

BIAŁA KSIĘGA NUMERYCZNYCH MODELI POGODY

pod redakcją
MICHĄŁA ZIEMIAŃSKIEGO,
MARIUSZA J. FIGURSKIEGO,
ANDRZEJA WYSZOGRODZKIEGO

SERIA WYDAWNICTW TECHNICZNYCH IMGW-PIB
2023



BIAŁA KSIĘGA NUMERYCZNYCH MODELI POGODY

pod redakcją
Michała Ziemiańskiego, Mariusza J. Figurskiego,
i Andrzeja Wyszogrodzkiego

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2023



SERIA WYDAWNICTW TECHNICZNYCH IMGW-PIB

BIAŁA KSIĘGA NUMERYCZNYCH MODELI POGODY

Opracowano na podstawie dokumentu

Guidelines on High-resolution Numerical Weather Prediction (WMO-No. 1311)
Światowej Organizacji Meteorologicznej

Autorzy

Eksperti Komisji WMO ds. Systemów Obserwacji, Infrastruktury i Informacji:
Douglas Boyd, Hamza Athumani Kabelwa, Stephani Landman,
Chiara Marsigli, Ken Mylne, Wai Kin Wong

Tłumaczenie

Zofia Bałdysz, Adam Jaczewski, Michał Ziemiański

Słownik terminów

Zofia Bałdysz, Adam Jaczewski

Korekta

Grzegorz Duniec, Mariusz Figurski

Opracowanie załączników

Andrzej Wyszogrodzki, Grzegorz Duniec, Mariusz Figurski, Jan Szturc, Anna Jurczyk,
Katarzyna Ośródk, Bogdan Bochenek, Zofia Bałdysz, Marta Gruszczynska, Adam Jaczewski,
Karina Kózka, Alan Mandal, Grzegorz Nykiel, Weronika Wrońska, Michał Ziemiański,
Joanna Wieczorek, Tomasz Strzyżewski, Marcin Kolonko

Zbiorcze podsumowanie i wstęp

Michał Ziemiański

Redakcja

Michał Ziemiański, Mariusz J. Figurski, Andrzej Wyszogrodzki

Opracowanie redakcyjne i graficzne

Rafał Stepnowski, Michał Seredin

ISBN: 978-83-64979-50-7

Wydawca

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61, E. content@imgw.pl
Redaktor Wydawniczy/Publishing Editor
Rafał Stepnowski, E. rafal.stepnowski@imgw.pl

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
ZBIORCZE PODSUMOWANIE DLA ZARZĄDZAJĄCYCH	7
WSTĘP: CHARAKTERYSTYKA DOKUMENTU	9
TŁUMACZENIE OBSZERNYCH FRAGMENTÓW DOKUMENTU WMO-No. 1311	11
I. WPROWADZENIE I WSTĘP DO SYSTEMÓW NWP (ROZDZIAŁY 1 I 2.1)	11
II. DEFINICJA PROGNOZY POGODY O WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI (ROZDZIAŁ 2.2)	12
III. TRWAŁOŚĆ I ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ (ROZDZIAŁ 2.3)	14
IV. OPCJE DOSTĘPU DO NWP O WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI (ROZDZIAŁ 2.4)	14
V. STRATEGIA (ROZDZIAŁ 2.5)	16
VI. WDROŻENIE OPERACYJNYCH SYSTEMÓW NWP (ROZDZIAŁ 4)	18
VII. KONWEKCYJNO-SKALOWE REGIONALNE NWP (POZIOMY USŁUG 3-6) (ROZDZIAŁY 4.4.1, 4.4.2)	19
VIII. NWP WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI: POZIOMY 3 DO 6 (ROZDZIAŁ 4.4.10)	21
TERMINOLOGIA/SKRÓTY	25
ANEKS 1. KONSORCJUM MODELOWANIA ACCORD	29
ANEKS 2. KONSORCJUM MODELOWANIA COSMO	33
ANEKS 3. MODEL WRF W IMGW-PIB	41
ANEKS 4. NOWCASTING W IMGW-PIB	51
ANEKS 5. PROGNOZY DŁUGOTERMINOWE	59
ANEKS 6. ZASTOSOWANIA SPECJALNE NWP	67
ANEKS 7. PRODUKTY MODELI NWP, NOWCASTINGOWYCH I SPECJALISTYCZNYCH	77
ANEKS 8. EUROPEJSKIE CENTRUM ŚREDNIOTERMINOWYCH PROGNOZ POGODY (ECMWF)	85

PRZEDMOWA

Numeryczne Prognozy Pogody to jeden z najbardziej zaawansowanych produktów współczesnej meteorologii, bez którego funkcjonowanie efektywnego systemu prognoz i ostrzeżeń o niebezpiecznych zjawiskach meteorologicznych jest obecnie praktycznie niemożliwe.

Dzięki postępowi technologicznemu, coraz wydajniejszym urządzeniom obliczeniowym, zaczynając od współczesnych komputerów osobistych a na zaawansowanych superkomputerach kończąc oraz współczesnej teleinformatyce, zapewniającej niemalże natychmiastowe dostarczenie danych pomiarowych z rozbudowanych meteorologicznych systemów obserwacyjno-pomiarowych, możliwe jest funkcjonowanie całej kaskady numerycznych modeli pogody, pracujących zasadniczo w trybie ciągłym. Umiejętne łączenie danych pochodzących z niezwykle zaawansowanych systemów obserwacyjno-pomiarowych, w tym i telemetrycznych, umożliwia numerycznym systemom prognoz meteorologicznych dostarczanie nie tylko wiarygodnych i aktualnych zobrazowań stanu atmosfery ziemskiej, ale przede wszystkich pozwala na nieustanne, ciągłe prognozowanie jego zmian.

Wyniki prognoz numerycznych, których wiarygodność w skali do kilku dni jest niezwykle wysoka, umożliwiają efektywne funkcjonowanie systemu ostrzeżeń o niebezpiecznych zjawiskach stanowiących bezpośrednie zagrożenie dla życia ludzkiego, mienia, bezpieczeństwa ekonomicznego państwa itd., jak również dają przesłanki do opracowywania prognoz o możliwości wystąpienia innych zagrożeń, tj. hydrologicznych, oceanograficznych czy geologicznych. Dzięki wykorzystywaniu różnych technik możliwe jest wydawanie ostrzeżeń o zagrożeniach mogących wystąpić w czasie od kilkudziesięciu minut do kilku dni od opracowania prognozy.

Rozwój numerycznych prognoz pogody nie byłby także możliwy bez międzynarodowej współpracy, która w ramach prognoz numerycznych przyjmuje wielokrotnie formę konsorcjów. Dzięki współczesnej telekomunikacji i otwarciu kodów źródłowych wielu numerycznych modeli meteorologicznych nastąpił niespotykany wcześniej rozwój tych systemów.

W procesie rozwoju systemu numerycznych prognoz pogody istotną rolę odgrywa Światowa Organizacja Meteorologiczna (WMO), której zadaniem jest zapewnienie dostępu do informacji meteorologicznej wszystkim krajom członkowskim. Ten dostęp zależy od szeregu regionalnych i lokalnych uwarunkowań, niemniej jednak zachowane są stosowne standardy, za których wypracowywanie, dokumentowanie i udostępnianie społeczności międzynarodowej odpowiada WMO. Dzięki tym wskazówkom mamy pewność, że implementowanie przez poszczególne narodowe służby meteorologiczne rozwiązania, w tym systemy numerycznych prognoz pogody, będą spełniały najwyższe standardy jakościowe. Jednocześnie regionalne i narodowe implementacje systemów umożliwiają osiągnięcie synergii, jaka związana jest ze współpracą międzynarodową.

Także polska służba meteorologiczna IMGW-PIB, będąca członkiem WMO, korzysta z możliwości stwarzanych przez tę organizację, zarówno wykorzystując dane obserwacyjno-pomiarowe z obszaru znacznie większego niż terytorium Polski, jak również rozwijając

we współpracy z innymi narodowymi służbami meteorologicznymi systemy numerycznych prognoz pogody po to, aby żyło się nam bezpieczniej, a nasze życie, zdrowie i mienie było właściwie chronione.

*prof. dr hab. Mirosław Miętus
Zastępca Dyrektora IMGW-PIB
Stały Przedstawiciel Polski
w Światowej Organizacji Meteorologicznej*

ZBIORCZE PODSUMOWANIE DLA ZARZĄDZAJĄCYCH

Wraz z szybkim postępem wiedzy oraz obliczeniowych mocy komputerów, numeryczne prognozy pogody (NWP) stały się podstawowym i niezbędnym narzędziem wspierania procesu prognozowania pogody oraz prowadzenia osłony hydrologiczno-meteorologicznej przez narodowe służby pogody (NMHS). Niniejsze opracowanie jest tłumaczeniem głównych tez dokumentu WMO-No. 1311 *Guidelines on High-resolution Numerical Weather Prediction*. Jego autorzy zwracają uwagę na zasadnicze korzyści wynikające z dostępu do prognoz numerycznych, ale też podkreślają, że systemy zapewniające dostęp do tych prognoz są złożone i kosztowne, a ich optymalne wykorzystanie wymaga odpowiedniej infrastruktury informatyczno-obliczeniowej oraz zespołów, które w sposób długoterminowy gromadzą i rozwijają niezbędną wiedzę i doświadczenia. Wymagana jest zatem długofalowa polityka wewnętrzna, która umożliwi utrzymanie usług na wymaganym poziomie i zapobiega marnotrawstwu funduszy i zasobów.

Dokument przedstawia sześć poziomów zaawansowania usług NWP możliwych do prowadzenia przez NMHS oraz charakteryzuje podstawowe zasoby infrastrukturalne i eksperckie niezbędne do ich utrzymania. Poziomy od 3 do 6 obejmują prowadzenie regionalnych numerycznych prognoz pogody (obliczanych operacyjnie w IMGW-PIB): regionalne NWP bez asymilacji danych (poziom 3), z asymilacją danych (poziom 4), w systemie prognoz wiązkowych (poziom 5) oraz w systemie obejmującym prognozy pozostałych komponentów środowiska planetarnego (Earth System), jak oceany, chemia atmosfery, etc. (poziom 6).

Przedstawione tezy mają ułatwić i umożliwić podjęcie optymalnej systemowej decyzji o pożądanym poziomie zaawansowania technologicznego operacyjnego systemu prognoz numerycznych w IMGW-PIB oraz o wdrożeniu niezbędnych wymagań infrastrukturalnych i eksperckich. Te ostatnie powinny dodatkowo uwzględniać zasoby niezbędne do prowadzenia prac badawczych w dziedzinie NWP przynajmniej dla utrzymania usług na poziomie „state-of-the-art”.

WSTĘP: CHARAKTERYSTYKA DOKUMENTU

Wraz z szybkim postępem wiedzy oraz wzrostem mocy obliczeniowych komputerów numeryczne prognozy pogody (NWP) stały się podstawowym i niezbędnym narzędziem wspierania procesu prognozowania pogody oraz prowadzenia osłony hydrologiczno-meteorologicznej przez narodowe służby pogody. Dokument WMO-No. 1311 pt. *Guidelines on High-resolution Numerical Weather Prediction* powstał w odpowiedzi na potrzeby narodowych służb meteorologicznych i zawiera podstawowe zalecenia dotyczące organizacji systemu numerycznych prognoz pogody oraz koniecznych zasobów, także eksperckich, niezbędnych do jego utrzymania. W opracowaniu przedstawiono też ogólną charakterystykę współczesnych numerycznych modeli pogody oraz metody i zasady interpretacji, wykorzystania i przetwarzania ich wyników.

Prezentowane w dokumencie WMO zalecenia mają bardzo praktyczny i konkretny charakter. Zebrano tu i podsumowano doświadczenia wielu narodowych służb hydrologiczno-meteorologicznych o różnym stopniu zaawansowania eksperckiego i technologicznego. Informacje te z reguły nie są upowszechniane w publikacjach naukowych lub podczas konferencji poświęconych numerycznym prognozom pogody. Ich zestawienie w jednym zbiorczym dokumencie ma ułatwić narodowym służbom hydrologiczno-meteorologicznym, takim jak IMGW-PIB, wprowadzenie i utrzymanie optymalnego poziomu usług NWP na jednym z proponowanych poziomów zaawansowania (w 6-stopniowej klasyfikacji).

Doboru zagadnień, które przedstawiono w niniejszym opracowaniu, dokonano z myślą o osobach biorących udział w podejmowaniu decyzji dotyczących utrzymania i rozwoju systemu prognoz numerycznych oraz niezbędnej infrastruktury informatycznej i obliczeniowej w IMGW-PIB, a także odpowiednich zespołów eksperckich. Przedstawione tezy powinny ułatwić i umożliwić podjęcie optymalnej decyzji o pożądanym poziomie zaawansowania technologicznego operacyjnego systemu prognoz numerycznych w IMGW-PIB oraz o niezbędnych wymaganiach infrastrukturalnych i eksperckich. Zrezygnowano zatem z rozszerzonej dyskusji o charakterystyce modeli numerycznych różnych klas oraz o zasadach interpretacji, przetwarzania, weryfikacji ich wyników, istotnych z punktu widzenia użytkowników prognoz (informacje te dostępne są jednak w oryginalnym dokumencie). Pominięto także aspekt prognoz globalnych, skupiając się na regionalnych prognozach wysokiej rozdzielczości operacyjnie wykorzystywanych w IMGW-PIB.

Należy podkreślić, że autorzy dokumentu *Guidelines on High-resolution Numerical Weather Prediction* skupili się na wymaganiach związanych z bieżącym utrzymaniem prognoz numerycznych jako operacyjnego systemu produkcyjnego. Nie brano pod uwagę zasobów, zwłaszcza ludzkich, niezbędnych do prowadzenia prac badawczo-rozwojowych w tej dziedzinie, przynajmniej dla utrzymania poziomu „state-of-the-art”. Odpowiednie decyzje systemowe powinny uwzględniać także ten aspekt oraz fakt, że udział IMGW-PIB w tego typu pracach wymagany jest wprost przez członkostwo Instytutu w międzynarodowych konsorcjach ACCORD i COSMO.

Prezentowane polskojęzyczne tłumaczenie fragmentów dokumentu WMO uzupełniono o słownik podstawowych pojęć i skrótów oraz załączniki zawierające charakterystykę modeli używanych w IMGW-PIB, w tym modeli międzynarodowych konsorcjów modelowania pogody ACCORD i RC LACE (Aneks 1) oraz COSMO (Aneks 2), charakterystykę modelu WRF (Aneks 3), prognoz nowcastingowych (Aneks 4) i prognoz długookresowych (Aneks 5). Aneks 6 omawia krótko zastosowania specjalne modeli NWP w IMGW-PIB, a aneks 7 przedstawia dostępne produkty NWP, nowcastingowe i specjalistyczne. Aneks 8 zawiera charakterystykę Europejskiego Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody (ECMWF) oraz możliwych do uzyskania korzyści, gdyby Polska przystąpiła do tej organizacji. Oryginalny tekst dokumentu WMO-No. 1311 został opublikowany i jest dostępny na stronie internetowej WMO (<https://library.wmo.int>).

TŁUMACZENIE OBSZERNYCH FRAGMENTÓW DOKUMENTU WMO-No. 1311

I. WPROWADZENIE I WSTĘP DO SYSTEMÓW NWP (ROZDZIAŁY 1 I 2.1)

Systemy, dane i produkty numerycznego prognozowania pogody (Numerical Weather Prediction – NWP) o wysokiej rozdzielczości oraz charakterze globalnym i regionalnym są podstawowymi narzędziami do zaawansowanego prognozowania pogody. Wspierają one szeroki zakres zadań i usług w dziedzinie prognozowania i ostrzegania, prowadzonych przez narodowe służby hydrologiczno-meteorologiczne (NMHS). Podczas gdy niektórzy członkowie WMO mają zasoby wymagane do nabycia i utrzymania dużych superkomputerów, aby eksploatować zaawansowane systemy NWP, większość NMHS ich nie ma. Dokument ten przedstawia członkom WMO zalecenia oraz szereg opcji jak uzyskać dostęp do globalnych i regionalnych danych NWP o wysokiej rozdzielczości, w zależności od posiadanych zasobów.

Model NWP to duży i bardzo złożony system programów komputerowych, przeznaczony do symulacji fizyki i dynamiki atmosfery. Do celów prognostycznych model NWP jest używany razem z procesem asymilacji danych. Wykorzystuje on najnowsze obserwacje bieżącego stanu atmosfery do zainicjowania obliczeń. Asymilacja danych to kolejny bardzo wyrafinowany system oprogramowania, który wymaga złożonego pobierania oraz kontroli jakości bieżących atmosferycznych danych obserwacyjnych. Na podstawie informacji o stanie początkowym atmosfery, wygenerowanym przez asymilację danych, model symuluje, w jaki sposób atmosfera będzie ewoluować poprzez kolejne dni, obliczając w ten sposób prognozę.

Dane wyjściowe z modelu NWP mogą obejmować wiele różnych zmiennych reprezentujących różne aspekty przewidywanej pogody, w tym pola ciśnienia, wiatru i temperatury przy powierzchni ziemi oraz na różnych wysokościach, opady, w tym deszcz i śnieg, zachmurzenie, promieniowanie słoneczne i widzialność. Niektóre systemy NWP są sprzężone z innymi modelami, aby dostarczać informacje prognostyczne o innych zmiennych. Na przykład, przy sprzężeniu z modelami gleby, oceanu lub hydrologicznymi, modele NWP mogą zapewnić prognozy wilgotności gruntu, fal i prądów oceanicznych lub spływów hydrologicznych oraz przepływów w rzekach. Wiele systemów prognostycznych wykorzystuje obecnie modele NWP w systemach wiązkowych (Ensemble Prediction Systems – EPS), gdzie model jest uruchamiany wiele razy z nieco różniącymi się warunkami początkowymi i, jeśli ta opcja jest dostępna, ze zróżnicowanymi reprezentacjami procesów fizycznych w modelu, w celu oszacowania niepewności prognozy.

Jakość prognoz z systemów NWP zależy od wielu czynników, ale jednym z najważniejszych jest poziomy rozmiar siatki obliczeniowej, czyli rozdzielczość. Modele NWP mają informację o atmosferze na siatce pojedynczych punktów. Im bliżej siebie znajdują się te punkty, tym dokładniej można symulować procesy fizyczne i tym bardziej szczegółowa może być prognoza modelu. Służba pogodowa może zatem skorzystać z dostępu do danych

NWP o najwyższej dostępnej rozdzielczości dla obszaru swojej odpowiedzialności. Jednak modele NWP potrzebują zwykle komputera o wysokiej wydajności (high-performance computer: HPC), a im wyższa rozdzielczość – czyli bliższe siebie węzły siatki – tym większa wymagana moc obliczeniowa.

Modele NWP występują w dwóch klasach, jako modele globalne i modele regionalne. Regionalne modele NWP są czasem nazywane także modelami o ograniczonym obszarze (limited area models – LAM). Ponieważ pokrywają one tylko ograniczoną część globu, na komputerze z mocą obliczeniową umożliwiającą uruchomienie globalnego modelu NWP można eksploatować regionalny model NWP o znacznie większej rozdzielczości (mniejszym odstępnie pomiędzy węzłami) niż ten model globalny. Modele regionalne są jednak zależne od dostępności warunków brzegowych (lateral boundary conditions – LBC) na granicach swojej domeny obliczeniowej. Pochodzą one z modelu globalnego odpowiedzialnego za prognozę wielkoskalowych systemów pogody, które napłyną do domeny modelu regionalnego.

Podstawowa inicjalizacja modelu regionalnego może odbywać się poprzez interpolację (downscaling) analizy z globalnego NWP. Jednak uzyskanie pełnych korzyści z modelu regionalnego wymaga także systemu asymilacji danych, który może przetwarzać obserwacje lokalne o wysokiej rozdzielczości. Budowa systemu asymilacji danych, efektywnie zasilanego przez obserwacje lokalne i umożliwiającego znaczną poprawę prognoz w warunkach operacyjnych, szczególnie w przypadku burz konwekcyjnych, jest złożonym i kosztownym wyzwaniem wymagającym wysoko wykwalifikowanego personelu specjalistycznego. Dodatkowe rozszerzenie systemu o zdolność prognozowania wiążkowego jest ściśle powiązane z procesem asymilacji danych, tak aby móc zainicjować poszczególne elementy wiązki prognoz. Eksploatacja EPS wymaga również dostępu do bardzo dużych zasobów obliczeniowych, a dla regionalnych EPS także do dużych ilości danych zapewniających wiążkowe warunki brzegowe.

Systemy NWP, działające na superkomputerach na poziomie „state-of-the-art”, generują bardzo duże ilości danych. Wytwarzanie i przetwarzanie tych danych także wymaga znacznych zasobów, zarówno obliczeniowych, jak i wysoko wykwalifikowanych naukowców i inżynierów oprogramowania.

II. DEFINICJA PROGNOZY POGODY O WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI (ROZDZIAŁ 2.2)

Przed rozważeniem dostępnych opcji warto obszerniej omówić, co oznacza NWP o wysokiej rozdzielczości. Rozwój technologii komputerowych umożliwił wzrost rozdzielczości modeli, trwający od wielu dekad, a to, co kilka lat temu uważano za wysoką rozdzielczość, obecnie uznawane jest za niską. W czasie pisania tego tekstu, w roku 2022, kilka wiodących na świecie modeli globalnych działało z krokiem siatki około 10 km w umiarkowanych szerokościach geograficznych. Globalne systemy wiążkowe działają typowo z krokami siatek

obliczeniowych około 20 km, ale kilka centrów planuje zagęszczenie ich do około 10 km do połowy lat 20. XXI wieku. Niewiele ponad dekadę wcześniej tylko modele regionalne mogły osiągnąć tego rodzaju rozdzielczości.

Siatki o kroku 10-20 km pozwalają modelom globalnym zapewnić bardzo dobrą reprezentację większości aspektów ogólnej cyrkulacji atmosfery, włączając w to szczegółową reprezentację układów niskiego ciśnienia umiarkowanych szerokości geograficznych, a nawet są wystarczające, aby oszacować intensywność cyklonów tropikalnych. Jednak takie modele nie mogą w sposób jawny przedstawić niektórych procesów i systemów atmosferycznych o mniejszej skali, w szczególności burz konwekcyjnych, procesów fizycznych zachodzących w chmurach i radiacyjnych oraz interakcji z powierzchnią ziemi. Procesy takie są reprezentowane za pomocą schematów parametryzacji podskalowych (są to uproszczone pod-modele w modelu NWP, które reprezentują statystycznie uśrednione efekty takich procesów). Konwekcja określa zasadniczą część pogody w tropikach, więc modele globalne generalnie radzą sobie tam gorzej niż w umiarkowanych szerokościach geograficznych. Niemniej dzisiejsze globalne modele i EPSy mają wystarczająco wysoką rozdzielczość, aby zapewnić silne narzędzia prognostyczne tam, gdzie brak dostępu do modeli regionalnych.

Modele regionalne (lub regionalne modele wiązkowe) działające na części globu, zasilane przez LBC z modelu globalnego (lub wiązki globalnej), pozwalają, aby dostępne moce obliczeniowe zapewniły wyniki o znacznie większej rozdzielczości niż system globalny (lub uzyskanie podobnej rozdzielczości na komputerach o mniejszej mocy). W niektórych systemach wykorzystuje się kilka stopni zagnieżdżenia modeli, gdzie pośredni model regionalny zapewnia LBC dla modeli lokalnych o bardzo dużej rozdzielczości. Wiele ośrodków jest obecnie w stanie wykorzystywać modele i wiązki w „skali konwekcyjnej” z krokiem siatki około 1 do 4 km. Te modele konwekcyjno-skalowe (czasami określane jako zezwalające na konwekcję) mogą jawnie reprezentować konwekcję w skali siatki obliczeniowej. Pozwalają wtedy na znacznie lepszą reprezentację typu konwekcji, która może wystąpić, np. lepszą reprezentację ulewnego deszczu lub gradu i związanego z tym ryzyka wystąpienia niebezpiecznej pogody. Mogą również bardziej szczegółowo odzwierciedlać inne zjawiska atmosferyczne, zwłaszcza te, na które wpływa lokalna topografia (wzgórza, doliny, linie brzegowe itp.), i ich wpływ na lokalną pogodę, np. na lokalnie występującą mgłę lub przybrzeżne efekty wiatrowe. Lepsza reprezentacja konwekcji może być szczególnie korzystna w tropikach, gdzie opady i niebezpieczna pogoda są głównie wywoływane przez konwekcję.

Takie modele konwekcyjno-skalowe pozwalają zatem na prowadzenie bardziej szczegółowych prognoz lokalnych. Użytkownicy powinni jednak mieć świadomość, że w wielu okolicznościach mogą również przedstawić przekonywujące i realistycznie wyglądające prognozy, których szczegóły są mylące lub błędne, zwłaszcza jeśli nie występują silne efekty orograficzne. Na przykład silne deszcze konwekcyjne mogą występować w zupełnie innych miejscach lub innym czasie niż te, w których modele je przewidują. Uzyskanie dobrej szczegółowej prognozy krótkoterminowej uzależnione jest od posiadania zaawansowanego systemu asymilacji danych, sprzężonego z bardzo dobrej jakości systemami obserwacyjnymi

o wysokiej rozdzielczości, co pozostaje wyzwaniem nawet dla najlepszych ośrodków. Zastosowanie zaawansowanych systemów przetwarzania wyników modeli jest dodatkowym czynnikiem ważnym dla prawidłowej interpretacji wyników modeli konwekcyjno-skalowych lub ich wiązek, tak aby zapewnić wiarygodne prognozy pogody.

W niniejszych wytycznych termin „NWP o wysokiej rozdzielczości” może odnosić się zarówno do globalnych, jak i regionalnych modeli NWP lub ich wiązek. Podczas gdy modele konwekcyjno-skalowe mogą zapewnić ważne dodatkowe szczegóły, także globalne systemy NWP można wykorzystać do wspierania służby prognoz i ostrzeżeń, zwłaszcza tam, gdzie systemy regionalne nie są dostępne.

III. TRWAŁOŚĆ I ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ (ROZDZIAŁ 2.3)

Zachowanie trwałości i zrównoważony rozwój są istotnym aspektem w znajdowaniu najlepszego rozwiązania dla uzyskania dostępu do NWP o wysokiej rozdzielczości. Systemy NWP są złożone i kosztowne w zarządzaniu oraz utrzymaniu. Zachowywanie i utrzymywanie wieloletniej wiedzy i doświadczenia w zarządzaniu systemami komputerowymi jest wymagane, aby zapewnić niezawodną pracę systemu, wdrażanie niezbędnego oprogramowania, regularną modernizację sprzętu i likwidowanie awarii. Ważne jest, aby infrastruktura była odporna na wpływy lokalne, takie jak wahania mocy, przerwy w telekomunikacji czy wpływ niebezpiecznej pogody. Krótkoterminowe projekty budujące zdolności (capacity building), które oferują instalację systemów lokalnych i obejmują zarówno sprzęt, jak i oprogramowanie, mogą wydawać się atrakcyjne, ale bez trwałej wiedzy, jak utrzymać i zarządzać takim systemem istnieje realne niebezpieczeństwo, że szybko przestanie on działać. Najmniejszą szkodą w takiej sytuacji byłoby zmarnowanie funduszy wykorzystanych na nabycie systemu i jego instalację; poważniejszą natomiast może okazać się odwracanie uwagi personelu od pełnienia podstawowych obowiązków osłony meteorologicznej na rzecz wysiłków zmierzających do odbudowania systemu. Kiedy rozważa się dostępne opcje, długoterminowe utrzymanie i trwałość potencjalnych rozwiązań powinna być brana pod uwagę w procesie decyzyjnym.

IV. OPCJE DOSTĘPU DO NWP O WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI (ROZDZIAŁ 2.4)

Niniejsze wytyczne zostały przygotowane dla wspierania NMHS-ów w uzyskaniu dostępu do odpowiadających im i trwale osiągalnych danych i produktów NWP o wysokiej rozdzielczości, zgodnie z zasobami i możliwościami tych służb. W przeszłości wiele ośrodków stosowało modele regionalne o kroku siatki na przykład 10-20 km, jednak obecnie nie należy oczekiwać, aby mogły one dodać jakąś wartość do wysokiej jakości prognoz modeli

globalnych. Modele konwekcyjno-skalowe mogą dostarczyć bardzo cennych dodatkowych szczegółów, szczególnie w przypadku ryzyka niebezpiecznych zjawisk pogodowych, ale są kosztowne obliczeniowo i niekoniecznie zapewnią automatyczną poprawę prognozy bez zaawansowanej asymilacji danych.

Oprócz zasobów obliczeniowych, prowadzenie i utrzymywanie zaawansowanych systemów NWP wymaga również zespołu wysoko wykwalifikowanych naukowców i inżynierów oprogramowania. Mają oni wysoce poszukiwane umiejętności, które mogą być trudne do utrzymania na konkurencyjnym rynku. NMHS-y muszą zdefiniować właściwą równowagę pomiędzy zasobami ludzkimi przeznaczonymi do uzyskania możliwie najlepszych danych NWP a zasobami do prowadzenia niezbędnych usług dla użytkowników. Niniejsze wytyczne definiują szereg opcji obejmujących sześć poziomów usług NWP dla prowadzenia osłony kraju. W sieci GDPFS (system WMO wymiany i przetwarzania danych Global Data-Processing and Forecasting System: *uwaga tłumacza*) można uzyskać wysokiej jakości dane z modeli globalnych dla wsparcia całego zakresu usług nawet przy bardzo ograniczonych zasobach. Na drugim końcu tego spektrum służby o wielkich zasobach mogą eksploatować własne zaawansowane systemy NWP dla wsparcia swoich usług.

Poziom 3 – Prosta implementacja regionalnego modelu NWP (downscaling).

- Zastosowanie modelu regionalnego o kroku siatki 5 km lub mniejszym (skala konwekcyjna) może przynieść korzyści wykraczające poza wyniki globalnych produktów NWP.
- W ramach tej implementacji zarówno warunki początkowe, jak i brzegowe są pobierane bezpośrednio z modelu globalnego. Korzyści z wyższej rozdzielczości wynikają z lepszej reprezentacji lokalnej topografii (wzgórza i doliny, wysokie łańcuchy górskie, linie brzegowe, itp.) oraz procesów na powierzchni podłoża, a także jawnej reprezentacji konwekcji.
- Może zapewnić szerszy dostęp do wyników modelu o wysokiej rozdzielczości i więcej zmiennych prognostycznych niż dostępne w centrach GDPFS.
- Wymaga dostępu do obliczeń o wysokiej wydajności oraz wykwalifikowanych zasobów naukowych a także w dziedzinie inżynierii oprogramowania.

Poziom 4 – Regionalne NWP obejmujące asymilację danych.

- Dodanie asymilacji danych do modelu regionalnego, z dostępem do lokalnych obserwacji poddanych kontroli jakości, może poprawić analizę danych początkowych, a tym samym prognozę krótkoterminową, w porównaniu z podejściem opartym na downscalingu.
- Kluczowe obserwacje, które można asymilować: obserwacje przy powierzchni ziemi, dane radarowe, dane z samolotów, itd.
- Asymilacja danych jest złożonym systemem naukowym i technicznym. Wymaga znacznych dodatkowych wykwalifikowanych zasobów ludzkich do wdrożenia, utrzymywania i rozwoju. Zapewnienie lepszych prognoz poprzez wykorzystanie asymilacji danych wymaga ciągłych badań i rozwoju.

Poziom 5 – Regionalny system prognoz wiązkowych EPS.

