

## **Współczesne numeryczne prognozy pogody - wiadomości ogólne.**

### **1. Rodzaje prognoz.**

Według definicji encyklopedycznej prognoza pogody to prognoza stanu atmosfery i związanych z nim zjawisk meteorologicznych nad określonym obszarem. Ponieważ zakres skal charakterystycznych rozmiarów przepływów atmosferycznych obejmuje 10 rzędów wielkości: od milimetrów gdzie wiry, fluktuacje i zaburzenia „wygładzane” są wskutek lepkości powietrza, do rozmiaru kuli ziemskiej, to do dobrego opisu atmosfery potrzebna nam jest cała hierarchia modeli, obejmująca modele zjawisk i przepływów w wielkich, średnich i małych skalach. Z charakterystycznymi rozmiarami cyrkulacji atmosferycznych wiążą się typowe czasy ich rozwoju i zaniku, tak więc modele nadają się do prognozowania zjawisk o właściwych sobie rozmiarach przestrzennych we właściwym sobie horyzoncie czasowym.

Ze względów praktycznych prognozy pogody dzielimy na:

- a) natychmiastowe (ang. nowcasting) obejmujące najbliższe kilkanaście godzin. Związane są one ze zjawiskami o rozmiarach przestrzennych od setek metrów (porywy wiatru, tornado) do kilkudziesięciu czy kilkuset kilometrów (kompleksy chmur burzowych);
- b) krótkoterminowe (do 72 godzin, obejmują one skale od kilku – kilkunastu kilometrów do tysięcy kilometrów ;
- c) średnioterminowe (do 2-3 tygodni), obejmują glob;
- d) długoterminowe (sezon, rok).

Jak wcześniej wspomniano, każda prognoza pogody jest poprzedzona analizą danych z pomiarów i obserwacji meteorologicznych w celu określenia wyjściowej sytuacji atmosferycznej, innymi słowy w celu „narysowania” jak najdokładniejszej trójwymiarowej „mapy” obrazującej stan wyjściowy atmosfery. Metodą analizy, stosowaną powszechnie do lat 70 XX w. była tzw. analiza subiektywna opierająca się na osobistym doświadczeniu i intuicji przygotowującego ją synoptyka. Tak więc mapy pogody przygotowywane na podstawie tych samych danych przez różnych synoptyków mogły różnić się znacznie.

Aktualnie wyjściowy stan atmosfery określa się na podstawie wyników różnorodnych pomiarów (od pomiarów in-situ przez pomiary zdalne, w tym satelitarne) wykorzystywanych do zasilania matematycznych procedur interpolacji i uzgodnień pomiędzy danymi pomiarowymi uwzględniającymi zależności fizyczne między obserwowanymi wielkościami i polami. Taki sposób badania stanu atmosfery nazywa się analizą obiektywną, a wynikiem tej analizy jest materiał wyjściowy do prognozy pogody: wartości parametrów meteorologicznych w każdym oczku siatki, pozwalające na rozpoczęcie obliczeń prognozy.

Matematyczny model procesów atmosferycznych nie jest jedynym narzędziem pozwalającym postawić prognozę. W zależności od zastosowanych metod prognozy pogody dzielimy na:

subiektywne (synoptyczne), statystyczne, fizyczne (czasem zwane dynamicznymi) i numeryczne.

Prognozy subiektywne to prognozy stawiane na podstawie doświadczenia synoptyka.

Mimo ogromnego postępu w rozwoju obiektywnych subiektywna interpretacja niedoskonałych przecież prognoz statystycznych, fizycznych i numerycznych jest do dziś dnia ważna.

Prognozy statystyczne bazują na informacji o przeszłych sytuacjach atmosferycznych. Analizując tę informację poszukuje się tzw. predyktorów, tj. takich parametrów, które są silnie skorelowane z predyktandami, czyli parametrami, które usiłuje się przewidzieć. Przy tym nie musimy szukać predyktorów i predyktandów powiązanych jasnymi zależnościami fizycznymi.

Np. aby postawić jesienią prognozę wielkości opadu na określony obszar na okres zimowy sprawdza się, czy w poprzednich latach występowała korelacja tego opadu z różnymi parametrami pogody jesienią. Jeśli parametrem, który wykazywał najsilniejszy związek jest np. temperatura powierzchni morza na jakimś obszarze, to uznaje się ją za predyktor pozwalający postawić prognozę opadu na zimę. Innym przykładem statystycznej prognozy pogody jest tzw. prognoza bezwładnościowa: „jutro będzie taka sama pogoda jak dzisiaj”. Predyktorem jest tu stan atmosfery w dniu dzisiejszym, predyktandem – pogoda dzień później. Łatwo się przekonać, że w niektórych regionach globu (np. pas pustyń, strefa pasatowa) sprawdzalność takiej prognozy jest bardzo wysoka, w innych, np. w Polsce, niekoniecznie. Tak naprawdę w prognozie statystycznej też stosujemy model matematyczny atmosfery, jego podstawą jednak nie są prawa fizyki a statystyki matematycznej i założenie stacjonarności statystycznej prognozowanych procesów, czyli niezmienności rozkładów statystycznych w czasie.

W prognozach fizycznych wykorzystuje się opisane prawami fizyki przyczynowo-skutkowe związki między elementami pogody i na ich podstawie przewidywać rozwój sytuacji atmosferycznej. Przykładem jest prognoza burzy na podstawie analizy stabilności atmosfery ziemskiej przeprowadzonej na danych pomiarowych z sondażu aerologicznego. W umiarkowanych szerokościach geograficznych istotną rolę odgrywają prognozy dynamiczne: prognozy fizyczne oparte na równaniach dynamiki atmosfery w skali synoptycznej. Typowym przykładem jest prognoza ewolucji pola ciśnienia atmosferycznego (rozwoju, zaniku i wędrowki wyżów i niżów atmosferycznych) na podstawie pola wirowości wiatru uzyskanego z analizy danych synoptycznych. W modelach fizycznych tworzymy już model matematyczny wybranych własności fizycznych atmosfery i staramy się go rozwiązać.

Metody numeryczne prognoz pogody to rozwinięcie i szczególna aplikacja metod fizycznych. Startując z warunku początkowego – analizy stanu atmosfery, rozwiązuje się w czasie model matematyczny: wspomniany układ równań opisujących dynamikę i termodynamikę atmosfery, prawa transferu promieniowania w atmosferze, oddziaływania przepływów atmosferycznych z podłożem, cykl hydrologiczny i szereg innych procesów, dostając w wyniku obliczoną ewolucję stanu atmosfery. Model taki musi zawierać tyle niezależnych związków (równań), ile jest w nim podstawowych parametrów opisujących stan atmosfery, tzn. musi być układem zamkniętym. Jak już wiemy rozwiązanie takiego układu jest możliwe tylko dzięki zastosowaniu z natury

przybliżonych metod numerycznych i wykorzystaniu do tego celu komputerów.

