia maszyn liczących w meteorologii, był norweski uczyony Vilhelm F.K. Bjerknes. Na przełomie XIX i XX wieku sformułował szereg równań opisujących stan atmosfery i rządzących jej ewolucją. Ówczesnie dostępna technologia nie pozwalała jednak na praktyczne wykorzystanie jego teorii. W 1922 roku brytyjski fizyk Lewis Fry Richardson powrócił do koncepcji prognozowania pogody przy użyciu maszyny i stworzył futurystyczną koncepcję „fabryki pogody”. Miała się ona opierać na pracy kilkudziesięciu tysięcy ludzi, wykorzystujących suwaki logarytmiczne do obliczania kolejnych wątków związanych z prognozą. Świat musiał czekać jeszcze blisko 30 lat, aby odważne teorie obu badaczy zastosowano w praktyce.

**Moce obliczeniowe w służbie meteorologii.** Drogę do numerycznego prognozowania pogody otworzyła era komputerów elektronicznych, której początki sięgają lat 40. i 50. XX wieku, gdy skonstruowano jednostki ENIAC oraz BESK. W 1948 roku amerykański meteorolog Jule Charney z zespołem jako pierwsi zaprogramowali maszynę cyfrową do obliczenia prognozy i stworzyli działający model numeryczny. Osiem lat później Norman A. Phillips opracował pierwszy model klimatyczny. W latach 50. i 60. nastąpił gwałtowny wzrost możliwości komputerów. Zjawisko podwajania się ich mocy obliczeniowej zostało wkrótce opisane w formule tzw. prawa Moore’a. Z czasem kolejne służby meteorologiczne - amerykańska (Joint Numerical Weather Prediction Unit) czy szwedzka (z Carlem-Gustafem Rossbyem na czele) - stawały się posiadaczami coraz szybszych maszyn. Rozpoczęła się ekspansja modeli globalnych. W 1970 roku powstało, słynne do dziś, amerykańskie NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Pojawiały się kolejne generacje coraz lepszych maszyn liczących: Colossus, IBM, CRAY, a wraz z nimi nowe koncepcje eksploatacji modeli regionalnych (LAM - limited area models), pozwalające uzyskiwać krótkoterminowe prognozy o większej rozdzielczości przestrzennej. W 1975 roku powołano do życia Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. European Centre for Medium-Range Weather Forecasting - ECMWF). Cztery lata później w ośrodku powstały pierwsze prognozy numeryczne.

**Météo-France, prognozowanie numeryczne i upadek muru berlińskiego.** W wyniku przemian ustrojowych w 1989 roku pojawiła się możliwość wciągnięcia do europejskiej współpracy zespołów specjalistów zza żelaznej kurtyny. Koncepcja konsorcjum modelowania numerycznego zrzeszającego służby meteorologiczne krajów Europy Zachodniej i Wschodniej zrodziła się w Météo-France. Istotny wkład w jego powstanie wnieśli Jean-François Geleyn (główny inicjator projektu), Radmila Bubnova, Dezső Dévényi i Vladimir Ivanovici. Inicjatywa szybko nabierała kształtu. W 1990 roku służba meteorologiczna Francji zaproponowała grupie analogicznych służb z Europy Środkowej realizację wspólnego projektu stworzenia spektralnego modelu mezoskalowego ALADIN i eksploatacji go na potrzeby operacyjnego prognozowania pogody. W negocjacjach ze stroną francuską Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej reprezentował ówczesny dyrektor do spraw prognoz Adam Wojtach. Prace ruszyły w 1991 roku i po kilku latach nowo powstały model ALADIN rozpoczął swoją służbę - najpierw w Météo-France, a później w kolejnych krajach współpracujących w projekcie. Obecnie konsorcjum ALADIN zrzesza służby 16 państw: Francji, Belgii, Portugalii, Maroka, Tunezji, Algierii, Polski, Czech, Słowacji, Austrii, Węgier, Bułgarii, Rumunii, Słowenii, Chorwacji i Turcji.



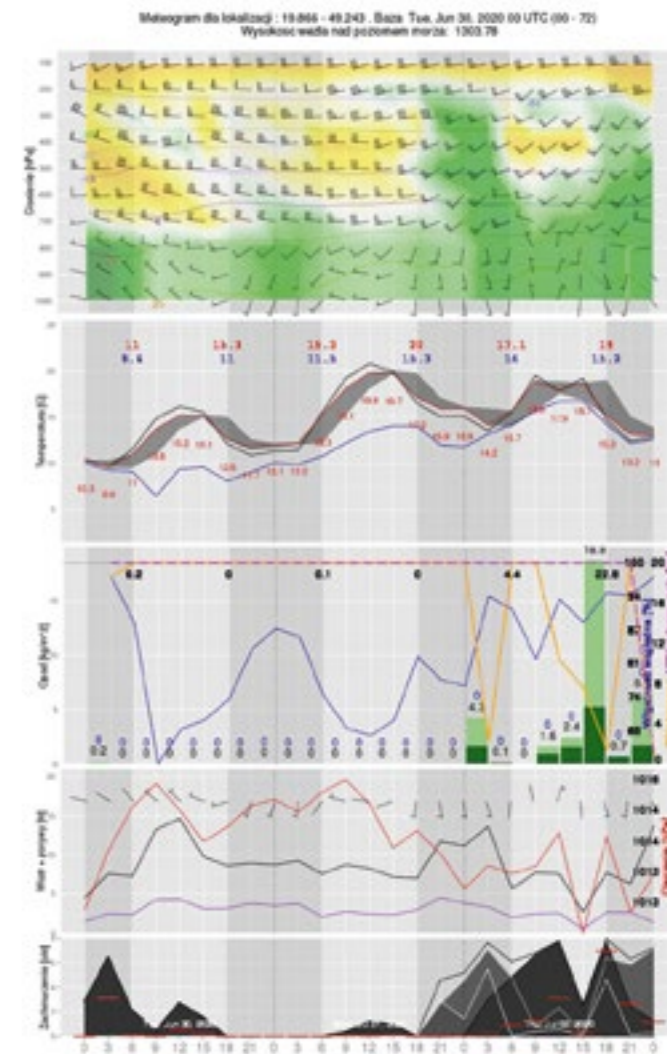
Topografia modelu AROME o rozdzielczości 0,5 km – testowa domena dla Tatr; przy tak dobrej rozdzielczości widać poszczególne pasma górskie oraz doliny rzek (źródło: Zakład Prognoz Numerycznych ALADIN)

**ALADIN w XXI wieku.** Aktualnie w skład systemu ALADIN, bo tak nazywamy zestaw modeli rozwijanych w konsorcjum, wchodzi model globalny ARPEGE oraz modele lokalne: ALADIN, ALARO i AROME. Model ARPEGE jest uruchamiany cztery razy dziennie w Météo-France na siatce o rozdzielczości przestrzennej od 7,6 km do 37 km (7,6 km w Europie). Dostarcza dane początkowe i brzegowe dla modeli wykorzystywanych w krajach konsorcjum. Przez wiele lat głównym modelem lokalnym był ALADIN, jednak ostatnio został wyparty przez pracujące w lepszych rozdzielczościach ALARO i AROME.

Od początku istnienia konsorcjum ALADIN współdzielili kod modeli z ECMWF. Co pół roku odbywa się wymiana doświadczeń i najnowszych osiągnięć między grupami, co zapewnia obustronny, dynamiczny rozwój. W ostatnich latach realizowana jest fuzja konsorcjów ALADIN i HIRLAM. Zgodnie z najnowszymi planami nowa grupa, zrzeszająca 26 krajów, rozpocznie działalność w 2021 roku. Jej głównym celem będzie tworzenie jak najlepszych modeli numerycznych prognoz pogody.

**Po co tyle modeli?** Globalnym modelem, na którym opierają się aktualnie zarówno ALARO, jak i AROME, jest ARPEGE. Jego siatka obliczeń nie jest rozłożona równomiernie, lecz wagowo. Największą wagę (i najwyższą rozdzielczość) ma region Europy Zachodniej i Środkowej, natomiast najmniejszą (i najrzadziej rozmieszczoną sieć obliczeń) mają antypody (Australia i Oceania). Pozwala to skupić się na regionach, dla których prognoza jest najważniejsza, przy jednoczesnej oszczędności czasu potrzebnego na obliczenia obejmujące cały glob. Model globalny ma jedynie warunki początkowe, gdyż topologia jego siatki jest sferyczna (nie jest to wycinek większej całości, lecz cała atmosfera Ziemi).

Dlaczego w takim razie potrzebujemy modeli regionalnych? Ponieważ traktują one zjawiska miejscowe - takie jak fronty powietrza dla ALADIN, głęboka konwekcja dla AROME, zjawiska mezoskalowe dla ALARO - z większą dokładnością niż model globalny. To, co w modelu globalnym jest opisywane jednym równaniem, w modelu średniej



Meteorogram dla modelu AROME; pięć paneli przedstawiających prognozy dla wybranego punktu (od góry: profil atmosfery – wilgotność względna, temperatura i wiatr na poziomach ciśnieniowych; temperatura – na poziomie 2 m nad gruntem, na powierzchni gruntu, maksymalna i minimalna temperatura oraz temperatura punktu rosy; opady – suma opadów, wilgotność względna na poziomie 2 m nad gruntem, widzialność; wiatr – wiatr i porywy wiatru na wysokości 10 m nad gruntem, ciśnienie na poziomie morza; zachmurzenie – zachmurzenie chmurami piętra niskiego, średniego i wysokiego oraz zachmurzenie całkowite)

skali (czyli wyższej rozdzielczości) rozrasta się do długiej sekwencji wzorów i zależności. Przykładem jest mikrofizyka chmur, szczególnie rozbudowana w AROME. W modelu globalnym nie interesuje nas, jak rozłoży się opad czy temperatura w konkretnym paśmie górskim. Natomiast modele o wyższej rozdzielczości są w stanie coraz lepiej przewidywać pogodę w obszarach pogórza i typowo górskich (Tatry, Beskidy, Bieszczady). Nie od dziś wiadomo, że prognozowanie w tych rejonach, podobnie jak przewidywanie sytuacji ekstremalnych, to test dokładności modeli.



Modele konsorcjum ALADIN są wykorzystywane w IMGW-PIB od wielu lat. Stanowią przede wszystkim wsparcie dla synoptyków przy prowadzeniu osłony meteorologicznej i hydrologicznej kraju. Ponadto znalazły zastosowanie w osłonie lotnictwa cywilnego, prognozach zanieczyszczenia i jakości powietrza, badaniach klimatu i prognozach nowcastingowych. W najbliższym czasie w modelach z rodziny ALADIN będą wprowadzane kolejne udoskonalenia: przedłużenie horyzontu czasowego prognozy do 36 godzin i 72 godzin (odpowiednio dla AROME i ALARO) czy uwzględnienie pola krupy śnieżnej oraz aerozoli w ALARO. Przyszłością modelowania mogą być prognozy zespołowe, znaczne zwiększenie rozdzielczości przestrzennej i wykorzystanie metod sztucznej inteligencji.

**ALADIN na służbie.** Intensywne i długotrwałe opady deszczu (skutkujące podtopieniami lub powodzią), gwałtowne burze, nawałnice, opady gradu, susze - te coraz częściej pojawiające się zjawiska ekstremalne powodują poważne straty w gospodarce oraz mieniu społeczeństwa. Modele numeryczne pozwalają pośrednio ograniczyć koszty takich kataklizmów. Na podstawie analizy ich wyników IMGW-PIB przekazuje odpowiednim służbom alerty i ostrzeżenia, a mediom informacje na temat możliwych zagrożeń.

Dzięki codziennej eksploatacji użytkownicy modeli wychwytyją błędy w ich oprogramowaniu i przyczyniają się do ciągłego rozwoju produktów. Bardzo istotnym elementem są szkolenia pracowników Zakładu Prognoz Numerycznych ALADIN w krajach konsorcjum ALADIN. Ponadto eksperci IMGW-PIB prowadzą badania naukowe i testy, których wyniki mogą w przyszłości wpłynąć na kształt modeli z rodziny ALADIN i zwiększyć ich zdolność prognozowania.

W 2020 roku ALADIN zostało włączone do ACCORD, największego na świecie międzynarodowego konsorcjum, zajmującego się prognozowaniem pogody, w którym uczestniczy także IMGW-PIB. Prace grupy koncentrować się będą na rozwoju systemów prognozowania pogody przy użyciu najnowszych badań naukowych i pionierskich technologii superkomputerowych.

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.1002/kj.49708235202>

**DR MARCIN KOLONKO.** Zajmuje się w IMGW-PIB numerycznym prognozowaniem pogody w grupie ALADIN. W szczególności prowadzi prelekcje poświęcone modelom ALARO i AROME. Aktualnie zajmuje się prognozami wiązkowymi. Pasjonuje się astronomią i turystyką górską.

foto: NOAA on Unsplash







# Niełatwe przewidywanie pogody. Modele, prognozy i superkomputery

prof. Mariusz Figurski, Dyrektor Centrum Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB

Atmosfera ziemską to skomplikowany układ hydrodynamiczny. Jego funkcjonowanie opisują cząstkowe równania różniczkowe nieposiadające z reguły rozwiązań analitycznych. Dlatego w prognozowaniu stanu atmosfery wykorzystuje się rozwiązania przybliżone, oparte na zaawansowanych metodach matematycznych i numerycznych. Ponieważ działania te są wykonywane na ogromnej liczbie danych, stosuje się w tym celu najwyższej jakości superkomputery. Powstające w ten sposób numeryczne modele pogody symulują czasoprzestrzenną ewolucję stanu atmosfery, a w istocie są rozwiązaniem skomplikowanego układu cząstkowych równań różniczkowych.

Model numeryczny to specjalistyczne oprogramowanie, które oblicza określone wartości parametrów meteorologicznych dla tzw. punktów węzłowych siatki, asymilując jednocześnie tysiące danych pomiarowych bezpośrednich i teledetekcyjnych. Obraz modelu otrzymuje się poprzez nałożenie na powierzchnię Ziemi siatki o jednakowej odległości oczek (na wzór siatki południków i równoleżników - oczka to ich punkty przecięcia, tzw. punkty gridowe). W modelach numerycznych pola meteorologiczne są opisywane przez skończoną liczbę punktów, a obliczenia - wykonywane w punktach nazywanych węzłami siatki. Odległość w poziomie pomiędzy sąsiednimi węzłami definiuje poziomą rozdzielczość modelu. Im mniejsza odległość, tym lepsza rozdzielczość i więcej szczegółów może być uwzględnionych w modelu.

Pogodę na Ziemi w dużej mierze kształtują procesy zachodzące w najniższej części atmosfery, zwanej warstwą graniczną. W zależności od warunków meteorologicznych warstwa ta może mieć zasięg od kilkunastu metrów do nawet kilku kilometrów. Liczba poziomów i ich rozkład w pionie określają drugi z parametrów modelu - rozdzielczość pionową.

W uproszczeniu zmiana pogody oznacza przekształcenie parametrów fizycznych atmosfery wskutek współdziałania wielu procesów fizycznych, dzięki którym dochodzi do transportu i transformacji energii. Wszystkie takie procesy można opisać równaniami matematycznymi. Wprowadziliśmy do nich szereg parametrów opisujących stan atmosfery w danym momencie, możemy policzyć, jak zmieniają się one po pewnym czasie. Numeryczną prognozę pogody można więc opisać jako proces przetwarzania danych obserwacyjnych w informację o przewidywanym stanie atmosfery.

**Modele globalne i mezoskalowe - dokładność prognoz numerycznych.** Dyskretność równań opisujących atmosferę (i stosowanie jawnych schematów) zmusza do wyboru odpowiednich wartości kroku czasowego całkowania i podziału przestrzeni prognozy siatką o skończonym rozmiarze oczka. W obliczeniach prognoz pogody wykorzystuje się hierarchiczny system modeli numerycznych, w którym wyróżnia się modele globalne i mezoskalowe. Modele globalne, o rozdzielczości prze-

strzennej 1 lub 0,5 stopnia, dobrze opisują wielkoskalowe ruchy atmosfery. Procesy fizyczne o mniejszej skali, tj. znajdujące się poza zdolnością rozdzielczą siatki modelu globalnego, muszą być odpowiednio sparametryzowane. Wynika to z tego, że nawet niewielkie zmiany stanu atmosfery mogą mieć duże znaczenie dla kształtowania lokalnych warunków meteorologicznych. Dlatego należy te działania wykonywać z dużą ostrożnością, od tego bowiem zależy jakość prognozy. W tym celu zmniejsza się krok czasowy obliczeń i zwiększa rozdzielczość siatki obszaru prognozy. Obu tych procedur nie można jednak nadużywać. Po pierwsze, skala zjawisk może skutkować niestabilnością numeryczną, co w konsekwencji może bardzo szybko pogorszyć jakość prognozy, a po drugie, zwiększanie rozdzielczości czasoprzestrzennej modelu powoduje wydłużenie czasu wykonania obliczeń. Aby uzyskać jak najdokładniejszą prognozę pogody w możliwie krótkim czasie, korzysta się z kilku modeli zagnieżdżonych w sobie. Dla każdego punktu siatki model oblicza prognozę wartości szeregu parametrów dwu-, trzy- i czterowymiarowych w przekroju pionowym dla kilkudziesięciu terminów. Parametry można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej zalicza się zrozumiałe i czytelne dla każdego człowieka wskaźniki, np. temperaturę powietrza, kierunek i prędkość wiatru czy ciśnienie atmosferyczne, do drugiej - atrybuty specjalistyczne, które synoptycy wykorzystują do prognozowania pogody, jak współczynniki konwekcji, informacje o prądach strumieniowych, parametry masy powietrza itp. Ponieważ wyniki modelowania są zapisywane w mało zrozumiałych formatach, przedstawia się je zwykle w postaci map obrazujących przestrzenne zmiany parametrów dla określonych terminów oraz diagramów wyświetlających zmienność wybranego parametru lub grupy parametrów w czasie.