- Celem EPS jest uchwycenie niepewności i lepsza ocena ryzyka związanego ze skutkami niebezpiecznych zjawisk pogodowych.
- Wiązkowy system asymilacji danych może zaspokoić potrzeby poziomu 4 i poziomu 5, ale wymaga znacznie więcej zasobów przetwarzania komputerowego.

Poziom 6 – Regionalne sprzężone modelowanie systemu planetarnego (Earth System Modeling) lub często wznawiany (rapidly updated) model NWP.

- Połączenie modelu NWP z innymi modelami fizycznymi, np. oceanu, hydrologicznym czy składu atmosfery, może zapewnić lepszą reprezentację oddziaływań w systemie planetarnym, prowadząc do lepszych prognoz pogody lub jej skutków.
- Częste wznawianie obliczeń NWP pozwala na lepsze wykorzystanie najnowszych obserwacji, w tym do nowcastingu i prognozowania bardzo krótkoterminowego.
- Modele NWP o kroku siatki poniżej 1 km, typowo od 100 do 300 m, mogą być wykorzystywane do symulacji wysokiej rozdzielczości szczegółów, np. środowisk miejskich. Więcej informacji można znaleźć w *Good practices on high-resolution modelling for Integrated Urban Services*.
- Poziom ten związany jest z najbardziej zaawansowanym poziomem naukowym i najnowszymi badaniami, wymaga dostępu do bardzo dużych zasobów obliczeniowych oraz eksperckich.

Dla wielu NMHS-ów, na każdym z powyższych poziomów zaawansowania, korzystne może być dołączenie do konsorcjum partnerów, aby pracować wspólnie nad rozwojem oraz wdrożeniem zdolności NWP, zamiast wykonania wszystkiego samodzielnie. Niniejszy przewodnik ma na celu pomóc członkom WMO w podjęciu decyzji, które podejście będzie najlepsze do zapewnienia trwałego wsparcia NWP dla ich usług.

V. STRATEGIA (ROZDZIAŁ 2.5)

Inwestycje w rozwój lepszego dostępu do modeli NWP o wysokiej rozdzielczości powinny mieć na celu zaprojektowanie systemów, które będą funkcjonowały przez wiele lat, a nawet dziesięcioleci, a zatem powinny uwzględniać przyszłą ewolucję systemów i możliwości, które one przyniosą, a także potrzeby bieżące. Każdy Członek WMO powinien zachowywać swoją ogólną strategię wykorzystania NWP o wysokiej rozdzielczości poprzez nadchodzącą dekadę (i później). Oczekiwania, że modele globalne (ze sprzężonymi modelami systemu planetarnego, asymilacją danych i wiązkami) będą w nadchodzących latach nadal zmierzać w kierunku uzyskania rozdzielczości konwekcyjno-skalowej, będą nadal wywierały presję wobec modeli regionalnych, aby te zapewniły końcowym użytkownikom wyniki o wartości większej niż modele globalne,

w zależności od wymaganych parametrów i potrzeb użytkowników. W związku z tym, ogólne zalecenia strategiczne dla Członków WMO, które należy wziąć pod uwagę przy generowaniu i rozpowszechnianiu produktów NWP, są następujące:

- Zastosuj lokalną strategię dla zasobów i produktów, która zapewni najbardziej wydajne, skuteczne i trwałe korzyści operacyjne użytkownikom lokalnym i społeczeństwu.
- Rozłokuj zasoby w celu jak najlepszego wykorzystania obecnie dostępnych danych/produktów z operacyjnego globalnego modelu NWP, aby zapewnić oparte na skutkach produkty dla lokalnych użytkowników i społeczeństwa.
- W przypadku zastosowania regionalnego konwekcyjno-skalowego modelu NWP rutynowo oceniaj (stosując weryfikację obiektywną i subiektywną) jego lokalne zdolności prognostyczne w porównaniu z obecnie dostępnymi danymi/produktami modelu globalnego, aby określić stosunek kosztu do korzyści dla modelu konwekcyjno-skalowego i uzyskać wskazówki dla dalszego rozwoju modelu.
- Rozpoznaj i wykorzystaj kontakty robocze w celu nawiązania współpracy z innymi partnerami, aby budować wspólne rozumienie lokalnych wymagań dla prognozowania oraz mocne/słabe strony modelu, dzielić się wysokiej jakości obserwacjami oraz poprawiać operacyjną jakość produktów prognostycznych dla obszaru(-ów) zainteresowania.

Jednym ze sposobów współpracy Członka WMO z innymi ośrodkami jest dołączenie do konsorcjum modelowania. Chociaż mogą pojawić się przeszkody w przystąpieniu do konsorcjum, jak pewne kryteria kwalifikacyjne, materialne i niematerialne koszty członkostwa, to korzyści z takiego ruchu jest wiele:

- Dostęp do całego zakresu oprogramowania i narzędzi do modelowania.
- Dostęp do danych wejściowych do modelu – LBC i warunki początkowe.
- Dostęp do i trwałość eksperckiego wsparcia modelu.
- Zaangażowanie w społeczność międzynarodową – najnowsze badania i działania operacyjne, postęp naukowy i techniczny w modelowaniu NWP, szkolenia, wymiana wiedzy i zasobów ludzkich.
- Strategiczne/skoordynowane podejście do rozwoju modeli, nakierowane na operacyjne wdrażanie narzędzi przynoszących sprawdzone korzyści.
- Możliwość wykorzystania wiedzy i narzędzi wykraczających poza jedną organizację.
- Korzyści z dużego zakresu międzynarodowej wiedzy, doświadczenia i umiejętności.
- Poprawa kosztów i wydajności w budowaniu własnych zdolności w porównaniu z pracą w pojedynkę.
- Poprawa reputacji/widoczności w kraju i na arenie międzynarodowej (co może pomóc w finansowaniu infrastruktury/badań).
- Możliwość wpływania i kierowania kierunkiem rozwoju konsorcjum i modelu z uwzględnieniem lokalnych wymagań, doświadczeń i wiedzy.

Biorąc pod uwagę powyższą dyskusję, dobrym podejściem jest rozważenie sześciu poziomów dostępu do NWP o wysokiej rozdzielczości w celu wsparcia usług opisanych powyżej, w zależności od poziomu zasobów technicznych i ludzkich, które można realistycznie zainwestować. Poziomy te wahają się od małego zespołu wykorzystującego informacje z modeli operacyjnych z centrów GDPFS aż po utrzymanie wielu zespołów wykorzystujących różne modele NWP. W dłuższej perspektywie strategia Członka WMO może ewoluować pomiędzy poszczególnymi poziomami zgodnie z dostępnymi zasobami, wiedzą i finansowaniem.

VI. WDROŻENIE OPERACYJNYCH SYSTEMÓW NWP (ROZDZIAŁ 4)

A. Wymagania operacyjne (rozdział 4.1)

Trwałe i zrównoważone wsparcie techniczne oraz utrzymanie infrastruktury NMHS ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia solidnych i odpornych operacyjnych usług NWP. Niezbędne zasoby infrastrukturalne znacząco wzrastają w miarę wzrostu poziomu usług. Usługi wsparcia i utrzymania powinny obejmować:

- Infrastrukturę IT i łączność sieciową, która umożliwi pracownikom dostęp do NWP, danych przetworzonych (w wyniku post-processingu) i weryfikacyjnych w celu świadczenia usług.
- Systemy, które można wdrażać i modernizować – zarówno pod względem naukowym, jak i technicznym.
- Zdolność finansowania i realizacji zakupów w celu umożliwienia cyklu wymiany infrastruktury informatycznej dla wspierania długoterminowej stabilności i modernizacji usług operacyjnych (lepszą terminowość przebiegów modeli, zwiększona rozdzielczość czasoprzestrzenna i złożoność modelu).
- Sprzęt do przechowywania danych i narzędzia do przetwarzania danych z możliwością rozbudowy zgodnie z wymaganiami (w celu wykorzystania nowych form danych, dostosowania się do zmian w formatach danych, itp.).
- Ciągłe monitorowanie i utrzymywanie infrastruktury IT (dostępna przestrzeń dyskowa, przepustowość sieci, aktualizacje systemu operacyjnego, zasoby obliczeniowe i kopie zapasowe danych).
- Przyciąganie i utrzymywanie odpowiedniej wiedzy specjalistycznej oraz zapewnianie odpowiednich szkoleń.
- Formalnie uzgodnione procedury, które zapewniają monitorowanie i naprawę awarii usług operacyjnych w systemie 24/7, a także zaangażowanie odpowiednich ekspertów ds. modelowania i organizacji systemu pracy, w przypadku gdy wsparcie 24/7 nie jest w stanie rozwiązać problemu.
- Systemy zapasowe powinny również zapewniać odporność w przypadku awarii komponentów IT.

B. Role personelu (rozdział 4.2)

Zasoby ludzkie mają kluczowe znaczenie dla sprawnego działania i trwałości utrzymania operacyjnych systemów NWP. Wymagania wyższych kwalifikacji i większej ilości wysoko wykwalifikowanych osób wzrastają znacząco, kiedy organizacja idzie w górę na 6-poziomowej skali dostępu (do danych NWP). Zdolność do utrzymania, rekrutacji i zachowania odpowiedniego personelu jest jednym z najistotniejszych czynników w podejmowaniu przez NMHS decyzji o odpowiednim stopniu dostępu do NWP. Eksploatacja systemu NWP oraz niezbędnego systemu komputerowego wymaga szeregu kompetencji:

- Administrator IT (IT Admin) – odpowiedzialny za utrzymanie podstawowej infrastruktury IT w ramach NMHS.
- Administrator obliczeń o wysokiej wydajności (High-Performance Computing – HPC) (HPC Admin) – kompetencje w administrowaniu systemami HPC/superkomputerowymi.
- Naukowy inżynier oprogramowania (Scientific Software Engineer) – integrator oprogramowania, programista kodu, projektant systemu organizacji pracy, instalacja/aktualizacja modelu, formaty danych.
- Naukowy użytkownik modelu (Model Scientist) – użytkownik modelu z kompetencjami w konstruowaniu i konfiguracji modeli (które mogą obejmować komponenty asymilacji danych, EPS-ów i środowiska planetarnego (Earth System)).
- Ekspert ds. Weryfikacji (Verification Expert) – tworzenie oprogramowania i interpretacja.
- Twórca produktów (Product Developer) – tworzenie oprogramowania/stron internetowych, rozumienie wymagań klienta.
- Meteorolog operacyjny (Forecaster) – kompetencje w interpretacji, analizie i syntezy informacji prognostycznych.

Systemy utrzymywane i zarządzane przez osoby pełniące wszystkie powyższe role są złożone, więc zachowanie doświadczonego personelu przez wiele lat jest niezbędne do utrzymania zdolności operacyjnych. Dodatkowo, wewnętrzne szkolenia, coaching i mentoring, a także grupowe aktywności szkoleniowe, jak omawianie szczególnych przypadków, są ważne dla wypracowywania niezbędnych zdolności przez członków zespołów operacyjnych. Jest to szczególnie prawdziwe dla nowych pracowników. Pełne wykorzystanie istniejących zasobów szkoleniowych jest ważne, ale nie jest wystarczające do wypracowania i utrzymania niezbędnych kompetencji. Lokalne wspólnoty szkoleniowe mogą pomóc w optymalnej interpretacji produktów NWP dla danego regionu.

VII. KONWEKCYJNO-SKALOWE REGIONALNE NWP (POZIOMY USŁUG 3-6) (ROZDZIAŁY 4.4.1, 4.4.2)

Tam, gdzie NMHS-y dysponują dobrze wspieranymi usługami oraz dostępne są dodatkowe zasoby, można zapewnić lepszy poziom NWP poprzez wprowadzenie konwekcyjno-skalowego NWP na poziomach usług od 3 do 6.

Konwekcyjno-skalowe regionalne modele NWP o rozdzielczości poziomej kilku kilometrów (1-4 km) zapewniają prognozy elementów meteorologicznych, które mają na celu lepszą reprezentację mezoskalowych procesów pogodowych, poprawę przewidywania w skali lokalnej i dostarczenie danych prognostycznych lub produktów informacyjnych o zwiększonych rozdzielczościach przestrzennych i czasowych. Model konwekcyjno-skalowy poprawia reprezentatywność procesów konwekcyjno-skalowych, które są parametryzowane w obecnych globalnych systemach NWP. Wyniki globalnych prognoz NWP są zazwyczaj rozpowszechniane z krokiem co 6 lub 12 godzin, co jest niewystarczające do oceny zmiennych sytuacji pogodowych powodowanych przez niebezpieczne procesy konwekcyjne. Zatem dostępność regionalnych konwekcyjno-skalowych systemów NWP z zaawansowaną asymilacją danych i częstszym cyklem aktualizacji (prognozy uruchamiane co 3 lub 1 godzinę) może zapewnić prognozy numeryczne o lepszej jakości dla wsparcia analizy, prognozy i ostrzegania o niebezpiecznych warunkach pogodowych.

Regionalne konwekcyjno-skalowe EPS mogą dodatkowo zapewnić produkty dla probabilistycznych prognoz niebezpiecznej pogody i ich niepewności wraz z udoskonaloną reprezentacją procesów stochastycznych związanych z mezoskalowymi procesami pogodowymi, jeśli dostępne są wystarczające wysoko wydajne zdolności obliczeniowe i infrastruktura informatyczna.

NMHS musi zidentyfikować cele operacyjne dla konwekcyjno-skalowego regionalnego systemu NWP – pod względem zasięgu domeny modelu, zakresu czasowego prognoz i częstotliwości uruchamiania modelu – aby określić wymagania dotyczące sprzętu komputerowego, oprogramowania i potrzebnej infrastruktury IT oraz ich utrzymania. Podczas procesu zakupowego można wykorzystać test wydajności, który dokładnie odzwierciedla właściwości proponowanego modelu(-ów), aby oszacować praktyczną wydajność oprogramowania modelu na proponowanym sprzęcie. Do eksploatacji globalnego lub regionalnego NWP o wysokiej rozdzielczości, z obliczeniami wykonywanymi na czas, wykorzystuje się zwykle superkomputer. Jednak mały klastr serwerów i system pamięci masowej mogą stanowić użyteczną platformę do wdrażania i przeprowadzania wstępnych prób lub eksperymentów numerycznych dla konwekcyjno-skalowego regionalnego systemu NWP jako dowód koncepcji oraz do archiwizacji zbiorów danych prognostycznych do oceny, dostrajania reprezentacji procesów fizycznych modelu oraz badania czułości i przewidywalności modelu dla różnych scenariuszy meteorologicznych.

Infrastruktura chmur obliczeniowych (czyli obliczeń poza siedzibą) może być potencjalnym rozwiązaniem alternatywnym. Chmury obliczeniowe mogą pomóc w zmniejszeniu inwestycji w zasoby ludzkie wymagane do nabycia, utrzymania i dalszego ulepszania własnego systemu komputerowego; jednakże wykwalifikowane zasoby techniczne będą nadal wymagane do zainstalowania i utrzymania złożonych systemów oprogramowania modelu na tej zdalnej infrastrukturze. Eksploatacja modelu w ten sposób może być także okazją do prowadzenia obliczeń w pobliżu użytecznych źródeł danych, unikając w ten sposób konieczności przesyłania dużych objętości danych pomiędzy fizycznie odległymi systemami.

VIII. NWP WYSOKIEJ ROZDZIELCZOŚCI: POZIOMY 3 DO 6 (ROZDZIAŁ 4.4.10)

POZIOM 3 – PROSTA IMPLEMENTACJA MODELU REGIONALNEGO (DOWNSCALING)

Podstawowe wymagania dotyczące prostego wykorzystania modelu regionalnego obejmują:

- Dostęp do nowoczesnego (state-of-the-art) modelu NWP oraz personel o odpowiednim zestawie umiejętności potrzebnych do wdrożenia wymaganego oprogramowania w efektywny sposób.
- Obliczenia: dostęp do superkomputera/klastra HPC o wydajności obliczeniowej oraz zasobach przechowywania danych umożliwiających produkcję prognoz w ramach czasowych wymaganych do prowadzenia osłony operacyjnej, a także umożliwiających testowanie oraz prace badawcze; wymaga typowo co najmniej setek lub tysięcy jednostek obliczeniowych (typu CPU lub GPU – *uwaga redaktora*); wsparcie w dziedzinie sprzętu oraz kompetencje dla implementacji i utrzymania.
- Dane: odbiór codziennych danych o objętości rzędu kilku gigabajtów, pochodzących z modelu zasilającego, poprzez sieć zdolną do transmisji warunków początkowych i brzegowych w ramach czasowych wymaganych dla osłony operacyjnej.
- Przetwarzanie końcowe (postprocessing) odpowiednie dla stosowanych aplikacji.
- Produkty: parametry prognozy modelu dostosowane do potrzeb klienta/interesariusza.
- Weryfikacja modelu regionalnego w celu zmierzenia korzyści w porównaniu z modelem globalnym (metody weryfikacji odpowiednie dla prognoz konwekcyjno-skalowych; gromadzenie i przechowywanie obserwacji o wysokiej rozdzielczości).
- Zasoby ludzkie:
 - Role: administrator IT, administrator HPC, naukowy inżynier oprogramowania (scientific software engineer SE), naukowy użytkownik modelu (model scientist), ekspert weryfikacji, wytwórca produktów, meteorolog; wymagany personel to 3-5 EPC na NWP, 1-2 EPC na SE, 2-3 EPC na IT (EPC to ekwiwalent pełnego czasu pracy, odpowiednik FTE – *uwaga tłumacza*).

POZIOM 4 – REGIONALNY NWP, W TYM ASYMILACJA DANYCH

W stosunku do wymagań poziomu 3, poziom 4 wymaga dodatkowo prowadzenia konwekcyjno-skalowej asymilacji danych i reprezentuje znaczący wzrost w naukowo/technicznej złożoności systemu z punktu widzenia jego implementacji, wsparcia, utrzymania, testowania i oceny:

- Dostęp do oprogramowania asymilacyjnego oraz personel o odpowiednim zestawie umiejętności potrzebnych do wdrożenia wymaganego oprogramowania w efektywny sposób.
- Obliczenia: budując na poziomie 3, koszty obliczeniowe wzrastają zgodnie z częstszymi (cyklicznymi) codziennymi prognozami modelu oraz z zastosowanymi metodami wariacyjnymi (na przykład koszt metod 4D-Var jest wiele razy większy niż koszt 3D-Var).

- Dane: objętości danych z modelu wzrastają z częstszymi cyklami prognoz, a asymilacja wymaga danych obserwacyjnych. Zdolność pozyskiwania lokalnych/regionalnych obserwacji o wysokiej jakości z WMO Information System (WIS) lub innych źródeł, z obserwacjami kierowanymi do systemu modelowania i rutynowo monitorowanymi pod kątem jakości i dostępności.
- Produkty: narzędzia monitorujące obserwacje i statystyki asymilacji danych dla własnego monitoringu operacyjnego.
- Zasoby ludzkie:
 - Role: administrator IT, administrator HPC, naukowy inżynier oprogramowania, naukowiec ds. asymilacji danych, naukowy użytkownik modelu, ekspert weryfikacji, wytwórca produktów, meteorolog; zwiększony personel do 5-7 EPC na NWP, 2-3 EPC na SE i 2-3 EPC na IT.

Ważne jest podkreślenie wymagań i wyzwań związanych z systemem asymilacji danych:

- Dostępność obserwacji i ich gromadzenie.
- Monitorowanie względnych korzyści z asymilacji różnych typów obserwacji (obszary o małej ilości danych, dane teledetekcyjne).
- Wstępne przetwarzanie obserwacji (pre-processing): kontrola jakości, korekta średnich błędów statystycznych, operatory obserwacji).
- Metoda/algorytm asymilacji danych (w tym oprogramowanie i jego konfiguracja), kompetencje w dziedzinie metod asymilacji danych, zaplecze matematyczne.
- Cykliczna organizacja systemu pracy.
- Terminowość obserwacji i dostępność prognoz.
- Monitorowanie efektów asymilacji danych.
- Ocena wpływu obserwacji.
- Czasochłonny i rygorystyczny proces potrzebny do operacyjnego wdrożenia nowego rodzaju obserwacji.

POZIOM 5 – REGIONALNY SYSTEM PROGNOZ WIĄZKOWYCH

Wiązka regionalna może być zagnieżdżona bezpośrednio wewnątrz wiązki globalnej lub różniące się warunki brzegowe mogą zostać zapewnione poprzez kolejne przebiegi modelu globalnego (podejście opóźnione). Regionalna wiązka oparta na downscalingu może być eksploatowana niezależnie od regionalnej asymilacji danych opisanych w poziomie 4. Złożoność techniczna będzie zależeć od wykorzystanej metody produkcji wiązki/perturbacji.

- Dodatkowa funkcjonalność uzyskiwania warunków brzegowych z wiązki o mniejszej rozdzielczości.
- Wzrost złożoności technicznej/naukowej dla wdrożenia, wsparcia, utrzymania, testowania oraz oceny.
- Wiązkowy system asymilacji danych, który wspiera potrzeby poziomu 4, może także wspierać poziom 5, ale wymaga znacznie większych zasobów obliczeniowych.

- Obliczenia: budując na poziomie 3 i/lub poziomie 4, koszty obliczeniowe zwiększają się z ilością realizacji w wiązce prognoz.
- Dane: budując na poziomie 3, znacznie zwiększona ilość dziennych danych wejściowych do modelu oraz danych wyjściowych (objętość rośnie z liczbą elementów wiązki).
- Produkty: wymaga opracowania produktów dostosowanych do potrzeb, bazujących na wiązkach, dostarczających informacji probabilistycznych reprezentujących niepewność prognozy (np. prawdopodobieństwa w odniesieniu do klimatologii, takie jak Extreme Forecast Index ECMWF, prognozy anomalii).
- Postprocessing: kalibracja prognoz probabilistycznych w celu poprawy wiarygodności wiązki, czyli dopasowanie pomiędzy prognozowanymi prawdopodobieństwami a rzeczywistością obserwowanymi częstościami wystąpienia zdarzeń (może to wymagać dostępności danych historycznych).
- Weryfikacja prognoz wiązkowych jest intensywna obliczeniowo w porównaniu do weryfikacji deterministycznej, różne wskaźniki.
- Wymaga kompetencji/edukacji w zakresie interpretacji i weryfikacji prognoz wiązkowych.
- Zasoby ludzkie:
 - Role: administrator IT, administrator HPC, naukowy inżynier oprogramowania, naukowiec ds. asymilacji danych, naukowy użytkownik modelu, ekspert weryfikacji, wytwórca produktów, meteorolog; zwiększony personel do 7-9 EPC na NWP, 2-3 EPC na SE i 2-3 EPC na IT.

POZIOM 6 – REGIONALNE SPRZEŻONE MODELOWANIE SYSTEMU PLANETARNEGO (EARTH SYSTEM) LUB CZĘSTO AKTUALIZOWANE PROGNOZY WIĄZKOWE

- Celem jest sprzęgnięcie fizycznych interakcji atmosfery, oceanu, powierzchni lądu, składników atmosfery itd.
- Reprezentuje najbardziej zaawansowany stan nauki o modelowaniu związany z najnowszymi badaniami w tej dziedzinie, wymagający dostępu do bardzo dużych zasobów obliczeniowych i eksperckich.
- W porównaniu z innymi poziomami stanowi to znaczny wzrost złożoności technicznej i naukowej na każdym kroku, od wdrażania i utrzymywania po testowanie i ocenę.
- Obliczenia wymagają typowo co najmniej dziesiątek tysięcy CPU z wieloma komponentami modelu działającymi wspólnie.
- Zwiększona ilość danych – dane wejściowe do modelu, obserwacje atmosfery w wysokiej rozdzielczości czasoprzestrzennej, obserwacje oceaniczne.
- Wymaga przygotowania lokalnych i regionalnych zestawów danych w wysokiej rozdzielczości o użytkowaniu gruntów, urbanizacji, batymetrii, hydrologii, itp.
- Wymaga ustrukturyzowanej strategii rozwoju i poszukiwania rozwiązań, aby zrozumieć interakcje i zachowania w systemie planetarnym oraz wypracować kwalifikacje perso-

nelu w obszarach, które w momencie pisania mogą nadal znajdować się w fazie badań i rozwoju w dużych NMHS, w przeciwieństwie do działań operacyjnych.

- Zasoby ludzkie:
 - Role: administrator IT, administrator HPC, naukowy inżynier oprogramowania, naukowiec ds. asymilacji danych dla każdego modelu, naukowy użytkownik modelu dla każdego modelu, ekspert weryfikacji, wytwórca produktów, meteorolog;.
 - EPC będą wzrastać proporcjonalnie do liczby i złożoności komponentów modelowania systemu planetarnego, zarówno dla rozwoju/utrzymania, jak i wsparcia IT.

TERMINOLOGIA/SKRÓTY

Model NWP o skali konwekcyjnej

Model NWP z węzłami siatki w odległości poziomej co 5 km lub mniej (zwykle 1-4 km), umożliwiającą reprezentowanie cyrkulacji konwekcyjnych w skali siatki w sposób jawny. Parametryzacja głębokiej konwekcji jest zwykle wyłączona. Modele takie nazywane są czasami także modelami zezwalającymi na konwekcję. (Procesy fizyczne zachodzące w skali większej od odległości między węzłami modelu mogą być rozwiązane w sposób jawny, natomiast w mniejszej skali są parametryzowane, czyli opisane w sposób uproszczony. Ze względu na to, że procesy konwekcyjne i wiele innych procesów atmosferycznych zachodzi w małych skalach, zwiększanie rozdzielczości modelu, czyli zmniejszenie odległości między węzłami siatki modelu pozwala uzyskać dokładniejszą prognozę. – *uwaga tłumacza*).

Dane podstawowe (ang. *Core Data*)

Zgodnie z polityką danych WMO, stanowią one minimalny zestaw danych, które ośrodki GDPFS muszą udostępnić za darmo i na warunkach nieograniczonego wykorzystania.

DA – asymilacja danych (ang. *Data Assimilation*)

Proces łączenia poprzedniej prognozy z najnowszymi obserwacjami w celu dostarczenia pól analizy, które są używane do inicjowania nowej prognozy NWP. Także proces włączania bieżących obserwacji do początkowych kroków prognozy (na które obserwacje nadal mają wpływ – *uwaga redaktora*) modelu NWP w celu poprawy jakości prognozy.

Downscaling

Szereg technik obliczeniowych, których celem jest przejście z większej skali (mniejszej rozdzielczości siatki obliczeniowej) do mniejszej (większej rozdzielczości siatki obliczeniowej). Przykładem jest tu downscaling dynamiczny, w którym regionalny model NWP jest wymuszany warunkami początkowymi i bocznymi warunkami brzegowymi z modelu globalnego celem uzyskania prognoz dla mniejszego obszaru (*uwaga tłumacza*).

ECMWF (ang. *European Centre for Medium Range Weather Forecasts*)

Wyspecjalizowane centrum średnio- i długo-terminowych prognoz NWP, także desygnowane centrum GDPFS o różnych funkcjach.

EPS – wiązkowy system prognoz (skr. wiązka prognoz, ang. *Ensemble Prediction System*)

System NWP, w którym model jest uruchamiany wielokrotnie z niewielkimi różnicami w stanie początkowym w celu reprezentacji niepewności w prognozie pogody; EPS jest często używany do szacowania prawdopodobieństwa wystąpienia różnych stanów pogody.

EPC – ekwiwalent pełnego czasu pracy (ang. *Full Time Equivalent*)

Miara liczby pracowników pełnoetatowych niezbędnych do wykonania zadania.

GDPFS – globalny system przetwarzania danych i prognozowania (ang. *Global Data-Processing and Forecasting System*)

Sieć wyznaczonych ośrodków, które oferują dane i usługi wspierające Członków WMO.

Model globalny lub wiązka modeli globalnych (ang. *global model or ensemble of global models*)

Modele NWP lub wiązka modeli NWP, które działają i dostarczają prognozy na obszarze całej Ziemi.

Rozdzielczość modelu

Funkcja poziomej odległości między sąsiednimi punktami węzłowymi siatki modelu NWP (lub wiązki), przedstawiająca najmniejszą skalę przestrzenną procesów dobrze reprezentowanych przez prognozę modelu i równa (zależnie od procesu) kilku takim odległościom (w częstych interpretacjach tego terminu – wprost ta odległość – *uwaga tłumacza*).

Siatka modelu (siatka gridowa, siatka węzłowa, ang. *model grid*)

Zbiór punktów węzłowych modelu, w których obliczane są wartości zmiennych pól meteorologicznych.

HPC – systemy obliczeniowe o bardzo dużej mocy obliczeniowej (ang. *High-Performance Computing*)

Zaawansowane systemy NWP, aby zapewnić wysoką wydajność, zwykle wymagają dużego superkomputera z wieloma procesorami pracującymi równolegle; w szczególności superkomputer zapewnia bardzo szybkie połączenia między procesorami. Często możliwe jest również uruchomienie małego regionalnego systemu NWP na klastrze serwerów o wysokiej wydajności.

IC – warunki początkowe (ang. *initial conditions, IC*)

Stan modelu utworzony przez asymilację danych w celu zainicjowania prognozy (reprezentacja stanu atmosfery w postaci szczegółowych pól meteorologicznych na wielu poziomach; dane mogą pochodzić wprost z analizy modelu globalnego (lub wiązki) lub być utworzone poprzez asymilację dodatkowych danych – *uwaga tłumacza*).

LBC – boczne warunki brzegowe (ang. *Lateral Boundary Conditions*)

Szczegółowe pola meteorologiczne na wielu poziomach, dostarczane z globalnego modelu (lub wiązki) (na bocznych granicach domeny obliczeniowej – *uwaga tłumacza*), aby napędzić model regionalny (lub wiązkę) napływem do domeny systemów pogodowych, które przemieszczają się do niej z zewnątrz.

Metody sąsiedztwa (ang. *neighbourhood methods*)

Szereg technik rozwiązywania problemu niepewności przestrzennej w przetwarzaniu końcowym i weryfikacji danych modelu w skali konwekcyjnej. Rozważając wystąpienie zjawiska takiego jak ulewny deszcz w określonym węźle siatki, przyjmuje się, że może ono wystąpić z równym prawdopodobieństwem w wielu sąsiednich punktach siatki. W efekcie sąsiednie punkty siatki są interpretowane jako elementy wiązki. Dzięki takiemu podejściu model deterministyczny może być interpretowany jako prognoza probabilistyczna; w przypadku zastosowania danych z wiązki można zastosować mniejsze sąsiedztwo.

NMHS (ang. *National Meteorological and Hydrological Service*)

Narodowa służba meteorologiczna i hydrologiczna.

NWP – numeryczny model prognoz pogody (ang. *Numerical Weather Prediction*)

Może być wykorzystywane w modzie globalnym lub lokalnym/regionalnym.

Model regionalny (lub wiązka) (ang. *regional model* lub *Limited Area Model, LAM*)

Model NWP (lub wiązka prognoz), który działa i dostarcza prognozy dla lokalnego obszaru. Taki system wymaga dostępu w czasie rzeczywistym do szczegółowych danych o warunkach brzegowych pochodzących z modelu globalnego (lub wiązki modeli), zapewniających informacje o napływie systemów pogodowych z obszaru zewnętrznego.

Postprocessing

Przetwarzanie wyników modeli NWP w celu uzyskania dodatkowych produktów czy wizualizacji prognoz.

RSMC (ang. *Regional Specialized Meteorological Centre*)

Regionalne specjalistyczne centrum meteorologiczne w sieci GDFPS.