Pełen model numeryczny za pomocą, którego możemy postawić numeryczną prognozę pogody (dalej nazywany numerycznym modelem prognostycznym) ma wobec tego kilka poziomów: pierwszym z nich jest zamknięty układ równań opisujących prawa fizyki tworzący model matematyczny, drugim algorytmy numerycznego rozwiązywania równań modelu matematycznego, a trzecim kod (program komputerowy), który pozwala na uzyskanie rozwiązania w konkretnym środowisku obliczeniowym (na konkretnym superkomputerze czy maszynie obliczeniowej). W pierwszym poziomie wyróżniamy równania dynamiki i tzw. parametryzacje procesów fizycznych (np. powstawania opadu), czyli szacunkowe równania wstawione w miejsce, gdzie nie potrafimy/ nie uważamy są przydatne/. zastosować równań bardziej podstawowych.

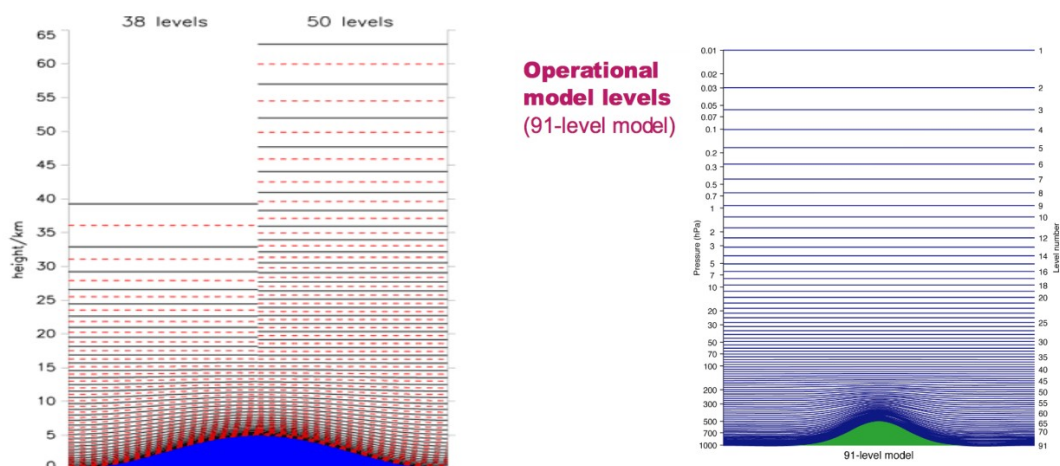
Część docierających do końcowego użytkownika prognoz pogody wykorzystuje więcej niż jedną z wymienionych wyżej metod prognozowania. Np. wyniki prognozy numerycznej weryfikowane są i poprawiane metodami statystycznymi, a często i subiektywnymi, uwzględniającymi wiedzę o tym, czy model numeryczny dobrze prognozował podobne sytuacje w przeszłości. Tak więc ostateczny produkt prognozy pogody, przygotowany w postaci strony www, programu telewizyjnego, komunikatu, notatki prasowej czy mapy, zawiera wybrane, przetworzone i dostosowane do potrzeb i wymagań odbiorcy wyniki modelowania numerycznego, analiz statystycznych i dynamicznych a czasami i dozę osobistego doświadczenia synoptyka.

W ostatnich latach podstawą krótko i średnioterminowych prognoz pogody są prognozy obliczane przy użyciu numerycznych modeli prognostycznych. Z kolei prognozy długoterminowe nadal najczęściej stawia się korzystając z metod statystycznych, ale coraz większą rolę odgrywają w nich modele numeryczne uwzględniające cyrkulacje oceaniczne.

Na specjalną uwagę zasługują prognozy natychmiastowe, w których zastosowanie numerycznych modeli prognostycznych na razie jest ograniczone, a metody statystyczne nie zawsze się nadają. Prognozy takie stawiane są najczęściej metodami subiektywnymi, ale z wykorzystaniem obiektywnej analizy danych pochodzących z nowoczesnych metod teledetekcyjnych obserwacji pomiarów atmosfery. Radary i satelity meteorologiczne, sieci pomiaru wyładowań atmosferycznych oraz automatyczne i standardowych stacje pomiarowe dostarczają danych, które są przetwarzane i wizualizowane przy pomocy grafiki komputerowej lub przetwarzana przez automatyczne systemy analizy danych. Na ich podstawie synoptyk może zorientować się w rozwoju sytuacji meteorologicznej w stanie zagrożenia burzą, opadem nawalnym czy tornadem wysłać stosowne ostrzeżenie, podając jakie miejsca są zagrożone tymi niebezpiecznymi zjawiskami. Ostrzeżenie udzielone nawet na krótko przed ich wystąpieniem, może uratować ludzkie życie i zmniejszyć powodowane przez nie straty.

## **2. Numeryczna prognoza pogody „od kuchni”.**

Po okresie burzliwego rozwoju w drugiej połowie XX w. podstawą współczesnych prognoz pogody, zarówno tych, z których korzystamy w życiu codziennym, jak i prognoz specjalistycznych, są, jak wspomniano, prognozy numeryczne (ang. Numerical Weather Prediction, NWP). Ich



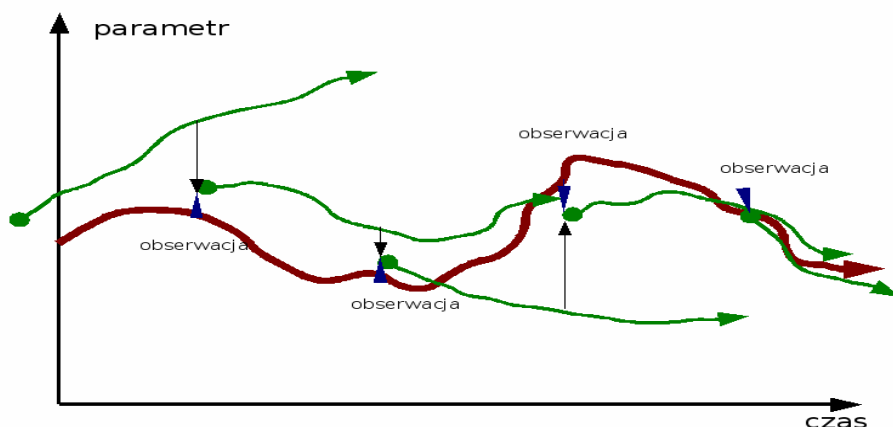
Rysunek 1: Przykład rozwoju globalnych modeli numerycznych prognoz pogody – coraz więcej poziomów obliczeniowych sięgających do coraz wyższych wysokości (niższych ciśnień)

trzonem są średnioterminowe prognozy pogody obejmujące obszar całej kuli ziemskiej obliczone przy użyciu tzw. modelu globalnego. Do ośrodka prowadzącego prognozę średnioterminową wpływają dane pomiarowe z pomiarów synoptycznych z całego świata. Odbiera się też dane satelitarne oraz wszelkie inne informacje meteorologiczne. Otrzymane dane są weryfikowane, tak, aby odrzucić wyniki pomiarów obarczone grubymi błędami. Następnie wykonuje się interpolację danych pomiarowych do punktów siatki obliczeniowej modelu prognostycznego. Taka siatka pokrywa cały obszar troposfery i znaczną część stratosfery. Jej oczko ma w poziomie rozmiar kilkudziesięciu kilometrów. W pionie siatka obejmuje kilkadziesiąt poziomów sięgających wysokości 30-40 kilometrów, rozłożonych nierównomiernie w pionie: zagęszczonych w dolnych warstwach atmosfery i rozrzedzonych w najwyższych.