Nie ma idealnego numerycznego modelu pogody. Nie ma również modeli, które z jednakową precyzją prognozują wszystkie parametry opisujące atmosferę ziemską. Jedne programy lepiej przewidują temperaturę powierzchniową, drugie - opad konwekcyjny. Problem ten można rozwiązać na kilka sposobów. Najprostszym i najpowszechniej stosowanym jest wykorzystanie kilku modeli o zróżnicowanej rozdzielczości, co wymaga dużej mocy obliczeniowej superkomputerów.





foto: Olivier de Sauleterre on Unsplash

Jeśli nie dysponuje się taką mocą, stosowane są modele wielowiązkowe, które zamiast jednej, najbardziej prawdopodobnej prognozy składającej się z różnych parametrów pozwalają stworzyć zestaw hipotetycznych prognoz. Na ich podstawie określa się zakres możliwych przyszłych stanów atmosfery.

#### **Modelowanie pogody w IMGW-PIB.**

W Instytucie stosuje się i rozwija obydwie metody modelowania numerycznego pogody, a jednocześnie tworzy się rozwiązania hybrydowe. Wszystkie użytkowane modele należą do grupy modeli regionalnych - mezoskalowych, które wymagają zdefiniowania warunków

początkowych z modeli globalnych i asymilacji dodatkowych danych obserwacyjnych z obszaru objętego analizą. Prognozy pogody w Instytucie przygotowuje się z wykorzystaniem dwóch podstawowych modeli, COSMO i ALADIN, które mogą pracować również w trybie modeli wielowiązkowych.

COSMO (Consortium for Small-scale Modeling) jest rozwijany w ramach międzynarodowej współpracy konsorcjum COSMO, do którego IMGW-PIB należy od 2003 roku. Model ten wykorzystuje system analizy i asymilacji danych pomiarowych dostarczanych z modelu globalnego ICON (Icosahedral Nonhydrostatic; liczonego w DWD).

Jego wyniki służą jako dane wejściowe do modeli hydrologicznych opad-odpływ, modeli nowcastingowych oraz falowania i służą zespołom synoptyków do przygotowywania codziennych prognoz, ostrzeżeń i komunikatów pogodowych. Model COSMO jest uruchamiany w IMGW-PIB cztery razy na dobę, w terminach 00, 06, 12, 18 UTC, na siatkach o dwóch rozdzielczościach horyzontalnych. Prognozy na siatce 7 km są wykonywane z wyprzedzeniem do 78 godzin dla Europy Środkowej i obszaru Morza Bałtyckiego. Prognozy na siatce 2,8 km wykonuje się dla 48 godzin w odniesieniu do obszaru Polski i fragmentów krajów ościennych.

Drugą grupę stanowią modele AROME i ALARO, rozwijane w ramach konsorcjum i systemu ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement International). AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle) służy do prognozowania pogody na siatkach o rozdzielczości poniżej 2,5 km. Jest wykorzystywany na całym świecie do przewidywania groźnych zjawisk pogodowych, w badaniach klimatu, a ostatnio coraz częściej jako model nowcastingowy, uruchamiany w systemach typu RUC (Rapid Update Cycle) w domenach o rozdzielczości przestrzennej rzędu 1 km. W IMGW-PIB

model AROME działa operacyjnie od 2015 roku na siatce o rozdzielczości przestrzennej 2 km i 70 poziomach wertykalnych. Prognozy są liczone cztery razy dziennie na najbliższe 30 godzin. Model ALARO (ALADIN and AROME) jest rozwijany głównie przez kraje grupy RC LACE. Jego fizyka predysponuje go do prognozowania pogody w skalach tzw. szarej strefy, czyli pomiędzy prognozami mezoskalowymi a skalami pozwalającymi na rozwiązywanie problemów konwekcyjnych. ALARO jest wykorzystywany operacyjnie przez wiele krajów konsorcjów ALADIN i HIRLAM w prognozach deterministycznych, probabilistycznych

i badaniach klimatu. W IMGW-PIB działa operacyjnie od 2014 roku na siatce o rozdzielczości przestrzennej 4 km i 70 poziomach wertykalnych. Prognozy są liczone cztery razy dziennie z wyprzedzeniem 72 godzin.

**Model WRF.** W 2019 roku do gamy mezoskalowych modeli pogody został włączony niehydrostatyczny model WRF (Weather Research and Forecasting), opracowany i rozwijany przez NCAR (National Center for Atmospheric Research) oraz NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), wdrożony operacyjnie przez prof. Mariusza Fi-



gurskiego z Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej w Centrum Informatycznym TASK, na superkomputerze Tryton, w ramach specjalnej wysokorozdzielczej wersji WRF METEOPG. IMGW-PIB wykorzystuje ten model na mocy umowy podpisanej z Politechniką Gdańską. Model WRF jest udostępniany na licencji open source, bez ograniczeń do zastosowań naukowych i komercyjnych. Zastosowano w nim wysokorozdzielcze dane geograficzne (obejmujące m.in. topografię, szorstkość podłoża, użytkowanie gruntów) i zoptymalizowaną parametryzację fizyki dla Europy Środkowej. Operacyjny model wykorzystuje trzy siatki zanurzone o rozdzielczościach odpowiednio: 12,5 km, 2,5 km i 0,5 km, na 50 wertykalnych hybrydowych poziomach obliczeniowych. Pierwsza siatka obejmuje kontynent europejski, druga - obszar Polski, trzecia - województwo pomorskie. Do prognozowania pogody w modelu WRF METEOPG asymilowane są dane z globalnego modelu GFS (Global Forecast System) o rozdzielczości 0,25°, który zawiera sprzężone modele atmosfery, gleby i oceanu. Alternatywnie system może asymilować dane z modelu europejskiego ICON-EU (Icosahedral Nonhydrostatic for Europe) o rozdzielczości 6,6 km lub pobierać dane wejściowe z modeli IMGW COSMO i ICON-LM oraz ERA5 z ECMWF (European Center for Medium-Range Weather Forecast). W ciągu doby system WRF METEOPG jest uruchamiany dla czterech głównych terminów synoptycznych (00, 06, 12 i 18) z prognozą na 60 godzin dla wszystkich siatek obliczeniowych.

**Modele globalne.** Oprócz modeli mezoskalowych w wielu analizach związanych z modelowaniem pogody wykorzystywany jest model GFS - globalny system prognozowania pogody krótko- i średnioterminowej, obsługiwany przez służbę meteorologiczną USA (National Weather Service). Wyniki z tego modelu są udostępniane bezpłatnie do wszelkich zastosowań, także komercyjnych. Najważniejszym składnikiem GFS jest numeryczny model prognozy pogody. Od czerwca 2019 roku model ten działa z nową wersją rdzenia dynamicznego FV3 (Finite-Volume on a Cubed-Sphere) o globalnej rozdzielczości -13 km i 64 poziomach w pionie. Jednakże wyniki modelu są udostępniane na siatkach o mniejszych rozdzielczościach: 0,25 deg (~27 km), 0,5 deg (~55 km) oraz 1 deg (~111 km). Model GFS jest uruchamiany cztery razy w cią-

*POSTĘPY W NUMERYCZNYCH PROGNOZACH POGODY TO CICHĄ REWOLUCJĄ. OPIERAJĄ SIĘ ONE NA SYSTEMATYCZNYM, WIELOLETNIM ROZWOJU TECHNOLOGII ORAZ WIEDZY NAUKOWEJ. NIE TOWARZYSZYŁY IM, POZA NIELICZNYMI WYJĄTKAMI, SPEKTAKULARNE I PRZEŁOMOWE ZDARZENIA W DZIEDZINIE FIZYKI. MIMO TO ZNACZENIE NUMERYCZNEJ PROGNOZY POGODY DLA ROZWOJU TEGO OBSZARU NAUKI JEST NIEZAPRZECZALNY. GLOBALNA, REGIONALNA LUB LOKALNA PROGNOZA POGODY, JAKO PROBLEM OBLICZENIOWY, JEST PORÓWNYWALNA Z SYMULACJĄ LUDZKIEGO MÓZGU I EWOLUCJI WCZESNEGO WSZECHŚWIATA. TYMCZASEM KAŻDEGO DNIA TE SKOMPLIKOWANE DZIAŁANIA SĄ WYKONYWANE W TYSIĄCACH OŚRODKÓW PROGNOZYSTYCZNYCH NA CAŁYM ŚWIECIE. PAMIĘTAJMY, ŻE NUMERYCZNA PROGNOZA POGODY JEST ROZWIĄZANIEM ZAGADNIENIA POCZĄTKOWEGO. JEJ JAKOŚĆ JEST ŚCIŚLE POWIĄZANA ZE STANEM MODELU I Z USTAWIENIEM PARAMETRÓW POCZĄTKOWYCH, KTÓRE POWINNY JAK NAJLEPIEJ ODZWIERCIEDLAĆ RZECZYWISTĄ SYTUACJĘ W ATMOSFERZE.*

gu doby i generuje maksymalnie 16-dniowe (384 godziny) prognozy pogody. Dla siatki 0,25 deg, w zakresie do 120 godzin (5 dni), interwał prognozy wynosi 1 godzinę; prognoza powyżej 120 godzin (5-16 dni) jest dostępna z interwałem 3-godzinnym. Prognozy na siatkach 0,5 deg oraz 1 deg są dostępne ze stałym, 3-godzinnym interwałem. GFS, obok europejskiego ECMWF oraz kanadyjskiego GEM (Global Environmental Multiscale Model), należy do najpowszechniej wykorzystywanych modeli numerycznych na świecie. W IMGW-PIB wykorzystuje się także wyniki modeli globalnych ARPEGE (Météo-France) oraz ICON (Deutscher Wetterdienst) do zasilania modeli lokalnych (odpowiednio ALARO/AROME oraz COSMO).

**Nowcasting - prognozowanie terazniejszości.** Do prognoz ultrakrótkoterminowych w IMGW-PIB wykorzystuje się tzw. modele nowcastingowe. Pierwszy z nich, INCA (Integrated Nowcasting Through Comprehensive Analysis), adaptowany do polskich warunków jako INCA-PL2, przetwarza dane z różnych źródeł: prognoz meteorologicznych z mezoskalowego modelu numerycznego AROME oraz pomiarów telemetrycznych ze stacji naziemnych. Wynikiem są prognozy nowcastingowe

z bardzo wysoką rozdzielczością przestrzenną (1 km), powstałe na bazie prognoz AROME aktualizowanych co godzinę (bazę tej aktualizacji stanowią wyniki pomiarów naziemnych oraz uwzględnienie m.in. orografii terenu). Model zapewnia bardzo wysoką sprawdzalność prognoz na najbliższe 8 godzin. Drugim modelem nowcastingowym jest opracowany w IMGW-PIB SCENE (Storm Cell Evolution and Nowcasting). Prognozuje on pole opadu z wysoką rozdzielczością czasową (10 minut) i przestrzenną (1 km). Model działa na podstawie analizy przemieszczania się oraz zmian pola opadu, wyznaczonego na podstawie pomiarów deszczomierzowych, radarowych i satelitarnych systemem RainGRS. Czas wyprzedzenia tych prognoz, przy zachowaniu odpowiedniej sprawdzalności, wynosi maksymalnie 2 godziny. Przedłużenie czasu wyprzedzenia do 8 godzin uzyskano przez połączenie prognoz SCENE z prognozami modelu AROME interpolowanymi do wysokiej rozdzielczości SCENE, co jest realizowane przez hybrydowy model MERGE.

**PROF. DR HAB. INŻ. MARIUSZ JÓZEF FIGURSKI.** Dyrektor Centrum Modelowania Meteorologicznego IGW-PIB i profesor Politechniki Gdańskiej. Specjalista w zakresie geodezji satelitarnej, meteorologii GNSS, technologii satelitarnych i numerycznego modelowania pogody. Ekspert w grupie parlamentarnej ds. przestrzeni kosmicznej. Autor nowej koncepcji prowadzenia badań w ramach otwartych zespołów naukowych „open team”.





# Nowcasting, czyli o pogodzie za chwilę

Jan Szturc, Anna Jurczyk, Katarzyna Ośródka, Mateusz Giszterowicz – IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego

Według ogólnej definicji WMO nowcasting to prognozowanie dowolną metodą z wysoką rozdzielczością przestrzenną i wyprzedzeniem do 6 godzin, włączając w to informacje o aktualnej pogodzie. Jako kryterium często używa się też wyprzedzenia 8-godzinnego. Definicja ta stawia modele nowcastingowe w opozycji do klasycznych numerycznych modeli mezoskalowych, dla których podstawę przy tworzeniu prognoz, oprócz znajomości warunków początkowych, czyli aktualnych wartości parametrów meteorologicznych, stanowi rozwiązywanie równań matematycznych opisujących ruch atmosfery oraz zachodzące w niej procesy fizyczne. Największym ograniczeniem tych modeli jest czas niezbędny do przetworzenia ogromnej ilości danych wejściowych oraz przeprowadzenia obliczeń, co na ogół zajmuje kilka godzin. Z tego względu modele mezoskalowe nie mogą być zbyt często uruchamiane. Nowcasting pozwala wypełnić tę lukę i zapewnia w tym przedziale czasowym znacznie większą dokładność i rozdzielczość.

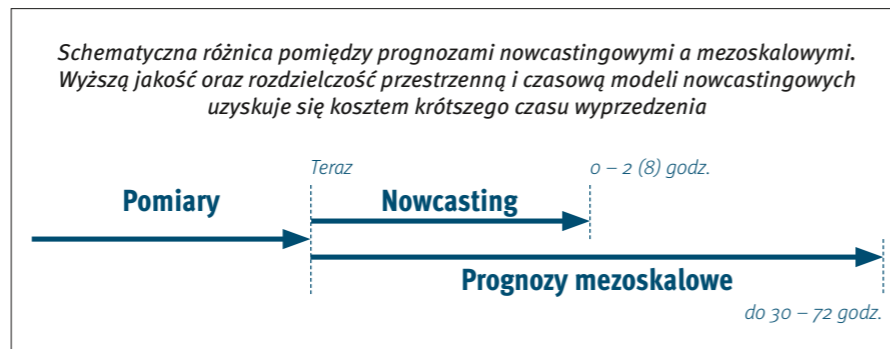


Modele nowcastingowe wykorzystuje się do prognozowania właściwie wszystkich parametrów meteorologicznych. Najczęściej jednak stosuje się je do prognoz pola opadu atmosferycznego, a zwłaszcza opadów nawalnych, związanych ze zjawiskami konwekcyjnymi, czyli m.in. burzami. Dynamika i zmienność przestrzenna tych zjawisk bowiem wymaga narzędzi prognostycznych, dzięki którym otrzymuje się wyniki z wyprzedzeniem 2-godzinnym, a nawet godzinnym, jak w znanym amerykańskim modelu TITAN.

Do nowcastingu opadu najczęściej stosowana jest ekstrapolacja. W tej metodzie zakłada się, że zmiany danej wielkości meteorologicznej w krótkiej perspektywie czasowej następują głównie na skutek adwekcji, czyli przemieszczenia pola tej wielkości. Natomiast ewolucja tego pola, następująca z upływem czasu, jest mniej istotna. Stosowanie metody ekstrapolacyjnej sprawia, że przy bardzo krótkich czasach wyprzedzenia sprawdzalność prognoz jest bardzo wysoka; szybko maleje ona wraz z wydłużaniem czasu wyprzedzenia.