WIS (ang. *The WMO Information System*)

System telekomunikacyjny, poprzez który WMO wymienia dane pomiędzy członkami.

WMC (ang. *World Meteorological Centre*)

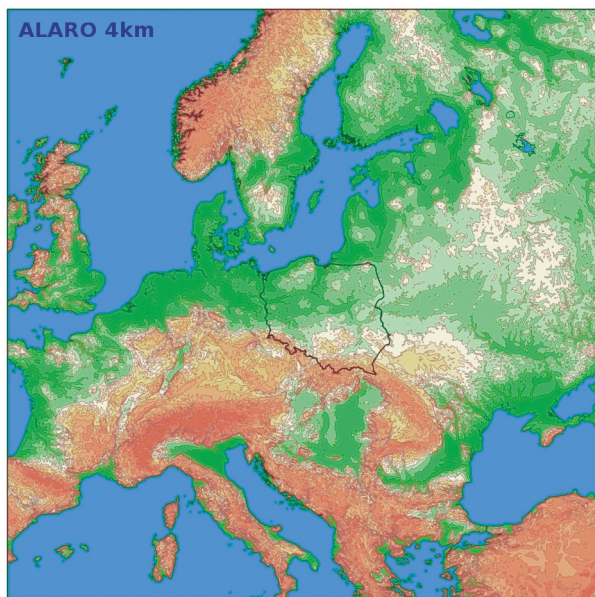
Światowe centrum meteorologiczne, działające w sieci GDFPS.

ANEKS 1. KONSORCJUM MODELOWANIA ACCORD

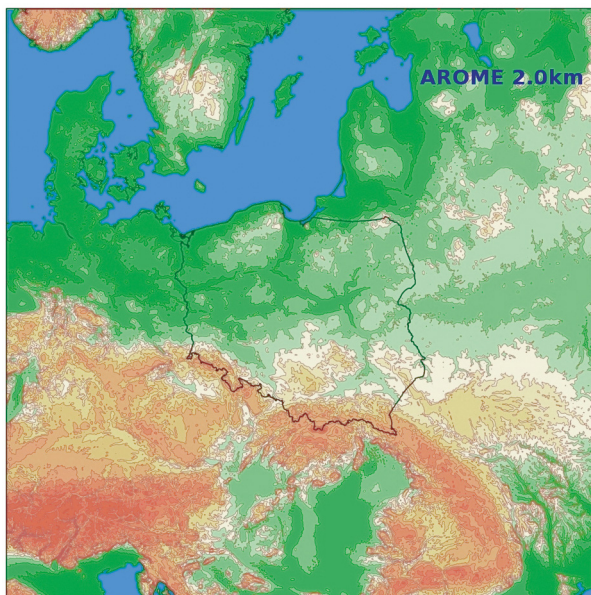
Bogdan Bochenek, Marcin Kolonko

Konsorcjum ACCORD (a ściślej jego poprzednik, konsorcjum ALADIN) powstało historycznie po upadku Muru Berlińskiego i przemianach ustrojowych w krajach dawnego bloku wschodniego. W tym czasie służba meteorologiczna Francji (Meteo France) zaproponowała służbom meteorologicznym krajów Europy Środkowej współpracę w zakresie rozwijania i eksploataowania wspólnego modelu numerycznej prognozy pogody, ALADIN.

W 1998 roku model ALADIN Polska został uruchomiony operacyjnie i po dzień dzisiejszy funkcjonuje jako model numerycznej prognozy pogody. Operacyjnie wykorzystywane są dwie domeny o różnej rozdzielczości: mezoskalowej oraz konwekcyjno-skalowej (wysokiej rozdzielczości). Domena modelu mezoskalowego ALARO CY43T2 o rozmiarach $3158 \text{ km} \times 3158 \text{ km}$ obejmuje większość Europy Środkowej i Zachodniej. Siatka numeryczna złożona jest z $789 \times 789 = 622\,521$ węzłów obliczeniowych o horyzontalnej rozdzielczości 4 km. W pionie znajduje się 70 warstw obliczeniowych rozmieszczonych od powierzchni do około 60 km nad ziemią. Łączna liczba punktów siatki wynosi 31 126 050. Krok czasowy całkowania to 150 sekund. Częstość sprzęgania z warunkami brzegowymi z modelu ARPEGE (o rozdzielczości 9,4 km) to 3 godziny, strefa sprzęgania – 16 punktów, horyzont (maksymalne wyprzedzenie) 72 godziny, uruchamianie 4 razy dziennie (co 6 godzin).



Domenę modelu wysokiej rozdzielczości AROME stanowi siatka o rozmiarze $1630 \text{ km} \times 1630 \text{ km}$ złożona 799×799 węzłów obliczeniowych o horyzontalnej rozdzielczości 2 km. W pionie znajduje się 70 poziomów obliczeniowych. Krok czasowy całkowania wynosi 50 sekund.



Częstość z jaką otrzymywane są pliki wynikowe (w formacie GRIB) wynosi 1 godzinę, z wyjątkiem zastosowania do prognoz modelu nowcastingowego INCA (tam co 10 minut). Maksymalne wyprzedzenie to 30 godzin. Warunki początkowe i brzegowe są otrzymywane z wcześniejszego przebiegu modelu ALARO, a sprzężanie następuje co 3 godziny. Przebieg modelu jest liczony 4 razy dziennie (o 00, 06, 12 i 18 godzinie czasu UTC).

Obydwa te modele są uruchamiane na superkomputerze euros, zlokalizowanym w Warszawie. Jego parametry to 97 węzłów po 16 rdzeni, co daje maksymalnie 1552 procesory intel Xeon (pracujące w systemie operacyjnym Scientific Linux 6), stanowiące klaster BN460c_GEN8 z magistralą Infiniband. Każdy rdzeń wyposażony jest w pamięć RAM 128 GB, a pojemność dysku wynosi 64 TB. Klaster euros jest użytkowany od kwietnia 2014 roku.

Model ALARO początkowo był eksploatowany w wersji hydrostatycznej, potem zmienionej (dla ALARO-v1B NH) na niehydrostatyczną. Model AROME był wspólnym dziełem konsorcjów ALADIN i HIRLAM: fizyka opisująca procesy zachodzące w atmosferze została zaadaptowana z modelu MESO-NH (niehydrostatycznego, rozwijanego w HIRLAMie), a dynamika – z modelu ALADIN. Aktualnie obydwie modele – ALARO i AROME – są eksploatowane w wersji niehydrostatycznej. ALARO jest modelem mezoskalowym (średniej rozdzielczości) natomiast AROME – konwekcyjno-skalowym (nazywany jest też modelem wysokiej rozdzielczości).

Warunki brzegowe do modelu mezoskalowego ALARO otrzymywane są z (liczonego w Meteo France) modelu globalnego ARPEGE. Z kolei z modelu ALARO otrzymuje się warunki początkowe i brzegowe dla modelu AROME. Te trzy modele (ARPEGE, ALARO i AROME) stanowią kaskadę modeli rodziny ALADIN.

persję zanieczyszczeń w dolinie Wisły na poziomie Krakowa, modelowanie wpływu wiatru halnego na jakość powietrza w Krakowie, automatyczne rozpoznawanie i modelowanie frontów atmosferycznych, analizę zjawisk ekstremalnych na terenie Polski na przykładzie derecho z 2017 roku, metody sztucznej inteligencji wspomagające modelowanie numeryczne, doskonalenie prognozowania pod kątem odnawialnych źródeł energii. Pracownicy biorą także udział w międzynarodowych konferencjach (np. EMS Meeting, ALARO Working Days, EWGLAM, LACE steering committee, spotkania LTM - kierowników grup w ACCORD) czy pracach organizacyjnych w IMGW-PIB (takich, jak utrzymywanie systemu zarządzania jakością ISO).

Fuzja konsorcjów ALADIN i HIRLAM nastąpiła w grudniu 2020 roku. Adresy stron www konsorcjum ACCORD zostały zunifikowane i rozbudowane o nowe treści. Znajdują się one pod linkiem: <http://www.umr-cnrm.fr/accord/> . Wcześniejsza strona ALADIN jest pod adresem: <http://www.umr-cnrm.fr/aladin/>.

Co kilkanaście miesięcy publikowana jest kolejna wersja modelu do zainstalowania przez służby członkowskie Konsorcjum. Nosi ona nazwę wersji kanonicznej (CMC, ang. *canonical model configuration*). Aktualnie jest nią wersja CY46, trwają prace nad CY49 (CY pochodzi od wersji modelu, zwanej cyklem z racji konieczności uzgodnienia jej z eksploatowanym w ECMWF modelem IFS poprzez fazaż, ang. *phasing*).

LITERATURA

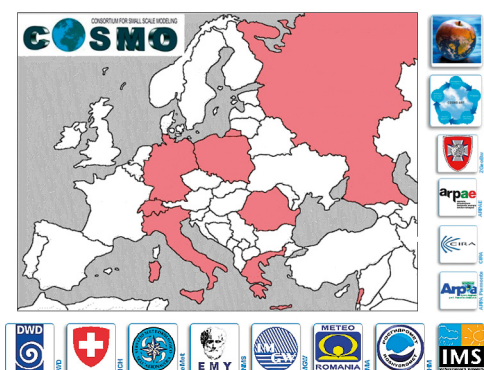
1. Termonia P., Fischer C., Bazile E., Bouyssel F., Brožková R., Bénard P., Bochenek B., Degrauwe D., Derková M., El Khatib R., Hamdi R., Mašek J., Pottier P., Pristov N., Seity Y., Smolíková P., Španiel O., Tudor M., Wang Y., Wittmann C., Joly A., 2018, The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, *Geoscientific Model Development*, 11, 257–281, DOI: 10.5194/gmd-11-257-2018.
2. Wang Y., Belluš M., Ehrlich A., Mile M., Pristov N., Smolíková P., Španiel O., Trojáková A., Brožková R., Cedilnik J., Klarić D., Kovačić T., Mašek J., Meier F., Szintai B., Tascu S., Vivoda J., Wastl C., Wittmann C., 2018, 27 Years of regional co-operation for limited area modelling in Central Europe, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99, 1415-1432, DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0321.1.

ANEKS 2. KONSORCJUM MODELOWANIA COSMO¹

Andrzej Wyszogrodzki, Grzegorz Duniec

Historia i cele konsorcjum COSMO

Konsorcjum COSMO (Consortium for Small Scale Modelling) powstało w 1998 roku (oficjalna strona www.cosmo-model.org), a w jego skład wchodzi Partnerzy reprezentujący narodowe służby hydro-meteorologiczne Niemiec (DWD), Szwajcarii (MeteoSwiss), Włoch (ITAFMet), Grecji (HNMS), Polski (IMGW-PIB), Rumunii (NMA), Rosji (RusHydromet) oraz Izraela (IMS), a także regionalne i wojskowe służby meteorologiczne z Niemiec (ZGeoBW) i Włoch (CIRA, ARPAE, ARPA Piemonte, CMCC, CMA) oraz społeczności akademickie zajmujące się rozwojem regionalnych modeli klimatu (Climate Limited-Area Modeling, CLM) i modeli transportu zanieczyszczeń/aerozoli i przemian gazowych (Aerosols and Reactive Trace gases, ART).



Mapa krajów i organizacji zrzeszonych w konsorcjum COSMO.

Licencje na wykorzystanie modeli COSMO oraz ICON do działań operacyjnych i badawczych udzielane są również innym krajom spoza konsorcjum. W latach 2022-2023 z płatnych licencji korzystały: Zjednoczone Emiraty Arabskie (NCMS), Brazylia (INMET), Oman (DGMAN), Botswana (BMS), Marynarka Wojenna Brazylii (DHN) oraz Turkmenistanu (Gidromet). Darmowe licencje (zależne od poziomu PBK kraju) były udzielone dla: Egiptu, Indonezji, Kenii, Madagaskaru, Malawi, Mozambiku, Nigerii, Pakistanu, Filipin, Tanzanii, Ukrainy, Zimbabwe, Armenii, Azerbejdżanu i Republiki Południowej Afryki.

Głównym celem działania konsorcjum jest opracowanie i rozwój niehydrostatycznych modeli NWP w wysokiej rozdzielczości o zasięgu regionalnym (ang. Limited-Area Model, LAM). Modele COSMO (Baldauf i in. 2011) oraz system prognostyczny nowej generacji ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic, Zängl et al. 2015) są wykorzystywane do zastoso-

¹ RusHydromet został w roku 2022 zawieszony w działaniach konsorcjum COSMO w odpowiedzi na wprowadzone sankcje wobec Rosji ze względu na agresję i działania wojenne wobec Ukrainy.

wań operacyjnych i badawczych przez Partnerów konsorcjum. Model ICON działa zarówno w trybie regionalnym jak i globalnym, także w zastosowaniu do modelowania klimatu. Ostateczna wersja modelu COSMO v6.0 została wydana w grudniu 2021 roku, a konsorcjum rozwija obecnie regionalną wersję modelu ICON-LAM.

W COSMO nie ma bezpośredniego finansowania ze strony Partnerów konsorcjum. Środki finansowe na działalność pozyskiwane są głównie ze sprzedaży licencji, w ramach których modele są wykorzystywane przez inne krajowe służby hydro-meteorologiczne, uniwersytety i instytuty badawcze. Środki te przeznaczane są na współpracę naukową, publikację wyników oraz refundację uczestnictwa w konferencjach naukowych i inne kluczowe działalności.

Partnerzy konsorcjum mają jednakże obowiązek aktywnie przyczynić się do prowadzenia prac rozwojowych i badawczych poprzez zapewnianie własnych zasobów kadrowych w wymiarze odpowiadającym dwóm pełnym etatom. Prace badawcze prowadzone są w ramach grup roboczych (Working Groups, WG), projektów (Priority Projects, PP) i zadań (Priority Tasks, PT) priorytetowych oraz we współpracy z krajowymi jednostkami akademickimi i innymi instytutami badawczymi.

Osiągnięcia konsorcjum w IMGW-PIB

Dzięki współpracy międzynarodowej oraz projektom finansowanych z funduszy zewnętrznych i pracom statutowym, zespół COSMO/IMGW-PIB opracował i wdrożył do działalności operacyjnej szereg innowacyjnych metodologii i algorytmów dla deterministycznych i wiązkowych modeli konwekcyjno-skalowych o wysokiej rozdzielczości. Do największych osiągnięć zespołów IMGW-PIB zaliczyć można opracowanie i wdrożenie:

- Systemu asymilacji danych pomiarowych, wykorzystującego dane pomiarowe udostępniane w ramach sieci WMO/GTS; rok 2011.
- Systemu prognoz wiązkowych, wykorzystującego perturbacje parametrów glebowych oraz różne zestawy warunków brzegowych i początkowych: COSMO-TLE (Time-Lagged Ensemble, Duniec i in. 2017); rok 2015.
- Systemu prognoz ultra-krótkoterminowych, wykorzystującego proces asymilacji danych telemetrycznych i pomiarów radarowych: COSMO-RUC (Rapid Update Cycle); rok 2017.
- Nowego rdzenia dynamicznego w modelu COSMO, służącego do całkowania ściśliwych równań ruchu w czasie, opartego na dynamice modelu EULAG. Rdzeń ten wykazuje się dużą stabilnością i daje możliwość generowania prognoz na siatkach o dowolnie małej rozdzielczości horyzontalnej w obszarach o stromej topografii: COSMO-EULAG (Ziemiański i in. 2021); rok 2020.

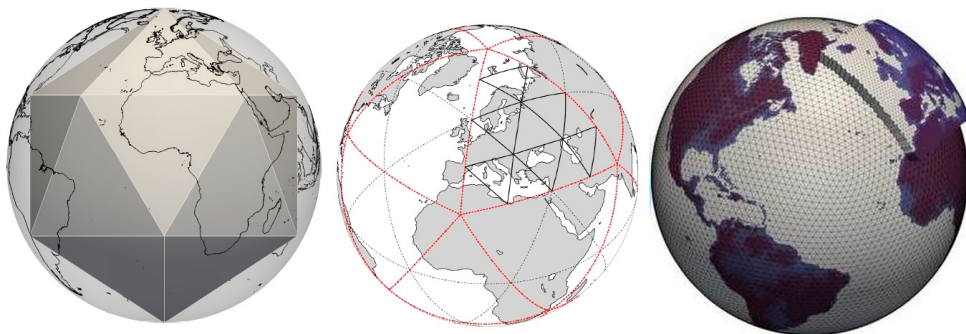
Powyższe systemy wpłynęły pozytywnie na podnoszenie jakości i niezawodności prognoz NWP oraz zwiększyły możliwość ich aplikacyjności dla końcowych odbiorców w procesie zabezpieczenia hydro-meteorologicznego kraju.

Operacyjne instalacje modeli COSMO w IMGW-PIB

Deterministyczne modele COSMO w IMGW-PIB działają operacyjnie w dwóch głównych siatkach o rozdzielczości 7 km oraz 2,8 km. Na potrzeby Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej (PAŻP) operacyjnie uruchamiany jest także model o rozdzielczości 14 km. Od 2023 roku w pełni operacyjnie działa także model ICON-LAM na siatce 2,5 km. Obliczenia dla powyższych modeli przeprowadzane są cztery razy na dobę w głównych terminach synoptycznych, tj. 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC oraz 18 UTC. Warunki początkowe i brzegowe dla powyższych modeli pochodzą z modelu globalnego ICON uruchamianego w DWD.

Niehydrostatyczny globalny model ICON

Uruchamiany operacyjnie w DWD, zbudowany na niestrukturalnej siatce (icosahedral-hexagonal), stanowi źródło warunków początkowych i brzegowych dla modeli COSMO o rozdzielczości 14 km oraz 7 km.



Po lewej Icosahedron (dwudziestościan, 12 wierzchołków) rozłożony na sferze. Siatka zdefiniowana jest przez podział boków trójkąta (R_n) oraz bisekcji (B_k) w postaci $R_n B_k$. W przypadku podstawowym, oznaczonym kolorem czerwonym, jest to siatka R1B00.

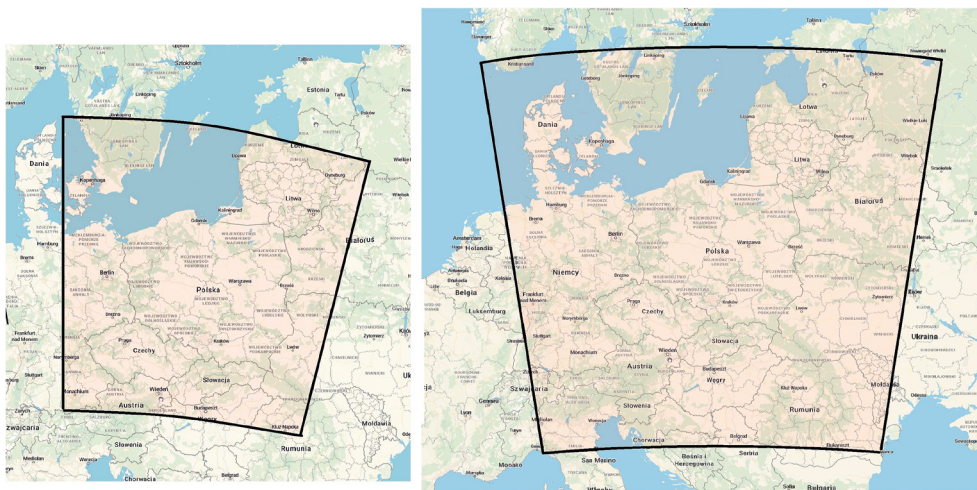
Przecięcie brzegów trójkąta liniami przerywanymi ($n = 2$) wraz z kolejnymi bisekcjami ($k = 1$) prowadzi do siatki R2B01 (czarna linia ciągła).

Po prawej operacyjna siatka o rozdzielczości 13 km (R3B07) oraz siatka ICON-EU o rozdzielczości 6,5 km (R3B08).

Model globalny ICON pokrywa całą kulę ziemską; oparty jest na siatce o rozdzielczości horyzontalnej 13 km i 90 poziomach w pionie (265 milionów węzłów, pionowy zasięg modelu to 75 km). Prognozy są obliczane w horyzoncie czasowym 180 godzin (dla przebiegu modelu z godziny 00 i 12 UTC) oraz 120 godzin (dla przebiegu modelu z godziny 06 i 18 UTC). Krok czasowy obliczeń to 24 sekundy. W modelu globalnym ICON reprezentowane są analogiczne procesy fizyczne, jak w modelach COSMO oraz ICON-LAM.

Modele konwekcyjno-skalowe wyższej rozdzielczości

Model COSMO o rozdzielczości horyzontalnej 2,8 km i 50 poziomach jest modelem niehydrostatycznym. Siatka obliczeniowa $308 \times 405 \times 50$ węzłów pokrywa obszar o rozmiarze $1064 \text{ km} \times 1134 \text{ km}$. Podstawowy krok czasowy całkowania obliczeń wynosi 20 sekund. Warunki początkowe i brzegowe pozyskane są z modelu COSMO o rozdzielczości 7 km. Model ICON-LAM obliczany jest na siatce niestrukturalnej o rozdzielczości 2,5 km i rozszerzonej domenie obliczeniowej przy wykorzystaniu warunków brzegowych i początkowych wyliczanych bezpośrednio z modelu globalnego ICON.



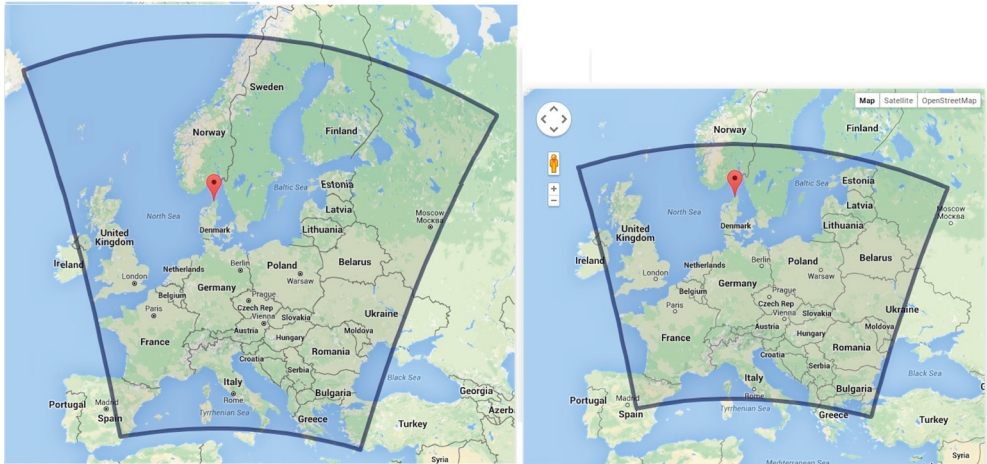
Domena modelu COSMO o rozdzielczości 2,8 km oraz modelu ICON-LAM 2,5 km.

Model ICON-LAM charakteryzuje się większą dokładnością parametrów prognostycznych w stosunku do modeli COSMO, w zakresie typowych rozdzielczości siatek powyżej 2 km. Od 2022 roku stał się on podstawowym modelem rozwijanym przez konsorcjum COSMO, zastępując w pracy operacyjnej modele COSMO oparte na rdzeniu dynamicznym Runege-Kutta.

IMGW-PIB nadal wykorzystuje wersje modelu COSMO z perspektywnym rdzeniem COSMO-EULAG, który umożliwi prowadzenie obliczeń w dowolnie małej rozdzielczości przestrzennej i przy bardzo stromej orografii. W następnych latach, po uzyskaniu odpowiednich mocy obliczeniowych, prowadzone będą weryfikacje obydwu modeli na siatkach obliczeniowych o rozdzielczości sub-kilometrowej 500-1000 m.

Mezoskalowe modele COSMO z siatką o rozdzielczości 7 km oraz 14 km

Model COSMO z siatką o rozdzielczości horyzontalnej 7 km i 40 poziomach jest modelem niehydrostatycznym. Rozmiary domeny wynoszą $2905 \text{ km} \times 3220 \text{ km}$. W obszarze domeny znajduje się $415 \times 460 \times 40$ węzłów obliczeniowych. W modelu 14 km siatka obliczeniowa ma $193 \times 161 \times 35$ punktów. Warunki początkowe i brzegowe do obu modeli pozyskiwane są z modelu globalnego ICON.



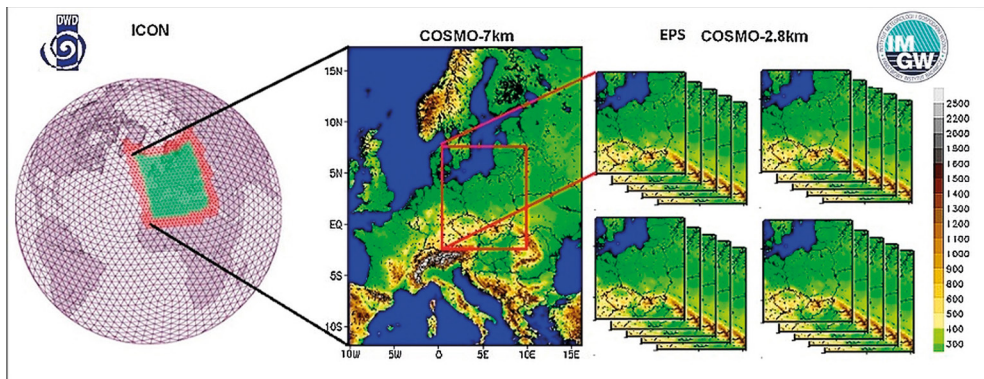
Domena modelu COSMO o rozdzielczości 7 km (lewa) i 14 km (prawa).

System prognoz wiązkowych COSMO-TLE (Time Lagged Ensemble)

System ten zbudowany jest z 20 realizacji prognoz modeli COSMO 2,8 km zasilanych warunkami brzegowymi i początkowymi dostarczonymi z modelu COSMO 7 km, pochodzącymi z czterech poprzednich prognoz tego modelu. Umożliwia to wygenerowanie czterech niezależnych statystycznie zestawów prognoz.

W każdym z zestawów ustawiona jest jedna realizacja podstawowa i cztery perturbacje warunków początkowych dla parametrów glebowych: po dwie perturbacje pola wilgotności (c-soil, surface-area index of evaporating fraction) oraz dwie perturbacje temperatury gleby do głębokości 1.5 m w głąb ziemi (Tg).

Wyniki z wszystkich 20 realizacji są przetwarzane statystycznie w celu wyliczenia wartości średnich i ekstremalnych, wariacji oraz prawdopodobieństwa przekroczeń krytycznych wartości. Wyniki te są udostępniane na dedykowanej stronie http://cosmo.imgw.ad/cosmo_prognoza_grad.2k8e.html.

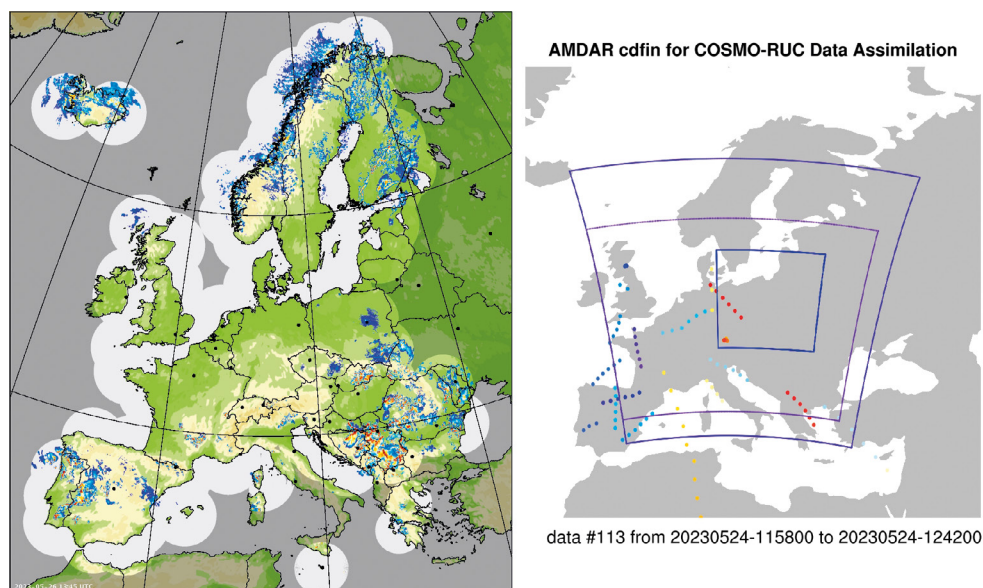


Schemat działania systemu COSMO-TLE.

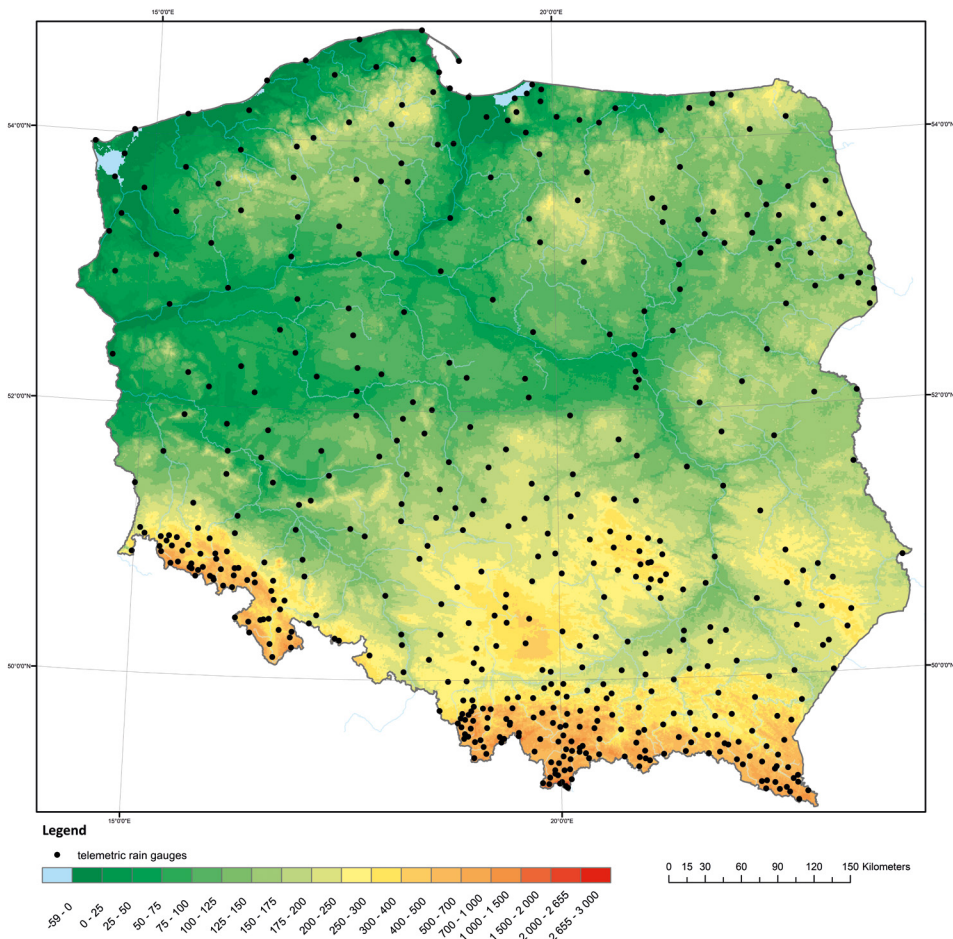
System prognoz ultra-krótkoterminowych COSMO-RUC (Rapid Update Cycles).

