





Na początku XX w.

**V.F.K. Bjerknes** i jego koledzy z tzw. norweskiej szkoły meteorologii, wykorzystując m.in. wyniki prac lorda Kelvina i polskiego fizyka L. Silbersteina w dziedzinie mechaniki płynów, zaproponowali i rozwinęli układ równań opisujący rozwój pól meteorologicznych w czasie.

Stosując prawa hydrodynamiki i termodynamiki do opisu przepływów atmosferycznych stworzyli podstawy nowoczesnej meteorologii dynamicznej.

Niestety ten skomplikowany układ równań różniczkowych cząstkowych, obejmujący równania ruchu, równanie ciągłości i równania termodynamiki, nie daje się prosto rozwiązać.



*V. Bjerknes.*

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi + F_u$$

$$c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \omega = Q + F_T$$

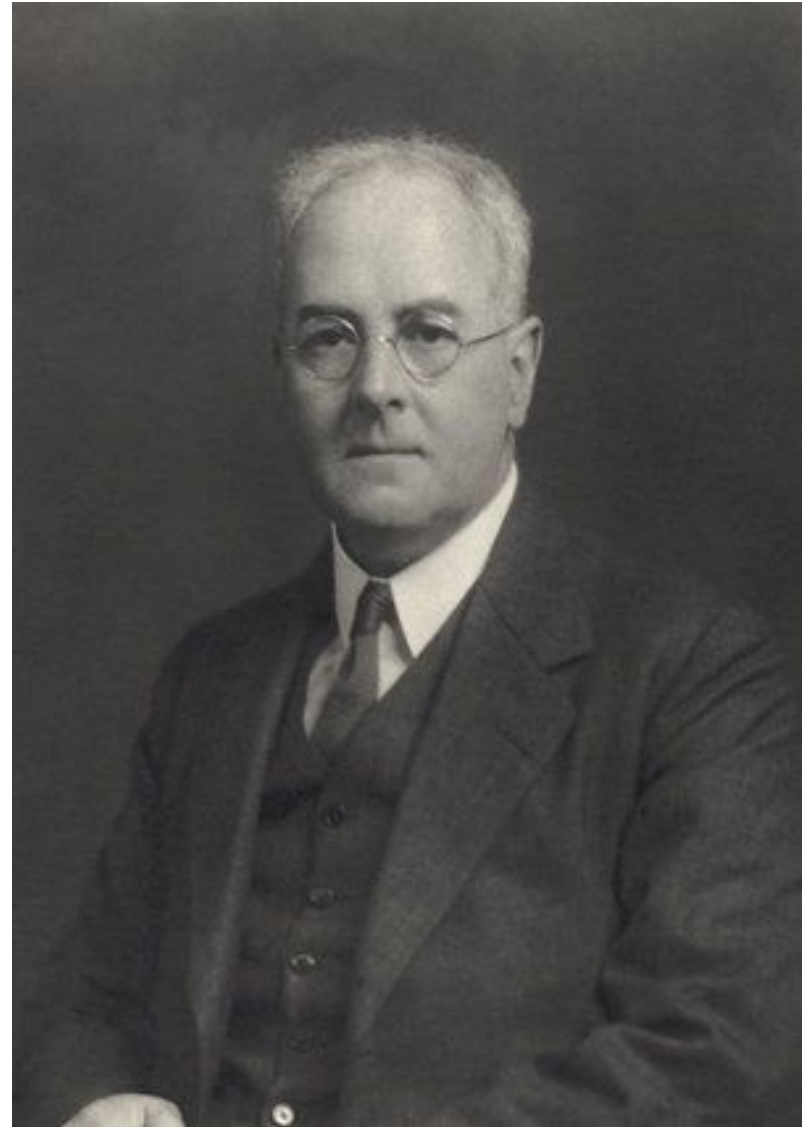
$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \nabla \cdot \mathbf{u}$$

Ten układ równań:

zasada zachowania pędu, zasada zachowania energii oraz równanie ciągłości (czyli zasada zachowania masy, uzupełniony równaniem konstytutywnym (np. równaniem gazu doskonałego dla powietrza) nosi nazwę „równań pierwotnych” (ang. „primitive equations”) i jest podstawą geofizycznej dynamiki płynów.