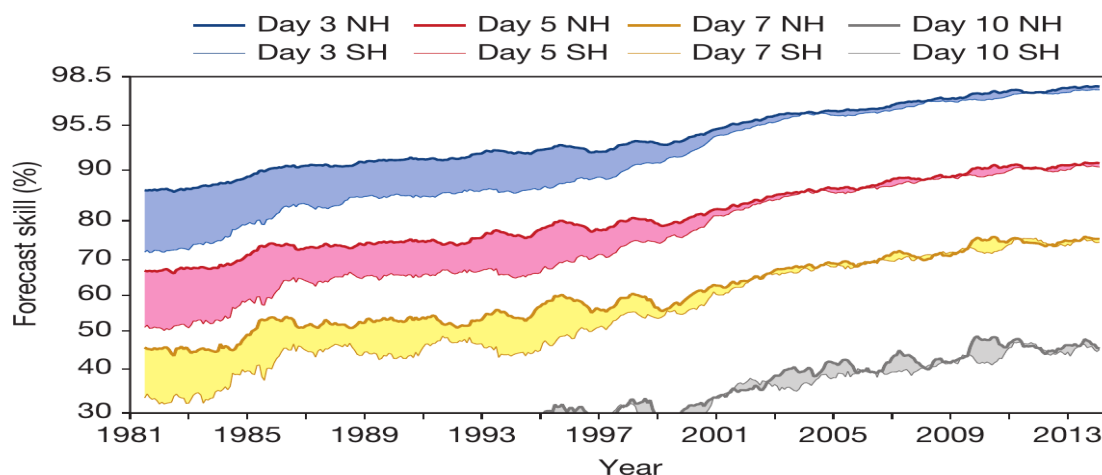
Interpolowane dane pomiarowe pochodzące z różnych źródeł uzgadnia się, tzn, sprawdza się czy nieuniknione w takim wypadku drobne błędy pomiarowe i przybliżenia interpolacji nie wprowadziły niezgodnych z prawami fizyki zależności między tymi danymi. Jeśli zależności takie występują to dokonuje się odpowiedniej korekty. Te etapy można nazwać analizą obiektywną sytuacji atmosferycznej. Kolejnym, niezwykle ważnym krokiem, często związanym z etapem analizy, jest tzw. asymilacja danych do modelu, prowadząca do inicjalizacji obliczeń. Uzyskane podczas analizy pola parametrów meteorologicznych wprowadza się do obliczeń tak, żeby ewolucja modelowanego rozwoju zjawisk atmosferycznych była zgodna z rzeczywistym ich przebiegiem w ciągu ostatnich godzin, dni i tygodni. Wykorzystuje się do tego najczęściej wyniki numerycznej prognozy pogody z poprzedniego cyklu obliczeniowego, które „nagina się” do rzeczywistego rozwoju sytuacji w atmosferze wprowadzając nowe dane pomiarowe. Innymi słowy ewolucję pogody w „wirtualnej rzeczywistości” modelu kierujemy na tory równoległe do tego co dzieje się w świecie rzeczywistym przez wprowadzanie do niej nowych danych pomiarowych i „popychamy” do przodu wykonując prognozę.

Następnym etapem są obliczenia, które symulują zachowanie atmosfery w okresie do

14 - 21 dni. Trwają one często kilkanaście godzin, z tym że już po krótkim czasie dostępne są wyniki prognozy na dzień następny, po kolejnej chwili na dwa dni w przód itd. Następnie wyniki te są przetwarzane i wizualizowane, a także rozsyłane do wielu ośrodków meteorologicznych. W ośrodkach tych obrabia się dalej uzyskane dane i korzystając czasami z metod statystycznych czy subiektywnych przygotowuje się ostateczną średnioterminową prognozę pogody.

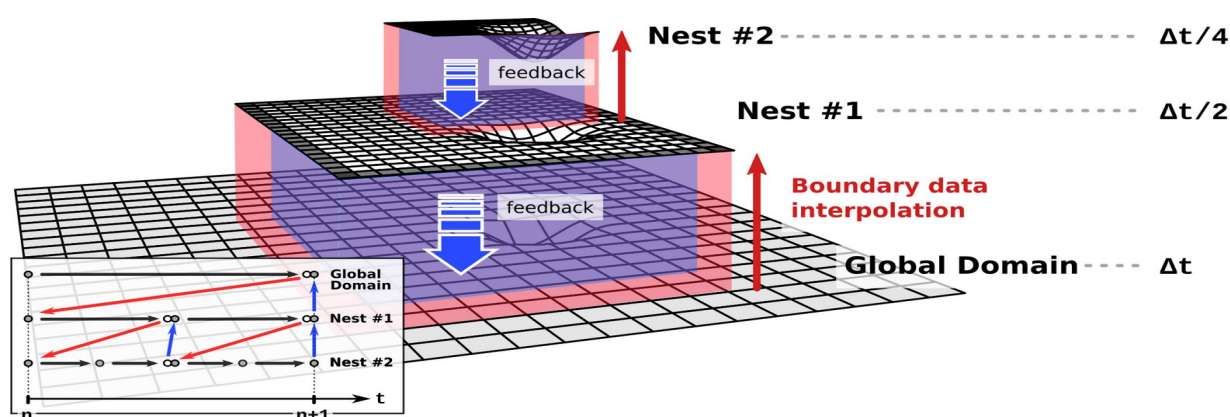


Rysunek 2: Asymilacja danych do modelu. Czerwona linia – rzeczywistość. Zielone linie – kolejne prognozy w „wirtualnej rzeczywistości” modelu. Niebieskie i czarne strzałki – wprowadzanie danych rzeczywistych do modelu i obliczenia kolejnej prognozy.



Rysunek 3: Ocena jakości numerycznej średnioterminowej prognozy pogody. Na osi poziomej czas, na osi pionowej korelacja prognozy pola ciśnienia atmosferycznego na wysokości ok. 5.5 km npm. z ciśnieniem obserwowanym na tej wysokości po 3,5,7, i10 dniach. W przypadku prognozy idealnej korelacja powinna wynosić 1. Przedstawiono wykresy modelu europejskiego ECMWF. Cienkie linie obrazują dane dla półkuli południowej, grube dla północnej. Źródło: *The quiet revolution of numerical weather prediction*, Peter Bauer, Alan Thorpe, Gilbert Brunet, *Nature* 2015

Uruchomienie i utrzymanie w zdolności operacyjnej modelu globalnego dla średnioterminowej prognozy jest wielkim przedsięwzięciem naukowym, technicznym i organizacyjnym. Na świecie jest niewiele ośrodków prowadzących w sposób ciągły takie prognozy prognoz, najważniejsze z nich to Europejskie Centrum Prognoz Średnioterminowych (ang. European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF, <http://www.ecmwf.int/>) z siedzibą w Reading w Wielkiej Brytanii oraz Centrum Modelowania Środowiska (ang. Environmental Modeling Center, EMC NCEP, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/>) w USA. Kilka innych ośrodków to służby meteorologiczne Wielkiej Brytanii, Niemiec, Francji, Japonii, Kanady, marynarki wojennej USA, National Center for Atmospheric Research w USA itd.