System COSMO-RUC, oparty na modelu COSMO 2,8 km, uwzględnia asymilację danych telemetrycznych, AMDAR oraz pomiarów radarowych. Dane telemetryczne dostępne są z częstością 10 minut, natomiast dane AMDAR pochodzą z transmisji przychodzących z sieci globalnej WMO/GTS. Dane te konwertowane są do formatu NetCDF (cdfin) wykorzystywanego w schematach asymilacji modelu COSMO.

W obecnej konfiguracji wykorzystywane są także powierzchniowe dane opadowe w postaci kompozytów SRI (Surface Rainfall Intensity), pochodzące z obrazów radarowych dostępnych w ramach programu EUMETNET Opera w rozdzielczości przestrzennej 2 km i czasowej 15 minut. Kompozyty radarowe konwertowane są z formatu Opera HDF5 do formatu GRIB1 wykorzystywanego przez system asymilacji modelu COSMO.



Pole SRI z danych radarowych Opera (lewo) oraz pomiary AMDAR w domenie europejskiej.



Sieć stacji telemetrycznych IMGW-PIB
wykorzystywanych w asymilacji COSMO-RUC.

System RUC przeprowadza 1-godzinny cykl asymilacji dostępnych danych, po którym następuje 3-godzinna prognoza. Cykl ten powtarzany jest co 30 minut generując dane prognostyczne z krokiem 5-minutowym. Podstawowym odbiorcą wyników tych prognoz są służby zabezpieczenia ruchu lotniczego (dedykowane aplikacje przetwarzające wyniki modelu na potrzeby kontrolerów lotniskowych) oraz systemy nowcastingowe. W przyszłości wyniki z tego systemu zasilać będą mogły także inne modele, takie jak modele hydrologiczne prognoz szybkich powodzi (flash-flood). Docelowo planowane jest zastąpienie danych pochodzących z programu Opera produktem opadowym RainGRS (kombinacja danych pochodzących z deszczomierzy, radarów i danych satelitarnych), które obecnie dostępne są w rozdzielczości przestrzennej 1 km i czasowej 10 minut.

Podsumowanie ustawień czasowych produkcji operacyjnych modeli COSMO/ICON

MODEL	HORYZONT	KROK	CZĘSTOŚĆ STARTU	GODZINY STARTU [UTC]
ICON 13.6 km	180 h/120 h	3 h	6 h	00,12 / 06,18
COSMO 14 km	72 h	1 h	6 h	00,06,12,18
COSMO 7 km	96 h	1 h	6 h	00,06,12,18
COSMO 2.8 km	60 h	1 h	6 h	00,06,12,18
ICON-LAM 2.5 km	48 h	1 h	6 h	00,06,12,18
COSMO TLE 2.8 km	36 h	1 h	6 h	00,06,12,18
COSMO RUC 2.8 km	3 h	5 min	30 min	H:00, H:30

LITERATURA

1. Baldauf M., Seifert A., Förstner J., Majewski D., Raschendorfer M., Reinhardt T., 2011, Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities, *Monthly Weather Review*, 139, 3887-3905, DOI: 10.1175/MWR-D-10-05013.1.

2. Duniec G., Interewicz W., Mazur A., Wyszogrodzki A., 2017, Operational setup of the soil-perturbed, time-lagged Ensemble Prediction System at the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute, *Meteorology Hydrology and Water Management*, 5 (2), 43-51, DOI: 10.26491/mhwm/71048.

3. Zängl G., Reinert D., Rpodas P., Baldauf M., 2015, The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141 (687), 563-579, DOI: 10.1002/qj.2378.

4. Ziemiański M., Wójcik D., Rosa B., Piotrowski Z.P., 2021, Compressible EULAG dynamical core in COSMO: convective-scale Alpine weather forecasts, *Monthly Weather Review*, 149 (10), 3563-3583, DOI: 10.1175/MWR-D-20-0317.1.

ANEKS 3. MODEL WRF W IMGW-PIB

Mariusz J. Figurski

WRF jest modelem numerycznej prognozy pogody, który ma na celu zaspokojenie potrzeb badawczych i operacyjnych w zakresie prognozowania pogody. Został zaprojektowany i jest rozwijany, nieprzerwanie od grudnia 2000 roku, m.in. przez: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), National Center for Atmospheric Research (NCAR), Air Force Weather Agency (AWFA), Forecast Systems Laboratory (FSL), Federal Aviation Administration (FAA) – łącznie około 150 różnych ośrodków i centrów badawczych oraz uniwersyteckich z całego świata (Skamarock i in. 2019). Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że WRF jak i jego podsystemy są dostępne nieodpłatnie i jest on stale wspieranych przez twórców. Model wykorzystywany jest przez około 25000 zarejestrowanych użytkowników w 130 krajach.

WRF może funkcjonować zarówno w skali globalnej, jak i mezoskali. Pozwala prowadzić symulację z danymi rzeczywistymi, jaki i idealizowanymi (generowanymi na podstawie danych rzeczywistych). Zawiera dwa rdzenie dynamiczne (Advanced Research WRF (ARW) i Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM)), system asymilacji danych oraz architekturę oprogramowania umożliwiającą obliczenia równoległe i skalowalność modelu. Począwszy od wersji WRF4.4 model WRF-NMM nie jest wspierany w głównej gałęzi rozwojowej modelu. WRF-ARW może być wykorzystany do symulacji zjawisk w skali od metrów do tysięcy kilometrów, w tym także do prognoz pogody. Przy pomocy WRF-ARW można przeprowadzać symulacje wyidealizowane (np. LES, konwekcja), badać huragany, testować parametryzacje oraz zastosować modele sprzężone w badaniach jakości powietrza, energii wiatrowej, hydrologii i do szeregu innych specjalistycznych zastosowań. Model WRF-ARW jest modelem ściśliwym, niehydrostatycznym (również może pracować jako model hydrostatyczny), działającym w oparciu o rozwiązania równań termo-hydrodynamicznych. W modelu parametryzowane są procesy fizyczne zachodzące w warstwie granicznej atmosfery, procesy radiacyjne, procesy mikrofizyczne zachodzące w chmurach, zjawiska konwekcyjne oraz procesy fizyczne zachodzące w glebie.

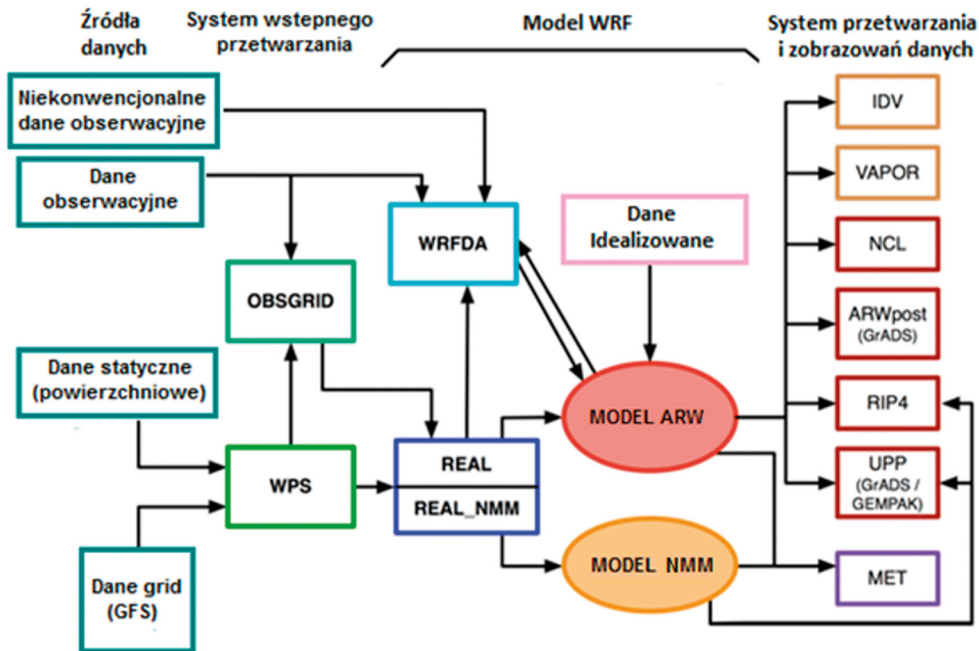
Model WRF-ARW umożliwia: zagnieżdżanie siatek obliczeniowych oraz (w najbardziej złożonym przypadku) wymianę informacji między siatkami nadrzędnymi i wbudowanymi, tworzenie siatek przemieszczających się wraz z badanym zjawiskiem, np. huraganami, oraz zmianę wysokości poziomów obliczeniowych (używane są hybrydowe współrzędne wysokościowe). Wykorzystywane są także konforemne odwzorowania kartograficzne: stereograficzne, polarne, Lamberta, czy odwzorowanie geograficzne (siatka prostokątna długość/szerokość geograficzna). Obliczenia wykonywane są na siatkach C-Arakawy (Skamarock i in. 2008), co oznacza przesunięcie węzłów siatki prędkości względem siatki ciśnienia. Równania modelu całkowane są (względem czasu) za pomocą algorytmów Rungego-Kutty drugiego i trzeciego rzędu. Do rozwiązania równań stosowany jest stały lub adaptacyjny krok całkowania.

WRF-ARW umożliwia naukowcom tworzenie symulacji odzwierciedlających rzeczywiste lub wyidealizowane warunki atmosferyczne dzięki szerokiej opcji fizyki i dynamiki, które obejmują kilka różnych modeli powierzchni ziemi, schematów mikrofizyki chmur, schematów planetarnej warstwy granicznej atmosfery oraz parametryzacji konwekcji. Model WRF (ARW) zaopatrzone w rdzeń dynamiczny, który rozwiązuje w pełni ściśle równania niehydrostatyczne, wykorzystując podążające za terenem współrzędne pionowe.

W procesie wypracowania prognoz pogody model WRF umożliwia stosowanie różnych parametryzacji zjawisk fizycznych lub rozwiązania równań pierwotnych. Uwzględnia on modele: procesów turbulencji przyziemnej warstwy atmosfery, fizyki planetarnej warstwy granicznej, gruntu, radiacji atmosferycznej i powierzchniowej (odpowiadający za transport promieniowania krótko i długofalowego), mikrofizyki chmur i opadów, zjawisk konwekcyjnych, itp. WRF pozwala zagnieżdżać siatki obliczeniowe oraz (w bardziej złożonym przypadku) umożliwia wymianę informacji między siatkami nadrzędnymi i wbudowanymi, tworzenie siatek przemieszczających się wraz z badanym zjawiskiem itp. Duża rozdzielczość siatek wbudowanych pozwala uwzględnić w prognozach wpływ obszarów o zróżnicowanej strukturze terenu podłoża i jego pokrycia.

Kolejną zaletą modelu WRF jest możliwość użycia różnych danych początkowych, które pochodzą z modeli globalnych lub regionalnych. Integralną częścią modelu WRF jest system asymilacji danych WRFDA, który został zaprojektowany jako elastyczny, nowoczesny system asymilacji danych pomiarowych, teledetekcyjnych naziemnych i satelitarnych. WRFDA, podobnie jak WRF, nadaje się do wykorzystania w szerokim zakresie zastosowań, w skali od kilometrów dla modelowania regionalnego i mezoskalowego do tysięcy kilometrów dla modelowania w skali globalnej. WRFDA opiera się na wariacyjnej metodzie asymilacji trójwymiarowej 3DVAR bądź czterowymiarowej 4DVAR. Możliwa jest także hybrydowa asymilacja danych. Zastosowanie procesu asymilacji pociąga za sobą zmianę danych początkowych oraz warunków brzegowych (podnoszona jest ich dokładność) modelu mezoskalowego.

Różne wersje modelu WRF zostały wykorzystane również w regionalnym modelowaniu klimatu, w tym do wykonania symulacji, które przyczyniły się do powstania Północnoamerykańskiego Regionalnego Programu Oceny Zmian Klimatu (NARCCAP) oraz Północnoamerykańskiego Eksperymentu NA-CORDEX. W IMGW-PIB model WRF oraz jego implementacje wykorzystywane są w badaniach dotyczących systemów prognozowania produkcji energii w instalacjach OZE, prognozach średnioterminowych i długoterminowych, ale także stanowi element systemu operacyjnego wspomagania modeli mezoskalowych na wypadek awarii. Implementacja modelu WRF w IMGW-PIB pozwala wykorzystać dane początkowe z modeli GFS, ICON, ICON-EU, ERA5, IFS, COSMO. Istotnym elementem prac nad modelowaniem hydrometeorologicznym jest implementacja modelu WRF-Hydro w realizowanych projektach hydrologicznych, w tym do przewidywania gwałtownych powodzi, oceny wpływu regionalnego hydroklimatu, sezonowych prognoz zasobów wodnych i badań sprzężenia gruntów z atmosferą.



Schemat blokowy przepływu danych w modelu WRF.

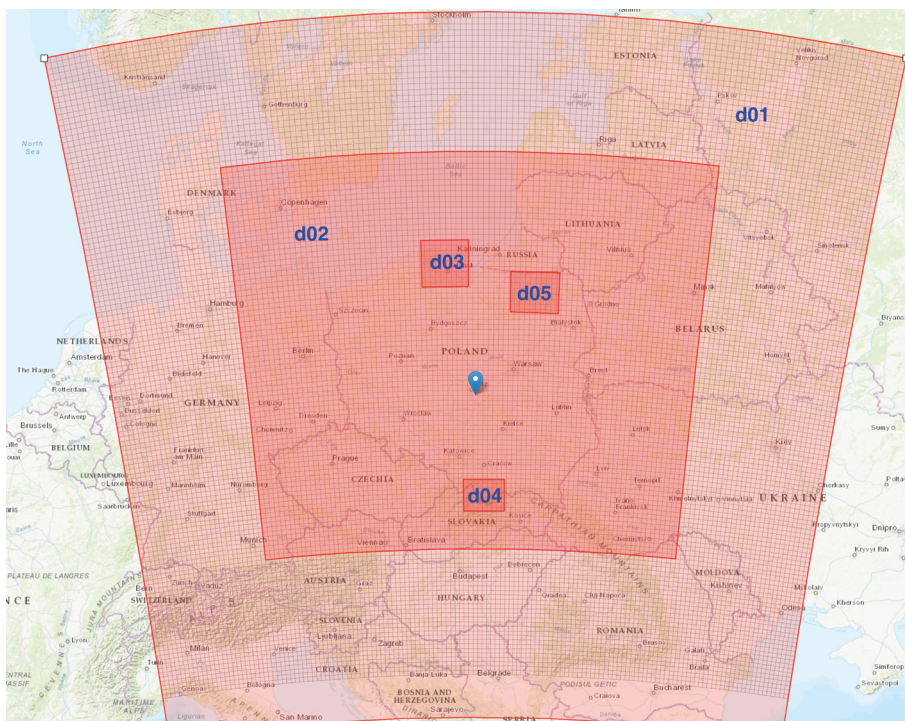
Źródło: Instrukcja Użytkownika ARW WRF 4.4.

Na rysunku przedstawiono schemat funkcjonalny modelu WRF, który składa się z kilku podsystemów zawartych w dwóch grupach – przetwarzania wstępnego (preprocessingu) oraz obliczeniowej.

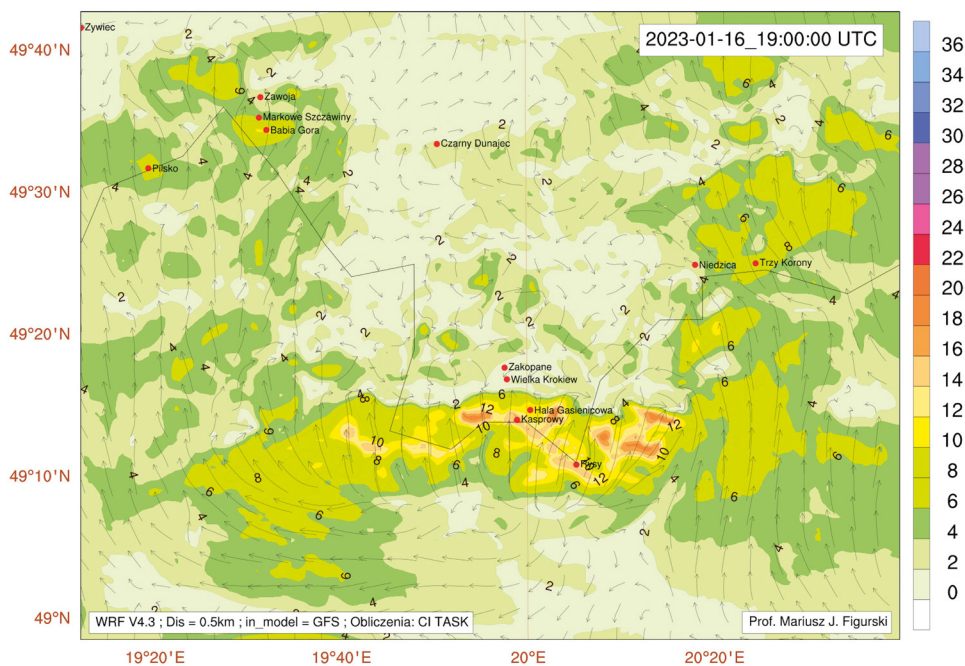
WPS (ang. WRF Preprocessing System) jest podsystemem przygotowującym dane do obliczeń prognostycznych. Wykorzystywany jest głównie w obliczeniach opartych o asymilację rzeczywistych pomiarów meteorologicznych. W jego skład wchodzi następujące podprogramy:

- Geogrid – asymiluje do modelu dane statyczne. Związane są one z wybranym przez użytkownika obszarem geograficznym prognozy mezoskalowej. Dane interpolowane są do węzłów zdefiniowanych siatek obliczeniowych. Geogrid dostarcza informacji m.in. o numerycznym modelu terenu, indeksach wegetacji, rodzaju podłoża, stopniu szorstkości terenu, albedo itp.
- Ungrib – przetwarza dane w formacie grib1 lub grib2 z modeli globalnych, np. GFS (ang. Global Forecasting System), NOGAPS (ang. Navy Operational Global Atmospheric Prediction System), czy MM5. Ungrib przekształca pliki analiz i prognoz pól meteorologicznych do formatu pośredniego modelu WRF.
- Metgrid – interpoluje zdefiniowane przez Geogrid i przygotowane przez Ungrib dane meteorologiczne do węzłów siatek obliczeniowych. Stworzone pliki wyjściowe są następnie wykorzystane przez wybrany do realizacji obliczeń rdzeń modelu.

z IMGW-PIB. Prognozy z WRF METEOPG udostępniane są dla Instytutu na mocy podpisanego w 2019 roku porozumienia o współpracy między Politechniką Gdańską i IMGW-PIB. W systemie zastosowano wysokorozdzielcze dane geograficzne (m.in. obejmujące topografię, szorstkość podłoża, użytkownie gruntów) i dopracowane, w wyniku testowania, parametryzacje procesów fizycznych. Operacyjny model wykorzystuje trzy siatki zagnieżdżone (stopień zagnieżdżenia 5) o rozdzielczościach odpowiednio 12,5 km (kontynent europejski), 2,5 km (obszar Polski) i 0,5 km (obszar Trójmiasta i części województwo pomorskiego) na 50 wertykalnych hybrydowych poziomach obliczeniowych. W systemie można również aktywować kolejne siatki o rozdzielczości 0,5 km dla wskazanych obszarów Polski, np. Tatr i Podhala lub Wielkich Jezior Mazurskich. Do prognozowania pogody asymilowane są dane z globalnego modelu GFS (Global Forecast System) o rozdzielczości 0,25°, który zawiera w sobie 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 (Consortium for Small-Scale Modeling) i ICON-LM oraz ERA5 i IFS z ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecast). System WRF METEOPG w ciągu doby uruchamiany jest dla czterech głównych terminów synoptycznych 00, 06, 12 i 18 UTC z czasem prognozy wynoszącym 60 godzin dla wszystkich siatek obliczeniowych. System obliczeniowy prognozowania pogody pracuje na superkomputerze "TRYTON", wykorzystując 624 rdzenie fizyczne.

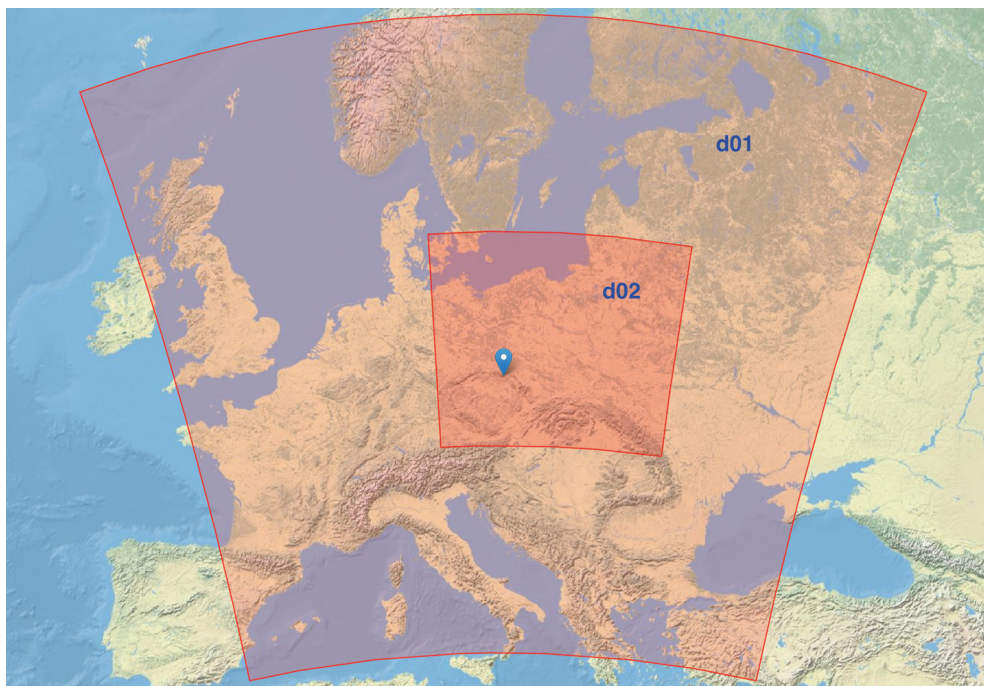


Domeny obliczeniowe operacyjnego modelu WRF METEOPG.



Wizualizacja pola prędkości i kierunku wiatru dla Tatr i Podhala
w domenie o rozdzielczości 500 m.

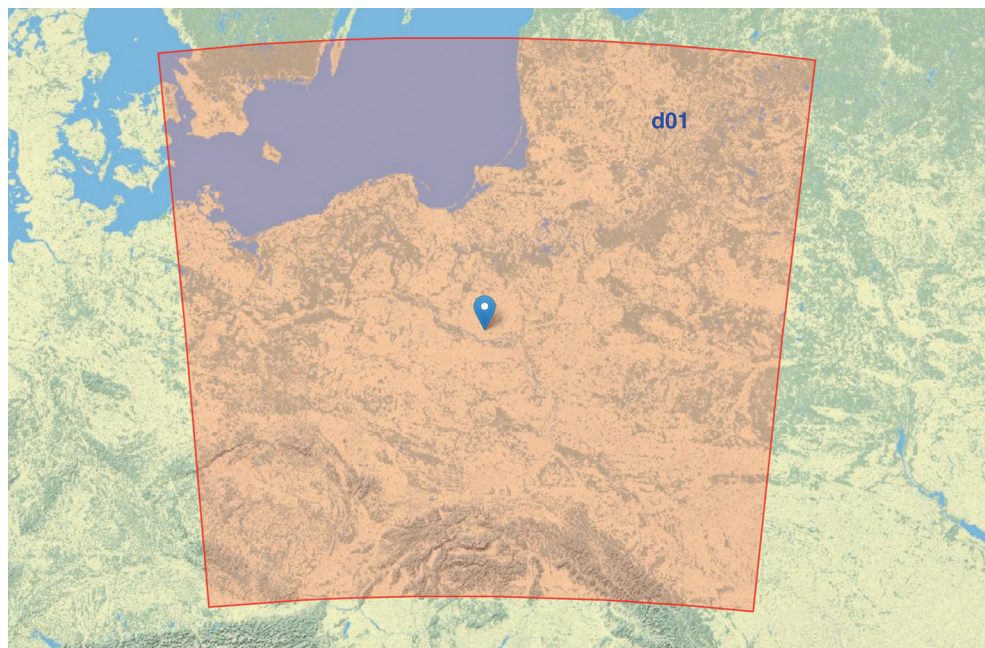
WRF GFS MEDIUM jest eksperymentalnym modelem średnioterminowym, opracowanym w ramach projektu obliczeniowego w Centrum Informatycznym TASK: *Parametryzacja i opracowanie mezoskalowego numerycznego modelu pogody WRF wysokiej rozdzielczości z asymilacją danych meteorologicznych i GNSS*. Model WRF GFS MEDIUM jest implementacją modelu WRF-ARW, który do zdefiniowania warunków początkowych i bocznych wykorzystuje model GFS. Prognoza jest realizowana na dwóch zagnieżdżonych domenach (stopień zagnieżdżenia 3) ze sprzężeniem zwrotnym o rozdzielczościach horyzontalnych odpowiednio 12 km (Europa) i 4 km Polska oraz 50 poziomach wertykalnych. Do zwiększenia prędkości symulacji w modelu WRF GFS MEDIUM zastosowano całkowanie z adaptacyjnym krokiem całkowania. Wprowadzono rozszerzenie dotyczące asymilacji pól hydrometeorów dostępnych w modelu GFSv16 polepszające prognozowanie pól opadowych. Model jest inicjalizowany przez pobranie 34 pól ciśnieniowych oraz 4 poziomów gleby z modelu globalnego GFS. Parametryzacja procesów podskalowych w modelu jest identyczna ze schematami parametryzacyjnymi zaimplementowanymi w modelu WRF METEOPG. W wersji eksperymentalnej model jest uruchamiany raz na dobę dla terminu 00:00 UTC, a horyzont czasowy prognozy wynosi 384 godziny.



Domeny obliczeniowe operacyjnego modelu WRF GFS MEDIUM.

WRF METEOPG ICON jest kolejnym eksperymentalnym modelem opracowanym w ramach projektu obliczeniowego w Centrum Informatycznym TASK *Parametryzacja i opracowanie mezoskalowego numerycznego modelu pogody WRF wysokiej rozdzielczości z asymilacją danych meteorologicznych i GNSS*. W celu uniknięcia dużego skoku z rozdzielczości danych wejściowych do rozdzielczości modelu wynoszącej 2,5 km, w implementacji WRF METEOPG ICON do inicjalizacji i warunków początkowych i brzegowych w całości wykorzystywany jest model ICON-EU z siatką 6,5 km; model jest inicjowany przez warunki początkowe zdefiniowane dla 74 poziomów hybrydowych atmosfery i 6 poziomów gleby w godzinnych interwałach czasowych. Zapewnia to niezwykle szczegółową inicjalizację i zredukowanie błędów numerycznych. Implementacja danych początkowych z modelu ICON-EU jest autorskim rozszerzeniem prof. Mariusza Figurskiego, który dokonał przebudowy modelu WRF v4.3 i v4.4 w celu wykorzystania danych początkowych zarówno z modelu ICON-EU, jak również modelu globalnego ICON o rozdzielczości 13 km. Ze względu na nowe rozwiązania w schemacie NOAH-MP WRF v4.3, związane z obliczaniem procesów hydrotermalnych symulujących zachowanie pokrywy śnieżnej na gruncie, model zachowuje się lepiej w warunkach zimowych, gdy grunt jest pokryty śniegiem (Wang i in. 2019). W tej wersji WRF METEOPG ICON w fazie testów modelu okazało się, że konwekcja jest lepiej odwzorowana w symulacjach. Dzięki zastosowaniu schematu IEVA (Wicker, Skamarock 2020) do sterowania kryterium stabilności pionowej poprawiona została stabilność numeryczna modelu w porównaniu z poprzednimi wersjami, ponieważ schemat IEVA pozwala na zastosowanie większego maksymalnego kroku czasowego w zastosowaniu adaptacyjnego kroku całkowania, utrzymując stabilność

modelu nawet przy wyższych pionowych wartościach CFL (Curant i in. 1928), a także szybkość symulacji. W wersji eksperymentalnej model WRF MTEOPG ICON jest uruchamiany raz na dobę dla terminu 00:00 UTC, a horyzont czasowy prognozy wynosi 120 godzin.



Domeny obliczeniowe operacyjnego modelu WRF METEOPG ICON.

LITERATURA

1. Bauer, P., Thorpe, A. & Brunet, G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature* 525, 47–55 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14956>
2. Courant R., Friedrichs K.O., Lewy H., 1928, Ueber die partiellen Differenzgleichungen der mathematische Physik, *Mathematische Annalen*, 100, 32-74, DOI: 10.1007/BF01448839.
3. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D., Duda M.G., Powers J.G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3, Technical Report, University Corporation for Atmospheric Research, DOI: 10.5065/D68S4MVH.
4. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y., 2019, A description of the advanced research WRF version 4, NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, DOI: 10.5065/1dfh-6p97
5. Wang Y.-H., Broxton P., Fang Y., Behrangi A., Barlage M., Zeng X., Niu G.-Y., 2019, A Wet-bulb temperature-based rain-snow partitioning scheme improves snowpack prediction over the drier Western United States, *Geophysical Research Letters*, 46 (23), 13825-13835, DOI: 10.1029/2019GL085722.

6. Wicker L.J., Skamarock W.C., 2020, An implicit-explicit vertical transport scheme for convection-allowing models, *Monthly Weather Review*, 148 (9), 3893-3910, DOI: 10.1175/MWR-D-20-0055.1.

ANEKS 4. NOWCASTING W IMGW-PIB

Jan Szturc, Anna Jurczyk, Katarzyna Osródka

Podstawy modeli nowcastingowych

Prognozy nowcastingowe są tworzone przez modele numeryczne należące do grupy nowcastingowych, których najważniejszą cechą charakterystyczną jest wysoka rozdzielczość czasowa i przestrzenna, wynosząca przynajmniej odpowiednio 5-10 min i 1 km. Uzyskuje się ją dzięki bieżącemu dostępowi do danych telemetrycznych, a w przypadku opadu także teledetekcyjnych, przede wszystkim z radarów meteorologicznych sieci radarowej POLRAD i z radiometrów satelitarnych.

Najczęściej stosowanym podejściem do tworzenia prognoz w tych modelach, zwłaszcza prognoz opadu, jest precyzyjna estymacja warunków początkowych, czyli aktualnej sytuacji meteorologicznej, a następnie ekstrapolacji w czasie w oparciu o szczegółową analizę przemieszczania się poszczególnych obiektów pola wejściowego. Ponadto określa się ewolucję w czasie, czyli zmiany nie tylko położenia, ale także wartości poszczególnych parametrów meteorologicznych.

Inne często stosowane podejście polega na dopasowaniu prognoz z modeli mezoskalowych, na ogół wygenerowanych kilka godzin wcześniej, do telemetrycznych danych pomiarowych. Metodę tę wykorzystuje się na ogół do pól meteorologicznych innych niż opad, takich jak temperatura, wilgotność itd.

Dzięki takiemu podejściu prognozy nowcastingowe cechują się dużą sprawdzalnością, nieosiągalną w innych rodzajach modeli. Jednak ich ograniczeniem są stosunkowo krótkie czasy wyprzedzenia prognoz, przy których zachowują one zadowalającą sprawdzalność. Czasy te, dla prognoz ze wspomnianą na początku wysoką rozdzielczością przestrzenną, są ograniczone do ok. 2 godz. w przypadku pola opadu, i do ok. 6-8 godz. dla pozostałych pól meteorologicznych.