Prognozy nowcastingowe generuje się najczęściej z wysoką rozdzielczością czasową, rzędu 10 minut, i przestrzenną, rzędu 1 km. Dąży się natomiast do osiągnięcia rozdzielczości, odpowiednio, nawet 1 minuty i 100 m, gdyż takie prognozy opadu mają coraz większe znaczenie praktyczne, np. przy przewidywaniu zjawisk hydrologicznych, szczególnie gwałtownych wzbrań opadowych w małych zlewniach górskich oraz miejskich, albo w systemach ostrzeżeń przed groźnymi zjawiskami meteorologicznymi. Aby sprostać tym zadaniom niezbędne jest poprawne estymowanie (odtworzenie) pola opadu w celu uzyskania warunków początkowych dla prognoz. Niezbędne są do tego dobrej jakości pomiary - głównie radarowe, które obrazują opad z bardzo wysoką rozdzielczością przestrzenną, oraz z telemetrycznej sieci posturków deszczomierzowych, dostarczających punktowej informacji obciążonej mniejszymi błędami niż dane radarowe. Mając odpowiednią ilość danych wysokiej jakości, możemy przystąpić do nowcastingu opadu. Jak to się robi?

**Ekstrapolacja.** Kierunek przemieszczenia się (adwekcji) pola opadu jest najczęściej wyznaczany poprzez poszukiwanie takiego wektora, dla którego korelacja wzajemna pomiędzy aktualnym polem opadu a polem z poprzedniego kroku obliczeniowego jest



Parametry modeli estymacji i prognoz opadu wykorzystywanych w IMGW-PIB do nowcastingu opadu

Model	RainGRS	SCENE	MERGE	AROME
Rodzaj	Estymacja	Prognoza nowcastingowa	Prognoza hybrydowa (SCENE + AROME)	Prognoza mezoskalowa
Rozdzielczość przestrzenna	1 km	1 km	1 km	2 km
Rozdzielczość czasowa (krok czasowy)	10 min	10 min	10 min	1 godz.
Częstotliwość aktualizacji	10 min	10 min	10 min	6 godz.
Najdłuższy czas wyprzedzenia	-	2 godz. (8 godz. dla potrzeb MERGE)	8 godz.	30 godz.
Dane wejściowe	Deszczomierzowe, radarowe i satelitarne	RainGRS	SCENE, AROME	Model globalny ARPEGE

największa. W celu uwzględnienia zmienności przestrzennej pola opadu w całej domenie obliczeniowej jest ono dzielone na subdomeny, a następnie dla każdej subdomeny wyznaczany jest osobny wektor. W ten sposób uzyskuje się pole wektorów przemieszczenia. Po przeprowadzeniu ich korekty z zastosowaniem analizy wariacyjnej lub algorytmów kontroli jakości wektorów należy je interpolować do potrzebnej rozdzielczości przestrzennej.

Inne podejście wprowadzają schematy nowcastingu obiektowego. Wyróżnia się w nim poszczególne obiekty opadowe, które są traktowane jako niezależne od siebie, a wektory ich przemieszczenia wyznacza się dla każdego z nich osobno. W tym celu identyfikuje się pojedyncze komórki opadowe lub ich grupy w kolejnych krokach obliczeniowych oraz wyznacza ich przemieszczenie.

Adwekcję pola opadu na czas wyprzedzenia dłuższy niż jeden krok obliczeniowy wykonuje się poprzez składanie kolejnych wektorów. Wektory te różnią się dla każdego następnego kroku obliczeniowego, ponieważ są wyznaczane z położenia, do którego dany

piksel został przesunięty w poprzednim kroku. Umożliwia to uwzględnienie zmienności przestrzennej i czasowej pola wektorów.

**Uwzględnienie konwekcji.** Czas wyprzedzenia prognoz ekstrapolacyjnych zależy od rodzaju i charakterystyki przestrzennej pola opadu. W praktyce w przypadku intensywnych opadów konwekcyjnych ekstrapolacja daje zadowalające wyniki dla czasów wyprzedzenia niewiele dłuższych niż 1 godzina. Ponieważ przemieszczanie się pojedynczych komórek konwekcyjnych może znacząco różnić się od ruchu opadów rozlewnych, często stosuje się podejście, w którym wykorzystywane są odrębne wektory przemieszczenia dla opadów konwekcyjnych i rozlewnych. W związku z tym kluczowym zagadnieniem staje się poprawne rozróżnienie rodzaju opadu.

Najprostszą techniką detekcji obszarów występowania konwekcji jest stosowanie danych radarowych, przy czym jako kryterium w uproszczeniu można przyjąć ustalony próg odbiciowości radarowej (35-45 dBZ). Bardziej zaawansowane modele

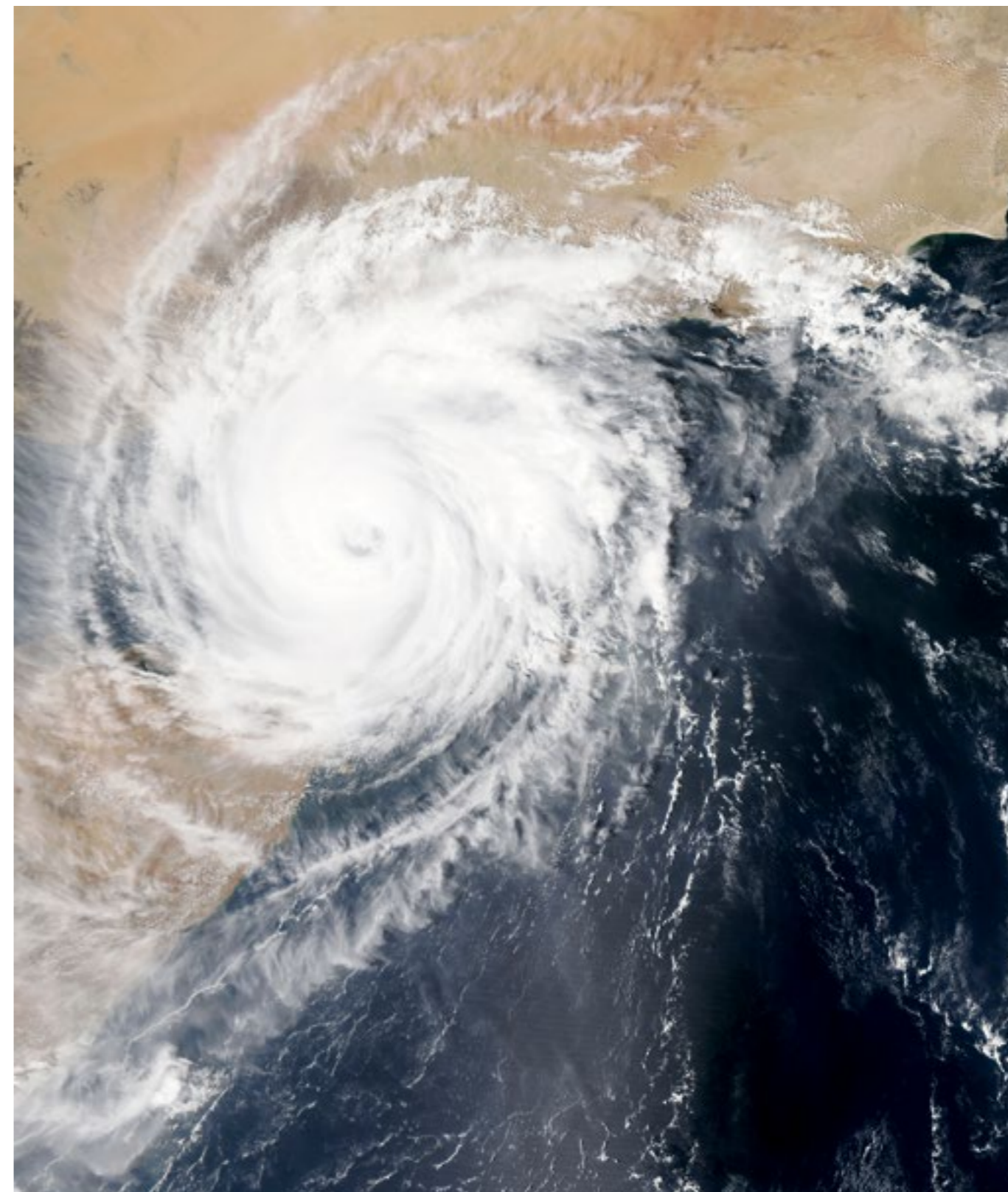


foto: NASA on Unsplash





Upowszechnienie się w ostatnich kilkunastu latach radarów meteorologicznych spowodowało znaczny rozwój prognoz nowcastingowych, które znalazły wiele zastosowań praktycznych, w szczególności w prognozach opadu. Efektywnie wykorzystuje się je do prognozowania zjawisk hydrologicznych, szczególnie gwałtownych wezbrań opadowych (flash floods) w małych zlewniach górskich oraz miejskich, w których spływ wody opadowej następuje bardzo szybko i jest ściśle powiązany ze zróżnicowanymi warunkami lokalnymi. Innym ważnym i ciągle poszerzającym się obszarem zastosowań dla metod nowcastingowych jest zasilanie danymi lokalnych systemów ostrzeżeń przed groźnymi zjawiskami pogodowymi generowanych dla społeczeństwa, w tym dla turystów, a także do osłony meteorologicznej różnego rodzaju imprez masowych, np. sportowych. Prognozy nowcastingowe są ponadto bardzo istotne w osłonie lotnictwa, transportu, energetyki czy rolnictwa, dla których istotna jest duża rozdzielczość oraz praktycznie natychmiastowy dostęp do prognoz.

wykorzystują inne dane radarowe, np. ilość płynnej wody w pionowej kolumnie atmosfery (VIL) czy 3-wymiarowe pola odbiciowości radarowej. Stosuje się też dane z innych systemów pomiarowych, np. z systemu wyładowań burzowych, które są mocno skorelowane z istnieniem konwekcji. Ostatnio częstym rozwiązaniem jest automatyczny podział pola opadu na warstwy związane ze skalą przestrzenną obiektów opadowych - wykorzystuje się do tego analizę fourierowską, rozkładając pole opadu na składowe harmoniczne wyznaczone w skali przestrzennej.

**Ewolucja pola opadu**, czyli jego zmienność w czasie, jest - po ruchu (przemieszcza-

niu się) - drugą istotną cechą z punktu widzenia prognozowania. Ze względu na krótkie czasy wyprzedzenia w przypadku prognoz nowcastingowych można stosować najprostszą metodę uwzględnienia ewolucji opadu poprzez analizę jego zmian. Wprowadzenie zróżnicowanych trendów zmian przestrzennych dla poszczególnych obiektów opadowych daje względnie dobre wyniki.

W ostatnich latach pojawiły się również bardziej zaawansowane metody. W modelu GANDOLF brytyjskiego Met Office zastosowano podejście, w którym wyznaczany jest aktualny etap życia danej komórki konwekcyjnej, a następnie symuluje się jej dalszy rozwój - wzrost lub zanikanie - za pomocą konceptualnego modelu życia komórki

konwekcyjnej. Inną, statystyczną koncepcję zastosowano w australijsko-brytyjskim modelu STEPS, w którym do prognozowania ewolucji pola opadu wykorzystano model autoregresyjny drugiego rzędu AR(2).

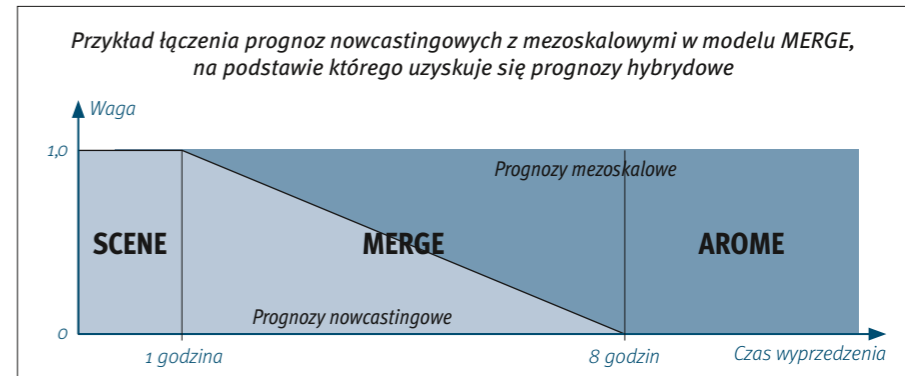
Niektóre operacyjnie działające modele nowcastingowe prognozują zmiany w intensywności opadu poprzez łączenie ich z prognozami z modeli mezoskalowych, np. za pomocą średniej ważonej czasem wyprzedzenia. W ten sposób otrzymuje się tzw. prognozy hybrydowe. Dzięki takiemu połączeniu czas wyprzedzenia prognoz hybrydowych może być znacznie wydłużony, nawet do kilku godzin.

Prowadzone obecnie prace idą w kierunku stworzenia bardziej zaawansowanych systemów, łączących modele nowcastingowe z mezoskalowymi, np. poprzez wykorzystanie prognoz mezoskalowych do prognozowania przebiegu ewolucji pola opadu, a z drugiej strony asymilację wysokiej rozdzielczości estymat opadu oraz prognoz nowcastingowych do modeli mezoskalowych.

Prognozy generowane przez różnego rodzaju modele nowcastingowe były porów-

nywane w czasie rzeczywistym przy okazji różnych dużych imprez sportowych, np. igrzysk olimpijskich. Eksperymenty takie wykazują, że generalnie modele nowcastingowe dają lepsze prognozy niż modele mezoskalowe czy prognozy hybrydowe przy czasach wyprzedzenia do 3 godzin.

**Zastosowanie nowcastingu w IMGW-PIB.** Punktem wejścia do nowcastingu opadu jest estymacja pola opadu na powierzchni gruntu. W IMGW-PIB estymaty pola opadu uzyskuje się z systemu RainGRS, który łączy dane opadowe w postaci 10-minutowych sum z telemetrycznej sieci deszczomierzowej, radarowej POLRAD i z satelitów geostacjonarnych Meteosat. Podstawą zastosowanego schematu łączenia danych jest algorytm kombinacji warunkowej, opartej na ilościowej informacji o jakości danych wejściowych, co pozwala wykorzystać zalety poszczególnych technik pomiarowych i zminimalizować ich wady. W przypadku deszczomierzy zaletą jest stosunkowo wysoka dokładność pomiaru, a wadą - brak informacji o opadzie pomiędzy deszczomie-



rzami, które są rozmieszczone dość rzadko. Z kolei radary meteorologiczne odwzorowują pole opadu z bardzo wysoką rozdzielczością, ale wymagają stosowania złożonych algorytmów korekt z powodu dużej liczby zakłóceń oraz ech niemeteorologicznych. Pomiary satelitarne natomiast cechują się dużą niezawodnością i brakiem ograniczeń w zasięgu, jednak estymacja opadu na ich podstawie jest raczej niskiej jakości. W IMGW-PIB operacyjnie użytkowane są dwa modele nowcastingowe - SCENE oraz INCA-PL2.

**SCENE (Storm Cell Evolution and Nowcasting)** jest modelem opracowanym w IMGW-PIB. Zawiera moduł detekcji opadów konwekcyjnych na podstawie informacji uzyskanych z radarów meteorologicznych i z systemu detekcji wyładowań atmosferycznych. Pole opadu jest dzielone na subdomeny, dla których wyznaczane są osobne wektory przemieszczenia, interpolowane przestrzennie do rozdzielczości 1 km x 1 km. Można stosować jedno pole wektorów adwekcji odrębne dla opadów konwekcyjnych i rozlewnych. W celu wydłużenia czasu wyprzedzenia prognoz nowcastingowych SCENE stosowany jest model hybrydowy MERGE, łączący prognozy SCENE z prognozami mezoskalowymi AROME. Podstawą integracji tych dwóch rodzajów prognoz jest zastosowanie funkcji wagowej, w której waga nowcastingu spada przy wydłużaniu czasu wyprzedzenia od 1,0 w początkowej godzinie do 0 po ośmiu godzinach.

**INCA-PL2** to model opracowany przez austriacką służbę meteorologiczną jako INCA (ang. Integrated Nowcasting Through Comprehensive Analysis) i zaadaptowany do pracy

na danych dostępnych w IMGW-PIB. Model ten prognozuje kilkanaście najważniejszych pól meteorologicznych: temperaturę powietrza na wysokości 2 m oraz przy powierzchni gruntu, temperaturę punktu rosy, temperaturę odczuwalną, wilgotność względną, ciśnienie, typ opadu, linię śniegu, poziom zamarzania, oblodzenie, prędkość i kierunek wiatru na wysokości 10 m oraz parametry konwekcji, takie jak CAPE, CIN, Lifted Index i inne, przy czym te ostatnie wyłącznie w postaci analiz bieżącej sytuacji (bez prognoz).

INCA korzysta z prognoz modelu mezoskalowego AROME, które są generowane cztery razy na dobę z godzinnym krokiem obliczeniowym, a więc dość długim, niemniej wystarczającym, jeśli chodzi o parametry meteorologiczne nie tak dynamiczne jak opad. Prognozy AROME są uaktualniane (update'owane) co godzinę pozyskiwanymi ze stacji synoptycznych i automatycznych aktualnymi wartościami poprzez ich dopasowywanie do pomiarów, przy czym wpływ pomiarów maleje ze wzrostem czasu wyprzedzenia. Ponadto prognozy te są przetwarzane do 1-kilometrowej rozdzielczości przestrzennej algorytmami uwzględniającymi topografię terenu.