Rysunek 4: Przykład zagnieżdżenia siatki modelu regionalnego w modelu globalnym <https://gmd.copernicus.org/articles/15/7153/2022/>

### 3. Modele mezoskalowe (regionalne, lokalne)

W celu przygotowania krótkoterminowej, regionalnej lub mezoskalowej numerycznej prognozy pogody wykorzystuje się wyniki kilkudziesięciu pierwszych godzin prognozy średnioterminowej. Numeryczny model prognostyczny używany dla prognozy krótkoterminowej to tzw. model mezoskalowy, różniący się ze względu na zakres skal i konieczność zastosowania innych przybliżeń i parametryzacji od modelu globalnego. Rozpięty jest on na siatce o oczkach o rozmiarze kilkunastu, a nawet kilku kilometrów, obejmującej wycinek powierzchni globu o rozmiarach rzędu tysiąca km. Pozwala to znacznie lepiej niż w modelu globalnym odwzorować zarówno własności powierzchni ziemi (kształt linii brzegowej, łańcuchów górskich, pokrycie ziemi roślinnością czy zabudową), jak i lokalne cyrkulacje meteorologiczne. Aby wiedzieć jakie masy powietrza wpływają w obszar obliczeniowy (tzw. postawienie warunku brzegowego do obliczeń) korzysta się z wyników modelu globalnego używanego w prognozie średnioterminowej.

Dodatkowo można asymilować nowe dane pomiarowe z obszaru modelu mezoskalowego, które mogły napłynąć w trakcie przygotowywania danych i obliczeń wykonywanych modelem globalnym. W efekcie przeprowadza się rachunki dające znacznie bardziej precyzyjną prognozę na ograniczonym obszarze. Z reguły w wyniku prognozy mezoskalowej uzyskujemy ekstrapolację zachowania atmosfery na 36 do 72 i więcej godzin w przód, a procedurę powtarza się dwa do czterech razy na dobę. Numeryczne prognozy mezoskalowe prowadzone są często przez

narodowe służby meteorologiczne i różne ośrodki naukowe.

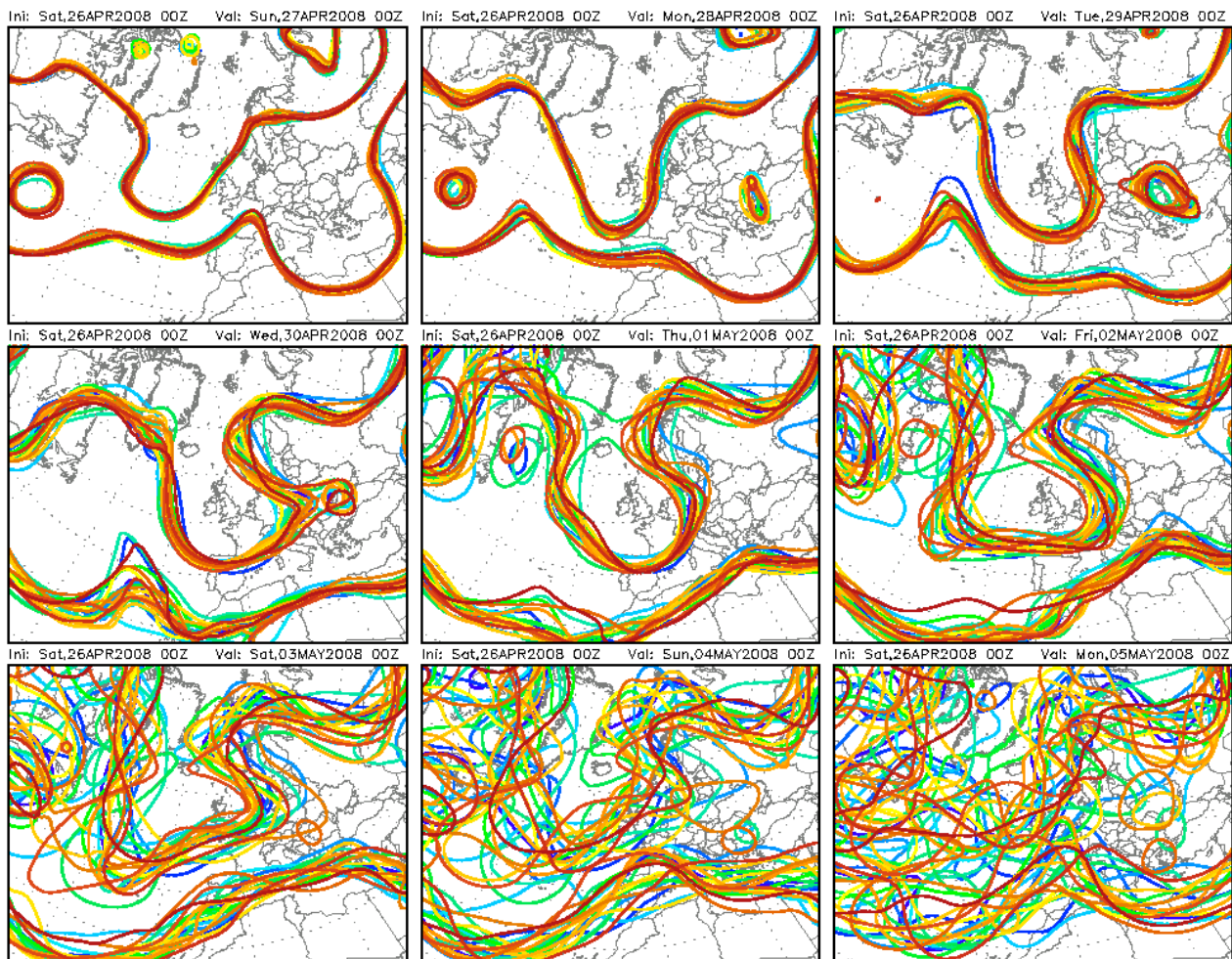
Często operację zagnieżdżania siatki powtarza się kilkakrotnie albo wykonuje się obliczenia na siatce nieregularnej, zagęszczonej w wybranych obszarach.

#### **4. Rozwój numerycznych prognoz pogody.**

Numeryczne modele prognostyczne rozwijają się burzliwie. Z jednej strony, korzystając z rozwoju matematyki i fizyki konstruuje się coraz doskonalsze modele matematyczne atmosfery. Rozwój techniki pozwala na zasilanie tych modeli coraz dokładniejszymi danymi pomiarowymi obejmującymi całą atmosferę ziemską. Trwają też prace nad udoskonalaniem prognoz dzięki coraz lepszemu zrozumieniu konsekwencji odkryć Lorenza teorii chaosu deterministycznego. Jedną z możliwości, wykorzystywanych coraz szerzej jest tzw. prognoza dynamiczno-stochastyczna metoda wiązek (ensemble forecast). Korzysta się w niej z kilku lub kilkunastu równoległych prognoz obliczonych przy użyciu tego samego modelu, ale startujących z różnych stanów początkowych atmosfery. Różnice między tymi stanami są mniejsze niż wynosi nieunikniony drobny błąd pomiarów. Jeśli wyniki wszystkich obliczeń są zgodne w pewnym obszarze czy okresie czasu, to prognoza w tym obszarze jest wiarygodna, jeśli występują różnice, to nie wiadomo który z prognozowanych przebiegów ewolucji atmosfery zrealizuje się w rzeczywistości i wiemy przynajmniej tyle że mamy prognozę której nie możemy ufać. Wyniki takich prognoz są dostępne pod adresami: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/ens/>, <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/> i tam zakładka ENS.