Jedną z najważniejszych wielkości przy generowaniu prognoz nowcastingowych jest wskaźnik jakości (quality index, QI), powszechnie stosowany przy tego rodzaju modelach. Jakość danych, jak i prognoz, wyznaczona ilościowo w postaci bezwymiarowego wskaźnika z zakresu od 0 do 1, stanowi podstawową wielkość uwzględnianą przy łączeniu różnego rodzaju danych, które odbywa się metodami kombinacji warunkowej.

Większość powyższych systemów generuje dane dla domeny wyznaczonej przez system RainGRS, o rozmiarze 900 km × 800 km, obejmującej Polskę z obrzeżami, natomiast dane z pozostałych systemów są przycinane do tej domeny i przeliczane na układ współrzędnych PUWG 92.

Systemy nowcastingowe IMGW-PIB

Większość z opisanych poniżej modeli nowcastingowych jest obecnie włączonych w System Estymacji i Nowcastingu Opadu (SEiNO), który został wykonany i wdrożony do pracy operacyjnej w Zakładzie Nowcastingu IMGW-PIB. Wszystkie poniżej opisane modele, poza modelem INCA, zostały zaprojektowane, utworzono dla nich oprogramowanie oraz zostały zaimplementowane operacyjnie przez pracowników Zakładu w wyniku prac własnych, a także udziału w projektach krajowych (NCN, NCBiR) i międzynarodowych (PR UE, Interreg) (Szturc i in. 2018).

System ulega ciągłemu rozwojowi i obecnie (sierpień 2023 r.) składa się z jedenastu modułów. Produkty generowane z 10-min krokiem czasowym są udostępniane przez następujące moduły:

- RainGRS: dane deszczomierzowe po kontroli jakości (RainGaugeQC), radarowe po kontroli jakości (RADVOL-QC) i łączeniu w mapę zbiorczą (RadComposite) oraz satelitarne (sat_qc_int), łączone w estymowane pole opadu GRS (deszczomierzowo-radarowo-satelitarne) (Jurczyk i in. 2020b; na temat kontroli jakości tych danych: Ośródką i in. 2014; Ośródką, Szturc 2022; Ośródką i in. 2022).
- SCENE: prognozy nowcastingowe pola opadu z czasem wyprzedzenia do 2 godz.
- MERGE: prognozy hybrydowe z czasem wyprzedzenia do 8 godz., czyli łączone prognozy nowcastingowe SCENE i mezoskalowe AROME.
- ENSEMBLE, PROB: prognozy probabilistyczne.
- INCA-PL2: prognozy nowcastingowe najważniejszych pól meteorologicznych z wyłączeniem opadu, z czasem wyprzedzenia do 8 godz. System jest oparty na austriackim modelu INCA-CE (Wang i in. 2017).
- SPT (Surface Precipitation Type): detekcja i prognozy do 1 godz. typu opadu na powierzchni gruntu: śnieg, śnieg z deszczem, deszcz marznący, deszcz.
- HAIL: detekcja gradu – prawdopodobieństwo wystąpienia i rozmiar gradzin.
- LIGHTNING: detekcja wyładowań (suma i gęstość wyładowań, lightning jump) na podstawie danych systemu PERUN.
- TSP (Thunderstorm Prediction): detekcja i prognozy do 1 godz. prawdopodobieństwa i intensywności burz.
- MeteoWarn: wizualizacja zagrożeń pogodowych.
- Dedykowana aplikacja internetowa służąca do wizualizacji i przeprowadzania analiz produktów SEiNO (<http://nowcasting.imgw.ad/seino/>).

Oprócz tworzenia powyższych modeli, przeprowadzono szeroko zakrojone prace nad kontrolą jakości poszczególnych danych wejściowych. Ze względu na bardzo dużą rolę, jaką odgrywają w tego rodzaju modelach dane pomiarowe, teledetekcyjne i telemetryczne, kontrola jakości stanowi jeden z kluczowych elementów zapewniających odpowiednią jakość generowanych estymat i prognoz.

Więcej informacji na temat powyższych systemów można znaleźć w literaturze zestawionej na końcu niniejszego rozdziału.

Produkty generowane przez moduły systemu SEiNO charakteryzują się następującymi parametrami:

- rozdzielczość przestrzenna 1 km × 1 km;
- rozdzielczość czasowa 10 min;
- czas wyprzedzenia ostrzeżeń:
 - 1 godz. w modułach związanych z groźnymi zjawiskami pogodowymi (co oznacza, że dane zagrożenie wystąpi w dowolnym momencie w ciągu godziny od wygenerowania ostrzeżenia),

- 2 godz. w prognozach SCENE i SPT,
- 8 godz. w prognozach INCA-PL2 i hybrydowych MERGE.

Parametry modeli nowcastingowych pracujących operacyjnie w IMGW-PIB.

MODEL/ SYSTEM	ZASTOSOWANIE	ROZDZIELCZOŚĆ PRZESTRZENNA	ROZDZIELCZOŚĆ CZASOWA	CZAS WYPRZEDZENIA
RainGRS	10-min sumy opadu	1 km	10 min	-
SCENE, ENESEMBLE, PROB	10-min sumy opadu deterministyczne, probalibistyczne	1 km	10 min	2 h
MERGE	10-min sumy opadu	1 km	10 min	8 h
INCA-PL2	Pozostałe główne pola meteorologiczne	1 km	estymacja: 10 min prognozy: 60 min	8 h
SPT	Rodzaj opadu	1 km	10 min	2 h
LIGHTNING HAIL	Analiza wyładowań Detekcja gradu	1 km	10 min	-
TSP	Detekcja i prognozy burz	1 km	10 min	1 h

Dane wejściowe

Dane wejściowe do generowania produktów i prognoz nowastingowych w IMGW-PIB pochodzą z następujących systemów telemetrycznych, teledetekcyjnych i prognostycznych:

- System Telemetrii IMGW-PIB: dane ze stacji opadowych i automatycznych stacji meteorologicznych.
- System kontroli jakości danych deszczomierzowych RainGaugeQC (opracowany w Zakładzie Nowcastingu).
- Polska sieć radarów meteorologicznych POLRAD: 10 radarów.
- System kontroli jakości danych radarowych RADVOL-QC (opracowany w Zakładzie Nowcastingu).
- Sieć satelitów meteorologicznych Meteosat.
- Oprogramowanie NWC-SAF do przetwarzania danych satelitarnych Meteosat.
- Aplikacja gau_qc_int do estymacji satelitarnego pola opadu (opracowana w Zakładzie Nowcastingu).
- System estymacji pola opadu multi-source RainGRS (opracowany w Zakładzie Nowcastingu).
- Aplikacja MOVE do wyznaczania pola wektorów przemieszczania się obiektów meteorologicznych.
- System detekcji wyładowań atmosferycznych PERUN: 12 stacji.
- Aplikacja przetwarzająca dane PERUN: LIGHTNING (opracowana w Zakładzie Nowcastingu).
- Detekcja opadu gradu HAIL (opracowana w Zakładzie Nowcastingu).
- System detekcji i prognoz burz TSP (opracowany w Zakładzie Nowcastingu).
- Prognozy z modelu mezoskalowego AROME 2,0 km.
- Prognozy z modelu mezoskalowego COSMO 2,8 km.

Przegląd modeli prognoz nowastingowych działających w IMGW-PIB

Model SCENE (Storm Cell Evolution and Nowcasting) dla pola opadu – generujący prognozy z czasem wyprzedzenia do 2 godz.

Model ten został opracowany w IMGW-PIB. Warunkami początkowymi dla ekstrapolacyjnych prognoz opadu SCENE są aktualne pola opadu, estymowane systemem RainGRS (Rainfall Estimates from Gauges, Radars and Satellites). Ponadto działa model hybrydowy MERGE, łączący nowcastingowe prognozy opadu SCENE z prognozami mezoskalowymi z modelu AROME. Odbywa się to przez zastosowanie odpowiednio dobranej funkcji wagowej, z wydłużaniem czasu wyprzedzenia zwiększającej wagę prognoz mezoskalowych. Dzięki temu łączone są zalety obydwu rodzajów modeli: bardzo wysokiej rozdzielczości prognoz przy krótszych czasach wyprzedzenia, a jednocześnie ich sprawdzalność utrzymywana jest na odpowiednio wysokim poziomie także przy dłuższych czasach wyprzedzenia.

Model INCA-PL2 – generujący prognozy dla pozostałych pól meteorologicznych

Model ten stanowi adaptację modelu INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) austriackiej służby meteorologicznej ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) do danych telemetrycznych i prognostycznych dostępnych w Polsce oraz do potrzeb IMGW-PIB. Prognozy są generowane dla pól: temperatury na poziomie gruntu i na 2 m, temperatury punktu rosy, temperatury odczuwalnej, wilgotności względnej, linii śniegu, poziomu zamarzania, oblodzenia, prędkości i kierunku wiatru na 10 m. INCA-PL2 łączy prognozy mezoskalowe poszczególnych parametrów pochodzące z modelu AROME 2,0 km z danymi telemetrycznymi z Systemu Telemetrii IMGW-PIB. Prognozy AROME są w każdym kroku czasowym dostosowywane (adjustowane) do pomiarów telemetrycznych. Krok czasowy generowania estymat pól meteorologicznych wynosi obecnie 10 min. Ponadto model jest wyposażony w moduł do wyznaczania pól kilku wybranych wskaźników konwekcji, udostępniony przez narodową służbę meteorologiczną Izraela.

Detekcja i prognozy groźnych zjawisk pogodowych w IMGW-PIB

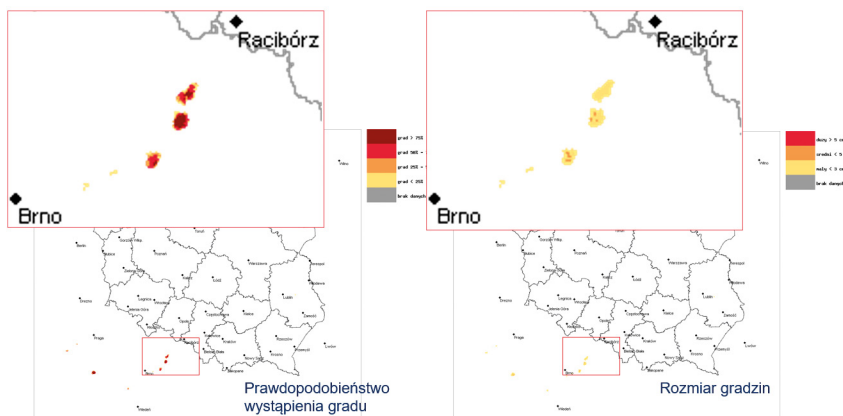
Oprócz powyżej opisanych modeli SCENE i INCA-PL2, w IMGW-PIB działają inne modele oparte na technikach nowcastingowych, prognozujące różne zjawiska pogodowe. Są to m.in. modele i systemy Thunderstorm Prediction (TSP) do nowcastingu burz (prawdopodobieństwo ich wystąpienia i intensywność), Surface Precipitation Type (SPT) do nowcastingu typu opadu (śnieg, śnieg i deszcz, deszcz marznący oraz deszcz) oraz HAIL do detekcji gradu (prawdopodobieństwo wystąpienia i rozmiar gradzin).

Detekcja i prognozy opadu na powierzchnię grunt, SPT (ang. *surface precipitation type*)

Model rozpoznaje rodzaj opadu (śnieg, śnieg z deszczem, deszcz marznący i deszcz) oraz prognozuje go na najbliższą godzinę. Dane wejściowe do SPT stanowią wyniki prognoz 3D pola temperatury z modelu NWP COSMO 2,8 km, prognozy temperatury na powierzchni gruntu i na wysokości 2 m z modelu INCA-PL2 oraz prognozy pola opadu SCENE. Do kalibracji algorytmów wykorzystano dane ze stacji synoptycznych z obsługą obserwatorów.

Detekcja opadu gradu, HAIL

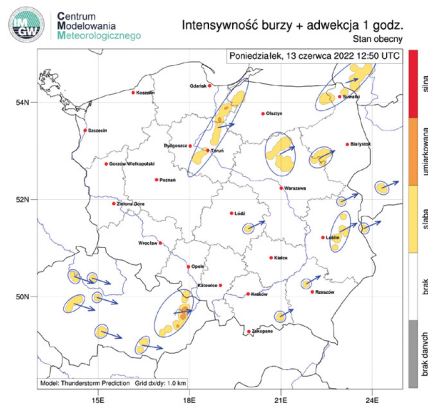
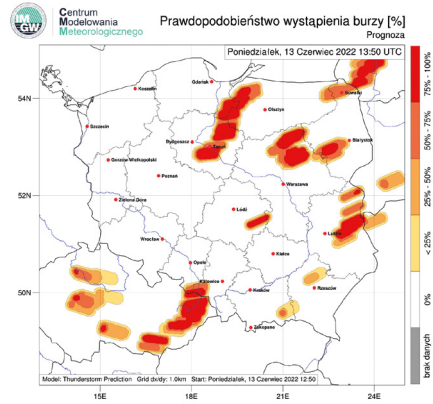
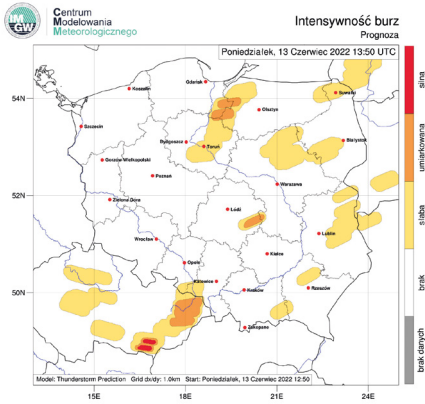
Model rozpoznaje miejsca wystąpienia opadu gradu – prawdopodobieństwo wystąpienia i maksymalny rozmiar gradzin. Dane wejściowe stanowią dane radarowe i prognozy CO-SMO 2,8 km. Algorytmy zostały oparte na technice *fuzzy logic*. Do kalibracji algorytmów wykorzystano dane ze stacji synoptycznych z obsługą obserwatorów oraz dane z bazy danych ESWD prowadzonej przez ESSL.



Przykład detekcji gradu, od lewej: prawdopodobieństwo wystąpienia i rozmiar gradzin.

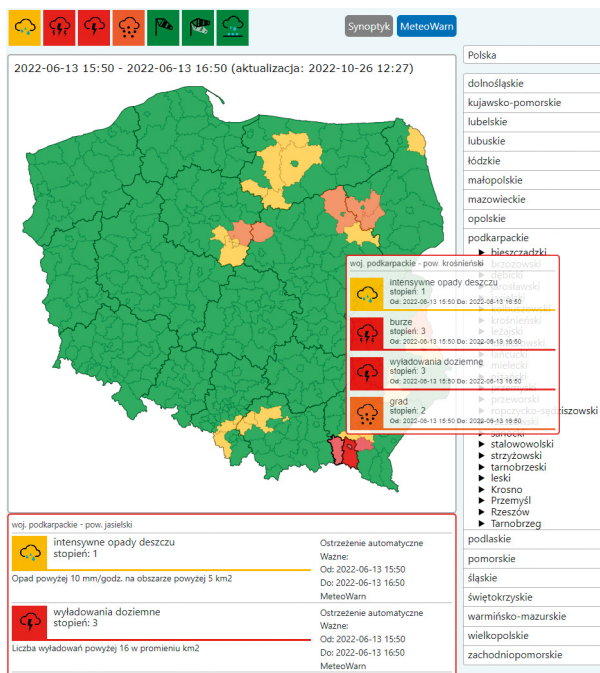
Detekcja i prognozy występowania burz, TSP (ang. *thunderstorm prediction*)

Model rozpoznaje miejsca, w których aktualnie występują burze oraz prognozuje ich występowanie w ciągu najbliższej godziny. Parametrami opisującymi burze są prawdopodobieństwo wystąpienia i ich intensywność. Model działa w dwóch etapach: detekcja i prognozy. Dane wejściowe do detekcji stanowią dane radarowe, dane systemu detekcji wyładowań atmosferycznych PERUN przetworzone aplikacją LIGHTNING oraz dane satelitarne Meteosat przetworzone oprogramowaniem EUMETSAT NWC-SAF (produkty RDT-CW). Algorytm detekcji został oparty na modelu SVM (ang. *support vector machines*). Dane do kalibracji pochodzą ze stacji synoptycznych z obsługą obserwatorów. Dane wejściowe do prognoz stanowią pole detekcji burz przez TSP, prognozy SCENE i parametry prognostyczne produktu RDT-CW. Algorytm jest oparty na drzewie decyzyjnym wykorzystując prognozy RDT-CW oraz na ekstrapolacji wektorami przemieszczenia wyznaczonymi przez model SCENE. Ponadto wyznaczane jest pole wskaźnika jakości produktów TSP.



Przykład produktów burzowych TSP, od lewej: prognoza intensywności, prognoza prawdopodobieństwa wystąpienia oraz detekcja intensywności z prognozą przemieszczania się poszczególnych obiektów burzowych.

System MeteoWarn opiera się na opisanych powyżej produktach detekcji i prognoz poszczególnych zjawisk z czasem wyprzedzenia do 1 godz. Jego głównym zadaniem jest zebranie wszystkich tych elementów w jednym miejscu, a także ich wizualizacja na mapie powiatów ilustrująca przekroczenia zdefiniowanych wartości progowych.



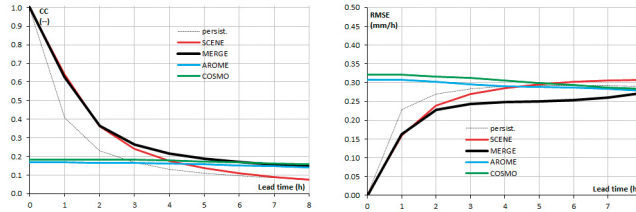
Wizualizacja danych w systemie MeteoWarn.

Inne rodzaje prognoz

Do obliczania prognoz wiązkowych opadu służy system ENSEMBLE, natomiast system PROB jest przeznaczony do wyznaczania prognoz probabilistycznych w postaci zestawu percentyli, wartości średniej i odchylenia standardowego lub parametrów rozkładu gamma. Dla tych modeli wejściowe informacje są dostarczane wraz z prognozami deterministycznymi w postaci pól wskaźnika jakości QI.

Weryfikacja

Do weryfikacji estymat i prognoz opracowano system METRICS, dedykowany specjalnie do prognoz nowcastingowych poprzez założenie rozdzielczości przestrzennej i czasowej charakterystycznych dla tego rodzaju modeli. Sprawdzalność prognoz dla wszystkich czasów wyprzedzenia jest liczona w czasie rzeczywistym w każdym 10-minutowym kroku czasowym, dla którego wyznaczone zostały estymaty poszczególnych pól meteorologicznych, zwłaszcza opadu. Liczony jest zestaw ponad 20 różnego rodzaju kryteriów sprawdzalności, w tym opartych na tabeli wielodzielczej.



Sprawdzalność nowcastingowych prognoz opadu (SCENE i MERGE) w porównaniu ze sprawdzalnością prognoz modeli mezoskalowych (COSMO 2,8 km i AROME) oraz prognozami inercyjnymi (persistence) w 2022 r., od lewej współczynnik korelacji (CC) i RMSE.

LITERATURA

1. Jurczyk A., Szturc J., Otop I., Ośródką K., Struzik P., 2020, Quality-based combination of multi-source precipitation data, *Remote Sensing*, 12, (11), 1709, DOI: 10.3390/rs12111709.
2. Ośródką K., Otop I., Szturc J., 2022, Automatic quality control of telemetric rain gauge data providing quantitative quality information (RainGaugeQC), *Atmospheric Measurement Techniques*, 15 (19), 5581-5597, DOI: 10.5194/amt-15-5581-2022.
3. Ośródką K., Szturc J., Jurczyk A., 2014, Chain of data quality algorithms for 3-D single-polarization radar reflectivity (RADVOL-QC system), *Meteorological Applications*, 21 (3), 256-270, DOI: 10.1002/met.1323.
4. Ośródką K., Szturc J., 2022, Improvement in algorithms for quality control of weather radar data (RADVOL-QC system), *Atmospheric Measurement Techniques*, 15 (2), 261-277, DOI: 10.5194/amt-15-261-2022.
5. Szturc J., Jurczyk A., Ośródką K., Wyszogrodzki A., Giszterowicz M., 2018, Precipitation estimation and nowcasting at IMGW-PIB (SEiNO system), *Meteorology Hydrology and Water Management*, 6 (1), 3-12, DOI: 10.26491/mhwm/76120.
6. Szturc J., Jurczyk A., Ośródką K., Giszterowicz M., 2020, Nowcasting, czyli o pogodzie za chwilę, *Obserwator*, 14-19.
7. Szturc J., Ośródką K., Jurczyk A., Otop I., Linkowska J., Bochenek B., Pasierb M., 2021, Quality control and verification of precipitation observations, estimates, and forecasts, [w:] *Precipitation Science. Measurement, Remote Sensing, Microphysics and Modeling*, S. Michaelides (red.), Elsevier, 91-133, DOI: 10.1016/B978-0-12-822973-6.00002-0.
8. Wang Y., Meirold-Mautner I., Kann A., Šajn S.A., Simon, A, Vivoda J., Bica B., Böcskör E., Brezková L., Dantinger J., Giszterowicz M., Heizler G., Iwanski R., Jachs S., Bernard T., Kršmanc R., Merše J., Micheletti S., Schmid F., Steininger M., Haiden T., Regec A., Buzzi M., Derková M., Kozarić T., Qiu X., Reyniers M., Yang J., Huang Y., Vadislavsky E., 2017, Integrating nowcasting with crisis management and risk prevention in a transnational and interdisciplinary framework, *Meteorologische Zeitschrift*, 26 (5), 459-473, DOI: 10.1127/metz/2017/0843.

ANEKS 5. PROGNOZY DŁUGOTERMINOWE

Zofia Bałdysz, Marta Gruszczyńska, Adam Jaczewski, Karina Kózka, Alan Mandal, Grzegorz Nykiel, Weronika Wrońska

Generalne informacje o prognozach długoterminowe (w tym sezonowych)

W celu opracowania prognoz z wyprzedzeniem od dwóch tygodni do 10 lat (dekady) zazwyczaj stosuje się w pełni sprzężone modele ocean-łód-atmosfera. Są one uruchamiane w skali globu, co pozwala przewidzieć ewolucję stanu atmosfery i powiązanych z nią składowych systemu Ziemi. Ze względu na ponadprzeciętne zasoby obliczeniowe, jakich wymagają takie systemy modelowania, są one uruchamiane głównie przez wybrane ośrodki narodowe (np. National Centers for Environmental Prediction – Narodowe Centrum Prognoz Środowiska, NCEP), a także międzynarodowe (np. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Europejskie Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody, ECMWF), które zapewniają wysokorozdzielcze prognozy globalne w trybie operacyjnym z najdłuższym wyprzedzeniem (do jednego roku).

Modele te pozwalają na probabilistyczne prognozy ryzyka różnych zdarzeń klimatycznych w postaci tzw. prognoz wiązkowych, dokładnie jak ma to miejsce w prognozach krótkoterminowych. W przypadku prognoz o wydłużonym terminie kluczowe jest jednak kilka założeń, które umożliwiają ich właściwą interpretację. Pierwszym z nich jest wybór okresu referencyjnego i związane z nim przewidywanie anomalii. Anomalie prognozy są zwykle definiowane w odniesieniu do standardowego okresu referencyjnego, takiego jak lata 1991-2020, lub w odniesieniu do okresu bazowego objętego prognozami wstecznymi. Z uwagi jednak na zmianę klimatu, prognozowane anomalie w odniesieniu do krótszego i nowszego okresu referencyjnego mogą być bardziej istotne. Probabilistyczne stwierdzenie dotyczące następnego okresu prognostycznego może być bowiem poprawne w odniesieniu do okresu 1991-2020, ale ma ograniczone zastosowanie dla typowego użytkownika, który chce wiedzieć, czego się spodziewać w odniesieniu do niedawnej przeszłości (np. ostatniego dziesięciolecia).

Kolejnym istotnym czynnikiem jest zdefiniowanie kategorii prognozowanych zjawisk. Na podstawie dostępnych historycznych obserwacji w danej lokalizacji można określić ilościowo zakres średniej zmienności zmiennej, którą chcemy prognozować. Korzystając z funkcji gęstości prawdopodobieństwa (PDF, ang. probability density function), obserwacje danej zmiennej w okresie referencyjnym można uporządkować rosnąco lub malejąco, określając jednocześnie granice, takie, że jedna trzecia obserwowanych wartości jest niższa lub jedna trzecia obserwowanych wartości jest wyższa od pozostałych. Wartości tych granic mogą być stosowane do kategoryzacji wartości anomalii (poniżej, powyżej bądź w normie), przy czym należy pamiętać, że zależą one od pory roku, lokalizacji, wykorzystanych danych obserwacyjnych oraz okresu referencyjnego.

W przypadku dynamicznych systemów predykcji długoterminowych, prognozy na nadchodzący okres prognostyczny są często przedstawiane w postaci średnich anomalii wiązkowych. Podkreślają one różnice między średnią prognozowaną wiązki a modelową średnią klimatologiczną (oszacowaną przy użyciu prognozy wstecznej). Należy pamiętać, że chociaż

średnia wiązki pojawia się jako pojedyncza wartość i czasami jest przez to określana jako „deterministyczna”, nadal jest wynikiem probabilistycznego systemu predykcji. Prognozy typowo probabilistyczne są z kolei zwykle wyrażane dla średniej miesięcznej (w przypadku prognozy miesięcznej) lub średniej z trzech miesięcy (w przypadku prognoz sezonowych) i opierają się na prognozowanych anomaliach prawdopodobieństwa dla różnych kategorii (np. poniżej, powyżej, w normie). W najprostszym podejściu prawdopodobieństwa są wyznaczane z liczby elementów wiązki w każdej kategorii zdefiniowanej przez klimatologię modelu. Przedstawianie prawdopodobieństw prognozy w połączeniu z progiem klimatycznym pochodzącym z obserwowanego klimatu może pomóc w jej interpretacji. W przypadku wiązki prognoz deterministycznych prawdopodobieństwa powinny być prezentowane razem z odpowiednimi oszacowaniami ich jakości.

Podział rozkładu prognozy klimatologicznej na kategorie (powyżej, poniżej, w normie) i formułowanie prognozy długoterminowej w kategoriach prawdopodobieństw odpowiadających każdej takiej kategorii powoduje utratę informacji o pełnym rozkładzie statystycznym zmiennej, a informacja o prognozie probabilistycznej jest dostępna tylko w kontekście wartości granic poszczególnych kategorii. Niektórzy odbiorcy mogą być jednak zainteresowani prawdopodobieństwem przekroczenia konkretnej wartości, która może różnić się od granicy kategorii. Uzyskanie takiej prognozy jest możliwe z pomocą pełnej funkcji gęstości prawdopodobieństwa, którą można określić wykorzystując np. metodę określania prawdopodobieństwa przewyższenia (POE, ang. probability of exceedance).

Odwiecznym problemem informacyjnym związanym z probabilistycznymi prognozami długoterminowymi jest ich interpretacja i sposób wykorzystania w procesie decyzyjnym. Prognozy probabilistyczne mogą być bowiem postrzegane jako zawodne, szczególnie gdy obserwuje się kategorię inną niż najbardziej prawdopodobna. W związku z tym należy mieć na uwadze dwie istotne rzeczy. Po pierwsze, dla wiarygodnego systemu prognoz nawet kategorie, które są przewidywane z niskim prawdopodobieństwem, np. 10%, powinny w rzeczywistości wystąpić w 10 proc. przypadków. Po drugie, obserwowany wynik nie zawsze będzie w najbardziej prawdopodobnej kategorii. Z tego powodu w procesie komunikacyjnym zawsze powinien być podkreślany probabilistyczny charakter prognozy, nawet jeśli prognoza jest stosunkowo pewna.

Wytyczne dotyczące dobrych praktyk w zakresie opracowywania obiektywnych prognoz długoterminowych (w tym sezonowych)

Poniżej przedstawiono zalecenia dotyczące infrastruktury wymaganej do wspierania zalecanej praktyki prognozowania długoterminowego, przekazywania prognoz i dobrych praktyk w celu zapewnienia wiarygodności podmiotom dostarczającym prognozy długoterminowe.

1. Katalogowanie i dokumentowanie regionalnej zmienności klimatu i czynników ją kształtujących.
2. Ustalenie harmonogramu prognoz długoterminowych.
3. Przegląd i dokumentowanie sprawdzalności opublikowanych prognoz.

4. Przedstawienie aktualnego stanu klimatu w celu ustalenia kontekstu dla prognozy długoterminowej na nadchodzący okres prognostyczny.
5. Dostarczanie prognoz długoterminowych w formacie probabilistycznym.
6. Omówienie fizycznej podstawy prognozowania długoterminowego.
7. Stworzenie mechanizmów informacji zwrotnej i zaangażowania odbiorców.
8. Określenie metody tworzenia długoterminowych prognoz operacyjnych.
9. Ustanowienie dobrych praktyk w zakresie przekazywania prognoz długoterminowych.
10. Wdrażanie dobrych praktyk w zakresie budowania i utrzymywania wiarygodności.

Prognozy długoterminowe w IMGW-PIB

Prognozy długoterminowe są realizowane jako prognozy eksperymentalne w Zakładzie Analiz Meteorologicznych i Prognoz Długoterminowych, w Centrum Modelowania Meteorologicznego. Wykorzystywane modele do opracowania prognoz długoterminowych są rozwijane na potrzeby zadań państwowej służby hydrologiczno-meteorologicznej. Aktualnie wykonywane są operacyjnie następujące prognozy długoterminowe:

- prognozy pogody dla Polski Centralnej i stanu wody na środkowej Wiśle oraz dla Małopolski i Podkarpacia (wykonywanej co dekadę na okres 3 dekad);
- prognoza ogólnego charakteru pogody opracowana dla wybranych miejscowości w dorzeczu Wisły i Odry (wykonywanej raz w miesiącu na okres od 21 dnia miesiąca bieżącego do 20 dnia miesiąca następnego);
- orientacyjna probabilistyczna prognoza pogody dla 8 miast na podstawie modelu IMGW-TWS (wykonywana codziennie);
- prognoza długoterminowa z modelu ECMWF na 5 tygodni (wykonywana dwa razy w tygodniu);
- eksperymentalna prognoza długoterminowa temperatury i opadu na 4 miesiące (wykonywana raz w miesiącu)

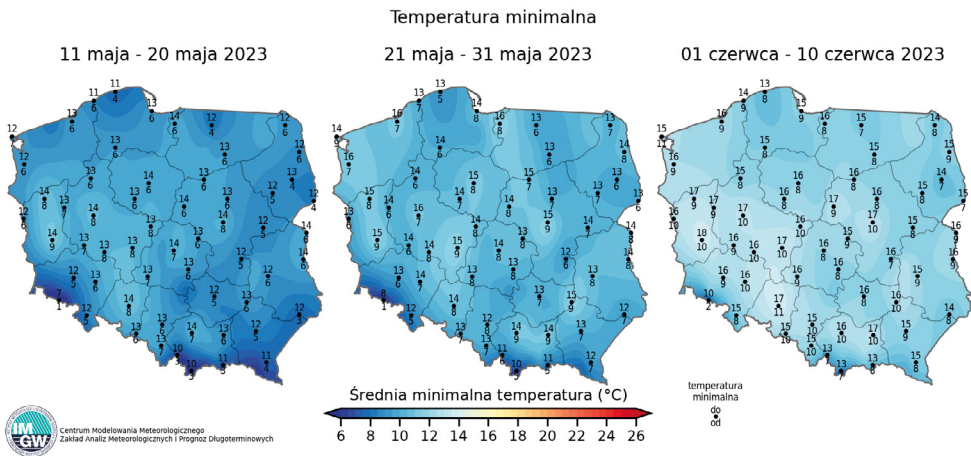
Orientacyjna prognoza pogody na podstawie modelu TWS (IMGW-TWS)

Jest autorskim numeryczno-statystycznym modelem dekadowych prognoz meteorologicznych warunków termicznych i opadowych dla wybranych stacji meteorologicznych IMGW-PIB. Opiera się na zaawansowanych metodach logiki rozmytej. Do obliczeń używane są dane z reanaliz NCEP/NCAR, modelu GFS 1° i ze stacji meteorologicznych. Model pozwala prognozować zakresy minimalnej i maksymalnej temperatury powietrza, liczbę dni z opadem i liczbę dni z opadem zawierającym śnieg, jakie powinny wystąpić w każdej z trzech kolejnych dekad, w okresach prognostycznych zaczynających się od 1., 11. i 21. dnia miesiąca. Prognoza jest wykonywana dla 87 stacji meteorologicznych w Polsce.