**DR HAB. JAN SZTURC.** Profesor IMGW-PIB, kierownik Zakładu Nowcastingu. Jest autorem i współautorem wielu algorytmów i systemów działających operacyjnie w Zakładzie oraz autorem publikacji naukowych z zakresu meteorologii i hydrologii, w szczególności systemów kontroli jakości danych oraz estymacji pól meteorologicznych i prognoz nowcastingowych.

**ANNA JURCZYK.** Pracownik Zakładu Nowcastingu. Jest główną autorką i współautorką metodyk i algorytmów przeznaczonych do estymacji i prognoz opadu tworzonych w ramach Zakładu oraz autorką wielu publikacji naukowych z tych dziedzin. Stworzyła aplikacje i systemy, m.in. RainGRS (estymacja opadu), SCENE (prognozy opadu) i SPT (detekcja rodzaju opadu).

**KATARZYNA OŚRÓDKA.** Pracownik Zakładu Nowcastingu. Zajmuje się głównie jakością danych telemetrycznych i teledetekcyjnych, w tym radarowych oraz jest autorką wielu publikacji naukowych z tych dziedzin. Jest główną autorką operacyjnego systemu kontroli jakości danych radarowych RADVOL-QC i współautorką podobnego systemu dla danych deszczomierzowych oraz innych systemów tworzonych w ramach Zakładu.

**MATEUSZ GISZTEROWICZ.** Pracownik Zakładu Nowcastingu. Informatyk, administrator całej infrastruktury informatycznej i systemów działających operacyjnie w Zakładzie. Zaangażowany głównie w rozwój systemu prognostycznego INCA-PL2, organizację obiegu danych oraz wizualizację online produktów generowanych w Zakładzie.



# Zespół IMGW-PIB

wprowadza innowacyjny rdzeń dynamiczny do modelu prognozy pogody COSMO

Michał Ziemiański – IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego

**1 czerwca 2020 roku w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB wdrożono do pracy operacyjnej nową wersję regionalnego modelu COSMO dla krótkoterminowej prognozy pogody. Kolejne edycje modelu są regularnie przygotowywane przez konsorcjum COSMO, do którego należy również Polska, i wdrażane w krajach członkowskich. Nie byłoby więc w tym wydarzeniu nic szczególnego, gdyby nie to, że w najnowszej operacyjnej wersji modelu dla Polski zastosowano innowacyjny rdzeń dynamiczny opracowany przez zespół IMGW-PIB.**

Numeryczne modele pogody są podstawowym narzędziem obliczeniowym wspomagającym synoptyków w przygotowywaniu prognoz i ostrzeżeń. Działanie modelu polega na rozwiązywaniu matematycznych równań fizyki (jak II zasada dynamiki Newtona) opisujących ewolucję atmosfery. Operacje te są realizowane w sposób przybliżony na siatce numerycznej, której poziome oczko ma obecnie w modelu COSMO rozmiar 2,8 km. Obliczeniowym sercem modelu jest jego rdzeń dynamiczny, którego zadanie polega na wykonaniu kolejnych kroków czasowych, czyli określeniu stanu atmosfery w chwili  $t_0 + \Delta t$  na podstawie informacji o jej stanie w chwili  $t_0$ . Rdzeń dynamiczny ściśle współpracuje z parametryzacjami fizycznymi, które odwzorowują efekty procesów fizycznych, takich jak tworzenie się chmur i opadów, transfer ciepła za pomocą promieniowania, wymiana ciepła i wilgoci z podłożem oraz mieszanie wynikające głównie z procesów turbulencyjnych.

**Rdzeń dynamiczny** jest odpowiedzialny za zachowanie dokładności i stabilności obliczeń modelu w najtrudniejszych nawet warunkach, jak duża zmienność, a nawet nieciągłość parametrów meteorologicznych (np. pola opadów), silne i zmienne prądy pionowe (np. w burzach) czy duża zmien-

ność właściwości podłoża (np. wysokie i strome góry). Zachowanie tych podstawowych właściwości staje się trudne wraz ze wzrostem przestrzennej dokładności modelu, wynikającej ze zmniejszania poziomego rozmiaru oczka sieci obliczeniowej. Ten postęp jakościowy zawdzięczamy stopniowemu wzrostowi dostępnych mocy obliczeniowych. Oczekuje się, że rozmiar siatki obliczeniowej osiągnie wkrótce 1 km, a w dalszej przyszłości będzie jeszcze mniejszy. Sprawna praca rdzenia dynamicznego zapewnia stabilne i dokładne obliczanie prognozy, a jej praktyczna jakość zależy w znacznym stopniu od dokładności parametryzacji fizycznych, które w zasadniczy sposób wpływają np. na prognozowane temperatury, wilgotność, chmury i opady.

W ramach podziału prac pomiędzy partnerami konsorcjum COSMO w Instytucie powstał zespół odpowiedzialny za przygotowanie nowoczesnego rdzenia dynamicznego, który zapewniłby modelowi COSMO wysoką dokładność i stabilność obliczeniową dla siatek obliczeniowych o rozmiarach nawet 100 m. W skład zespołu, od 2009 roku, wchodzili Marcin Kurowski, Zbigniew Piotrowski, Bogdan Rosa, Damian Wójcik i Michał Ziemiański. Ich prace polegały na dostosowaniu i wprowadzeniu do struktury obliczeniowej

modelu COSMO nowoczesnego rdzenia dynamicznego EULAG, konstruowanego oryginalnie dla potrzeb symulacji badawczych różnego rodzaju przepływów - nie tylko atmosferycznych, ale także oceanicznych, geofizycznych czy nawet gwiazdowych. Rdzeń dynamiczny EULAG powstał w Narodowym Centrum Badań Atmosfery (NCAR) w USA. Jego głównym autorem jest Piotr Smolarkiewicz, współpracujący w tej dziedzinie z innymi naukowcami z NCAR, Los Alamos National Laboratory, ECMWF, DLR i Instytutu Geofizyki UW. EULAG stosował przybliżenie równań hydrodynamiki, szczególnie pomocne w symulacjach atmosferycznych na ograniczonym obszarze (przybliżenia anelastyczne).

**W ostatnich latach rozwój rdzenia EULAG** był kontynuowany przez Piotra Smolarkiewicza i jego współpracowników w Europejskim Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF), gdzie rozszerzono konstrukcję modelu tak, aby obejmowała wszystkie skale ruchu w atmosferze przy wykorzystaniu ściślejszych równań hydrodynamiki. W wyniku tych prac powstała uniwersalna wersja rdzenia dynamicznego o dużej odporności numerycznej i wydajności obliczeniowej. Jest on potencjalnym

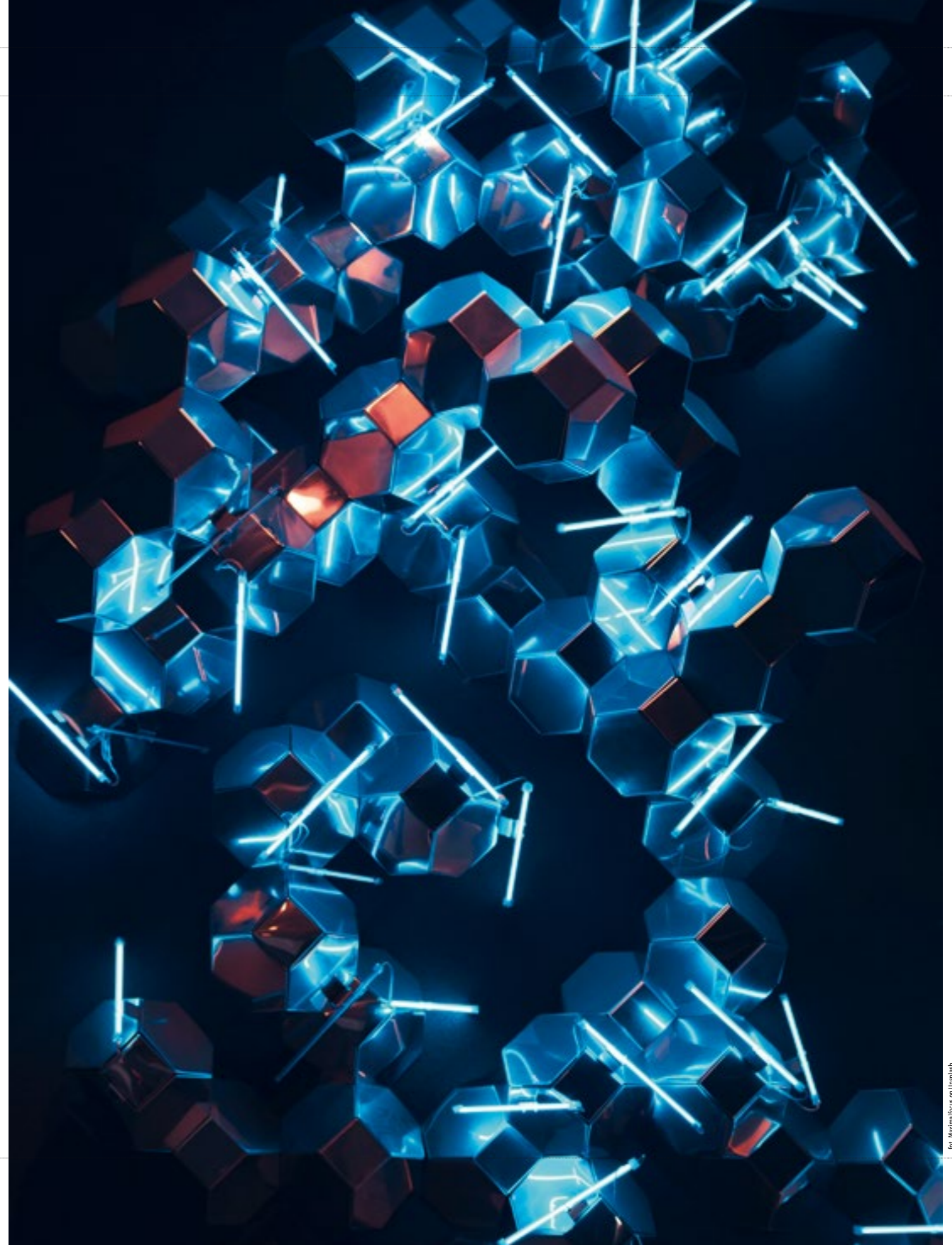






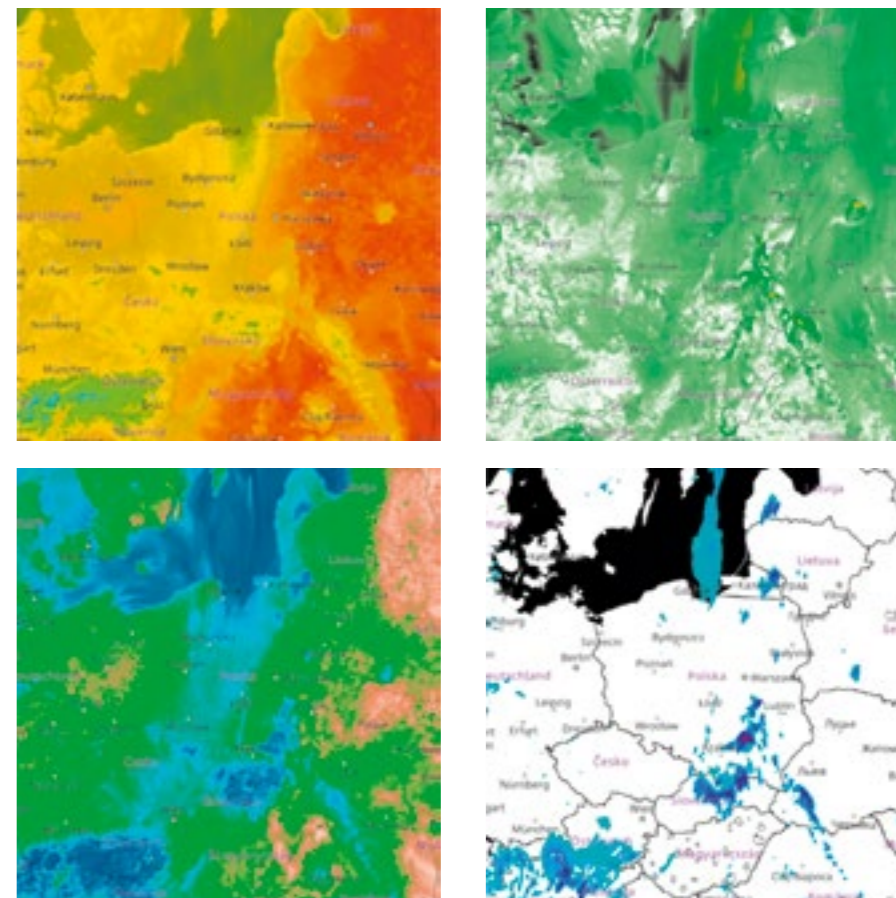
foto: Luka Wok on Unsplash

następcą używanego obecnie rdzenia dynamicznego globalnego modelu pogody IFS działającego operacyjnie w ECMWF.

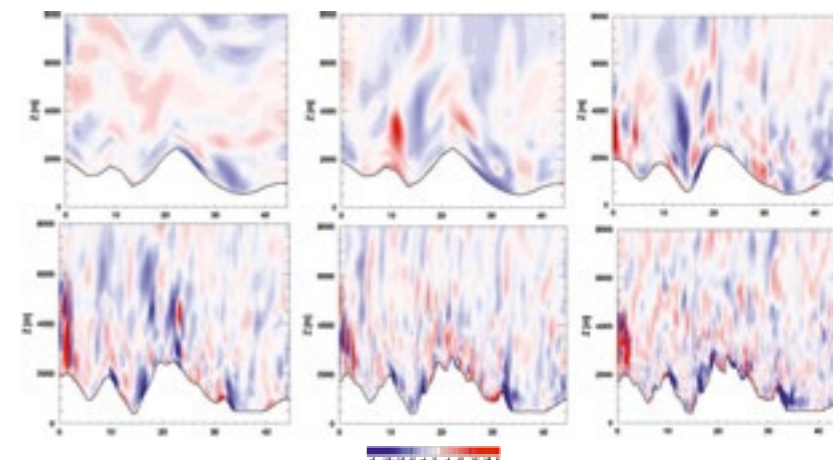
**Prace w Instytucie rozpoczęto** od dostosowania i implementacji anelastycznego rdzenia EULAG w strukturę regionalnego modelu COSMO. Wyniki skonstruowanego prototypu były na tyle zachęcające, że konsorcjum COSMO zaproponowało kontynuowanie prac w celu włączenia ściślej wersji EULAG w strukturę swojego modelu. Z sukcesem zakończono kolejny etap i rozpoczęto testy m.in. dla standardowych przepływów wyidealizowanych oraz realistycznych prognoz pogody. Szczególnie istotne były testy pogodowe nad alpejską domeną obliczeniową ze stromymi i wysokimi zboczami. Próby wykonano dla siatek obliczeniowych z oczkami o rozmiarach poziomych od 2 km do 100 m. Następnie porównano sprawdzalność prognoz z modelu COSMO używającego rdzenia EULAG ze sprawdzalnością standardowej wersji modelu przy zachowaniu tych samych parametryzacji procesów fizycznych. Testy udowodniły, że nowy produkt jest wyjątkowo stabilny obliczeniowo, nawet dla oczek siatki o wielkości do 100 m, a najprawdopodobniej także dla znacznie mniejszych. Pozwala on również podnieść sprawdzalność prognoz dla większości parametrów meteorologicznych, mimo że jest to trudne wobec silnej zależności wyników sprawdzalności od parametryzacji fizycznych.

**Otrzymane wyniki** pozwoliły w 2019 roku na skonstruowanie półoperacyjnej wersji COSMO-EULAG dla regionu Polski i jej otoczenia. Po blisko rocznych testach 1 czerwca 2020 roku model włączono do pracy operacyjnej w IMGW-PIB. Instytut stał się w ten sposób pierwszym ośrodkiem, który do prowadzenia operacyjnych numerycznych prognoz pogody wykorzystuje nowoczesny innowacyjny rdzeń dynamiczny EULAG. Rezultaty tego projektu są też przykładem możliwości wynikających z dobrej, ścisłej współpracy Instytutu z europejskimi konsorcjami modelowania numerycznego oraz ze światowej klasy ośrodkami badawczymi, takimi jak NCAR i ECMWF.

**DR MICHAŁ ZIEMIAŃSKI.** Rozpoczął pracę w IMGW-PIB jako informator lotniczo-meteorologiczny, a później synoptyk. Zajmuje się numerycznym modelowaniem pogody oraz dynamiką atmosfery. Pełnił funkcję Scientific Project Managera w międzynarodowym konsorcjum rozwijającym numeryczny model pogody COSMO.