Na pierwszym panelu kolejne grupy kolorowych linii pokazują wybrane izohipsy 500hPa dla kilkunastu początkowych pól ciśnienia różniących się w granicach błędu pomiaru. Kolejne panele to obliczone położenia tych izohips na kolejne dni. Łatwo zauważyć, że początkowo niewielkie różnice między wynikami obliczeń narastają z każdym dniem. Są jednak obszary gdzie obserwujemy znaczne różnice już w trzecim dniu obliczeń, na innych obszarach różnice nawet po sześciu dniach różnice w są niewielkie.

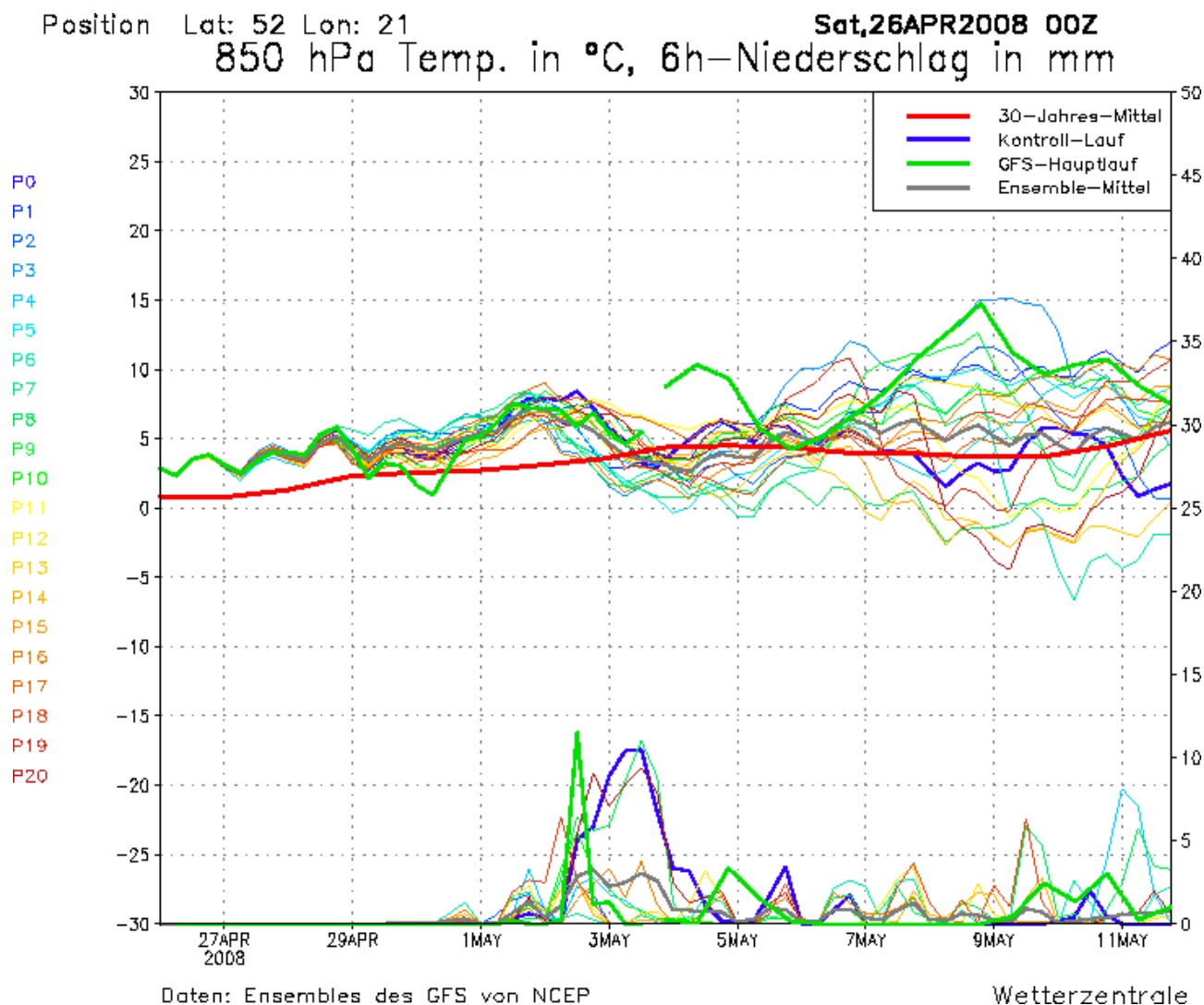




Rysunek 5: Przykład nowoczesnej średnioterminowej prognozy pogody metodą wiązek dla obszaru Europy i Północnego Atlantyku wykonanej przy pomocy amerykańskiego modelu GFS 9 z Wetterzentrale.

Prognoza pogody metodą wiązek jest w tej chwili bardzo intensywnie rozwijana w wielu ośrodkach na świecie, zrozumienie zmienności atmosfery jaka daje ta metoda skutkuje też poprawa zrozumienia zagadnienia asymlacji danych i wpływa na poprawę „tradycyjnych” pojedynczych prognoz.



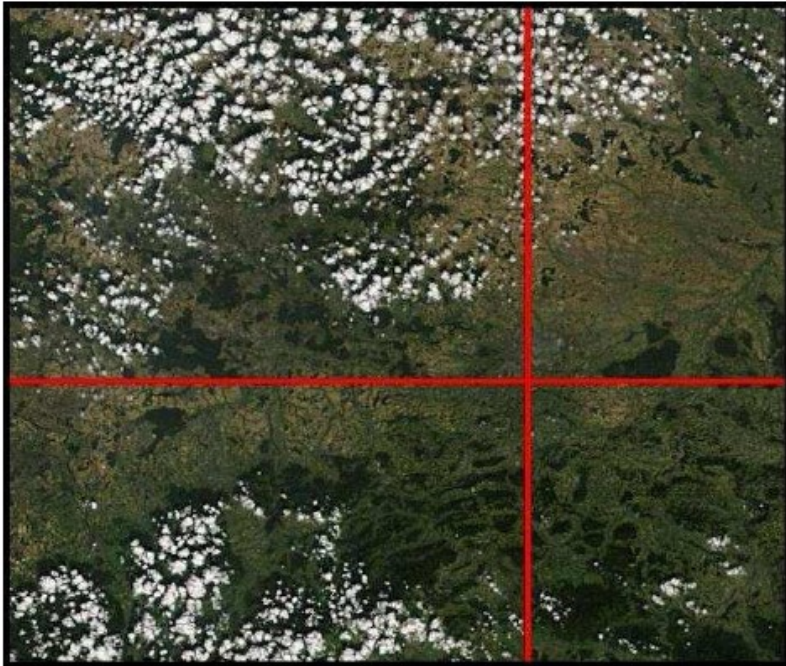


Rysunek 6: Prognoza temperatury na powierzchni 850hPa i opadu na ziemi w centralnej Polsce obliczona metodą wiązek. P1P20 20 jednoczesnych prognoz tworzących wiązkę. Czerwony – średnia klimatyczna, niebieski – przebieg kontrolny używany w asymilacji danych i generacji warunków początkowych dla wszystkich prognoz wchodzących w skład wiązki, zielony – prognoza detetministyczna („prognoza GFS” w serwisach), szary średnia po zespole prognoz. (z Wetterzentrale)