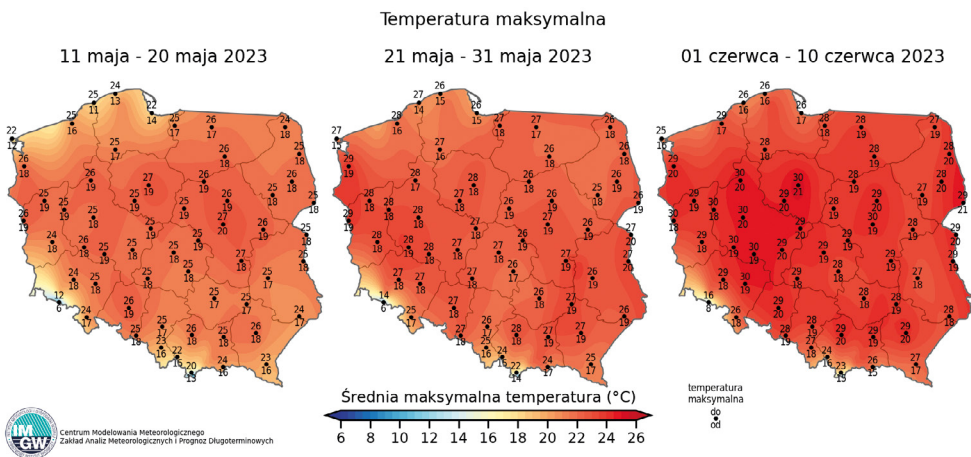
Model TWS funkcjonuje w kilku wersjach zależnych od opracowywanej prognozy:

- Prognozy pogody dla Polski Centralnej i stanu wody na środkowej Wiśle oraz dla Małopolski i Podkarpacia na podstawie modelu TWS_8 – dla 8 miast (Warszawa, Kraków, Rzeszów, Wrocław, Poznań, Szczecin, Gdańsk, Suwałki).

- Prognoza ogólnego charakteru pogody opracowana dla wybranych miejscowości w dorzeczu Wisły i Odry na podstawie modelu TWS_RZGW:
 - PROGN_RZGW_WISLA – prognoza dla 4 miast dorzecza Wisły dla RZGW GDAŃSK (Toruń, Gdańsk, Chojnice, Płock);
 - PROGN_RZGW_ODRA – prognoza dla 3 miast dorzecza Odry dla RZGW SZCZECIN (Wrocław, Szczecin, Słubice).
- Prognoza pogody dla 87 stacji na podstawie modelu TWS_GÓRY.



Prognoza temperatury minimalnej dla 3 dekad dla wybranych miast w Polsce.



Prognoza temperatury maksymalnej dla 3 dekad dla wybranych miast w Polsce.

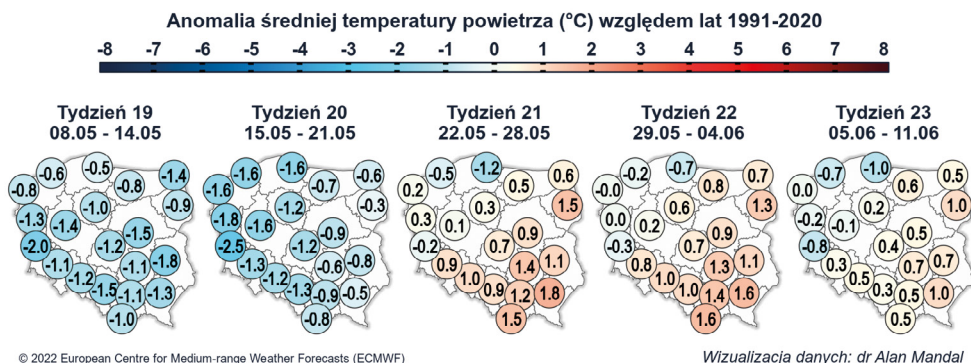
Prognoza długoterminowa na podstawie modelu ECMWF na 5 tygodni

Jest produktem opracowanym i rozwijanym w IMGW-PIB. Opiera się ona na 46-dniowych prognozach parametrów meteorologicznych dystrybuowanych przez ECMWF jako model ENS (Ensemble Forecast System).

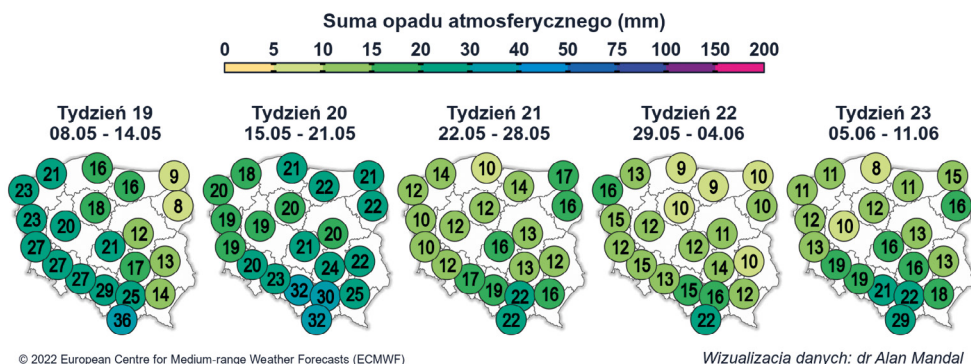
Opracowywane prognozy obejmują następujące parametry:

- Dla temperatury powietrza:
 - średnia dobowa temperatura tygodnia w danym tygodniu (AvgT);
 - prawdopodobieństwo, że średnia dobowa temperatura w danym tygodniu będzie poniżej 0°C (%AvgT0);
 - prawdopodobieństwo, że średnia dobowa temperatura w danym tygodniu będzie powyżej 20°C (%AvgT20);
 - anomalia w stosunku do średniej temperatury z okresu 1991-2020 (AvgAnom);
 - anomalia w stosunku do średniej temperatury z okresu 2004-2020 (AvgAnom);
 - prawdopodobieństwo przekroczenia normy z lat 2004-2020 (%Avg);
 - maksymalna temperatura prognozowana w danym tygodniu (MaxT);
 - średnia maksymalna temperatura prognozowana w danym tygodniu (AvgMaxT);
 - prawdopodobieństwo, że maksymalna temperatura w danym tygodniu przekroczy 30°C (%MaxT30);
 - anomalia średniej maksymalnej temperatury w stosunku do normy z lat 2004-2020 (MaxTAnom);
 - prawdopodobieństwo, że średnia maksymalna temperatura będzie większa od normy z lat 2004-2020 (%MaxT);
 - minimalna temperatura prognozowana w danym tygodniu (MinT);
 - średnia minimalna temperatura prognozowana w danym tygodniu (AvgMinT);
 - prawdopodobieństwo, że średnia minimalna temperatura będzie mniejsza od normy z lat 2004-2020 (%MinT0);
 - anomalia średniej minimalnej temperatury w stosunku do normy z lat 2004-2020 (MinTAnom);
 - prawdopodobieństwo, że średnia minimalna temperatura będzie niższa od normy z lat 2004-2020 (%MinT).
- Dla opadu atmosferycznego:
 - opad całkowity w danym tygodniu (AcuP);
 - prawdopodobieństwo, że opad całkowity w danym tygodniu będzie wyższy niż 10 mm (%AcuP10);
 - prawdopodobieństwo, że opad całkowity w danym tygodniu będzie wyższy niż 20 mm (%AcuP20);
 - prawdopodobieństwo, że opad całkowity w danym tygodniu będzie wyższy niż 50 mm (%AcuP50);
 - prawdopodobieństwo, że opad całkowity w danym tygodniu będzie wyższy niż 100 mm (%AcuP100);

- średnia dobowa suma opadów w danym tygodniu (AvgP);
- prawdopodobieństwo, że średnia dobowa opadu w danym tygodniu będzie wyższa niż 1 mm (%AvgP1);
- prawdopodobieństwo, że średnia dobowa opadu w danym tygodniu będzie wyższa niż 3 mm (%AvgP3);
- anomalia sumy opadu (%) względem lat 1991-2020 (PrecAnom).



Prognoza anomalii średniej temperatury powietrza względem lat 1991-2020 dla wybranych miast w Polsce na 5 tygodni.



Prognoza sumy opadu atmosferycznego (mm) dla wybranych miast w Polsce.

Eksperymentalna prognoza długoterminowa temperatury i opadu na 4 miesiące

To prognoza długoterminowa miesięczna dla Polski dla 4 kolejnych miesięcy kalendarzowych, począwszy od miesiąca następnego po tym, w którym publikowana jest prognoza. Do opracowania prognozy IMGW-PIB wykorzystuje własne autorskie modele IMGW-Reg i IMGW-Bayes oraz wyniki modelu CFS (The NCEP Climate Forecast System) oraz ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

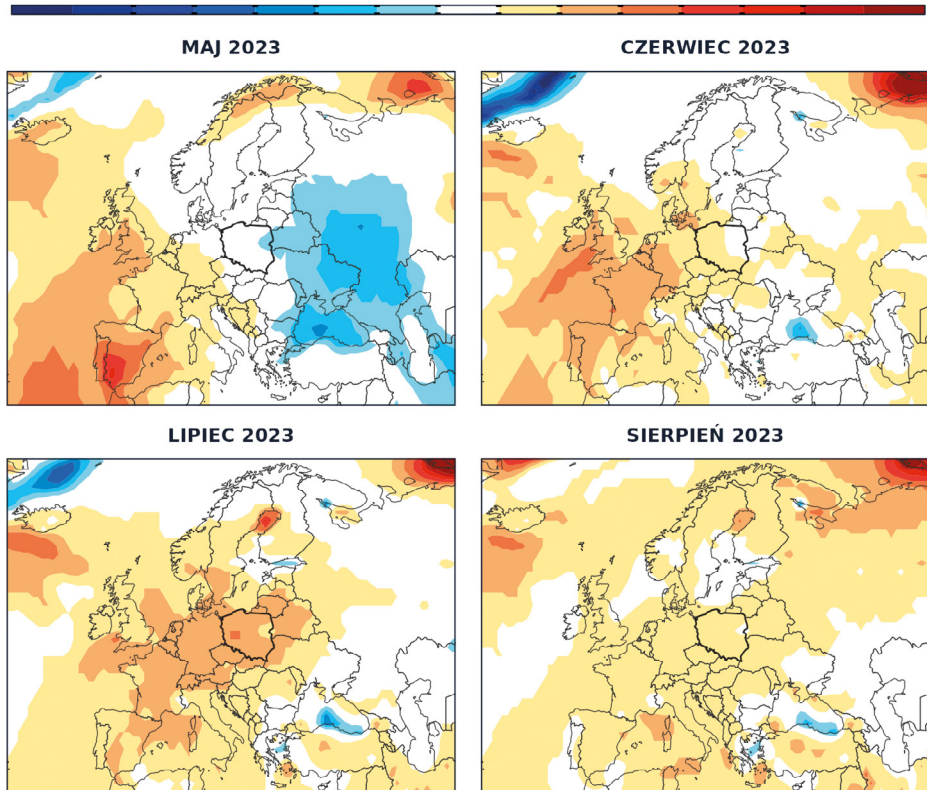


Centrum
Modelowania
Meteorologicznego

Model: **CFS E3**
Start: 08.05.2023
Norma: 1991-2020

Anomalia średniej temperatury (°C)

-3.5 -3.0 -2.5 -2.0 -1.5 -1.0 -0.5 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5



Wizualizacja: dr Alan Mandal

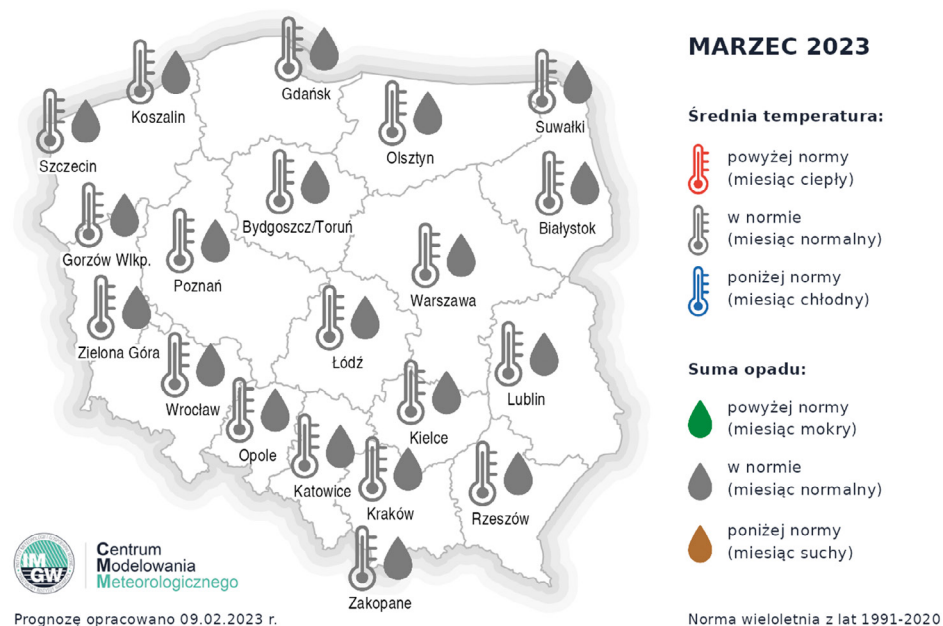
Prognoza anomalii średniej temperatury na 4 miesiące wg modelu CFS E3.

IMGW-Reg jest numeryczno-statystycznym modelem prognostycznym, opracowanym i rozwijanym w IMGW-PIB. Prognozowana jest wartość średniej miesięcznej temperatury powietrza i sumy miesięcznej opadów wraz z odchyleniem standardowym (+/-) prognozowanej wartości. Model wykorzystuje metody regresji cząstkowej, za predyktory przyjmując

pola kwantyli wybranych zmiennych meteorologicznych z reanaliz NCEP/NCAR. Model uruchamiany jest raz w miesiącu i generuje prognozę dla 6 najbliższych miesięcy. Prognoza jest liczona dla 20 wybranych miast w Polsce.

IMGW-Bayes jest statystycznym modelem prognostycznym, opracowanym i rozwijanym w IMGW. Model opiera się na teorii prawdopodobieństwa i twierdzeniu Thomasa Bayesa (naiwny klasyfikator Bayesa). Prognozowane jest prawdopodobieństwo wystąpienia miesięcznej średniej temperatury powietrza i 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 górnej granicy normy). Do obliczeń wykorzystywane są dane z reanaliz NCEP/NCAR, które dotyczą wybranych pól meteorologicznych z różnych poziomów troposfery i stratosfery. Model uruchamiany jest raz w miesiącu i generuje prognozę do maksymalnie 5 miesięcy w przód. Prognoza jest wykonywana dla 20 stacji meteorologicznych w Polsce.

W IMGW-PIB, podobnie jak w innych ośrodkach meteorologicznych na całym świecie, średnią miesięczną temperaturę powietrza/miesięczną sumę opadów atmosferycznych dla danego miesiąca prognozuje się w odniesieniu do normy wieloletniej przyjmowanej za okres 1991-2020. Wartości średniej miesięcznej temperatury/miesięcznej sumy opadów z tego 30-letniego okresu sortuje się od najniższej do najwyższej: 10 najniższych wartości wyznacza średnią temperaturę/sumę opadów w klasie „poniżej normy”, 10 środkowych „w normie”, a 10 najwyższych „powyżej normy”.



Prognoza średniej miesięcznej temperatury powietrza i miesięcznej sumy opadów atmosferycznych na marzec 2023 roku dla wybranych miast w Polsce.

ANEKS 6. ZASTOSOWANIA SPECJALNE NWP

Adam Jaczewski, Joanna Wieczorek, Karina Kózka, Tomasz Strzyżewski

Numeryczne modele pogody są uniwersalnymi narzędziami prognostycznymi, a ich wyniki wszechstronnie opisują fizyczny stan atmosfery (w tym rozkład temperatury, wilgotności, wiatru, ciśnienia i opadów). Pozwala to na przygotowywanie różnorodnych prognoz specjalistycznych, w których wyniki modelu służą do obliczania kolejnych parametrów istotnych w różnych dziedzinach życia i gospodarki, jak np. w prognozach bio- i agrometeorologicznych. Wyniki modeli pogody mogą też zasilać inne zaawansowane modele procesów fizycznych, jak np. modele hydrologiczne, a w niektórych zastosowaniach – jak w prognozach pożarów – także same modele pogody mogą uwzględniać efekty fizyczne tych dodatkowych procesów. W niniejszym opracowaniu przedstawiono, jak tego typu zastosowania numerycznych modeli pogody są rozwijane i implementowane w Centrum Modelowania Meteorologicznego IMGW-PIB, a także omówiono prace przygotowujące wdrożenie modeli o podwyższonych rozdzielczościach w obszarach zurbanizowanych.

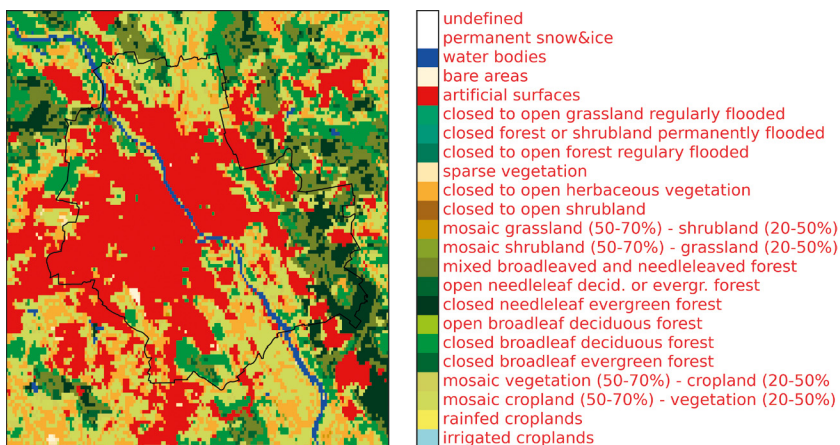
NMP dla obszarów zurbanizowanych

Uwzględnienie efektów zabudowy miejskiej jest ważne z wielu powodów: poczynając od przewidywania interakcji między pogodą i klimatem a aglomeracją miejską, poprzez zrozumienie fizycznych procesów meteorologii miejskiej i ich wpływu na bilans cieplny (np. zjawiska miejskiej wyspy ciepła). Pozwala także na dokładniejsze prognozy warunków meteorologicznych, jakości powietrza oraz analizę działań adaptacyjnych i dostosowawczych do zmiany klimatu. Dane opadowe z modeli meteorologicznych zasilać mogą także modele hydrologiczne typu opad–odpływ przewidujące wystąpienie warunków powodziowych w obszarach miejskich. Dodatkowo, modelowanie warunków meteorologicznych w mieście może stanowić wsparcie dla ruchu bezzałogowych statków powietrznych i konieczności zapewnienia osłony meteorologicznej – zarówno podstawowych parametrów meteorologicznych, jak i turbulencji generowanej przez budynki oraz oblodzenia. Szczególnie istotne jest to ze względu na większą czułość takich statków na niebezpieczne warunki meteorologiczne i większe skutki awarii w obszarze zurbanizowanym

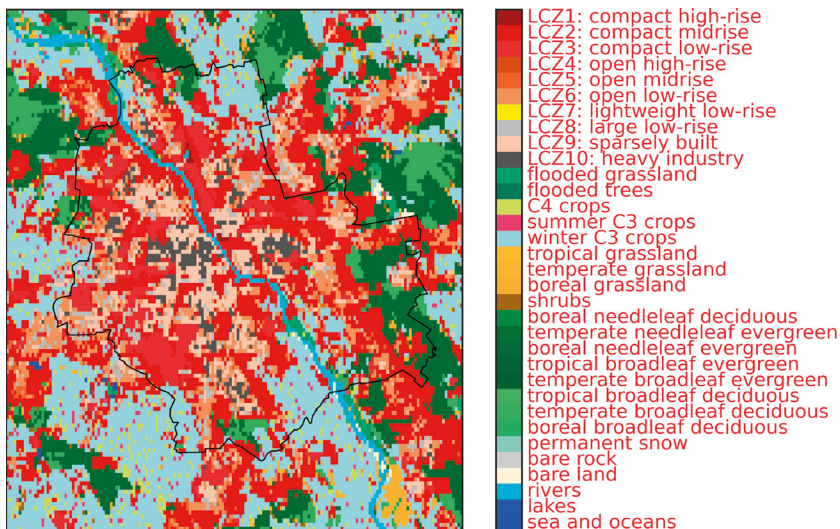
W tym celu, równoległe ze zwiększeniem rozdzielczości NMP, wymagane jest wykorzystanie odpowiednich wysokorozdzielczych danych geomorfologicznych niezbędnych do uruchomienia parametryzacji procesów meteorologicznych zachodzących w skali budynków i ulic w numerycznych modelach pogody działających w IMGW-PIB oraz ich implementację w kodach systemów modelowania.

W obecnie działających prognozach operacyjnych obszary miejskie nie są zróżnicowane w danych użytkownika powierzchni, lecz przyporządkowane tylko do jednej typu. W celu zróżnicowania obszarów miejskich proponuje się wykorzystanie idei stref klimatu lokalnego (LCZ, ang. Local Climate Zones). Jej zastosowanie w modelach wymaga jednak implementacji nowego zbioru pokrycia terenu uwzględniającego takie klasy oraz ustalenie wartości parametrów mikrofizycznych dla każdej takiej klasy – udział zabudowy, wysokość zabudowy, stosunek

wysokości do szerokości kanionu ulicznego, przewodnictwo cieplne, pojemność cieplna, albedo, emisyjność, nieprzepuszczalność podłoża i antropogeniczny strumień ciepła. Obecnie w systemach NMP konsorcjum COSMO wykorzystuje się dane użytkowania powierzchni GLOBCOVER200. Jednym z zadań priorytowych konsorcjum jest implementacja parametryzacji miejskiej oraz danych użytkowania terenu ECOCLIMAP-SG zawierających klasy LCZ, co pozwoli na wierniejsze odwzorowanie warunków meteorologicznych w obszarach zurbanizowanych. Istotnym aspektem jest również aktualność takich danych ze względu na postępujące antropogeniczne zmiany w użytkowaniu terenu, szczególnie w miastach.



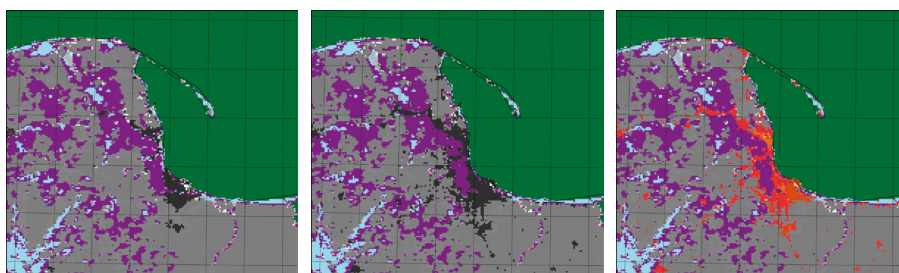
Pole użytkowania terenu w obszarze miasta Warszawy
na podstawie danych GLOBCOVER2009.



Pole użytkowania terenu w obszarze miasta Warszawy
na podstawie danych ECOCLIMAP-SG.

Podobne podejście zaimplementowano w parametryzacji miejskiej modelu WRF (Salamanca 2010), z tym, że modyfikacji poddaje się oryginalne pole użytkowania terenu poprzez włączenie klas LCZ do obszarów zurbanizowanych, wykorzystując do tego dane WUDAPT (Demuzere 2019).

Należy jednak mieć na uwadze, że klasyfikacja LCZ cechuje się niepewnością związaną z samą metodą generalizacji, niereprezentatywności warunków lokalnych, dyskretyzacji zbioru wynikowego oraz podpróbkowania do siatki NMP. Z tego powodu obecnie możliwe jest wykonywanie prognoz z wykorzystaniem NMP i danych LCZ jedynie w domenach obejmujących pojedyncze aglomeracje.



Implementacja klas LCZ w modelu WRF-METEOPG w domenie Trójmiasta; po lewej: oryginalne dane użytkowania powierzchni (czarne: obszary zurbanizowane); środek: obszary zurbanizowane w danych WUDAPT (czarny: obszary zurbanizowane – wszystkie klasy LCZ); po prawej: zróżnicowanie LCZ w obszarach zurbanizowanych.

Prognozy biometeorologiczne

Zadaniem współczesnych służb meteorologicznych jest pełnienie kompleksowej osłony ludności, mającej na celu również wspomaganie działalności innych służb oraz dostarczanie użytkownikom szczegółowej informacji meteorologicznej. Stąd, poza prognozami elementów meteorologicznych i wydawaniem komunikatów oraz ostrzeżeń o występowaniu bądź prognozie niebezpiecznych zjawisk pogodowych, istotne jest również przygotowanie opracowań o charakterze ocen potencjalnego wpływu warunków meteorologicznych na organizm człowieka, tj. specjalistycznych biometeorologicznych prognoz impaktowych. Mają one praktyczne zastosowanie, ułatwiają bowiem podejmowanie codziennych decyzji dotyczących aktywności w terenie otwartym. Mogą okazać się pomocne w niwelowaniu potencjalnie niekorzystnego oddziaływania pogody na organizm, a przede wszystkim w planowaniu i wspomaganie środowiskowej adaptacji użytkownika. Zwłaszcza w perspektywie zmiany klimatu, która wymusza poszukiwanie optymalnych strategii radzenia sobie z uciążliwymi warunkami meteorologicznymi.

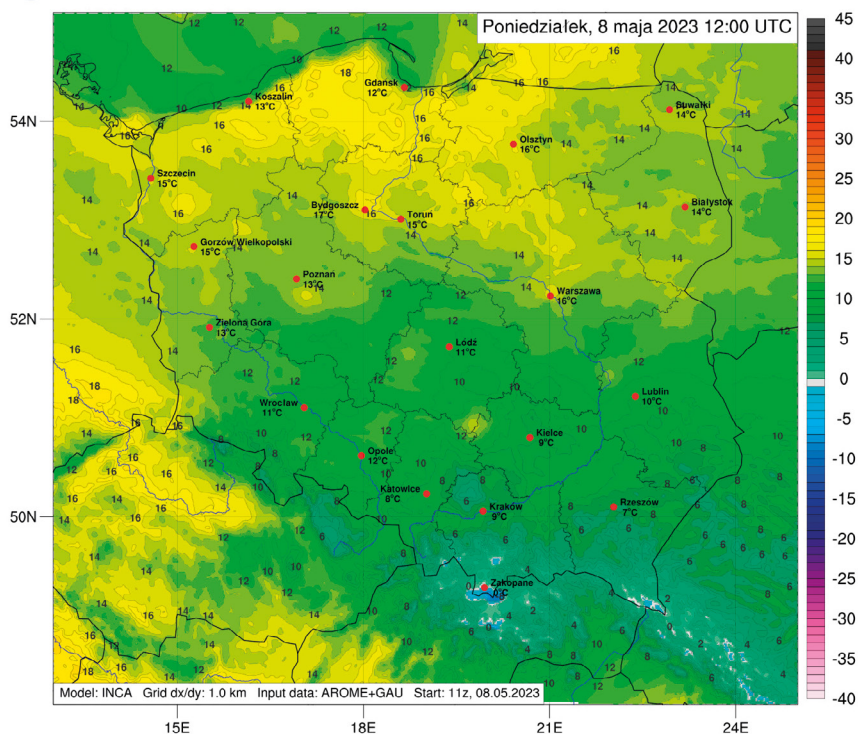
Jedną z podstawowych prognoz, uwzględniającą częściową ocenę środowiska termicznego w prognozowanej sytuacji synoptycznej, jest prognoza temperatury odczuwalnej (ang. feels like temperature). Uwzględnia ona łączny wpływ takich elementów meteorologicznych,

jak temperatura i wilgotności powietrza oraz prędkość wiatru w kształtowaniu potencjalnego efektu biologicznego i subiektywnego odczucia termicznego. W IMGW-PIB prognoza prze-strzenna temperatury odczuwalnej (w cieniu) dla mieszkańców Polski wizualizowana jest obecnie z wykorzystaniem modelu ultrakrótkoterminowego INCA-PL2 oraz średnioterminowego COSMO 2,8 km – wraz z prawdopodobieństwem przekroczenia progów: -20 , -10 , -5 , 0 , 5 , 10 , 20 i 30°C temperatury odczuwalnej. W ramach rozwoju produktu wprowadzana będzie również wizualizacja prognozy temperatury odczuwalnej z modeli krótkoterminowych ALARO, AROME, WRF METEOPG oraz średnioterminowych WRF ICON i WRF GFS.