Prognoza modelu COSMO-EULAG na portalu meteo.imgw.pl: temperatura (góra, lewy panel), prędkość wiatru (góra, prawy panel), wilgotność (dół, lewy panel) i opad (dół, prawy panel) na 8 czerwca 2020 r., na godzinę 15.00 UTC



Przekrój pionowy przez pole prędkości pionowych (w m/s) nad Alpami dla zmieniającej się rozdzielczości modelu: rząd górny, od lewej: standardowy COSMO o oczku siatki 2,2 km, dalej COSMO-EULAG o oczku siatki 2,2 km i 1,1 km; rząd dolny, od lewej: COSMO-EULAG o oczku siatki 0,5, 0,2 i 0,1 km; skala pozioma: kilometry, skala pionowa: metry; widać, że symulacja z oczkiem 2,2 km jest dość grubym przybliżeniem obrazu uzyskanego z oczkiem 0,1 km



# Modele klimatyczno-prognostyczne innych światów

prof. Mariusz Figurski, Dyrektor Centrum Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB

Od wielu lat zjawiska zachodzące w atmosferze ziemskiej prognozuje się i bada za pomocą skomplikowanych symulacji numerycznych. Modele te są używane zarówno w codziennych prognozach pogody, jak i długookresowych, globalnych symulacjach zmiany klimatu. Zebrane przez dziesięciolecia doświadczenia wykorzystuje się obecnie do prognozowania pogody na innych planetach Układu Słonecznego, a nawet na niektórych egzoplanetach.

Planety i księżycy Układu Słonecznego są odległymi i mało znanymi nam światami. Jednak przeglądając obrazy ich powierzchni, wykonane przez kosmiczne teleskopy i sondy, można dostrzec zjawiska przypominające te, które znamy z Ziemi. Oczywiście burze piaskowe na Marsie różnią się od tych na naszej planecie, a chmury kwasu siarkowego, obserwowane na powierzchni Wenus, u nas nie występują. Niemniej wszystkie te zjawiska i procesy opierają się na prawach fizyki obowiązujących na Ziemi. Oznacza to, że można określić wyraźnie podobieństwa między naszą planetą a innymi ciałami Układu Słonecznego. Zasada ta ma fundamentalne znaczenie dla badań klimatu i pogody na innych planetach, ponieważ można je prowadzić przy użyciu modeli klimatycznych stosowanych do prognozowania pogody na Ziemi, choć odpowiednio zmodyfikowanych.

**Nie wszystkie planety Układu Słonecznego mają atmosferę.** Jest to zależne w dużej mierze od trzech zmiennych: odległości planety od Słońca, jej masy oraz wielkości. Duże obiekty, podlegające prawu przyciągania, są w stanie utrzymać atmosferę, małe - wręcz przeciwnie. Przykładem jest najbliższa Słońcu i najmniejsza planeta Układu Słonecznego - Merkury. Wystawiona na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego powierzchnia planety nagrzewa się w ciągu dnia do 400 stopni Celsjusza, by nocą spaść do -200 stopni Celsjusza. Tak drastyczne zmiany temperatury są wynikiem właśnie całkowitego braku atmosfery.

Na Wenus, gdzie temperatura powierzchni dochodzi do około 460 stopni Celsjusza, warunki są na tyle stabilne, że mogły tam powstać grube, nieprzezroczyste chmury, składające się głównie z dwutlenku siarki. Związek ten jest odpowiedzialny za specyficzny efekt cieplarniany i bardzo wysoką temperaturę powierzchni planety. Wenus jest nazywana bliźniaczką Ziemi ze względu na podobny rozmiar i grawitację, ale jej klimat bardzo różni się od ziemskiego. Przede wszystkim Wenus obraca się w kierunku przeciwnym do Ziemi i znacznie wolniej (jeden obrót na 243 dni ziemskie). Na wysokości około 60 km nad powierzchnią planety wieje szybki wschodni wiatr okrążający Wenus w mniej więcej 4 dni ziemskie (z prędkością 360 km/h). Zjawisko to, znane jako superrotacja atmosferyczna, występuje na większości planet Układu Słonecznego,

ale na Wenus przybiera rozmiary ekstremalne. Nawet największe huragany występujące na Ziemi są co najwyżej lekką bryzą w porównaniu z superrotacją atmosfery wenusjańskiej.

Drugą sąsiadującą z Ziemią planetą jest Mars. Temperatura jego powierzchni waha się od -140 do +20 stopni Celsjusza. W atmosferze Marsa dominuje dwutlenek węgla; w śladowych ilościach występuje też woda, czego dowodem są mgły pojawiające się w kanionach o wschodzie Słońca.

Za pasem asteroid znajduje się największa planeta Układu Słonecznego - Jowisz. Jego atmosfera składa się głównie z wodoru i helu oraz śladowych ilości amoniaku, metanu, wody i minerałów skalnych. Jowisz emituje więcej energii niż otrzymuje od Słońca, a temperatura na jego powierzchni wynosi około -100 stopni Celsjusza. W atmosferze planety wieją potężne wiatry, którym towarzyszą gigantyczne burze i wyładowania elektryczne. Chmury występujące na Jowiszu przypominają ciecz, której struktura zmienia się na stałą wskutek wzrostu ciśnienia w głębi planety.

Kolejną i drugą co do wielkości planetą jest gazowo-ciekły Saturn, otoczony charakterystycznymi pierścieniami, które można obserwować z Ziemi. Składnikami atmosfery planety, podobnie jak Jowisza, są wódór i hel, a temperatura na jej powierzchni dochodzi do -140 stopni Celsjusza. Wiatry wiejące na Saturnie mogą osiągać prędkość blisko 2 tys. km/h.

Nietypową planetą w Układzie Słonecznym jest Uran, a to ze względu na jego oś obrotu przekreconą o prawie 90 stopni. Ma to zasadniczy wpływ na atmosferę planety, składającą się głównie z wodoru i helu. Uran bowiem toczy się po swojej orbicie, co powoduje, że okresowo jego bieguny są skierowane w stronę Słońca - w tym czasie na jednym z nich panuje lato, a na drugim zima. Po pokonaniu połowy drogi w ruchu obiegowym wokół Słońca bieguny Uranu zamieniają się miejscami. Temperatura w atmosferze planety jest bardzo niska, dochodzi do około -220 stopni Celsjusza.

Ostatnią planetą w Układzie Słonecznym jest Neptun, w którego atmosferze sondy międzyplanetarne odkryły chmury z kryształkami lodu, podobne do spotykanych w atmosferze ziemskiej chmur pierzastych. Na planecie występują potężne wiatry wiejące z prędkościami ponad 2 tys. km/h,

foto: Greg Riekman on Unsplash

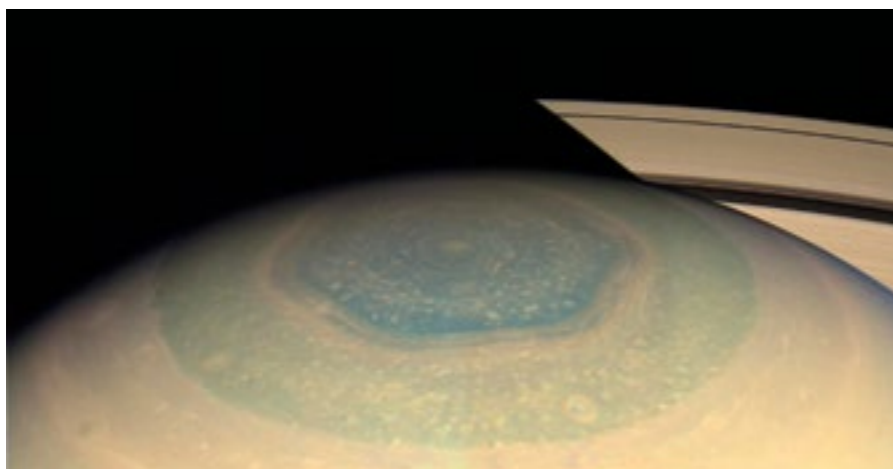




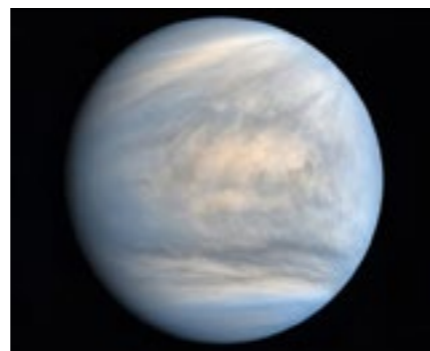
Mars obecnie i wizualizacja sprzed miliardów lat (źródło: NASA Goddard Space Flight Center)



Jowisz z wirującymi chmurami w rejonie północnej półkuli, znanymi jako Jet N4, zarejestrowanymi przez sondę Juno (źródło: NASA)



Północny biegun Saturna sfotografowany przez sondę Cassini, która, zanim splonęła w atmosferze planety we wrześniu 2017 roku, dostarczyła bezcennych informacji o jej składzie (źródło: NASA)



Wenus z gęstą warstwą chmur (źródło: NASA/JPL)

a temperatura przy powierzchni spada do -200 stopni Celsjusza. Atmosfera Neptuna składa się głównie z wodoru, helu i metanu.

Większości planet Układu Słonecznego towarzyszą naturalne satelity, które najczęściej są pozbawione atmosfery, jak Księżyc. Dlatego na szczególną uwagę zasługuje Tytan - naturalny księżyc Saturna. Jest wyjątkowy ze względu na gęstą atmosferę, składającą się głównie z azotu, a także dlatego, że to jedyny obiekt poza Ziemią, na którym znajdują się duże ilości cieczy w postaci ciekłych węglowodorów.

**Planetarne modele klimatyczno-prognostyczne.** Badania atmosfery i klimatu innych planet były i są prowadzone przy użyciu zróżnicowanych pod względem funkcjonalności i przeznaczenia modeli. Wśród nich można wyróżnić kilka podstawowych modeli klimatycznych obejmujących szeroki zakres złożoności, od prostych, zerowymiarowych (0-D), po złożone - trójwymiarowe (3-D). Zalicza się do nich modele radiacyjno-konwekcyjne (MRK), modele bilansu energii (MBS), modele transferu radiacyjnego (MTR) oraz globalne modele cyrkulacji (GCM). Każdy ma swoje wady i zalety, które determinują jego zastosowanie.

Modele MTR umożliwiają szczegółową obróbkę absorpcji gazów atmosferycznych. Jednowymiarowe MRK, uwzględniające wysokość, pozwalają na modelowanie konwekcji i pionowego transferu energii, co umożliwia obliczanie absorpcji ciepła w różnych warstwach atmosfery. Idealnie nadają się do badań klimatu egzoplanet. Zerowymiarowe modele MBS „widzą” planetę jako punkt w przestrzeni ze średnią temperaturą i emisją energii. Jednowymiarowe MBS rozwiązują bilans energetyczny 1D oraz generują dane uśredniane po szerokości geograficz-

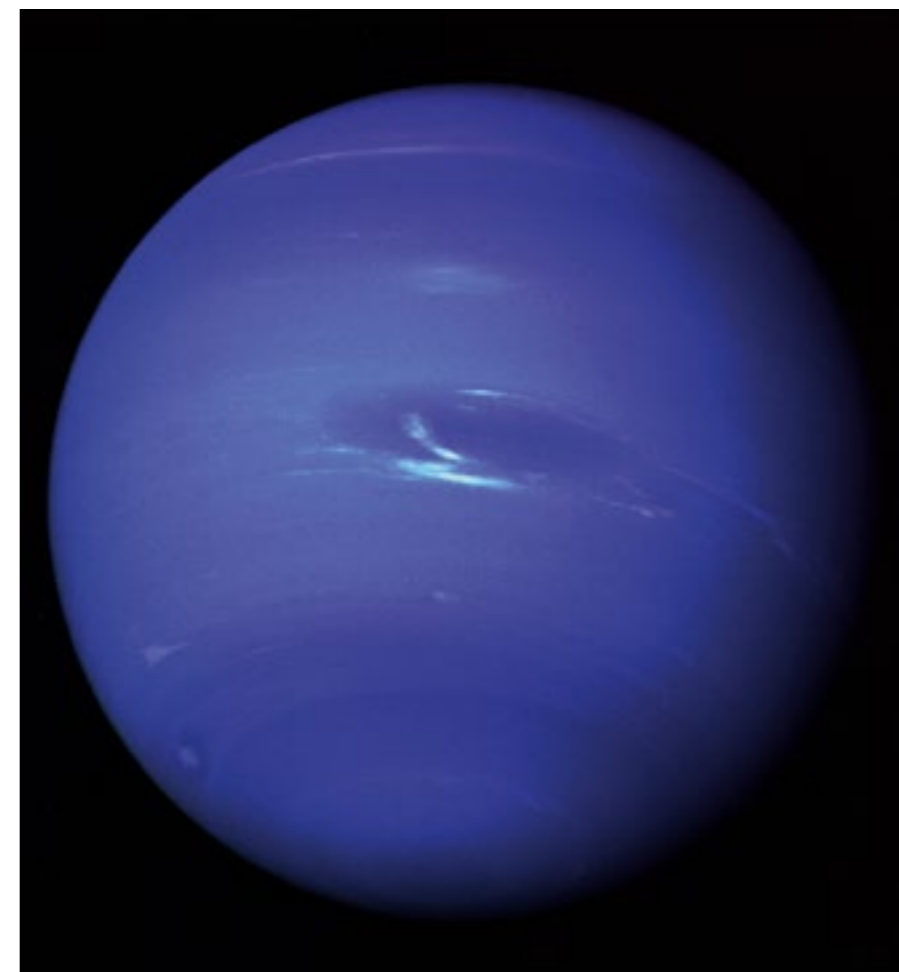


Chmura stratosferyczna nad północnym biegunem księżyc Saturna – Tytana – jest bardzo podobna do chmur stratosferycznych Ziemi; sonda Cassini po raz pierwszy sfotografowała te chmury w 2006 roku (źródło: NASA/JPL/U. of Ariz./LPGNantes)

nej. Zaletą modeli bilansu energetycznego jest możliwość badania szerokiej gamy parametrów przy jednoczesnej minimalizacji kosztowności obliczeń. Są szczególnie przydatne, gdy chcemy uwzględnić wpływ wielu czynników na klimat, związanych m.in. z ruchem orbitalnym i rotacją planety, polem magnetycznym czy transferem promieniowania.

Najbardziej złożonymi i jednocześnie skomplikowanymi modelami są trójwymiarowe modele (3D) globalnej cyrkulacji GCM. Pozwalają one na symulację klimatu z wysoką rozdzielczością, a ponadto dysponują najbardziej wyrafinowanymi mechanizmami obróbki transferu promieniowania oraz cyrkulacji atmosfery z uproszczonym wymuszaniem. Modele 3D są używane w celu zbadania i analizy możliwych systemów cyrkulacji atmosferycznej. Najwyżej w hierarchii klasyfikują się tzw. pełne globalne modele klimatyczne, na bazie których można budować wirtualne planety.

Modele globalnej cyrkulacji atmosfery bazują na rozwiązaniu serii nieliniowych równań różniczkowych, opisujących cyrkulację atmosfery poprzez globalne ruchy płynów i transport w dynamicznym rdzeniu, w którym rozwiązywane są równania ruchu powierza w obrębie planety. W trójwymiarowej wersji modelu GCM najlepiej w pierwszym przybliżeniu przyjąć, że planeta jest kulą. Na jej powierzchni mogą znajdować się oceany i lądy, których część może być pokryta lodem, a nad jej powierzchnią zalegają różne warstwy atmosfery. Zamodelowanie



Zdjęcie Neptuna wykonane przez sondę Voyager 2 z odległości około 8 mln km pokazuje Wielką Ciemną Plamę i towarzyszącą jej jasną smugę chmur (źródło: NASA)



trójwymiarowego globalnego systemu klimatycznego planety wymaga podzielenia jej na określone komórki siatki, w której występują składowe poziome (szerokość i długość geograficzna) oraz pionowe (wysokość/ciśnienie). W następnym kroku model oblicza średnie wartości parametrów fizycznych w każdej komórce siatki na podstawie fizyki i dynamiki zjawisk występujących w komórce oraz w wyniku interakcji z innymi komórkami. Interakcje obejmują wymianę radiacyjną między energią gwiazdy, atmosferą i powierzchnią planety, cyrkulację atmosferyczną z wiatrami, wymianę ciepła między atmosferą i oceanem, cyrkulację oceaniczną i jej reakcje na wymianę ciepła. Powyższe wymiany obejmują również cykliczne zmiany w środowisku na powierzchni planety i w jej atmosferze, w szczególności obieg gazów naturalnych i antropogenicznych. Zakres opisanych procesów fizycznych świadczy o dużym stopniu szczegółowości modeli, jaki mogą one osiągnąć przy próbie dokładnego modelowania globalnego systemu klimatycznego planety. Uniwersalność globalnego modelu cyrkulacji objawia się tym, że nie wszystkie jego implementacje muszą obejmować pełny zestaw przedstawionych procesów. Istnieje możliwość założenia w modelowaniu przypadków, gdy planeta jest pozbawiona wody lub na jej powierzchni znajdują się tylko oceany. Opisane numeryczne modele pierwotnie wykorzystywano już w latach 60. ubiegłego wieku do identyfikowania głównych czynników i procesów kształtujących klimat Ziemi. Celem ówczesnych badań było zrozumienie, jaki globalny bilans energetyczny jest osiągany przez połączenie odbitego, pochłanianego i emitowanego promieniowania krótkofalowego pochodzącego ze Słońca oraz długofalowego promieniowania ciepłego. Kilkadziesiąt lat doświadczeń stosowania modeli w badaniach nad atmosferą ziemską pozwoliło lepiej zrozumieć i interpretować wzorce pogodowe i klimatyczne, które dziś mogą być stosowane w modelowaniu klimatu innych planet.