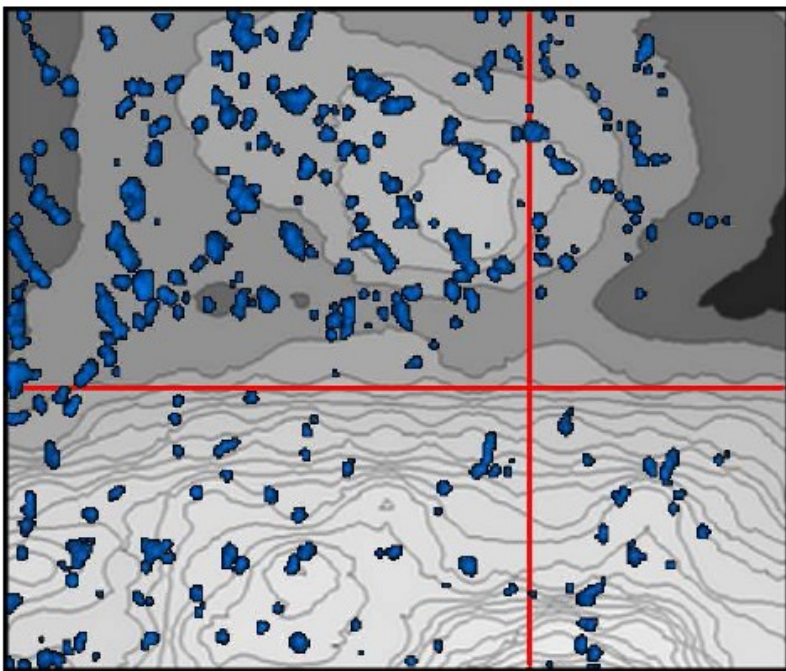
Inny kierunek rozwoju prognoz, to zmiany i zagęszczanie siatek w modelach mezoskali i mniejszych oraz prace nad asymilacją danych radarowych satelitarnych do modeli. Jeszcze jednym kierunkiem jest praca nad tzw. „siatkami adaptatywnymi”, tj. takimi, które w razie potrzeb same się zagęszczają, np. w okolicach powierzchni frontowej, czy w momencie gdy formuje się cyklon tropikalny czy mezoskalowy system konwekcyjny.

Przy zwiększaniu rozdzielczości prognozy trzeba pokonać wiele trudności matematycznych, fizycznych i numerycznych. Komplikuja się równania modeli, które muszą uwzględniać procesy zachodzące w coraz mniejszych skalach, trzeba stosować inne metody numeryczne, występują

problemy ze "sklejaniem" siatek o coraz drobniejszych oczkach. Z drugiej strony, modele o dużej rozdzielczości, jeśli uda się rozwiązać problemy z zasilaniem ich w dane, dają szanse na bardzo precyzyjne prognozowanie zjawisk konwekcyjnych czy ekstremalnych.



Przykład obok (zaczepnięty z pracy magisterskiej Piotra Drzewieckiego "Modelowanie procesów konwekcyjnych nad południową Polską") - porównanie wyników konkretnej sytuacji konwekcyjnej w "zagnieżdżonym" modelu o dużej rozdzielczości do obrazu satelitarnego - pokazuje, że nawet zwiększenie rozdzielczości modelu do 1 km nie pozwala na dokładne odtworzenie procesów atmosferycznych, choć niektóre cechy rozwoju konwekcji nad Jurą Krakowsko - Częstochowską i Podbeskidziem przedstawione są poprawnie.



### Modele niehydrostatyczne.

W bieżącym okresie wchodzi do powszechnego użytku nowa generacja modeli numerycznych, tzw. modele niehydrostatyczne. W szczególności dotyczy to modeli mezoskalowych i lokalnych (ang. Limited Area Model, LAM), choć eksperymentalnie stosuje się też sformułowania niehydrostatyczne modeli globalnych prognoz pogody i modeli klimatu. Równania

niehydrostatyczne, w zależności od zastosowanych przybliżeń (mogą tu wrócić państwo do wcześniejszych materiałów żeby przypomnieć sobie kilka podstawowych wiadomości) wymagają innych metod obliczeniowych i nowych parametryzacji procesów podskalowych. W zamian pozwalają na bezpośrednie rozwiązywanie zjawisk, które w modelach hydrostatycznych nie dają się odtworzyć. Potencjalnie nowa generacja modeli. powinna zaowocować lepszymi, bardziej precyzyjnymi prognozami. W praktyce bywa różnie i jeszcze przez długi czas można spodziewać się niespodzianek. Wynika to z faktu, że nowe, bardziej precyzyjne modele wymagają znacznie lepszych danych wejściowych niż może dostarczyć to współczesna sieć pomiarowa, wymagają po prostu asymilacji znacznie większej liczby danych pomiarowych.

Spróbujmy na przykładzie wytłumaczyć na czym polega prognoza i problem asymilacji. Pamiętajmy, że model meteorologiczny to rzeczywistość wirtualna, odpowiadająca do pewnego stopnia prawdziwej. To znaczy, że prawa natury rządzące w wirtualnym świecie modelu i w rzeczywistym świecie za oknem powinny sobie odpowiadać. Np. w grze komputerowej „Cywilizacja” i w rzeczywistości prawa historii powinny działać tak samo. Mamy nasz model globalny (grę „Cywilizacja”). Asymilujemy do modelu dane pomiarowe – wprowadzamy do gry „Cywilizacja” historię rozwoju ludzkości. W pewnym momencie, odpowiadającym teraźniejszości gramy kilka posunięć do przodu – wykonujemy prognozę na poziomie zmian granic państw, gospodarki światowej itp.