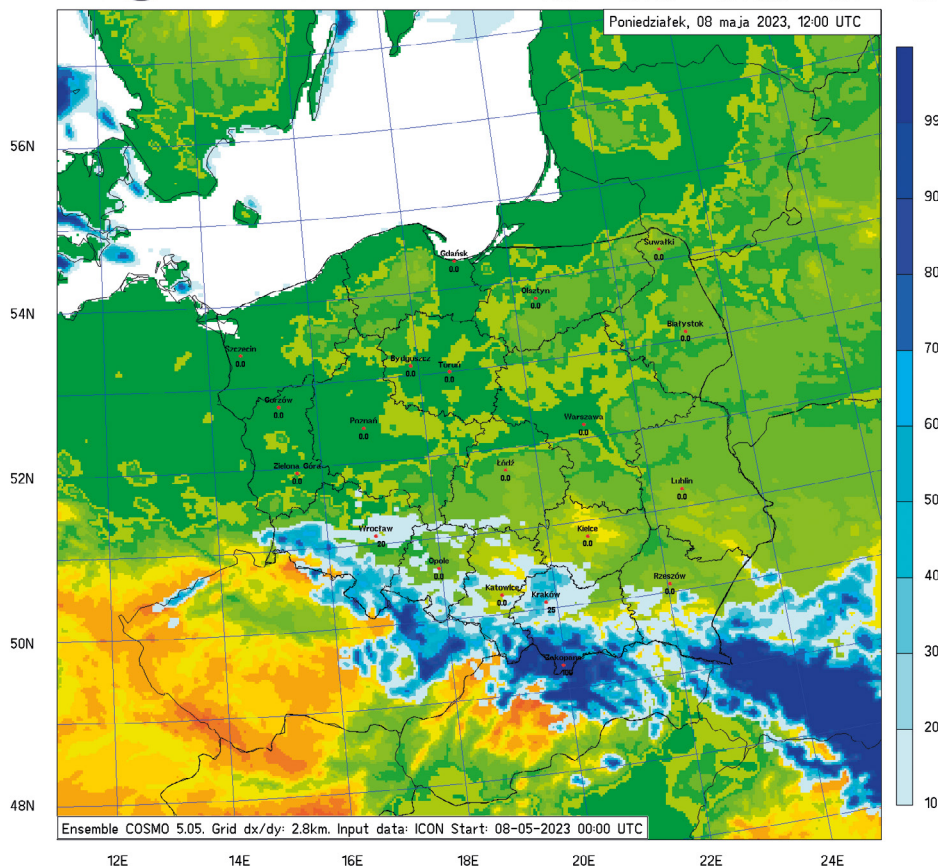


Centrum
Modelowania
Meteorologicznego

Temperatura odczuwalna (w cieniu) [$^{\circ}\text{C}$]



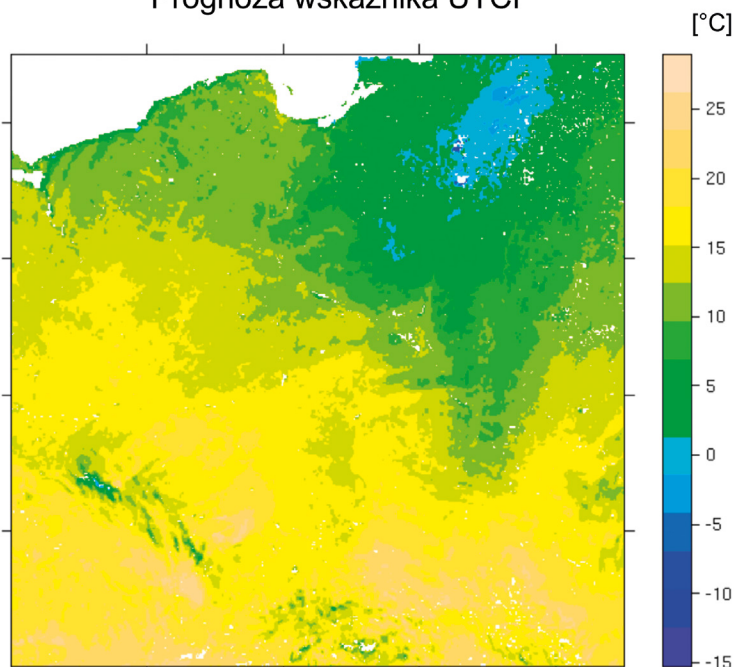
Przykład wizualizacji prognozy temperatury odczuwalnej (w cieniu), model INCA.



Przykład wizualizacji prognozy prawdopodobieństwa wystąpienia temperatury odczuwalnej poniżej wartości 5°C, model COSMO 2,8 km.

Informacji o kompleksowym oddziaływaniu warunków meteorologicznych na układ fizjologicznej termoregulacji ciała człowieka dostarcza wskaźnik Universal Thermal Climate Index (UTCI). Interpretacja wartości wskaźnika pozwala na ocenę występowania ewentualnego stresu termicznego i prognozę poziomu zagrożenia wystąpieniem wychłodzenia lub przegrzania organizmu. Trwają prace nad opracowaniem i wizualizacją prognoz UTCI w skali przestrzennej Polski, z rozdzielczością terenową 2,5 km i horyzontem czasowym prognoz +30 h.

Prognoza wskaźnika UTCI



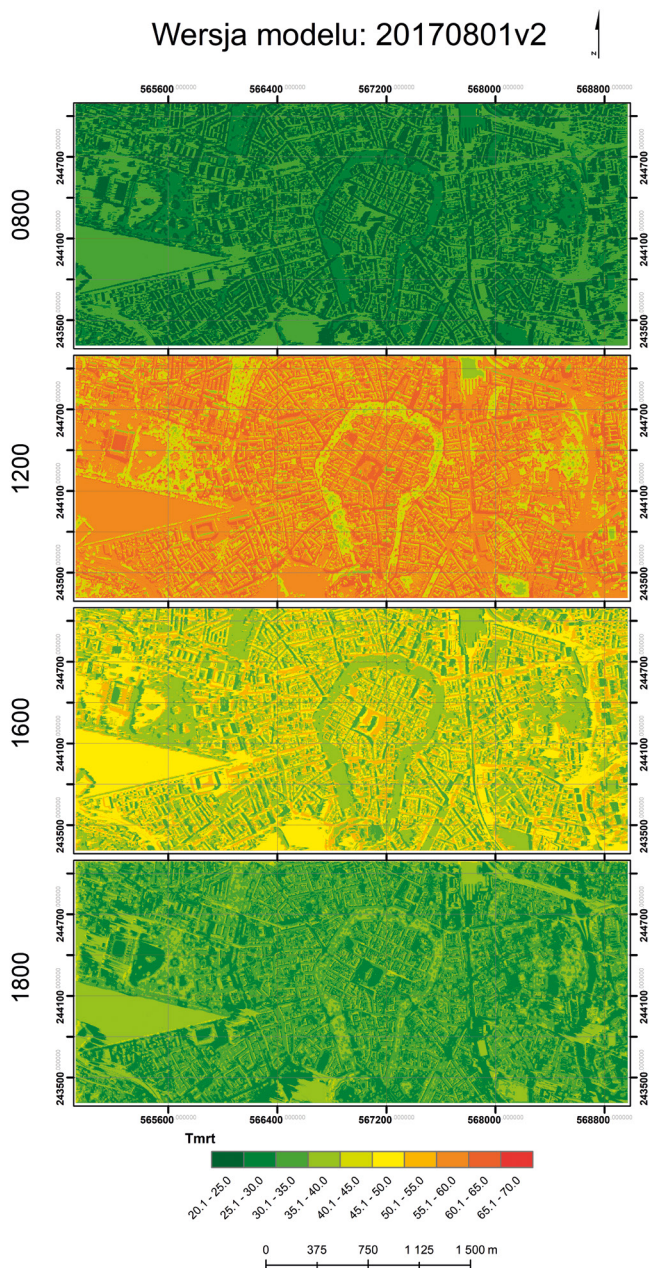
Rozkład przestrzenny wartości wskaźnika UTCI w dniu 22.03.2023_12UTC, model AROME.

Równoległe do w/w działań prowadzone są prace zmierzające do opracowania prognoz wskaźnika UTCI z parametryzacją w szczegółowej skali miejskiej, tj. z uwzględnieniem danych o rodzaju powierzchni i pokryciu terenu z rozdzielczością szczegółową 1 m i downscalingiem danych z modeli meteorologicznych w rozdzielczości poniżej 0,5 km. Pilotażowo takie prognozy są przygotowywane dla obszaru Krakowa, a docelowo mają dotyczyć kilku większych aglomeracji miejskich w Polsce.

Zadanie to wpisuje się w cele i kierunki działań zawarte w przyjętym przez Rząd RP *Strategicznym planie adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu do roku 2020 z perspektywą do 2030 r.* (SPA 2020). Obszary miejskie wykazują sektor zdrowia publicznego jako najbardziej wrażliwy i zagrożony zmianami klimatycznymi (wg Projektu *Miejskich planów adaptacji*). Ludność obszarów miejskich jest bowiem szczególnie narażona na występowanie niekorzystnych zdarzeń meteorologicznych i kumulację ich negatywnych efektów, szczególnie związanych z występowaniem fali upałów. Wynika to z większej koncentracji mieszkańców na ograniczonym obszarze, występowania dodatkowych antropogenicznych źródeł ciepła oraz struktur o dużym udziale powierzchni sztucznych (o niskim albedo) w bilansie cieplnym powierzchni czynnych.

Perspektywa zmiany klimatu otwiera nowe wyzwania, ale stawia również wymagania wobec służb hydrologiczno-meteorologicznych (NWS) w zakresie wsparcia miast w sku-

tecznym rozpoznawaniu i informowaniu, jak również rekomendowaniu działań adaptacyjnych i mitygacyjnych, zmierzających do ograniczenia negatywnych skutków ekstremalnych zjawisk meteorologicznych.



Przykład wstępnych wyników modelowania średniej temperatury promieniowania w skali Krakowa.

WRF S-Fire

Ze względu na zmiany klimatu i związane z nimi dłuższe i częstsze susze, wzrasta ryzyko wystąpienia pożarów lasów. Dlatego IMGW-PIB wdrożył system prognozowania pogody pożarowej oraz kontynuuje prace nad kolejnymi produktami, które mogą ocenić ryzyko pożarów oraz aktywnie wspomagać pracę służb w walce z nimi. Jednym z tych działań jest wdrożenie modelu WRF-Sfire. Jest to dodatkowy moduł fizyki implementowany do modelu WRF-ARW, który umożliwia modelowanie rozwoju pożaru na obszarach naturalnych (lasy, pola, łąki). W swoim działaniu uwzględnia on elementy środowiska, takie jak nachylenie terenu, właściwości ściółki, warunki atmosferyczne. Model WRF S-fire uwzględnia też dwukierunkowe sprzężenia zwrotne z atmosferą w związku z mikroklimatem jaki powstaje w wyniku pożaru oraz transferem ciepła jawnego i utajonego. Pożary terenów leśnych, pól i łąk wynikają ze złożonych interakcji pomiędzy wieloma procesami fizycznymi, w tym dynamiką i mikrofizyką atmosfery, spalaniem, hydrologią i biosferą. Mimo bardzo sprawnego systemu przeciwpożarowego w polskich lasach, w kontekście zmiany klimatu, wysokorozdzielcze, sprzężone z atmosferą modele rozprzestrzeniania się ognia mogą w najbliższych latach być niezbędne do przewidywania i oceny ryzyka oraz zarządzania służbami kryzysowymi. Implementacja oraz poprawa tego typu modeli wymaga zaangażowania naukowców i służb. W ostatnich latach można zaobserwować znaczne postępy w modelowaniu pożarów, dzięki szerszemu dostępowi do platform obliczeniowych (takich jak CI TASK), coraz doskonalszym modelom pogody oraz poprawie w gromadzeniu i asymilacji danych. W przypadku WRF-Sfire wg specjalistów pracujących w NCAR postępy dokonują się w wieloskalowym, dokładnym śledzeniu frontu pożaru, dostępu do danych dotyczących wilgotności ściółki na różnych poziomach oraz modelowaniu dyspersji ognia i dymu.

WRF-Hydro

Procesy hydrologiczne zachodzące w zlewniach, mają ogromne znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania różnych dziedzin gospodarki. Odpowiednie zrozumienie przebiegu i współzależności tych procesów stanowi podstawę do formułowania funkcji matematycznych służących do ich opisu oraz umożliwia prawidłową identyfikację parametrów składowych modelu hydrologicznego. Wyniki matematycznego modelowania procesów hydrologicznych mają znaczenie dla gospodarowania wodą, żeglugi śródlądowej, podejmowania prawidłowych decyzji planistycznych, ochrony przeciwpowodziowej czy prognozowania ostatnio bardzo problematycznego zjawiska tzw. powodzi błyskawicznych (ang. Flash Floods). Większość matematycznych modeli hydrologicznych skupia się jedynie na wybranych elementach obiegu wody na Ziemi, takich jak np. przepływ w korytach otwartych czy transformacji opadu w odpływ.

Postępujący rozwój modelowania meteorologicznego dostarcza coraz precyzyjniejszych danych wysokiej rozdzielczości, które mogą stanowić dane wejściowe do modelu hydrologicznego. Jak wiadomo cykl hydrologiczny łączy w sobie szereg procesów zachodzących w atmosferze, biosferze i litosferze, dlatego zbudowanie numerycznego modelu hydrolo-

gicznego w oparciu o wysokorozdzielcze dane meteorologiczne pozwoli dokładniej odzwierciedlić ten złożony proces. Dlatego też IMGW-PIB pracuje nad implementacją modelu WRF-Hydro (The Weather Research and Forecasting Model Hydrological modeling system) w wariacie, dla którego dane wejściowe stanowią wyniki wysokorozdzielczego modelu WRF-METEOPG. Natomiast w przyszłości wyniki modelu hydrologicznego będą stanowiły dane wejściowe do kolejnych obliczeń modelu meteorologicznego, co umożliwi poprawę początkowych parametrów modelu oraz docelowo może się przyczynić do poprawy jakości prognoz, zwłaszcza na poziomie lokalnym.

Większość powszechnie używanych modeli hydrologicznych używanych do celów operacyjnych w IMGW-PIB bazuje na danych punktowych. Natomiast model WRF-Hydro wyróżnia się na tle innych modeli hydrologicznych tym, że dane wejściowe oraz wyjściowe są polami powierzchniowymi (w formacie plików netcdf). W wyniku przeprowadzenia jednej symulacji modelu otrzymujemy pola wyjściowe dające zbiór parametrów zlewni w obszarze domeny obliczeniowej.

Dane prognostyczne z modelu WRF-Hydro mogą służyć do:

- opracowania prognoz hydrologicznych;
- szacowania bilansu wodnego czy zagrożenia suszą zarówno glebową, jak i hydrologiczną;
- planowania gospodarowania zasobami wodnymi, żeglugi śródlądowej, pracy elektrowni wodnych czy ochrony przeciwpowodziowej.

LITERATURA

1. Demuzere M., Bechtel B., Middel A., Mills G., 2019, Mapping Europe into local climate zones, PLOS ONE, 14 (4), DOI: 10.1371/journal.pone.0214474.
2. ECOCLIMAP-SG, 2023, Overview – ECOCLIMAP-SG – CNRM Open Source Site, dostępne online <https://opensource.umr-cnrm.fr/projects/ecoclimap-sg> (07.06.2023).
3. GLOBCOVER2009, 2023, GlobCover Land Cover Maps, dostępne online http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php (07.06.2023).
4. Salamanca F., Krpo A., Martilli A., Clappier A., 2010, A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations – part I. Formulation, verification, and sensitivity analysis of the model, Theoretical and Applied Climatology, 99 (3), 331-344, DOI: 10.1007/s00704-009-0142-9.

ANEKS 7. PRODUKTY MODELI NWP, NOWCASTINGOWYCH I SPECJALISTYCZNYCH

Wszystkie modele NWP generują parametry meteorologiczne oparte na zmiennych prognostycznych i diagnostycznych modeli oraz inne dedykowane produkty powstałe przy zaawansowanej analizie powyższych parametrów. Otrzymane wyniki stanowią wsparcie dla różnych zespołów IMGW-PIB, w szczególności synoptyków, którzy w procesie prognostycznym zapewniając osłonę hydro-meteorologiczną kraju. Zależnie od modelu i jego zastosowań typowe produkty można skategoryzować w dwóch głównych grupach – prognoz deterministycznych oraz wiązkowych.

Modele generują wiele różnych zestawów danych, produktów i pól meteorologicznych, zależnie od horyzontu i kroku prognozy, częstości uruchamiania modelu oraz zastosowania. Typowymi formatami danych wykorzystywanymi przy tworzeniu produktów są GRIB1, GRIB2, HDF oraz NetCDF. Niektóre modele stosują inne natywne formaty, poniższa tabela podsumowuje te informacje.

MODELE/FORMAT	GRIB1	GRIB2	NetCDF	HDF5
ALARO/AROME	X	X		
COSMO	X		X	
ICON-LAM		X	X	
WRF	X	X	X	
INCA-PL				X
SCENE				X

Prognozy deterministyczne NWP

Główne parametry prognostyczne modeli NWP zapisywane są zwykle jako zmienne trójwymiarowe na siatkach obliczeniowych. W przypadku modelu COSMO jest to siatka hybrydowa.

Zmienne prognostyczne 3D:

- P – ciśnienie powietrza [hPa].
- U – składowa horyzontalna prędkości [m/s].
- V – składowa merydionalna prędkości [m/s].
- W – składowa pionowa prędkości [m/s].
- T – temperatura powietrza [K] lub [C].
- QV – wilgotność właściwa powietrza [kg/kg].
- QC – stosunek zmieszania wody chmurowej.
- QR – stosunek zmieszania wody ciekłej opadowej [kg/kg].
- QI – stosunek zmieszania śniegu [kg/kg].
- QG – stosunek zmieszania krupy śnieżnej [kg/kg].
- QH – stosunek zmieszania gradu [kg/kg].
- G – geopotencjał.

Parametry diagnostyczne 2D:

- Ciśnienie powietrza na poziomie morza.
- Prędkość i kierunek wiatru na 10 m (na wysokości wiatromierza).
- Temperatura powietrza na wysokości 2 m (na wysokości klatki meteorologicznej).
- Wilgotność względna na wysokości 2 m (klatki meteorologicznej).
- Porywy wiatru na 10 m: dynamiczny i konwekcyjny².
- Prędkość i kierunek wiatru oraz geopotencjał na wysokości 300 hPa oraz 850 hPa.
- Intensywność opadu (łącznie śnieg i deszcz) za 3 godziny.
- Intensywność opadu (łącznie śnieg i deszcz) prognozowany obraz radarowy.
- Intensywność opadu śniegu za 3 godziny.
- Suma opadów (łącznie deszczu i śniegu) za okres 3 godzin oraz za okres 1 godziny.
- Suma opadu konwekcyjnego za okres 3 godzin.
- Suma opadu: za 24 godziny, dzienna, nocna.
- Całkowita zawartość wody w chmurach.
- Zachmurzenie ogólne (CT) oraz zachmurzenie na piętrach: CL, CM, CH.
- Wierzchołki i podstawy chmur konwekcyjnych (dla płytkiej konwekcji).
- Maksymalna prędkość wiatru za 6 godzin oraz 24 godziny.
- Temperatura minimalna, maksymalna i średnia temperatura powietrza za 24 godziny.
- Minimalna i minimalna temperatura powietrza za 12 godzin.
- Temperatura powierzchni.
- Temperatura punktu rosy na wysokości 2 m nad gruntem.
- Różnica między temperaturą powietrza a temperaturą punktu rosy.
- Dywergencja pola prędkości na wysokości 10 m.
- Widzialność pozioma.

Parametry konwekcyjne do analizy synoptycznej:

- Wysokość izotermii zero.
- Wskaźniki konwekcyjne (np. CAPE, CIN, K-index, TT-index, L-index, SWEAT, SRH3km, BRN, UTI, EHI1km, EHI3km).
- Temperatura powietrza z izohipsami na wysokości 300, 500, 700, 850, 950, 1000 hPa.
- Temperatura powietrza na poziomie równowagi.
- Wysokość poziomu równowagi.
- Wysokość swobodnej konwekcji LFC.
- Wysokość poziomu kondensacji z uniesienia LCL.
- Różnica wysokości poziomów LFC i LCL.
- Konwekcyjny poziom kondensacji CCL.
- Wysokość izotermii 0°C, -5°C, -10°C, -20°C temperatury termometru zwilżonego.
- Wysokość izotermii 0°C, -10°C, -20°C temperatury powietrza.

² Parametry konwekcyjne aktywne przy włączonej parametryzacji głębokiej/płytkiej konwekcji.

- Mapy topografii barycznej względnej.
- Grubość warstwy powietrza zawartej pomiędzy izotermami -10°C i 0°C .
- Gradient temperatury pomiędzy powierzchniami izobarycznymi 850 hPa i 500 hPa.
- Gradient temperatury pomiędzy powierzchniami izobarycznymi 800 hPa i 600 hPa.
- Parametry na poziomach ciśnieniowych 300, 500, 700, 850, 950, 1000 hPa: wirowość względna, dywergencja, prędkość pionowa, wilgotność względna powietrza temperatura ekwiwalentno-potencjalna, temperatura, prędkość i kierunku wiatru.
- Fog Stability Index.
- Hail Size (rozmiary gradzin).

Model WRF

Wyniki modelu WRF pochodzą z bezpośredniego zapisu zmiennych prognostycznych i zmiennych diagnostycznych, a także innych dedykowanych parametrów. Zmienne prognostyczne w modelu WRF METEOPG to:

- poziome i pionowe składowe kartezjańskie wiatru (u , v , w);
- temperatura potencjalna (θ);
- wilgotność właściwa (q_v) i zawartość wody w chmurach (q_c);
- zawartość lodu w chmurach (q_i);
- zawartość wody właściwej w deszczu (q_r), śniegu (q_s), krupie śnieżnej (q_g)
- masa kolumny suchego powietrza (μ)
- geopotencjał

Zmienne diagnostyczne 4-wymiarowe w modelu WRF METEOPG to:

- składowa wektora wiatru w kierunku wschodnim względem siatki obliczeniowej (U);
- składowa wektora wiatru w kierunku północnym względem siatki obliczeniowej (V);
- wertykalna składowa wektora wiatru (W);
- perturbacje potencjalnej temperatury powietrza (θ);
- fluktuacja ciśnienia (perturbacja ciśnienia, odchylenie ciśnienie od jego wartości średniej) (PB);
- udział wody w parze wodnej ($QVAPOR$);
- udział wody w chmurach ($QCLOUD$);
- udział wody w opadzie atmosferycznym ($QRAIN$);
- temperatura warstw gruntu zgodnie z modelem NOAHMP;
- zawartość wody w glebie zgodnie z modelem NOAHMP.

Zmienne diagnostyczne (wybrane) 3-wymiarowe w modelu WRF METEOPG to:

- składowe wektora wiatru w węzłach sieci obliczeniowej na wysokości 10 m ponad powierzchnią terenu ($U10, V10$);
- temperatura na wysokości 2 m nad powierzchnią gruntu ($T2$);
- wysokość warstwy granicznej atmosfery ($PBLH-PBL$);

- prędkość dynamiczna u^* (UST);
- skumulowany od początku symulacji opad konwekcyjny RAINC);
- skumulowany od początku symulacji całkowity opad na całą komórkę (RAINNC);
- skumulowany od początku symulacji całkowity opad śniegu i lodu na całą komórkę (SNOWNC);
- skumulowany od początku symulacji całkowity opad krupy śnieżnej na całą komórkę (GRAUPELNC);
- skumulowany od początku symulacji całkowity opad gradu na komórkę (HAILNC);
- natężenie promieniowania krótkofalowego (słonecznego) na powierzchni terenu (SWDOWN);
- natężenie promieniowania długofalowego na powierzchni terenu (GLW);
- odpływ powierzchniowy odpływ wód powierzchniowych (SFROFF);
- odpływ podpowierzchniowy wód podziemnych (UDROFF);
- równoważnik wody w śniegu (SNOW);
- grubość pokrywy śnieżnej (SNOWH);
- temperatura powierzchni gruntu (TSK).

Modele ALARO i AROME

Wyniki modeli ALARO i AROME pochodzą z bezpośredniego zapisu zmiennych prognostycznych i zmiennych diagnostycznych, a także innych dedykowanych parametrów. Zmienne prognostyczne w tych modelach to:

Zmienne prognostyczne 3D:

- P – ciśnienie powietrza [hPa].
- U – składowa horyzontalna prędkości [m/s].
- V – składowa merydionalna prędkości [m/s].
- W – składowa pionowa prędkości [m/s].
- T – temperatura powietrza [K] lub [C].
- QV – wilgotność właściwa powietrza [kg/kg].
- QC – stosunek zmieszania wody chmurowej.
- QR – stosunek zmieszania wody ciekłej opadowej [kg/kg].
- QI – stosunek zmieszania śniegu [kg/kg].
- QG – stosunek zmieszania krupy śnieżnej [kg/kg].
- QH – stosunek zmieszania gradu [kg/kg].
- G – geopotencjał.
- VOR – wirowość.
- CF – poziom zachmurzenie [%].
- DIV – dywergencja.

Parametry diagnostyczne 2D:

- Ciśnienie powietrza na poziomie morza.
- Prędkość i kierunek wiatru na 10 m (na wysokości wiatromierza).
- Temperatura powietrza na wysokości 2 m (na wysokości klatki meteorologicznej).

- Wilgotność względna na wysokości 2 m (klatki meteorologicznej).
- Porywy wiatru na 10 m: dynamiczny i konwekcyjny³.
- Intensywność opadu.
- Suma opadu.
- Typ opadu.
- Całkowita zawartość wody w chmurach.
- Zachmurzenie ogólne (CT) oraz zachmurzenie na piętrach: CL, CM, CH.
- Wierzchołki i podstawy chmur konwekcyjnych (dla płytkiej konwekcji).
- Maksymalna prędkość wiatru za 6 godzin oraz 24 godziny.
- Temperatura minimalna, maksymalna i średnia temperatura powietrza za 24 godziny.
- Minimalna i minimalna temperatura powietrza za 12 godzin.
- Temperatura powierzchni.
- Temperatura punktu rosy na wysokości 2 m nad gruntem.
- Różnica między temperaturą powietrza a temperaturą punktu rosy.
- Dywergencja pola prędkości na wysokości 10 metrów.
- Widzialność pozioma.
- CAPE.
- CIEN.
- MOCON.

Model COSMO-RUC generuje podstawowy zestaw parametrów progностycznych (U, V, W, T, P, QV) oraz zbiór parametrów konwekcyjno-burzowych.

³ Parametry konwekcyjne aktywne przy włączonej parametryzacji głębokiej/płytkiej konwekcji.

Wyniki systemów prognostycznych i modeli specjalistycznych

Prognozy wiązkowe COSMO-TLE

Prognozy COSMO-TLE są otrzymywane z modelu o rozdzielczości 2,8 km, w horyzoncie 36 godzin, z krokiem co 3 godziny, i obejmują następujące pola meteorologiczne:

TYP SATYSTYK	POLA
Podstawowe zmienne z wartościami statystycznymi po zespole: <ul style="list-style-type: none"> • średnia • rozrzut (spread) • wartość minimalna • wartość maksymalna • różnica między ekstremami: maks-min. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ciśnienie atmosferyczne na poziomie morza oraz na poziomie gruntu • Prędkość wiatru na wysokości 10 m • Temperatura powietrza i temperatura punktu rosy na 2 m • Temperatura powierzchni • Temperatura odczuwalna (ang. Heat/Cold Index) • Wilgotność względna na wysokości 2 m • Opad: deszczu, śniegu oraz opad całkowity • Zachmurzenie całkowite i piętra niskiego • CAPE_MU • LPI – Lightning Potential Index
Prawdopodobieństwo przekroczenia progów wartości pól meteorologicznych istotnych z punktu widzenia meteorologii synoptycznej (wersja zimowa DJF)	<ul style="list-style-type: none"> • Prawdopodobieństwo przekroczenia zachmurzenia ogólnego oraz piętra niskiego, powyżej: 1/8; 2/8; 3/8; 4/8; 5/8; 6/8; 7/8; 8/8 octanów • Prawdopodobieństwo przekroczenia opadu całkowitego oraz opadu śniegu powyżej: 0,1; 1; 5; 10; 20; 30; 40; 50 mm/3 h • Prawdopodobieństwo przekroczenia temperatury powierzchni poniżej progów: 0°C; -1°C; -2°C; -5°C • Prawdopodobieństwo przekroczenia temperatury powietrza poniżej progów: 0°C; -1°C; -5°C; -10°C; -15°C; -25°C; -30°C • Prawdopodobieństwo przekroczenia temperatury powietrza powyżej progów: 1,5°C; 5°C; 10°C • Prawdopodobieństwo prędkości wiatru poniżej (cisza): 0,5 m/s; 1 m/s oraz powyżej: 30 km/h; 50 km/h; 70 km/h; 90 km/h; 110 km/h; 115 km/h
EPS-gramy (meteogramy) na stacjach synoptycznych	<ul style="list-style-type: none"> • Prędkość wiatru, temperatura, ciśnienie • Suma i natężenie opadu, wilgotność względna

WRF-HYDRO

ZMIENNE WYJŚCIOWE	POLE [nazwa oryginalna]	OPIS
dot. cieków	streamflow	Natężenie przepływu [m ³ /s]
	q_lateral	Dopływ boczny do odcinka rzeki lub komórki [m ³ /s]
	velocity	Prędkość w korycie [m/s]
	Head	Poziom wody w cieku [m]
dot. krążenia wody	SOIL_M	Objętościowa wilgotność gleby
	zwattablrt	Głębokość do strefy saturacji [m]
	sfheadsbrt	Głębokość wody zalegającej na powierzchni [mm]
	QSTRMVOLRT	Skumulowana głębokość dopływu do koryta [mm]
dot. zbiorników/jezior	water_sf_elev	Wysokość zwierciadła wody w zbiorniku/jeziorze [m]
	inflow	Dopływ do zbiornika/jeziora [m ³ /s]
	outflow	Odływ ze zbiornika/jeziora [m ³ /s]
dot. wody podziemnej	inflow	Dopływ do „zbiornika” wody podziemnej [m ³ /s]
	outflow	Odływ ze „zbiornika” wody podziemnej [m ³ /s]
	depth	Głębokość wody „zbiornika” wody podziemnej [mm]

Modele Nowcastingowe

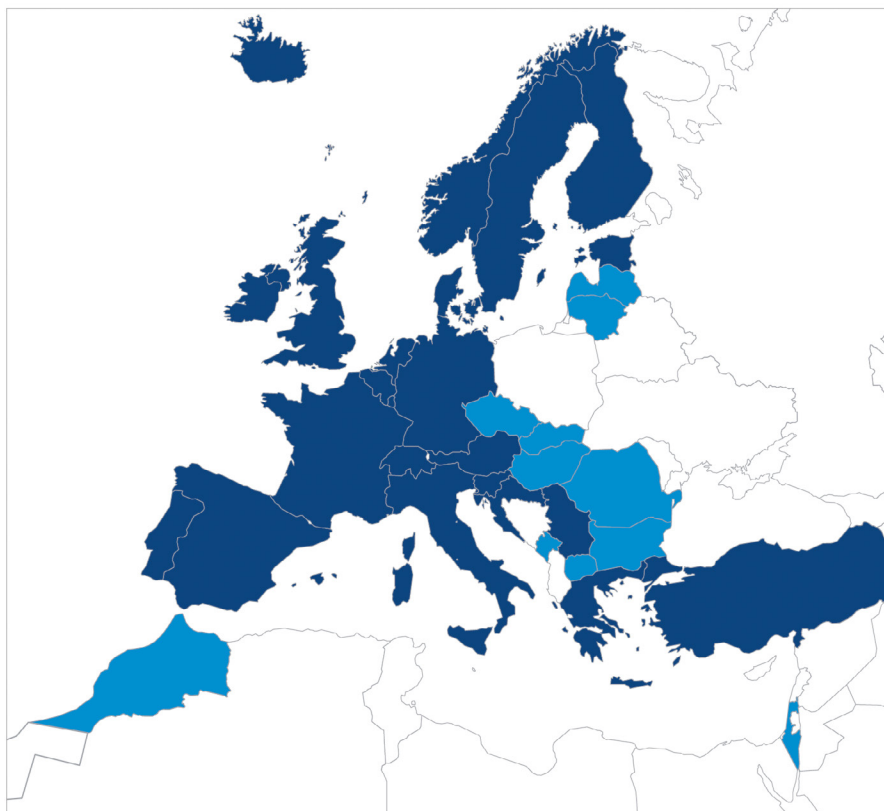
MODEL	POLA	DLUGOŚĆ PROGNOZY
RainGRS	<ul style="list-style-type: none"> • Dane opadowe deszczomierzowe po kontroli jakości • Dane opadowe radarowe po kontroli jakości i łączeniu w mapę zbiorczą • Dane opadowe satelitarne • Dane opadowe łączone w estymowane pole opadu GRS (deszczomierzowo-radarowo-satelitarne) • Pole jakości QI pola opadu GRS 	
SCENE	<ul style="list-style-type: none"> • Prognoza nowcastingowa pola opadu 	2 h
MERGE	<ul style="list-style-type: none"> • Prognozy hybrydowe z czasem wyprzedzenia do 8 godz., czyli łączone prognozy nowcastingowe SCENE i mezoskalowe AROME 	
ENSEMBLE, PROB, prognozy probabilistyczne	<ul style="list-style-type: none"> • Prawdopodobieństwo przewyższenia • Wartość średnia i odchylenia standardowe • Wartości określonych percentyli rozkładu 	2 h
INCA-PL2 prognozy nowcastingowe	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura na wysokości 2 m • Temperatura punktu rosy • Wilgotność względna • Linia śniegu • Poziom zamarzania • Oblodzenie • Temperatura gruntu • Temperatura odczuwalna • Wiatr na 10 m (dwie składowe) • CAPE, CIN • LCL, Level of free convection, Lifted Index • Showalter Index, Deep Convection Index • Trigger temperature, Trigger temperature deficit • Equivalent pot. temperature • Moisture convergence • Flow divergence • Precipitable water 	8 h
SPT (Surface Precipitation Type),	<ul style="list-style-type: none"> • Typ/rodzaj opadu na powierzchnię gruntu: śnieg, śnieg z deszczem, deszcz marznący i deszcz 	detekcja i prognozy do 1 h
HAIL, detekcja gradu	<ul style="list-style-type: none"> • Prawdopodobieństwo wystąpienia • Rozmiar gradzin 	
LIGHTNING detekcja wyładowań	<ul style="list-style-type: none"> • suma wyładowań • Gęstość • Lightning jump 	
TSP (Thunderstorm Prediction)	<ul style="list-style-type: none"> • Prawdopodobieństwo burz • Intensywność burz • Mapy przemieszczania się burz • Pole jakości produktów 	detekcja i prognozy do 1 h
MeteoWarn: wizualizacja zagrożeń pogodowych	<ul style="list-style-type: none"> • Tabela zagrożeń • Mapa zagrożeń 	1 h

ANEKS 8. EUROPEJSKIE CENTRUM ŚREDNIOTERMINOWYCH PROGNOZ POGODY (ECMWF)

Michał Ziemiański

Wstęp

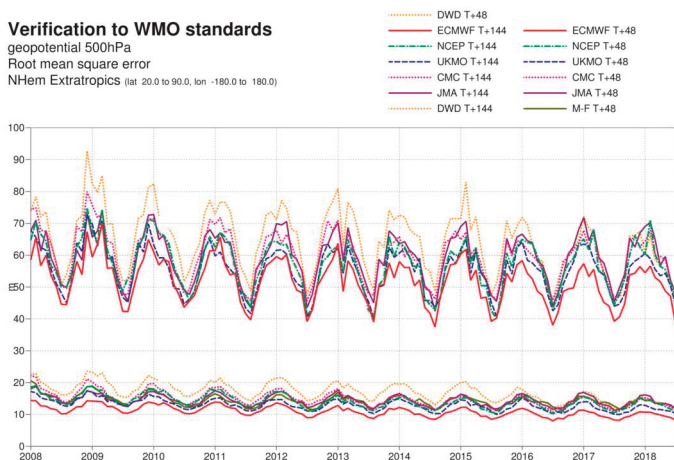
ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) jest europejską organizacją międzyrządową, odpowiedzialną za przygotowywanie i dystrybucję do krajów członkowskich najwyższej jakości operacyjnych numerycznych prognoz pogody. Szczególnym zadaniem Centrum jest przygotowywanie prognoz średnioterminowych (na okres od 3 dni do około 2 tygodni), wymagających modelowania pogody w skali globalnej. Centrum jest światowym liderem w dziedzinie globalnych numerycznych prognoz pogody. Za krótko-terminowe prognozy (na okres do 2 dni) odpowiedzialne są w Europie narodowe służby hydrologiczno-meteorologiczne, które wykorzystują regionalne numeryczne modele pogody o wyższej rozdzielczości.