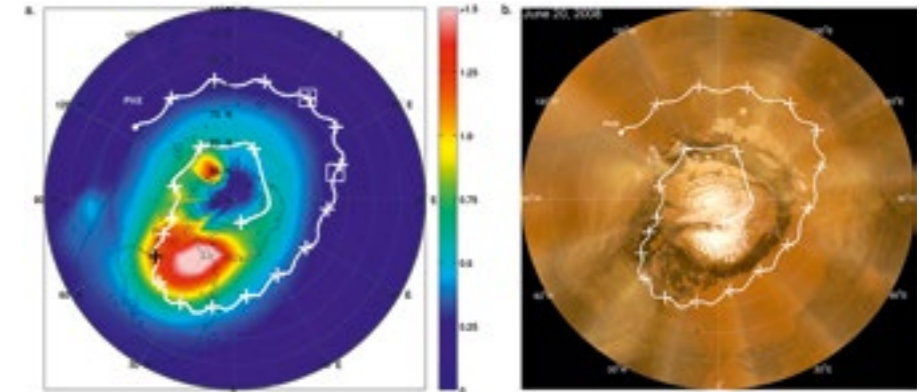
**Modele klimatyczne w badaniach kosmicznych - geneza.** Pierwsze próby wykorzystania modeli do symulowania zjawisk atmosferycznych na innych planetach Układu Słonecznego pojawiły się pod koniec lat 90. ubiegłego wieku. Obiektem, który szczególnie interesował badaczy, był



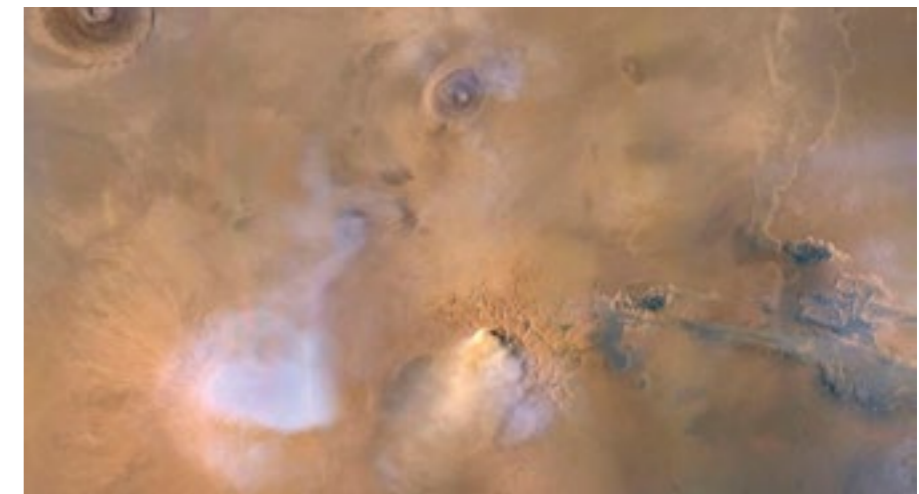
W modelach klimatyczno-prognostycznych planetę dzieli się na siatkę z odstępami pionowymi i poziomymi – takie rozwiązanie zastosowano m.in. w globalnym modelu GCM; im mniejsze odstępki, tym drobniejsza siatka i lepsza rozdzielczość modelu, co oznacza, że „zauważa” on więcej szczegółów (źródło: NOAA)

Mars. Większość implementacji modeli do symulacji klimatu tej planety bazowała na globalnym modelu cyrkulacji (GCM), w którym zastosowano dwupoziomowy model atmosfer planetarnych Mintz-Arakawa. Do najważniejszych adaptacji można zaliczyć wykorzystywany przez NASA model Mars GCM (Ames General Circulation Model), opracowany w Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). Za jego pomocą badano m.in. wielkoskalowe marsjańskie burze piaskowe. Innym przykładem modelu marsjańskiego jest Mars Model Oxford-LMD (Laboratoire du Météorologie Dynamique) wykorzystujący dwa dynamiczne rdzenie ze wspólną parametryzacją procesów fizycznych. Kolejne implementacje opracowano na Uniwersytecie York w Kanadzie, podobne prace rozwijano na kilku uczelniach w Japonii wspólnie z Japońską Agencją Meteorologiczną oraz w Max Planck Institute for Solar System Research w Niemczech.

W badaniach nad klimatem Marsa kluczowe było znalezienie odpowiedzi na pytanie, jak to możliwe, że na planecie otrzymującej znacznie mniejszą dawkę promieniowania słonecznego (na Marsie jasność Słońca jest niższa o blisko 20 proc. niż na Ziemi) istniała kiedyś woda w stanie ciekłym w postaci rzek – na co wskazują fizyczne dowody pomiarowe. Mimo wielu badań i symulacji numerycznych nie znaleziono jednoznacznego wyjaśnienia. Najnowsze i najbardziej prawdopodobne wyniki obliczeń wskazują



Symulacja pyłu w atmosferze Marsa z obliczoną modelem Mars GEM trajektorią wsteczną; pył został zaobserwowany przy użyciu lidarów lądownika Phoenix (źródło: <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL064892>)



Burze piaskowe na Czerwonej Planecie – zdjęcie wykonane przez sondę Mars Reconnaissance Orbiter orbitującą wokół Marsa (źródło: CNN/NASA)

na mechanizm związany z absorpcją wywołaną zderzeniami  $\text{CO}_2\text{-H}_2$  i  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ . Zarówno metan, jak i wodór powstałe w wyniku zmian w akwenach wodnych mogły się łączyć z odgazowanym z wulkanów  $\text{CO}_2$  i tworzyć około miliarda lat temu atmosferę, gdy na powierzchni Marsa woda znajdowała się jeszcze w stanie ciekłym.

**Jaka jutro pogoda na Tytanie?** Model globalnej cyrkulacji stosowano również do symulowania klimatu planet o masywnych, wolno rotujących atmosferach, takich jak Wenus, a także ciał niebieskich o ekstremalnie chłodnym środowisku, np. Plutona. Najbardziej spektakularne wyniki uzyskano w modelu cyrkulacji atmosfery Tytana, księżycy Saturna, opracowanym we francuskim Laboratoire du Météorologie Dynamique

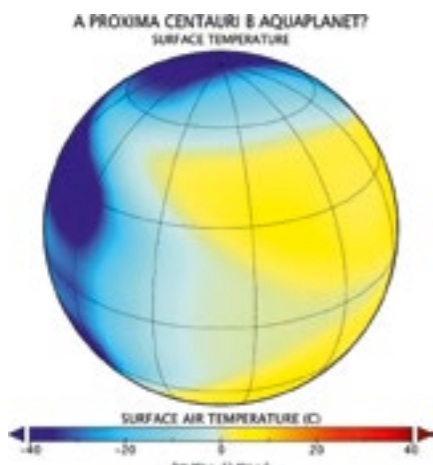
(LMD). W badaniach wykorzystano Generic Convective Model, oparty na dynamicznym rdzeniu GCM opracowanym dla atmosfery ziemskiej, który dostosowano do warunków panujących w atmosferze Tytana. Uzyskano symulację atmosfery księżycy od stanu spoczynku po superrotację, z wiatrem strefowym o parametrach porównywalnych do tych uzyskanych w trakcie pomiarów wykonanych przez sondy międzyplanetarne. Zasięg pionowy modelu LMD obejmował atmosferę do wysokości około 250 km nad powierzchnią Tytana. Transfer radiacyjny obliczono przy użyciu poziomo jednolitego pionowego profilu mgły i gazów występujących w atmosferze księżycy. W kolejnej wersji dwuwymiarowego, osiowo-symetrycznego modelu klimatycznego, opracowanego w IPSL (Institute Pierre-

fot. Benjamin Davies on Unsplash



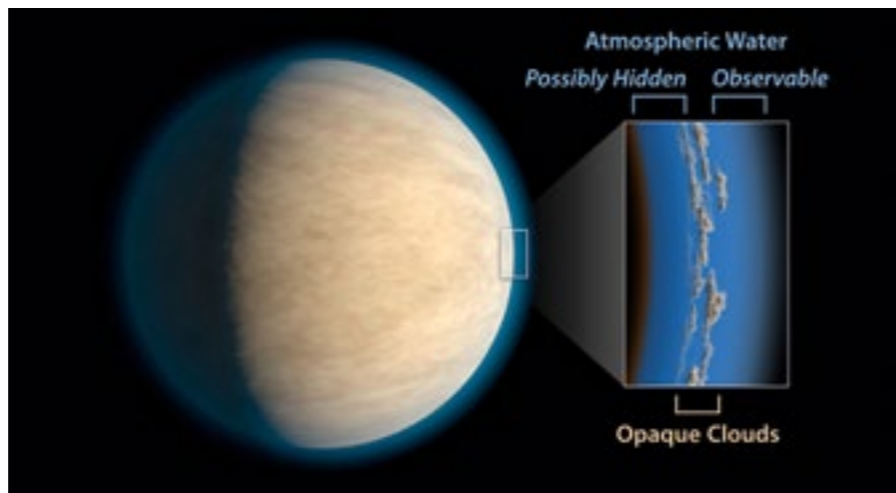


Przykład siatki o zmiennej rozdzielczości, złożonej z sześciokątów z modelu MPAS umożliwiającego modelowanie w różnych skalach, od globalnej do regionalnej. Siatka staje się drobniejsza w obszarze kontynentalnym Stanów Zjednoczonych i tym samym uzyskiwana jest większa rozdzielczość (źródło <http://earthsystemcog.org/projects/dcmip-2012/mpas>)



Rozkład temperatury na powierzchni egzoplanety Proxima Centauri b, która krąży wokół gwiazdy najbliższej Ziemi, uzyskany za pomocą symulacji modelem ROCKE-3D (źródło: NASA). Wizualizacje różnych parametrów klimatycznych z modelu ROCKE-3D dla Proxima Centauri b, Ziemi i Wenus sprzed milionów lat można tworzyć samodzielnie na stronie <https://data.giss.nasa.gov/rocke3d/maps/>

-Simon Laplace), uwzględniono sprzężenie z zamgleniem, a zasięg modelu zwiększono do wysokości 500 km. Dodatkowo zastosowano w modelu specyficzną parametryzację, która uwzględniała mieszanie poziome falami barotropowymi (fale związane z ruchem wielkoskalowym w atmosferze). Najnowsza wersja GCM modelu IPSL opiera się na nowym, dynamicznym rdzeniu LMDZ4/LMDZ5. Poprawiono w nim parametryzację warstwy granicznej, przez co uzyskano bardzo realistyczne profile wiatrów strefowych w troposferze, oraz uwzględniono pływ grawitacyjne Saturna.



Przykład egzoplanety typu gorący jowisz z widocznymi chmurami i zamgleniami blokującymi skutecznie atmosferę; wizualizacja na podstawie obserwacji i symulacji komputerowych (źródło: NASA/JPL-Caltech)

Należy jeszcze wspomnieć o jednym z najnowszych modeli - Resolving Orbital and Climate Keys of Earth and Extraterrestrial Environments with Dynamics (ROCKE-3D) GCM - pozwalającym symulować atmosferę planet o różnych promieniach, grawitacji i ciśnieniu powierzchniowym oraz zróżnicowanym składzie chemicznym, ze szczególnym uwzględnieniem egzoplanet.

**Jeszcze o modelach GCM i czy modele mikro- oraz mezoskalowe sprawdzają się w kosmosie.** Poza Tytanem i Marsem najczęściej „modelowanym” obiektem w Układzie Słonecznym jest Wenus. Znaczne osiągnięcia na tym polu mają japońscy naukowcy z Uniwersytetu Tokijskiego, którzy stworzyli zmodyfikowaną wersję modelu GCM do symulowania ekstremalnych warunków panujących na tej niedostępnej, pokrytej grubą warstwą chmur planecie. Podobne prace nad modelowaniem atmosfery Wenus, z wykorzystaniem zmodyfikowanej wersji modelu UM (Unified Model), podjęli naukowcy z United Kingdom Meteorological Office (UKMO). W tym celu Brytyjczycy udoskonaliili swój model w zakresie modelowania zjawisk zachodzących w atmosferach planet olbrzymów (Jowisz i Saturn). Wykorzystano wersję GCM, do której implementowano pionowe współrzędne hybrydowe (współrzędna przechodząca w sposób ciągły z temperatury potencjalnej do funkcji współrzędnej ciśnienia).

Wyspecjalizowane podejście do modelowania środowisk innych planet Układu Słonecznego utorowało drogę do dostosowania

modeli klimatycznych wykorzystywanych na Ziemi, które uwzględniają również cechy bardzo zróżnicowanych środowisk gwiazdowych. Dzięki tym zmian i modyfikacjom planetarne modelowanie klimatyczno-prognostyczne mogą zostać wykorzystane do badania potencjalnego klimatu planet krążących wokół gwiazd innych niż Słońce.

Od kilkunastu lat podejmowane są próby wykorzystania do badań atmosfery planet modeli mezoskalowych i mikroskalowych. Stosowano je głównie w odniesieniu do Marsa w celu interpretacji danych z ładowników marsjańskich w skali subglobalnej. Ponadto użyto ich w badaniach procesów tworzenia się chmur na Tytanie. Modele mikroskalowe pozwalają na symulację dynamiki atmosfery w skalach do kilku metrów (tzw. symulacja dużych wirów lub modelowanie LES) w celu jawnej symulacji warstwy granicznej. Jednak ograniczony charakter siatek obliczeniowych tych modeli zawęził ich zastosowanie w badaniach planetarnych do regionalnych zakresów siatek obliczeniowych. W związku z tym warunki brzegowe modeli ograniczonego obszaru muszą być wymuszone z archiwum wyników modelu globalnego lub ustawiane okresowo w wyidealizowanych symulacjach, co oczywiście może prowadzić do błędów w symulacjach.

**Przełom w postaci modelu planetWRF.** Naukowcy badający planety w Układzie Słonecznym uzyskują niezbędne informacje do swoich eksperymentów, wykorzystując wyniki z szeregu różnych

modeli: globalnych, regionalnych i lokalnych. Korzystanie z modeli planetarnych, o zróżnicowanej skali, poza Ziemią może powodować problemy z ich poprawną interpretacją i jest po prostu uciążliwe. Najlepszym rozwiązaniem tego problemu byłoby ujednoczenie modelu do badania dynamiki atmosfery i powierzchni planety w taki sposób, aby miał on cechy zarówno modeli globalnych, jak i mezoskalowych. Jednym ze sposobów jest lokalne powiększenie modelu globalnego poprzez zniekształcenie jego odwzorowania, co spowoduje skupienie węzłów siatki obliczeniowej w określonym obszarze. Ten rodzaj przystosowania modeli globalnych jest przydatny, ale ma ograniczenia związane z rozmieszczeniem, liczbą i rozmiarem oczek w siatce obliczeniowej. Niezbędna jest też w pełni zgeneralizowana siatka obliczeniowa. Można to osiągnąć na dwa sposoby: przełączając się na siatkę złożoną z niemal równomiernie rozmieszczonych wielokątnych oczek siatki (rozwiązanie stosowane w modelu MPAS i ICON) lub używając wbudowanego do modelu mechanizmu mezoskalowego zagnieżdżenia siatek w sobie i elastycznego podejścia do definiowania siatek w różnych odwzorowaniach. Pierwsze z prezentowanych rozwiązań jest bardzo nowatorskie, jednak wymaga odmiennego od siatek regularnych podejścia do rozwiązania równań różniczkowych. Druga metoda ma tę przewagę, że pozwala na zachowanie większej kompatybilności z poprzednimi modelami, np. można emulować model GCM, i charakteryzuje się większą swobodą w zakresie konfiguracji siatek obliczeniowych.

Część tych cech ma mezoskalowy model WRF (Weather Research and Forecasting), który powstał na początku XXI wieku w Narodowym Centrum Badań Atmosferycznych (NCAR). WRF jest modelem modułowym, zoptymalizowanym tak, aby wykorzystać nowoczesne i szybkie superkomputery. Jednocześnie jest wystarczająco elastyczny, aby działać również na komputerach osobistych. Model WRF jest używany w badaniach meteorologicznych - zarówno mezoskalowych, jak i mikroskalowych - oraz w prognozowaniu pogody z wykorzystaniem asymilacji danych. Modułowość modelu pozwala na używanie różnych modeli fizycznych i rdzeni dynamicznych, co wyróżnia go wśród nume-

rycznych modeli pogody. Poza tym model WRF pozwala używać pojedynczej siatki obliczeniowej oraz daje unikalną możliwość zagnieżdżenia i rekonfiguracji siatek obliczeniowych w zależności od potrzeb i celu modelowania. W oryginalnej wersji WRF nie mógł działać jako globalny model ogólnej cyrkulacji atmosfery, ale naukowcy z Cornell University, Ashima Research, Jet Propulsion Laboratory/Caltech i Kobe University w Japonii podjęli wysiłek rozbudowania modelu, co zaowocowało nową wersją planetWRF.