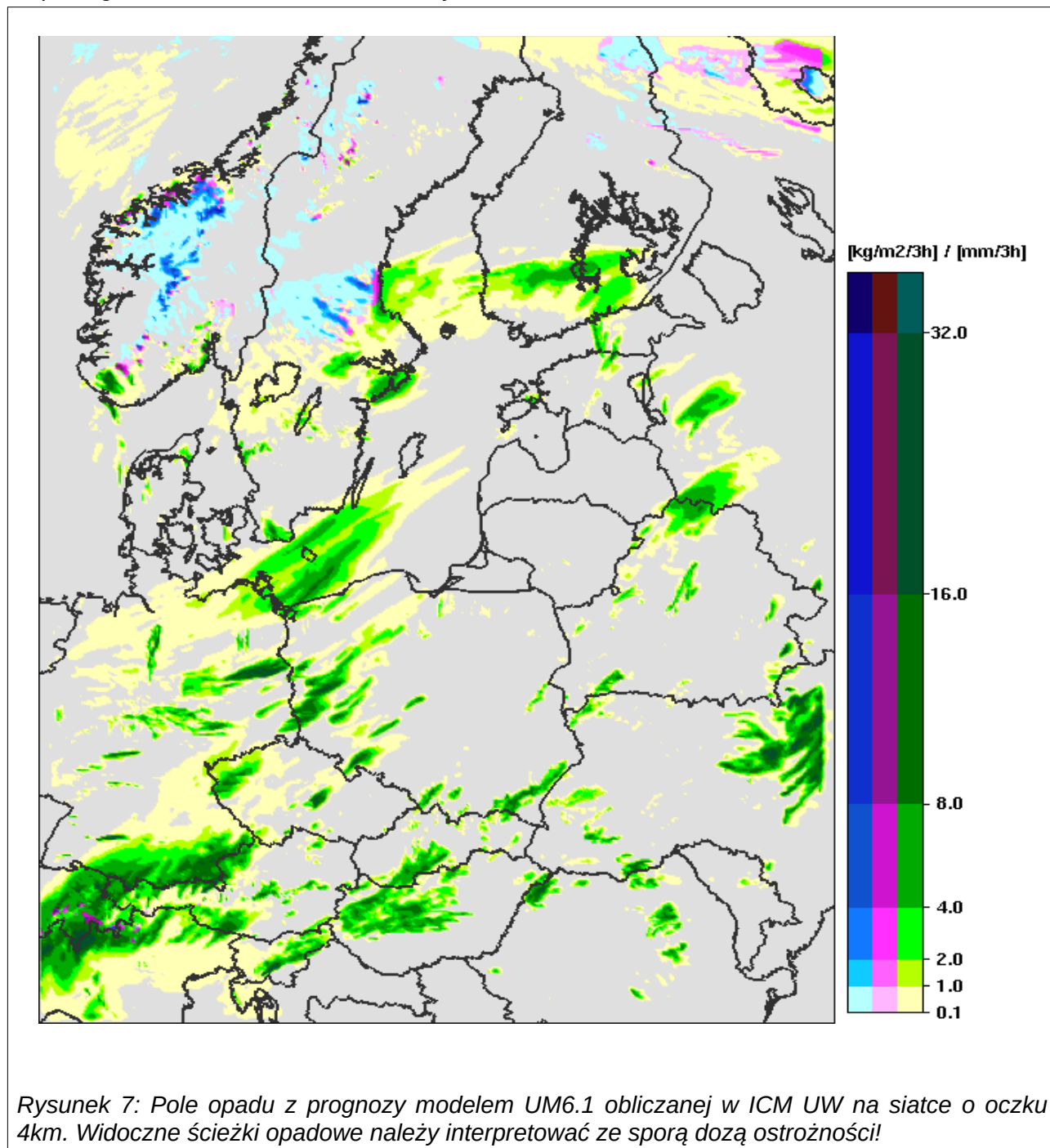
A teraz na przykładzie przejście do modeli niehydrostatycznych. W pewnym momencie okazuje się, że grę „Cywilizacja” zastępujemy tysiącem gier „SimCity” gdzie symulujemy prawa historii i gospodarki na znacznie niższym poziomie – organizmu miasta czy gminy, a nie państwa. Oczywiście, miasta i gminy składają się na państwa – procesy w małej skali, parametryzowane w grze „Cywilizacja” rozwiązujemy w grze „SimCity” bezpośrednio. Zanim nauczymy się używać gry „SimCity” na obszarze takim, na jakim graliśmy „Cywilizacją” tak żeby jednocześnie odtwarzać poprawnie i prognozować procesy w mniejszych (gmina) i większych (kraje i kontynenty) skalach, potrzeba zebrać wiele doświadczeń. Musimy także do gry wprowadzić **poprawnie** znacznie większą liczbę danych.

Prześledźmy tę procedurę porównując dwie generacje modeli numerycznych obliczanych w ICM: stary model hydrostatyczny na siatce 17 km czyli UMPL w wersji 4.5 i model niehydrostatyczny na siatce 4 km czyli UM w wersji 6.1: [http://new.meteo.pl/index\\_um.php](http://new.meteo.pl/index_um.php) .

Nowy model nad tym samym obszarem zawiera ~25x więcej oczek siatki (także inne są oczka w pionie), potrzebuje więc 25x więcej danych początkowych! Tych danych nie jest w stanie dostarczyć stara sieć pomiarowa. Sytuacja jest jeszcze trudniejsza: ponieważ model (teoretycznie) może obliczyć zjawiska o bardzo krótkim okresie życia (np. duże chmury burzowe), ma krótszy krok czasowy (narzucony przez tzw. warunek Couranta) i potrzebuje częstszej asymilacji danych! Skąd wziąć te dane? Teoretycznie, można wykorzystać do tego dane satelitarne i radarowe, w praktyce nie do końca wiemy jak to zrobić. Przecież satelita odbiera informacje o promieniowaniu w różnych długościach fal, a radar informacje o odbiciowości radarowej. My musimy wprowadzić do każdego oczka modelu informacje o ruchu powietrza, temperaturze, wilgotności czy wodności chmur. Jest to trudne, wymaga zarówno dobrej (co najmniej na poziomie doktoratu!) znajomości modeli, jak i technik radarowych i satelitarnych, nie wspominając o zaawansowanej matematyce i dobrych podstawach fizycznych. Tylko wiodące w skali międzynarodowej ośrodki naukowo-



badawcze są w stanie odpowiedzialnie (z szansami na sukces) podjąć się tego rodzaju działań, a do pełnego sukcesu na razie daleko nie tylko u nas...



W rezultacie, teoretyczne możliwości modeli niehydrostatycznych w najbliższych latach nie zostaną w pełni wykorzystane, także w Polsce. Na razie koledzy z ICM walczą z licznymi problemami związanymi z wprowadzaniem danych do modelu i pewnymi nieoczekiwanymi zachowaniami. W efekcie, opady konwekcyjne prognozowane przez model czasem wypadają w niewłaściwym miejscu, a ścieżki opadowe jakie widać na mapach opadów są często zaszumione i położone nie tam gdzie trzeba (Rys.1.). Inne kłopoty stwarza niehydrostatyczny model COAMPS –

tam gorsze są warunki brzegowe uzyskiwane z amerykańskiego modelu GFS i gorsza mapa podłoża. Także model konsorcjum COSMO, stosowany w IMGW, stwarza liczne problemy, być może będą w nim potrzebne poważne zmiany. Problemów z nową generacją modeli jest więcej. W miarę ich rozwiązywania prognozy modelami nowej generacji będą coraz bardziej wiarygodne i dokładne. Na razie jednak nie interpretujemy każdej kreski czy plamy na mapie generowanej przez model zbyt dosłownie.

W dalszej części wykładu zajmiemy się modelami prognostycznymi obejmującymi obszar Polski i Europy Środkowej. Nie ma w niej ilustracji, ich rolę spełniają odnośniki do stron z modelami czy prognozami.