Państwa członkowskie (ciemny niebieski) i stowarzyszone (jasny niebieski) ECMWF (źródło: www.ecmwf.int).

ECMWF jest częścią Europejskiej Infrastruktury Meteorologicznej, zapewniającej europejskim narodowym służbom hydrologiczno-meteorologicznym koordynację działań oraz pełen dostęp do najwyższej jakości globalnych prognoz numerycznych oraz wyników obserwacji satelitarnych. Pozostałymi elementami Europejskiej Infrastruktury Meteorologicznej są EUMETNET (zapewniający koordynację i współpracę pomiędzy europejskimi służbami hydrologiczno-meteorologicznymi) i EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, zapewniający operacyjny dostęp do pomiarów satelitarnych). ECMWF ściśle współpracuje z NATO, Radą Europy, EUMETSAT, EUMETNET, Europejską Agencją Kosmiczną (ESA). Do ECMWF należą (jako kraje członkowskie lub stowarzyszone) wszystkie kraje Unii Europejskiej, oprócz Polski, a spośród pozostałych krajów europejskich do ECMWF nie należą Albania, Bośnia i Hercegowina, Białoruś, Ukraina i Federacja Rosyjska. Polska należy do pozostałych organizacji tworzących Europejską Infrastrukturę Meteorologiczną.

ECMWF powstał w 1975 roku z zadaniem prowadzenia zaawansowanych badań naukowych nad metodami numerycznych prognoz pogody oraz tworzenia operacyjnych prognoz średnioterminowych wykorzystujących wyniki tych badań. W rezultacie Centrum stało się przodującym światowym ośrodkiem naukowym rozwijającym metody prognoz numerycznych (w tym metodykę probabilistycznych prognoz wiązkowych), metody asymilacji danych (w tym asymilacji danych satelitarnych), metody interpretacji wyników modeli numerycznych, metody optymalnego wykorzystania wielkich mocy obliczeniowych i inne. Ścisłe połączenie zaawansowanych badań naukowych z ich operacyjnym wykorzystywaniem dało Centrum pozycję niekwestionowanego od lat światowego lidera w dziedzinie dokładności prognoz globalnych.



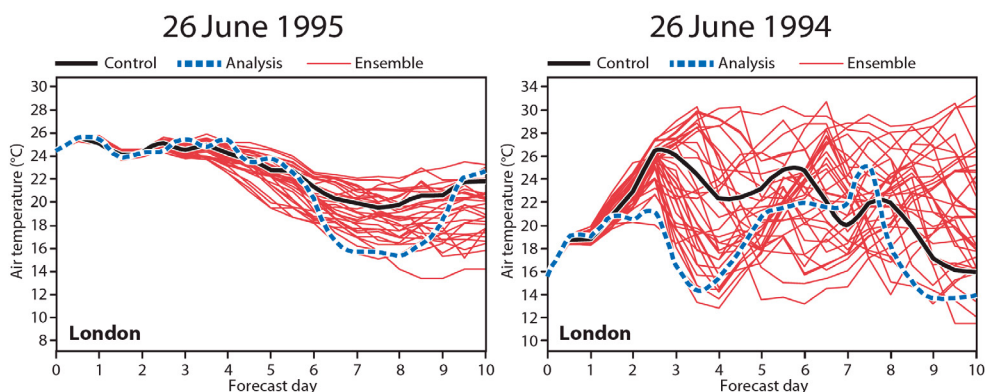
Błąd średni kwadratowy prognozy geopotencjału na powierzchni 500 hPa dla współczesnych globalnych modeli pogody (czerwona linia dla ECMWF) na 2 doby (dół rysunku) i 6 dób (górze) (źródło www.ecmwf.int).

ECMWF zrzesza 23 kraje członkowskie i 12 stowarzyszonych. Siedziba Centrum mieści się w Reading w Wielkiej Brytanii, niedaleko Londynu. Niedawno podjęto decyzję o przeniesieniu jego centrum obliczeniowego do Bolonii, powstał również dodatkowy ośrodek badawczy w Bonn. Budżet Centrum w 2017 roku wynosił 94,1 miliona funtów, z czego 43,5 miliona pochodziło ze składek państw członkowskich i stowarzyszonych. Centrum zatrudnia obecnie około 430 pracowników z 35 krajów.

Do obliczeń numerycznych Centrum wykorzystuje obecnie cztery superkomputerowe zestawy (kompleksy) obliczeniowe ATOS Bull Sequana XH2000, na które składa się ponad milion rdzeni obliczeniowych. Pozwalają one na moc obliczeniową około 30 PetaFlops (1PF = miliard albo milion miliardów operacji numerycznych na sekundę). Zasoby obliczeniowe w 50 proc. przeznaczone są na prowadzenie prac badawczych, w 25 proc. na obliczenia operacyjne oraz w 25 proc. na indywidualne potrzeby państw członkowskich. ECMWF posiada największe na świecie archiwum danych meteorologicznych, zawierające 698 petabajtów danych.

Produkty ECMWF

ECMWF przygotowuje globalne numeryczne prognozy pogody o charakterze deterministycznym oraz wiązkowym. Prognozy deterministyczne obliczane są dwa razy na dobę na okres do 10 dni za pomocą numerycznego modelu pogody o poziomym kroku siatki obliczeniowej około 9 km. Prognozy te wykorzystywane są przez państwa członkowskie do analizy rozwoju sytuacji meteorologicznej, a przede wszystkim do definiowania warunków brzegowych niezbędnych dla regionalnych krótkoterminowych prognoz pogody obliczanych przez narodowe służby meteorologiczne. W celu rozszerzenia dostępu do tych danych prognozy deterministyczne obliczane są także w dwóch dodatkowych terminach w ciągu doby, na okres 6 dni, dla członków partycypujących w opcjonalnym programie Boundary Conditions.



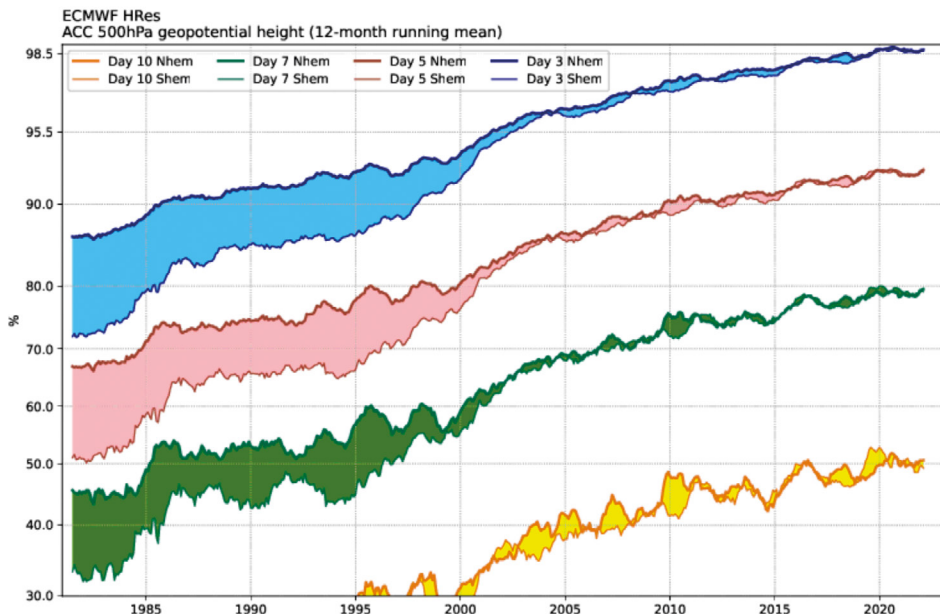
Przykłady wiązkowej prognozy temperatury dla 2 różnych typów pogody o większej i mniejszej przewidywalności (źródło: ECMWF Newsletter No. 134).

Wyniki numerycznych prognoz pogody są bardzo czułe na niewielkie nawet błędy określenia początkowego stanu atmosfery. Informacja o warunkach początkowych jest niezbędna do wystartowania prognozy i jest obliczana przez procedury asymilacji danych na podstawie wyników bieżących obserwacji i pomiarów (w tym naziemnych, balonowych, morskich, lotniczych i satelitarnych), które zawsze obciążone są błędami pomiarowymi. Wynika stąd, że wynik prognozy numerycznej jest obciążony pewną niepewnością. Aby uzyskać informacje o tym, jak wielka jest ta niepewność oraz w jakich granicach może ewoluować przyszła pogoda, przygotowuje się prognozy wiązkowe. Składają się one z wielu pojedynczych realizacji prognozy numerycznej, dla których warunki początkowe zostały nieco zmienione w granicach błędów pomiarowych. Cały zespół takich prognoz o różnych warunkach początkowych jest konstruowany tak, aby reprezentował przestrzeń możliwych realizacji ewolucji pogody. Wyniki prognoz wiązkowych interpretowane są probabilistycznie jako prawdopodobieństwo wystąpienia danego typu pogody lub parametru meteorologicznego (np. temperatury maksymalnej przekraczającej 35°C) w danym miejscu i czasie.

Oprócz prognoz średnioterminowych Centrum przygotowuje także prognozy miesięczne i sezonowe. Ich obliczanie też oparte jest na metodologii prognoz wiązkowych. W tym celu dwa razy w tygodniu oblicza się prognozę na okres do 46 dni, raz w miesiącu prognozę na okres do 7 miesięcy oraz raz na kwartał prognozę na okres 13 miesięcy. Prognozy te mają status produktów badawczych. Obecny horyzont czasowy praktycznie użytecznych prognoz pogody sięga około 10 do 14 dni.

W ostatnich latach istotnie wydłużył się okres praktycznej użyteczności prognoz deterministycznych i probabilistycznych realizowanych przez ECMWF. Poniższa grafika ilustruje wzrost jakości prognoz ECMWF reprezentowany przez wielkość korelacji pomiędzy prognozowanym a rzeczywistym stanem atmosfery na poziomie 500 hPa, dla 3-, 5-, 7- i 10-dniowego horyzontu prognoz, dla półkuli północnej i południowej. Wyraźnie widać systematyczny wzrost sprawdzalności prognoz; obecnie prognoza 5-dniowa ma podobną sprawdzalność, jak prognoza 3-dniowa w latach 80.

Lead time of anomaly correlation coefficient (ACC) reaching multiple thresholds (High resolution (HRES) 500 hPa height forecasts)



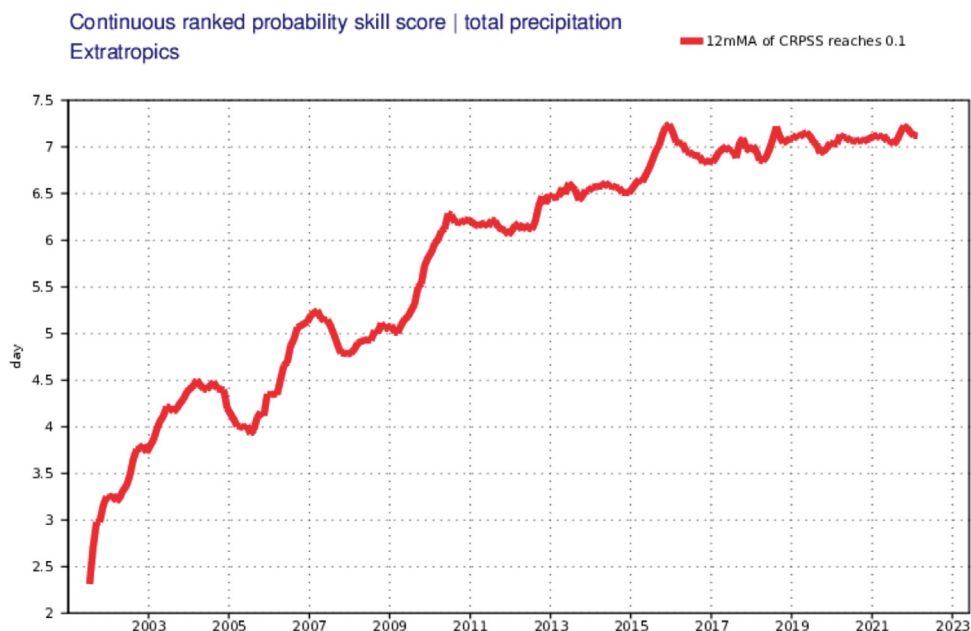
© 2020 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
Source: www.ecmwf.int
Licence: CC-BY4.0 and ECMWF Terms of Use (<https://apps.ecmwf.int/datasets/licences/general/>)



Jakość prognoz 3, 5, 7 i 10-dniowych dla półkuli północnej i południowej (źródło: www.ecmwf.int, lead time of anomaly correlation coefficient).

Kolejna grafika ilustruje wydłużenie horyzontu praktycznej użyteczności probabilistycznych prognoz opadu, który w ciągu ostatnich 15 lat zwiększył się statystycznie z 2-3 do około 7 dni (sprawdzalność prognoz zależy oczywiście od bieżącego typu cyrkulacji i w praktyce oscyluje wokół wartości średnich).

Lead time of continuous ranked probability skill score (CRPSS) of 24 hour precipitation forecasts falls to 10%



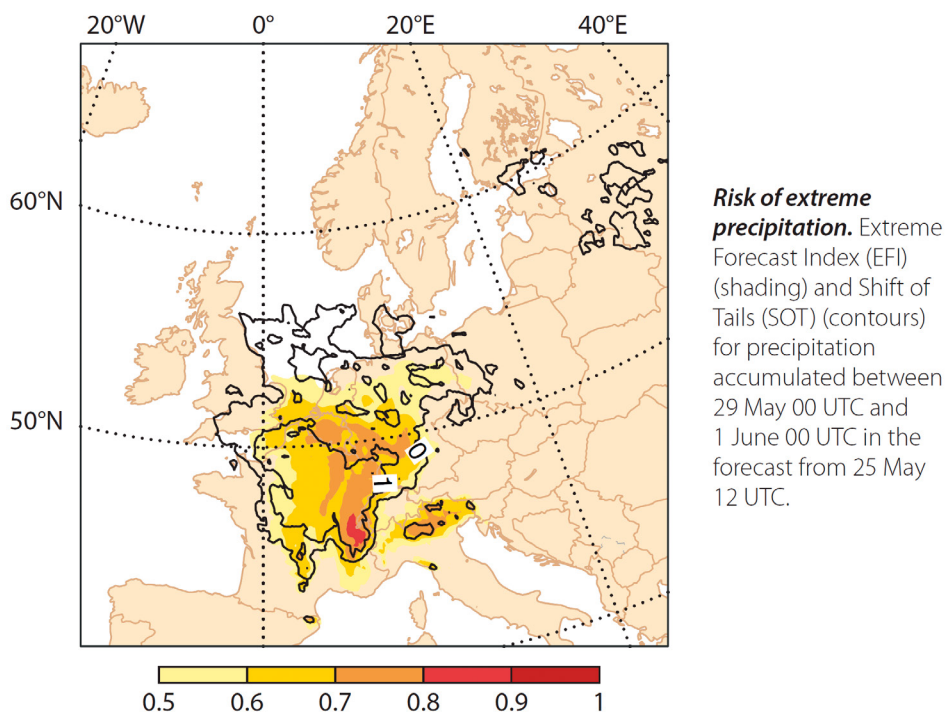
© 2020 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)
Source: www.ecmwf.int
Licence: CC-BY-4.0 and ECMWF Terms of Use (<https://apps.ecmwf.int/datasets/licences/general/>)



Liczba dni praktycznie użytecznej probabilistycznej prognozy opadu (źródło: www.ecmwf.int, continuous ranked probability skill score, total precipitation).

Odpowiadając na praktyczne potrzeby krajów członkowskich, związane z prowadzeniem osłony hydrologiczno-meteorologicznej oraz koniecznością ostrzegania przed niebezpiecznymi zjawiskami pogody, ECMWF rozwija zaawansowane metody post-processingu (przetwarzania) probabilistycznych prognoz pogody pod kątem prognozy jej ekstremów. Są to metody statystyczne polegające na automatycznym porównywaniu prognoz probabilistycznych z dotychczasowym klimatem (zbiorczymi wynikami modelu charakteryzującymi poprzednie 20 lat). Wyniki prezentowane są jako Extreme Forecast Index (EFI) i Shift of Tails (SOT: nazwa odnosi się do „ogonów” funkcji dystrybucji statystycznych związanych z rzadko występującymi zjawiskami ekstremalnymi). Wskaźniki te obliczane są standardowo dla dolnych (przyziemnych) temperatur (średnie, maksymalne, minimalne), wiatru dolnego (średni i porywy), opadów (opad całkowity, opad śniegu), zjawisk konwekcyjnych (podstawowe indeksy konwekcyjne), wysokości falowania.

Wskaźniki te okazały się bardzo użyteczne we wczesnym wykrywaniu możliwości wystąpienia ekstremalnych zjawisk związanych np. z falami ciepła lub mrozu, powodzią i suszami, silnymi wiatrami i sztormami, itp. Na rysunku przedstawiono przykład prognozy wskaźników EDI oraz SOT, które pozwoliły na wczesne wykrycie (z wyprzedzeniem 4-dniowym) możliwości wystąpienia powodzi we Francji i Niemczech. Zjawiska te wystąpiły na przełomie maja i czerwca 2016 roku i miały miejscami postać powodzi gwałtownych (flash floods) powodowanych przez ekstremalne zjawiska konwekcyjne.



Prognoza możliwości wystąpienia powodzi we Francji i Niemczech z wyprzedzeniem 4 dni (źródło: ECMWF Newsletter No. 148).

Państwa członkowskie korzystają z pełnej gamy prognoz ECMWF, które bezpośrednio lub w formie przetworzonej używane są dla prowadzenia służby prognoz i ostrzeżeń, a także wykorzystywane do przygotowywania produktów komercyjnych. Dodatkowo, wyniki modelu ECMWF są powszechnie stosowane przez większość krajów członkowskich (zwłaszcza tych, które nie mają własnego modelu globalnego) jako warunki brzegowe niezbędne dla własnych regionalnych krótkoterminowych numerycznych prognoz pogody. Bardzo wysoka sprawdzalność modelu ECMWF przekłada się na wysoką jakość prognoz regionalnych, a w przypadku Polski jego wykorzystanie dodatkowo pozwoliłoby na uniezależnienie się od innych dostawców tych danych (w IMGW-PIB są to Deutsche Wetterdienst i Meteo France).

ECMWF systematycznie rozwija swoją aktywność, rozszerzając zakres prognoz na globalne prognozy stanu środowiska (Earth System Prediction), wliczając w to prognozy stanu mórz i oceanów, pokrywy lodowej oraz prognozy stężeń gazowych i aerozolowych składników atmosfery. W ramach tych prac ECMWF realizuje Projekt Copernicus Komisji Europejskiej. Strategia Centrum do roku 2025 przewiduje dalszy wzrost dokładności prognoz oraz prace nad przedłużeniem zakresu użyteczności prognoz niebezpiecznych zjawisk pogody na okres do około 2 tygodni, a prognozy wielkoskalowych systemów atmosferycznych do około 4 tygodni.

Członkostwo w ECMWF zapewnia pełny, operacyjny dostęp do wszystkich produktów centrum, wiedzy i know-how wypracowanych w Centrum, a także umożliwiłoby kształcenie polskich specjalistów w dziedzinie metodyki prognoz numerycznych oraz ich wykorzystywania na europejskim i światowym poziomie.

ECMWF jest ośrodkiem gromadzącym i przechowującym wielkie zbiory danych meteorologicznych. Dane te są wykorzystywane do oceny i prognozy zmiany klimatu oraz generalnie do prowadzenia prac badawczych nad procesami atmosferycznymi i pogodotwórczymi. Członkostwo w ECMWF pozwala na pełen dostęp do tych danych oraz wspiera i aktywizuje robocze kontakty z europejskim środowiskiem naukowym, co ułatwia prowadzenie zaawansowanych prac badawczo-rozwojowych na rzecz służby hydro-meteorologicznej.

Kraje, które posiadają pełne (a nie stowarzyszone) członkostwo w Centrum, mają dodatkowo do swojej dyspozycji 25 proc. mocy obliczeniowych centrum oraz 10 proc. zasobów bazodanowych. Kraje członkowskie wykorzystują tę infrastrukturę do przygotowywania niektórych dodatkowych produktów prognostycznych, prowadzenia prac badawczych, a także jako awaryjną infrastrukturę obliczeniową.

Biznesowe korzyści z przystąpienia do ECMWF

Przystąpienie do ECMWF niesie z sobą szereg istotnych korzyści. Mają one charakter zarówno krótko- jak i długoterminowy i dotyczą szeregu aspektów życia społecznego.

A. Poprawa bezpieczeństwa państwa i obywateli w dziedzinie bezpieczeństwa wewnętrznego i zewnętrznego, w tym w obszarze zwalczania skutków ekstremalnych zjawisk meteorologicznych i hydrologicznych.

- Dostęp do wysokiej jakości średnioterminowych prognoz Centrum pozwala na wiarygodne ostrzeżenie przed szczególnie niebezpiecznymi zjawiskami meteorologicznymi już na kilka dni przed ich wystąpieniem (w większości służb europejskich do 5 dni, a w Wielkiej Brytanii do 7 dni przed wystąpieniem zjawiska).
- Dzięki temu możliwe jest optymalne planowanie i podjęcie właściwych działań zapobiegawczych w celu znacznego ograniczenia strat, a także optymalizacja działań oraz kosztów akcji ratunkowych. W przypadku np. rozległych powodzi prognozowanych w różnych obszarach lub następujących kolejno po sobie można optymalizować wykorzystywanie zasobów i rezerw państwa, a także związanych z nimi zasobów finansowych.

- Dostęp do globalnych prognoz Centrum pozwoli siłom zbrojnym na optymalne planowanie (pod względem warunków meteorologicznych) oraz prowadzenie operacji zgodnie z wymaganiami rządu i sojuszników.
 - Dostęp do produktów o najwyższej jakości prognostycznej daje szansę na działania prewencyjne i ogranicza możliwość realizowania przez przeciwnika ataków terrorystycznych i militarnych, których skuteczność jest uzależniona od warunków pogodowych.
- B. Poprawa jakości krótko-terminowych prognoz i ostrzeżeń meteorologicznych.
- Członkostwo w Centrum pozwala na przygotowywanie najlepszych jakościowo warunków brzegowych dla regionalnych krótko-terminowych numerycznych prognoz pogody obliczanych w Instytucie.
 - Dzięki temu możliwe byłoby zwiększenie jakości krótko-terminowych prognoz pogody oraz ostrzeżeń przygotowywanych przez Instytut, co m.in. bezpośrednio przyczyni się do wzrostu bezpieczeństwa obywateli oraz lepszego planowania akcji zapobiegawczych i ratunkowych w przypadku wystąpienia niebezpiecznych zjawisk pogody.
 - Dostęp do warunków brzegowych dostarczanych przez Centrum pozwoli uniezależnić się od wykorzystywanych obecnie warunków brzegowych dostarczanych przez Deutsche Wetterdienst i Meteo France na podstawie umów konsorcjów.
- C. Rozwój oferty produktów komercyjnych oferowanych przez Instytut.
- Badania ekonomiczne są zgodne co to tego, że wysoka jakość prognoz pogody stymuluje rozwój gospodarki, a inwestycje w tej dziedzinie przekładają się na szybszy rozwój ekonomiczny.
 - Istnieje szereg gałęzi gospodarki szczególnie zależnych od warunków pogodowych, dla których istnieje rynek komercyjnych produktów meteorologicznych. Dotyczy to zwłaszcza transportu, energetyki (w tym energetyki odnawialnej) i rolnictwa.
 - Dostęp do produktów Centrum pozwoli na podwyższenie jakości obecnie dostępnych produktów komercyjnych, opartych na wynikach krótkoterminowych numerycznych prognoz pogody, co powinno także przełożyć się na zwiększenie zapotrzebowania na nie oraz stymulować zapotrzebowanie na kolejne produkty.
 - Dostęp do średnioterminowych prognoz Centrum pozwoli na przygotowanie nowych grup produktów komercyjnych; dotyczy to zarówno stosunkowo prostych produktów (np. Dla rolnictwa), jak i wysoko specjalistycznych prognoz dla szczególnie wymagających odbiorców (np. Energetyka). Prognozy te wymagają wysokiej wiedzy statystycznej, bardzo dobrej współpracy z odbiorcami i istotnego nakładu pracy.
 - Dostęp do baz danych Centrum oraz jego know-how pozwoli Instytutowi na przygotowanie zaawansowanych narzędzi prognostycznych (w tym dla odbiorców komercyjnych) polegających na statystycznym post-processingu wyników prognoz numerycznych, który umożliwi dalsze istotne zwiększenie jakości prognoz.

D. Stymulacja środowiska akademickiego zajmującego się badaniami atmosfery i klimatu.

- Możliwość bezpośredniej współpracy z Centrum będzie napędzała rozwój prac badawczych w dziedzinie nauk o atmosferze i klimacie w polskim środowisku naukowym.
- Współpraca z Centrum pozwoli na bezpośredni dostęp do meteorologicznych baz danych ECMWF, bezpośrednie kontakty ze światowej klasy specjalistami w dziedzinie modelowania procesów atmosferycznych oraz ułatwi udział we wspólnych projektach naukowych, zwłaszcza finansowanych ze środków Unii Europejskiej.
- Rozwój środowiska akademickiego zajmującego się badaniami atmosfery i klimatu przyczyni się do zwiększenia poziomu i dostępności kadry zasilającej Instytut oraz bardziej owocnej współpracy Instytutu z polskim środowiskiem naukowym (zwłaszcza w dziedzinie prac badawczych odpowiadających na potrzeby IMGW-PIB).

E. Korzyści dla Instytutu.

- Bezpośrednia współpraca z Centrum pozwoli na podniesienie poziomu i stabilny rozwój kadry naukowej oraz operacyjnej IMGW-PIB poprzez wykorzystanie szerokiego dostępu do szkoleń w dziedzinie metod numerycznego prognozowania pogody oraz operacyjnego wykorzystywania prognoz numerycznych.
- Pracownicy Instytutu będą mogli być zatrudniani przez Centrum na zasadzie terminowych kontraktów, podnosząc swoje kwalifikacje zawodowe oraz nawiązując kontakty z międzynarodowym środowiskiem naukowym, a następnie wykorzystywać swoje doświadczenia w dalszej pracy w Instytucie.
- Podniesie się poziom prac badawczych oraz efektywność prac badawczo-wdrożeniowych prowadzonych przez Instytut zarówno w dziedzinie badań podstawowych związanych z numerycznymi prognozami pogody, jak i wdrażaniem wyników tych badań do praktyki operacyjnej.
- Możliwy będzie szerszy udział pracowników naukowych Instytutu w finansowanych zewnętrznie międzynarodowych projektach badawczych i międzynarodowej wymianie naukowej.
- Dostęp do bazy danych Centrum, jego know-how oraz wszystkich wyników prac naukowych prowadzonych przez Centrum pozwoli Instytutowi na prowadzenie badań i efektywnych prac wdrożeniowych nad rozwojem zaawansowanych narzędzi prognostycznych.
- W przypadku pełnego członkostwa w ECMWF Instytut uzyska dostęp do dodatkowych mocy obliczeniowych (można je szacować na poziomie około 0,7 proc. całkowitych zasobów obliczeniowych Centrum); zasoby te można wykorzystać do prowadzenia własnych prac badawczych, a także jako zabezpieczenie na wypadek awarii własnego centrum obliczeniowego.
- W takim przypadku Instytut uzyska do swojej dyspozycji przypadającą część z 10 proc. zasobów bazodanowych udostępnionych na indywidualne potrzeby państw członkowskich.
- W przypadku pełnego członkostwa w Centrum Dyrektor IMGW-PIB będzie członkiem Rady Centrum i w imieniu Polski będzie miał wpływ na wszystkie decyzje Centrum.

W tej sytuacji rekomendowane jest uzyskanie przez Polskę pełnego członkostwa w Europejskim Centrum Średnioterminowych Prognoz Pogody.