Wersja planetWRF to całkiem nowy model do numerycznej symulacji atmosfery planet i systemów klimatycznych. Od większości podobnych planetarnych modeli atmosferycznych wyróżnia go uogólniony moduł odwzorowań kartograficznych siatek obliczeniowych, pozwalający na dowolne ich kształtowanie w zależności od rodzaju symulacji. Ponadto daje on możliwość multiskalowania i zagnieżdżenia siatek obliczeniowych, co oznacza, że w modelu WRF mogą one mieć rozdzielczość od kilkuset metrów do nawet kilkunastu tysięcy kilometrów. Dodatkowo planetWRF wyposażono w opcję zagnieżdżenia siatek obliczeniowych, znaną z wersji bazowej modelu WRF. Dzięki temu model pozwala na badanie sprzężeń między procesami w różnych skalach - od globalnej po lokalną. Uogólniona siatka obliczeniowa umożliwia również konfigurację modelu w trybie jedno-, dwu- i trójwymiarowym.

Model planetWRF został też wyposażony w system rozbudowanej asymilacji danych. Nowe rozwiązania, które wprowadzono w planetarnej wersji modelu, zostały włączone do podstawowej wersji dystrybucyjnej WRF i od tego czasu można go używać do symulacji globalnych atmosfery na Ziemi. Przykładowe wyniki serii symulacji dla Marsa, Tytana i Wenus wskazują, że model działa poprawnie dla różnych planet i trybów pracy - od mikroskali, poprzez mezoskalę, po skalę globalną. Symulacje atmosfery w okolicach krateru marsjańskiego Victoria (odwiedzzonego przez marsjański łazik Opportunity) pokazały duże zmiany temperatury powierzchni w godzinach porannych oraz wyraźne zmiany we wzorcach obciążenia wiatrem, gdy wewnątrz krateru jest odseparowane od konwekcji warstwy granicznej.

**Alternatywa dla planetWRF - model planetMPAS.** Wywodzi się on z modelu NCAR for Prediction Across Scales (MPAS) i jest zbudowany z nieregularnej siatki<sup>1</sup>, która pozwala na zachowanie jednolitej rozdzielczości w obrębie całego globu. Wykorzystuje w pełni ściśliwy, niehydrostatyczny rdzeń dynamiczny oraz zaawansowany układ współrzędnych dostosowany do topografii terenu. Model MPAS został zaprojektowany tak, aby można było korzystać z procedur zjawisk fizycznych modelu WRF. Modele planetMPAS i planetWRF dysponują alternatywnymi rdzeniami dynamicznymi w ramach tego samego systemu modelowania. Wersja planetMPAS ma szereg zalet w stosunku do WRF w niektórych rodzajach symulacji globalnych, np. transportu argonu na Marsie. Z drugiej strony WRF jest znacznie użyteczniejszy w przypadku symulacji zjawisk mikro- i mezoskalowych.

**Z powrotem do gwiazd, czyli modelowanie atmosfer egzoplanet.** Już sama nazwa brzmi zagadkowo. Czym są egzoplanety i co mają z nimi wspólnego modele klimatyczno-prognostyczne stosowane do badania atmosfer planet Układu Słonecznego? Najprościej rzecz ujmując, egzoplaneta (lub z ang. extrasolar planet) to obiekt spoza Układu Słonecznego. Pierwsza wzmianka o zaobserwowaniu planety w innym układzie pojawiła się w 1917 roku, ale nie została nigdy potwierdzona. W 1992 roku zespół radioastronomów, kierowany przez Aleksandra Wolszczana i Dale'a Fraila, opublikował wyniki badań nad pulsarem<sup>2</sup> PSR 1257+12. Uczni zaobserwowali, że emitowana przez obiekt wiązka promieniowania elektromagnetycznego ulega zakłóceniom. Opracowane przez nich modele sugerowały, że odpowiedzialne jest za to orbitujące wokół gwiazdy ciało niebieskie - prawdopodobnie planeta. Obserwacje innych pulsarów potwierdziły, że zachowują się one podobnie. Ostatecznie tezę Wolszczana i Fraila potwierdziły kolejne obserwacje PSR 1257+12 - do 1994 roku dowiedli oni istnienia trzech egzoplanet krążących wokół gwiazdy.

To przełomowe odkrycie rozpoczęło burzliwy okres poszukiwania planet w innych układach, oddalonych od Słońca o dziesiątki, a nawet setki lat świetlnych. Dziś wiemy już o istnieniu kilku tysięcy obiektów, które dzie-

<sup>1</sup> Model wykorzystuje sześciokątną siatkę przypominającą plaster miodu, którą w pewnych obszarach można rozciągać, a w innych skompresować w celu uzyskania wyższej rozdzielczości.  
<sup>2</sup> Pulsar to szybko rotująca gwiazda, która jest w końcowej fazie ewolucji gwiazdy.



lą się generalnie na dwie kategorie: mniejsze skaliste planety oraz gazowe olbrzymy podobne do Jowisza, nazywane gorącymi jowiszami. Opracowano kilka technik do poszukiwania planet znajdujących się w pobliżu gwiazd. Pierwsza i najstarsza wykorzystuje zjawisko prędkości radialnej gwiazdy. Drugą są pomiary astrometryczne, na podstawie których analizuje się ruch gwiazdy wokół ośrodka masy układu. Kolejna metoda opiera się na mikrosoczewkowaniu grawitacyjnym (zjawisku grawitacyjnym wzmocnienia światła, w którym masa działa jak soczewka). I wreszcie najpopularniejsza - technika tranzytów - która pomogła odkryć około 3 tys. planet. Polega ona na obserwacjach zaćmień będących wynikiem przesłonięcia gwiazdy przez obiegające ją planety. Metoda tranzytów jest wykorzystywana przez astronomów na Ziemi i w teleskopach kosmicznych, np. Keplera i Spitzera, czy w sondzie TESS.

**Odkrywanie tajemnic najodleglejszych światów.** To właśnie dzięki obserwacjom zaćmień w odległości 39 lat świetlnych odkryto bardzo ciekawy system planetarny kilku obiektów krążących wokół gwiazdy TRAPPIST-1 (gwiazdozbiór Wodnika). W jego skład wchodzi trzy planety typu ziemskiego, a jedna z nich prawdopodobnie znajduje się na granicy ekosfery („strefy zamieszkania”) systemu. Badania wskazują, że przynajmniej na jednej z nich znajduje się woda w stanie ciekłym. Niestety, nawet największe teleskopy wykorzystywane do obserwacji planet pozasłonecznych nie pozwalają na bezpośrednią obserwację powierzchni tak odległych od nas światów. Niemożliwe jest również ich zbadanie za pomocą sondy - jej podróż trwałaby setki tysięcy lat. Dodatkowym utrudnieniem w obserwacjach są rozmiary egzoplanet oraz dominujące światło gwiazd. I tutaj z pomocą przychodzą planetarne modele klimatyczno-prognostyczne. Z badań przeprowadzonych na Ziemi wiemy, że atmosfera nie tylko pomaga w utrzymaniu i cyrkulacji ciepła, ale także jest odpowiedzialna za transport gazów, m.in. tych umożliwiających powstanie życia. Gazy te nazywane są biosygnaturami, a modele klimatyczne pomagają w ich poszukiwaniu w atmosferach egzoplanet. Celem zakrojonych na szeroką skalę badań jest nic innego, jak znalezienie Świętego

Graala astronomii - globu podobnego do Ziemi, nadającego się do zamieszkania.

Obecnie w analizach korzysta się głównie z modeli globalnej cyrkulacji (GCM) o różnym stopniu zaawansowania. Do wstępnej oceny klimatycznej egzoplanet służą modele jednowymiarowe. Na podstawie uzyskanych wyników definiuje się warunki początkowe modeli 3D. Dodatkowo w badaniach wykorzystuje się różne scenariusze paleoklimatyczne Ziemi i innych planet Układu Słonecznego. W ten sposób powstają projekcje możliwych klimatów, uwzględniające warunki określonego systemu planetarnego. Jedne z pierwszych symulacji wykonano dla zamrożonej, obracającej się synchronicznie egzoplanety Gliese 581 g. W pierwszym kroku symulowano prawdopodobne scenariusze klimatyczne, według których w punkcie podgwiazdowym<sup>3</sup> znajduje się woda w stanie płynnym. Następnie określono ilościowo możliwość zasiedlenia Gliese 581 g jako funkcję składu atmosfery i szybkości rotacji. Modele globalnej cyrkulacji zostały również wykorzystane do zbadania wpływu oddziaływań grawitacyjnych na planecie Kepler-62f (jedna z pięciu planet układu zaliczanych do typu superziem) oraz możliwość rozwoju na jej powierzchni warunków sprzyjających pojawieniu się życia.

GCM pomagają także w eksploracji planet o klimacie znacznie różniącym się od Ziemi, w tym planet gazowych, które krążą blisko gwiazd macierzystych i nazywane są gorącymi jowiszami, planet typu ciepłe neptuny, np. HD 21749b, czy podobnych do Wenus, np. Kepler-1649b. Spośród różnych typów egzoplanet tylko dla gorących jowiszy dysponujemy wystarczająco szczegółowymi danymi, aby porównać je z modelami klimatycznymi, dlatego poświęca się im wiele badań. Cechą charakterystyczną tych gazowych olbrzymów jest rotacja synchroniczna wokół gwiazdy macierzystej, powodująca stałe oświetlenie jednej strony planety. Właściwość ta znacznie upraszcza modelowanie atmosfery. Niezbędne dane do modelowania gorących jowiszy zostały pozyskane z obserwacji wykonanych przez teleskop orbitalny Keplera. Wykorzystując technikę tranzytów, rejestruje on ekstremalnie małe spadki jasności gwiazdy, gdy na jej tle przechodzi planeta obserwowana w różnych fazach (analogicznie do faz ziemskiego satelity - Księżyca). Analizy symulacji mode-

lowych oraz danych z rzeczywistych z obserwacji tranzytów pozwoliły na dopasowanie modeli do krzywych fazowych prawdziwych gorących jowiszów i określenie, które krzywe odpowiadają za ciepło planety, a które za światło odbite od chmur w atmosferze planety. Połączywszy te dane, naukowcy opracowali globalne modele zachmurzenia i uzyskali informacje o wiatrach i różnicach temperatur na badanych gorących jowiszach. Modele i obserwacje wykazały, że po stronie dziennej planeta jest pozbawiona chmur, a w części nocnej jest stale zachmurzona. Jednak chmury te w niczym nie przypominają ziemskich. Powstają, gdy opary kondensują się w minerały, związki chemiczne takie jak tlenek glinu, czy nawet metale. Ponadto odkryto, że na chłodniejszych gorących jowiszach dominować mogą chmury z siarczku manganu, a w światach cieplejszych - chmury krzemianowe. Z czasem krzemiany opadają w formie deszczu do wnętrza planety i znikają z atmosfery. Naukowcy z Jet Propulsion Laboratory w efekcie badania serii gorących jowiszy odkrytych za pomocą kosmicznego teleskopu Hubble'a stwierdzili obecność pary wodnej w chmurach. Było to spore zaskoczenie. W celu potwierdzenia obserwacji badacze połączyli wszystkie dane obserwacyjne z modelami klimatycznymi, aby znaleźć najbardziej prawdopodobny wzorzec klimatyczny. Analiza różnych scenariuszy klimatycznych - zakładających obecność zachmurzenia lub całkowity jego brak - wskazała, że na niektórych z obserwowanych gorących jowiszy występują chmury lub mgły.

Szczególnym modelem wykorzystywanym w badaniach egzoplanet jest opracowany przez naukowców z NASA Goddard Institute for Space Studies symulator ROCKE-3D. Opiera się on na wersji modelu dla planet Układu Słonecznego, do której wprowadzono znaczne modyfikacje w zakresie m.in. obsługiwanego warunków atmosferycznych, chemii, składu i rozmiarów planet oraz ich grawitacji, prędkości obrotowych, rozmieszczenia oraz topografii lądów i oceanów, a także podstawowych funkcji biosfery. Poza zaletami model ma wady. Ponieważ został zaprojektowany do symulacji tylko płytkich atmosfer i oceanów, nie można go stosować w badaniach tzw. wodnych planet, na których woda stanowi znaczną część masy, a proces przejścia cieczy ze stanu ciekłego w stały (lód) następując pod wysokim ciśnieniem. Model nie sprawdza się

również w symulacjach często spotykanych we Wszechświecie gigantycznych egzoplanet typu gorące jowisze. Poza szeregiem ograniczeń model, poprzez kombinację różnych cech egzoplanet, sprawdza się w badaniu zmian zachodzących w atmosferze planet oraz ustaleniu, w jaki sposób zmiany te mogą wpływać na możliwość zamieszkania. Wykorzystawszy model ROCKE-3D i obserwacje egzoplanety Proxima b, która orbituje w najbliższym układzie gwiazdnym Proxima Centauri, naukowcy odkryli, że rotuje ona synchronicznie wokół gwiazdy macierzystej. Dogłębna analiza wyników modelu pokazała, że chmury mogą się gromadzić po trwale nasłonecznionej stronie planety, co prowadzi do znacznego obniżenia temperatury jej powierzchni do wartości spotykanych na Ziemi. Na tej podstawie można przypuszczać, że na Proxima Centauri b z dużą dozą prawdopodobieństwa może występować woda. Są to jednak tylko przypuszczenia, wymagające potwierdzenia.

**Czy planetarne modele klimatyczne pozwalają nam lepiej zrozumieć kosmos?** Z pewnością tak. To dzięki nim wiemy, że na planetach znajdujących się poza Układem Słonecznym panują bardzo zróżnicowane warunki, a wiele środowisk gwiazdnych i układów planetarnych może nadawać się do zamieszkania. Symulacyjne modelowe w połączeniu z rzeczywistymi obserwacjami i pomiarami, umożliwiają badanie składu atmosfer odległych światów oraz poszukiwanie na ich powierzchni wody w stanie ciekłym. Badania klimatologiczne poszerzyły również naszą wiedzę na temat procesu powstawania planet, do niedawna ograniczającą się głównie do ciał niebieskich w ramach Układu Słonecznego. Wnioski płynące z symulacji modelowych są niezwykle cenne dla rozwoju metodyk, technologii i instrumentów pomiarowych stosowanych w planetologii kosmicznej. Doświadczenie to wykorzystuje się m.in. przy projektowaniu nowych teleskopów oraz tworzeniu strategii obserwacyjnych.

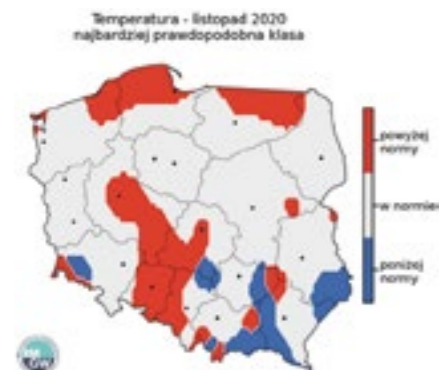
Planetarne modele klimatyczno-prognostyczne stosuje się również w praktyce. Obecnie głównym odbiorcą tych produktów są światowe agencje kosmiczne, ale w niedalekiej przyszłości do grona zainteresowanych prognozą pogody na innych planetach dołączą firmy komercyjne, jak choćby SpaceX Elona Muska. Modele meteorologiczne dostarczają niezbędnych informacji już na etapie planowania misji kosmicznych. Dane o stanie atmosfery planety są niezbędne do nawigacji sond i bezpiecznego ich posadzenia w wyznaczonym punkcie lądowania. Modele klimatyczno-prognostyczne wspomagały w tym zakresie misje na Marsa, Wenus czy Tytana. W niektórych przypadkach z tych modeli korzystają również satelity krążące na orbitach. Skuteczne przewidywanie pogody jest, jak widać, uniwersalną potrzebą ludzkiej cywilizacji nie tylko na Ziemi. Pytanie, jaka będzie jutro pogoda na Marsie, staje się powoli truizmem.

<sup>3</sup> Punkt na planecie stale zwrócony w kierunku gwiazdy.