### **Prognozy numeryczne dla obszaru Polski i Europy (uwaga - tekst nieaktualizowany).**

W Polsce przygotowaniem prognoz pogody zajmuje się statutowo Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Wyniki obliczeń numerycznych prognoz średnio i długoterminowych, wykorzystywane w opracowywaniu prognoz końcowych a także używane w modelach mezoskalowych jako warunki brzegowe, uzyskuje się w drodze międzynarodowej wymiany danych meteorologicznych dzięki współpracy ze służbami meteorologicznymi innych krajów.

Ośrodki IMGW w Warszawie i Krakowie prowadzą operacyjnie obliczenia prognoz krótkoterminowych korzystając z modeli mezoskalowych: niemieckiego (tzw. model COSMO rozwijany we współpracy międzynarodowej koordynowanej przez Deutscher Wetterdienst wariant niemieckiego LOKALMODELL, <http://cosmo-model.cscs.ch/>) i francuskiego (model ALADIN, rozwijany w Meteo France w ramach konsorcjum kilku krajów europejskich, <http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>).

Oba te modele bardzo różnią się od siebie, zarówno w szczegółowej postaci równań stanowiących podstawę modelu, jak i w metodzie numerycznego rozwiązywania tych równań.

Niestety w obu przypadkach występują problemy z bezpośrednią asymilacją danych pomiarowych, w związku z tym przebieg „wirtualnej rzeczywistości” odbiega często od tego co za oknem.

Wyniki prognoz obliczanych modelami COSMO/LM i ALADIN są dostępne w serwisie IMGW:

<https://modele.imgw.pl/>.

Modele wykorzystywane przez IMGW zasilane są warunkami brzegowymi dostarczanymi przez konsorcja ALADIN i COSMO, czyli służby meteorologiczne Francji i Niemiec.

Interdyscyplinarne Centrum Modelowania Matematycznego i Komputerowego Uniwersytetu Warszawskiego (czyli ICM) prowadzi badania naukowe nad rozwojem modeli mezoskalowych, przede wszystkim nad asymilacją danych, korzystając ze wspomnianego już modelu brytyjskiej służby meteorologicznej (UM6.4), zasilanego warunkami brzegowymi dostarczanymi przez Brytyjską Służbę Meteorologiczną. Innym modelem jest wspomniany już amerykański model

COAMPS (<http://coamps.icm.edu.pl/>). Do niedawna zasilany byłon warunkami brzegowymi ze światowego modelu marynarki USA NOGAPS, aktualnie pracuje na danych z GFS i asymilowane są do niego w pewnym zakresie dane obserwacyjne ze stacji synoptycznych. Warto zwrócić uwagę na nesting (zagnieżdzenie) siatek modelu COAMPS, najdrobniejsza siatka ma 4km i jest porównywalna z siatką UM6.4. Można więc porównywać prognozy obliczane tymi modelami!

Dotarcie do wyników prognozy z modelu globalnego i wykonanie obliczeń prognozy mezoskalowej modelem niehydrostatycznym jest dzięki internetowi możliwe do wykonania przez każdego (niestety bez asymilacji danych).

Pełne wyniki obliczeń modelem GFS, na podstawie których można pobrać warunki brzegowe, są powszechnie dostępne na serwerach National Centers for Environmental Protection (NCEP) w USA - NOMADS, np.: [http://nomad5.ncep.noaa.gov/ncep\\_data/](http://nomad5.ncep.noaa.gov/ncep_data/). Każdy może skorzystać z tych danych i używając darmowego oprogramowania, np.: [GEMPAK](#) • [McIDAS](#) • [IDV](#) generować sobie własne mapy prognostyczne czy meteogramy. W ten sposób, z wykorzystaniem programu GRADS (<http://www.iges.org/grads/>) powstają wykresy i mapy dostępne w serwisie <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/> .

Korzystając z tych danych każda uczelnia czy jednostka meteorologiczna, a nawet każdy amator wyposażony w odpowiedni komputer i wiedzę oraz umiejętności może samodzielnie obliczać prognozy mezoskalowe. Dostępne są w sieci i dobrze udokumentowane kody modeli numerycznych MM5 (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>), WRF (<http://www.wrf-model.org/index.php>), RAMS (<http://rams.atmos.colostate.edu/>), ETA (<http://www.cptec.inpe.br/etaweb/index.shtml>). Przykładem takich „amatorskich”, ale wymagających w praktyce dużej wiedzy meteorologicznej i sprawności komputerowych wizualizacji wyników modelu GFS i lokalnie już wykonanych obliczeń dla Polski modelem WRF jest witryna prowadzona przez Piotra Dżakow: <https://meteomodel.pl/> .

Prognozy obejmujące Europę Środkową, wykonywane z wykorzystaniem tych modeli, zasilanych przez warunki brzegowe z NCEP lub z European Centre for Medium-Range Weather Forecasts <http://www.ecmwf.int/> są dostępne na wielu serwerach (adresy niektórych z nich podano na końcu wykładu). Niestety, Polska nie jest członkiem ECMWF i nie jest z ECMWF stowarzyszona, co skutecznie blokuje dostęp polskiej meteorologii do najlepszego ośrodka prognoz numerycznych na świecie i wyników obliczeń modelami tam wykorzystywanymi.

ZFA IGF UW zajmuje się m. in. badaniami podstawowymi związanymi z numerycznym modelowaniem pogody. Współpracuje blisko z National Center for Atmospheric Research (USA) i wykorzystując polski, choć stworzony w USA model EULAG (<http://www.mmm.ucar.edu/eulag/>) modeluje procesy konwekcyjne i turbulencję w atmosferze.

### **Rada praktyczna.**

Numeryczne prognozy pogody są wspaniałym osiągnięciem współczesnej nauki i pozwalają lepiej niż kiedykolwiek w przeszłości prognozować pogodę. Jednak, jak wszystko, co potrafimy



stworzyć, są niedoskonałe. Musimy o tym pamiętać, korzystając z ich wyników.

Pamiętajmy, że prognoza prognozie nierówna. Czego innego możemy oczekiwać od prognozy modelem globalnym (masy powietrza, wyże, niże, kierunki napływu, zgrubna informacja o frontach), czego innego od prognozy mezoskalowej (cykl dobowy, lepsza informacja o frontach, niektóre cechy cyrkulacji lokalnych), jeszcze czego innego od niehydrostatycznych modeli na oczkach kilkukilometrowych (lepsza reprezentacja zjawisk lokalnych i konwekcyjnych). W każdym przypadku wyniki zależą nie tylko od modelu, ale w wielkim, czasami zasadniczym stopniu od naszej zdolności „nakierowania” modelu na właściwy tor, czyli od asymilacji danych. Przy ograniczonej informacji o stanie atmosfery to ostatnie jest trudne do wykonania i prognoza nawet wykonana idealnym modelem MOŻE SIĘ NIE SPRAWDZIĆ. Łatwiej interpretować wyniki prognoz, wiedząc że:

*należy weryfikować prognozę z przebiegiem pogody za oknem, widocznym na obrazach satelitarnych i radarowych. Gdy występuje rozbieżność, warto zastanowić się, czy dzieje się tak wskutek tego że procesy rzeczywiste bieżą innym tempem niż te w prognozie - wtedy wystarczy pewna korekta czasowa – czy może rzeczywistość modelu numerycznego poszła „inną ścieżką” niż to co za oknem - wtedy przestajemy ufać wynikom prognozy.*