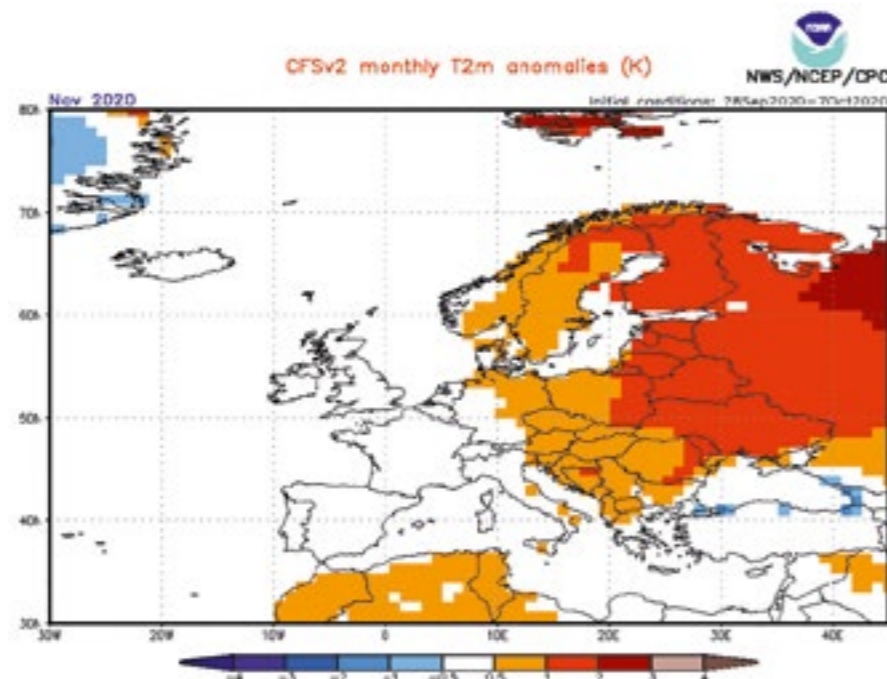
Przykład prognozy trzyklasowego ogólnego charakteru pogody, opracowanego przez IMGW-PIB – kolor niebieski oznacza klasę poniżej normy, szary klasę w normie, a czerwony powyżej normy (źródło: opracowanie własne)



Miesięczna prognoza najbardziej prawdopodobnej klasy średniej temperatury powietrza dla wybranych miast w Polsce według modelu IMGW-Reg (źródło: opracowanie własne)

wiatru, wilgotność względna), pochodzących z reanaliz NCEP/NCAR<sup>2</sup>. Wynikiem jest wyselekcjonowana wiązka prognoz danego elementu, na podstawie której określa się najbardziej prawdopodobną klasę. Model jest uruchamiany raz w miesiącu i generuje prognozę dla 6 najbliższych miesięcy i 20 wybranych miast w Polsce.

IMGW-Bayes jest statystycznym modelem prognostycznym, opartym na teorii prawdopodobieństwa i twierdzeniu Thomasa Bayesa (naiwny klasyfikator Bayesa). Prognozowane jest prawdopodobieństwo wystąpienia miesięcznej średniej temperatury powietrza, miesięcznej sumy opadów w klasie „powyżej normy”, „w normie” i „poniżej normy” (wyniki modelu nie zawierają informacji, o ile prognozowana wartość będzie niższa od dolnej granicy normy lub wyższa od jej górnej granicy). Do



Prognoza CSFv2 odchylenia temperatury powietrza od średniej wieloletniej (źródło: Climate Prediction Center, Seasonal climate forecast from CFSv2)



Obszarowa probabilistyczna prognoza pogody dla Polski według modelu IMGW-Bayes

obliczeń wykorzystywane są dane z reanaliz NCEP/NCAR, które dotyczą wybranych pól meteorologicznych z różnych poziomów troposfery i stratosfery. Model jest uruchamiany raz w miesiącu i generuje prognozę w wyprzedzeniu maksymalnie pięciu miesięcy. Obecnie prognozy wykonuje się dla 87 stacji meteorologicznych w Polsce, a wyniki interpoluje dla obszaru całego kraju.

**Jakość prognozy.** Modele IMGW-PIB dla prognozy średniej miesięcznej temperatury powietrza wykazują sprawdzalność na poziomie 57 proc. (IMGW-Bayes) i 64 proc.

(IMGW-Reg); dla miesięcznej sumy opadów umożliwiają osiągnięcie sprawdzalności na poziomie 35 proc. (IMGW-Reg) i 37 proc. (IMGW-Bayes). Prognozy pogody co do zasady muszą uwzględniać potrzeby i oczekiwania odbiorców, dlatego pojęcia sukcesu i porażki nie są jednoznaczne i cały czas dotyczą wspomnianego konfliktu interesów „potrzeby” i „możliwości”. Szczególnie wyraźnym przykładem jest opracowanie prognozy sezonowej, gdy należy odpowiedzieć na pytanie: czy zamierzamy przedstawić uśrednioną charakterystykę całego sezonu (np. średnia temperatura sezonu, suma opadu w sezo-

nie), czy też przedstawiamy charakterystyki pogodowe osobne dla każdego miesiąca wchodzącego w skład analizowanego okresu? Mimo ciągłego rozwoju metod analiz otrzymywanych wyników i algorytmów obliczeniowych nadal trudno jest z bardzo dużą pewnością określić, jakie warunki pogodowe wystąpią za kilka miesięcy. Odczuwalna dynamika zmiany klimatu również nie pomaga metodom prognostycznym, odnoszącym się do cykliczności zjawisk, które miały miejsce w przeszłości. Czy zatem długoterminowe prognozy pogody mają sens? Tak, o ile spróbujemy zrozumieć ich istotę i będziemy trwale poszukiwać rozwiązań (np. takich jak regionalny multimodel integrujący wiele modeli z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji), które pozwolą zaspościć głód poznania jutra z pozycji „tu i teraz”.

<sup>1</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration – amerykańska instytucja rządowa zajmująca się prognozowaniem pogody.  
<sup>2</sup> National Centers for Environmental Prediction – Narodowe Centrum Prognoz Środowiska, National Center for Atmospheric Research – Narodowe Centrum Badań Atmosfery.

**KRYSZYNA PIANKO-KLUCZYŃSKA.** Absolwentka Politechniki Warszawskiej (specjalność matematyka stosowana). Główny specjalista badawczo-techniczny w Centrum Meteorologicznej Osłony Kraju. Zajmuje się długoterminowymi prognozami pogody. Autorka modeli prognostycznych IMGW-Bayes i IMGW-TWS. Interesuje się również zagadnieniami związanymi z cyrkulacją atmosferyczną i systemami jej klasyfikacji.

**KRYSZYNA KONCA-KĘDZIEŃSKA.** Absolwentka Politechniki Warszawskiej (specjalność matematyka stosowana). Pracę w IMGW-PIB rozpoczęła w 1980 r. w Ośrodku Baz Danych. W kolejnych latach zajmowała się już jednak problematyką jakości prognoz meteorologicznych i hydrologicznych. Obecnie specjalizuje się w badaniach klimatycznych i prognozach długoterminowych. Autorka modelu prognostycznego IMGW-Reg.

**MARCIN WADOWIKOWSKI.** Pracuje w IMGW-PIB od 2007, aktualnie w Centrum Modelowania Meteorologicznego. Współautor ponad 30 prac naukowych i popularno-naukowych w zakresie hydrometrii, modelowania opadów maksymalnych, ochrony przeciwpowodziowej i zarządzania kryzysowego. Aktualnie obszary zainteresowań to: prognozy długoterminowe, meteorologia na potrzeby odnawialnych źródeł energii oraz aplikacyjne zastosowania hydrologii i meteorologii. Przedstawiciel delegacji polskiej w grupie ds. ochrony przeciwpowodziowej Międzynarodowej Komisji Ochrony Łąby. Zawodowo i rodzinie związany z Odrą i Wrocławiem.

**ALAN MANDAL.** Doktor nauk o ziemi w dziedzinie geografii. Pracownik IMGW-PIB od 2010 roku. Realizuje zadania w zakresie prognozowania długoterminowego w ramach Centrum Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB

**GRZEGORZ NYKIEL.** Dr inż. nauk technicznych, główny specjalista badawczo-techniczny w IMGW-PIB, naukowo związany również z Politechniką Gdańską. Zajmuje się przetwarzaniem i analizą danych pochodzących z numerycznych modeli prognozowania pogody, a także wykorzystaniem sygnałów satelitarnych do analizy stanu ziemskiej atmosfery.

**ADAM JACZEWSKI.** Dr nauk o Ziemi, adiunkt. Specjalizuje się w modelowaniu klimatu i pogody oraz weryfikacją wyników tych modeli. Zajmuje się również oceną zmian i zmienności klimatu, szczególnie w zakresie zjawisk ekstremalnych.

**WERONIKA WROŃSKA.** Absolwentka Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie na kierunku Inżynieria Środowiska. Młodszy specjalista w Centrum Modelowania Meteorologicznego. Zajmuje się prognozami długoterminowymi oraz aplikacyjnym wykorzystaniem danych i prognoz meteorologicznych.

**TOMASZ STRZYŻEWSKI.** Pracownik IMGW-PIB od 2018 roku. Głównie zainteresowania to małoskalowe modelowanie przepływu powietrza technikami CFD, zmiany klimatyczne, nowoczesne technologie pozyskiwania energii, wiatrowe zjawiska ekstremalne oraz wszelkiego rodzaju analizy przestrzenne.

**ZOFIA BALDYSZ.** Stażystka w IMGW-PIB. Zawodowo związana z Politechniką Gdańską. Zajmuje się analizą zawartości pary wodnej w atmosferze pod kątem monitorowania zmian klimatycznych, a także badaniami niebezpiecznych zjawisk pogodowych z wykorzystaniem techniki GNSS.

**MARTA GRUSZCZYŃSKA.** Doktor nauk technicznych w dyscyplinie geodezja i kartografia. Aktualnie specjalista w Centrum Modelowania Meteorologicznego. Współautorka 11 publikacji naukowych. Interesuje się analizą szeregów czasowych, prognozami długoterminowymi, jak również kontrolą jakości danych meteorologicznych.

**ROZWÓJ NUMERYCZNYCH MODELÓW POGODY NA CAŁYM ŚWIECIE, BĘDĄCY KONSEKWENCJĄ POSTĘPU TECHNIK TELEDETEKCYJNYCH, SATELITARNYCH I WZROSTU MOCY OBLICZENIOWEJ SUPERKOMPUTERÓW, OTWIERA CORAZ TO NOWSZE MOŻLIWOŚCI, RÓWNIEŻ W ZAKRESIE PROGNOZOWANIA DŁUGOTERMINOWEGO. W POLSCE PODSTAWOWYM ŹRÓDŁEM INFORMACJI O POGODZIE JEST IMGW-PIB, W KTÓRYM PROGNOZY DŁUGOTERMINOWE ROZWIJANE SĄ OD LAT 50. XX WIEKU. OBECNIE W INSTYTUCIE OPRACOWYWANE I WDRAŻANE SĄ ROZWIĄZANIA TECHNOLOGICZNE NIEZBĘDNE DO PRZEPROWADZANIA ZAAWANSOWANYCH ANALIZ METEOROLOGICZNYCH. ASYMILACJA WSPÓŁCZESNEJ WIEDZY I TECHNOLOGII Z WIELOLETNIM DOŚWIADCZENIEM PRACOWNIKÓW ORAZ ROZWÓJ OBECNIE STOSOWANYCH MODELÓW PROGNOZ DŁUGOTERMINOWYCH POZWOLĄ IMGW-PIB DOŁĄCZYĆ DO GRONA WIODĄCYCH SŁUŻB METEOROLOGICZNYCH ŚWIATA.**



foto: Marek Szurcon/Unsplash



# Jeszcze o pogodzie. Kilka słów o przyszłości

prof. Mariusz Figurski, Andrzej Wyszogrodzki, Jan Szturc – IMGW-PIB/Centrum Modelowania Meteorologicznego

**Numeryczne modele pogody to zaawansowana technologia, która może być bardzo przydatna pod warunkiem, że jest dobrze stosowana. Postępy w numerycznym prognozowaniu pogody opierają się na systematycznym, wieloletnim rozwoju technologii i wiedzy naukowej. Każdego dnia te skomplikowane obliczenia są wykonywane w setkach ośrodków prognostycznych na całym świecie, w celu dostarczania społeczeństwu coraz dokładniejszych prognoz pogody, których to sprawdzalność wzrasta nieprzerwanie od lat 70. ubiegłego wieku. Czy prognozy mogą stać się doskonałe?**

Większość dzisiejszych prognoz pogody bazuje na wynikach złożonych symulacji, przeprowadzanych przez programy komputerowe nazywane numerycznymi modelami prognoz pogody (NMP), które są wykonywane na systemach obliczeniowych dużej mocy, czyli tzw. superkomputerach. Można o nich myśleć jako o grach komputerowych, czyli uproszczonej, ale imponującej numerycznej reprezentacji skomplikowanej rzeczywistości ziemskiego ekosystemu. Numeryczne modele prognoz pogody wykorzystują pomiary podstawowych parametrów atmosfery w celu oszacowania tego, co dzieje się na przestrzeni kilku ostatnich godzin (otrzymując tzw. analizę). Następnie, na podstawie policzonej już analizy uruchamiana jest numeryczna symulacja, która prognozuje ewolucję stanu atmosfery w niedalekiej przyszłości. Takie symulacje wykorzystują efektywne metody numeryczne oraz uproszczoną fizykę atmosfery, aby zakończyć obliczenia w możliwie najkrótszym czasie, czyli wygenerować prognozę zanim nadejdzie termin, na który została ona przygotowana.

Jednak prognozy numeryczne są tak dokładne, jak dokładne są obserwacje wchodzące w skład prognozy na początku jej przebiegu, zwane często „warunkami początkowymi”. Tymczasem pogodę kształtują niezwykle dynamiczne w czasie i przestrzeni procesy. Na jej jutrzejszy przebieg w Polsce wpływają warunki atmosferyczne występujące obecnie setki lub tysiące kilometrów stąd. Na pogodę w przyszłym tygodniu może wpływać dzisiejsza pogoda na innym kontynencie. Jeśli chcemy uchwycić istotę tych zależności, musimy na potrzeby modelowania numerycznego pozyskiwać coraz większą ilość danych z globalnych i regionalnych sieci pomiarowych. To pozwala prognozować pogodę z odpowiednią dokładnością.

Pomimo dysponowania coraz lepszymi i bardziej zaawansowanymi modelami opisującymi zjawiska fizyczne w atmosferze oraz dostępu do ogromnej ilości danych konsumowanych przez te modele, prognozy numeryczne są ciągle dalekie od doskonałości. Cały czas podejmowane są próby poprawy jakości generowanych prognoz. Jedną z nich jest wykorzystanie sztucznej inteligencji, która dodatkowo przetwarza dane prognostyczne z numerycznych modeli pogody oraz wszelkiego rodzaju pomiarów bezpośrednich oraz teledetekcyjnych. Podejście takie jest uzasadnione, gdyż może generalnie poprawić dokładność prognoz, ale nie wnosi nowej jakości do naszej wiedzy o prognozowanych zjawiskach. Niezależnie od zastosowanej metody, wynikiem będzie prognoza poprawiona w stosunku do surowych wyników modelu i chociaż ze statystycznego punktu widzenia będzie dokładniejsza, to nie do końca zadowalająca, ponieważ metody te nie są oparte na znajomości procesów fizycznych, które w rzeczywistości zachodzą w danym momencie lub mają uformować się w ciągu następnych godzin. Dlatego sztuczna inteligencja na tym etapie rozwoju modelowania numerycznego pogody może być istotnym, ale tylko wspomagającym elementem.

Obecne badania nad rozwojem i doskonaleniem metod modelowania koncentrują się na polepszeniu rozdzielczości czasowej i przestrzennej siatek obliczeniowych, zwiększeniu złożoności i dokładności fizycznych parametryzacji w różnej skali oraz analizie zjawisk ekstremalnych wywołanych zmianami naturalnymi i antropogenicznymi. Obserwujemy także, że wraz z rozwojem naszych kompetencji, umożliwiającym lepsze zrozumienie procesów prognozowania pogody i klimatu, zwiększają się również oczekiwania społeczeństwa w stosunku do jakości prognoz. Potrzebujemy w coraz to większym stopniu dedykowanych prognoz uwzględniających zjawiska ekstremalne i pokazujących ich skutki, gdy tymczasem wiele zdarzeń pogodowych i sytuacji awaryjnych ma charakter losowy, wykazuje się niezwykle dynamiką i zachodzi w krótkim czasie. Musimy zatem stale poprawiać jakość systemów modelowania dla służby hydrometeorologicznej, aby można było skutecznie informować społeczeństwo oraz udzielać jak najlepszych porad i prognoz meteorologicznych dla naszych odbiorców.

for. Pev/Martin on Unsplash



# ZAKOCHAJ SIĘ W GÓRACH

GORY.IMGW.PL



CAŁOROCZNY SERWIS INFORMACJI POGODOWYCH  
DLA GÓR ORAZ 150 MIEJSCOWOŚCI OD IMGW-PIB



GÓRY  
IMGW-PIB  
[gory.imgw.pl](http://gory.imgw.pl)