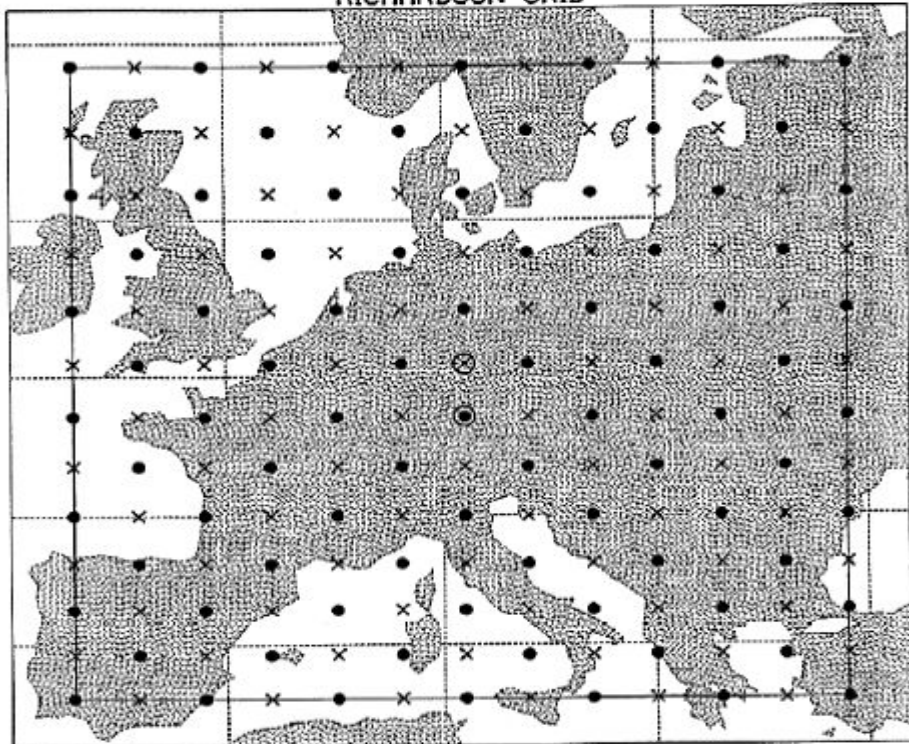
**Lewis Fry Richardson** służąc w wojsku jako sanitariusz polowy podczas I Wojny Światowej rozwiązał ten w sposób przybliżony, zastępując równania różniczkowe równaniami różnicowymi.

Obszar atmosfery nad Europą Zachodnią podzielił na jednakowe, regularne kostki i na podstawie danych pomiarowych z rozłożonych nierównomiernie stacji pomiarowych w każdej z nich wyznaczył przez interpolację danych początkowe wartości ciśnienia, temperatury, kierunku i prędkości wiatru. Następnie obliczył krok po kroku przewidywane sześć godzin później wartości tych pól w każdym oczku siatki.



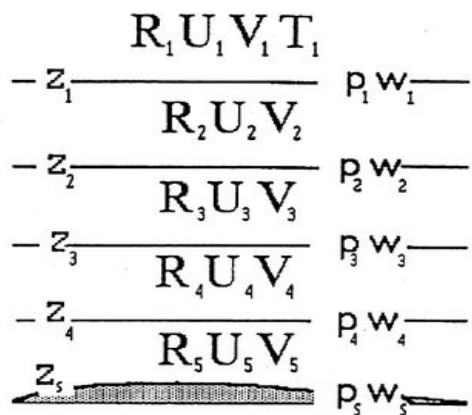


RICHARDSON GRID



Wynik okazał się kompletnie niezgodny z wynikami obserwacji w chwili czasu odpowiadającej prognozie.

Wynik obliczeń nie mógł być dobry, ponieważ dokonując przybliżeń Richardson nie znał kilku warunków matematycznych, jakie powinny spełniać jego kostki i kroki obliczeniowe. Warunki te odkryto dopiero w latach 30. i 40. XX w.



$U, V$	$P$	$U, V$
$P$	$U, V$	$P$
$U, V$	$P$	$U, V$

Richardson popełnił też inny błąd, którego wtedy nie mógł uniknąć: nie przeprowadził asymilacji danych i miał problemy związane z aliasingiem.

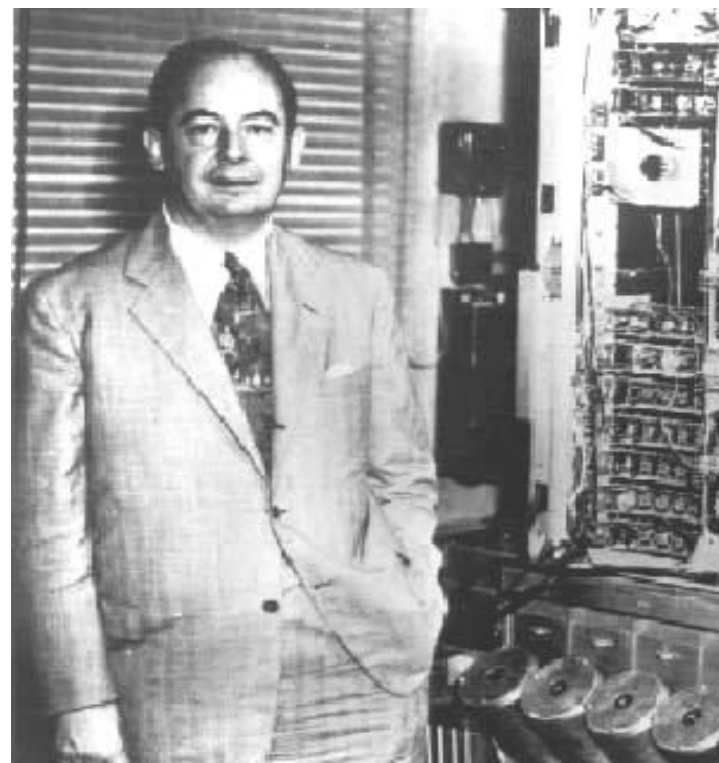
Mimo niepowodzenia opublikował w 1922 r. wyniki pracy w rozprawie “**Weather Forecasting By Numerical Process**”.

Pozostaje ona wspaniałym przykładem świadczącym, że warto opublikować nawet negatywny wynik, jeśli został otrzymany w wyniku rzetelnej pracy naukowej.

Szukanie błędu w prognozie Richardsona doprowadziło do sprecyzowania podstawowych warunków analizy numerycznej i doprowadziło do rozwoju obliczeniowej mechaniki płynów.



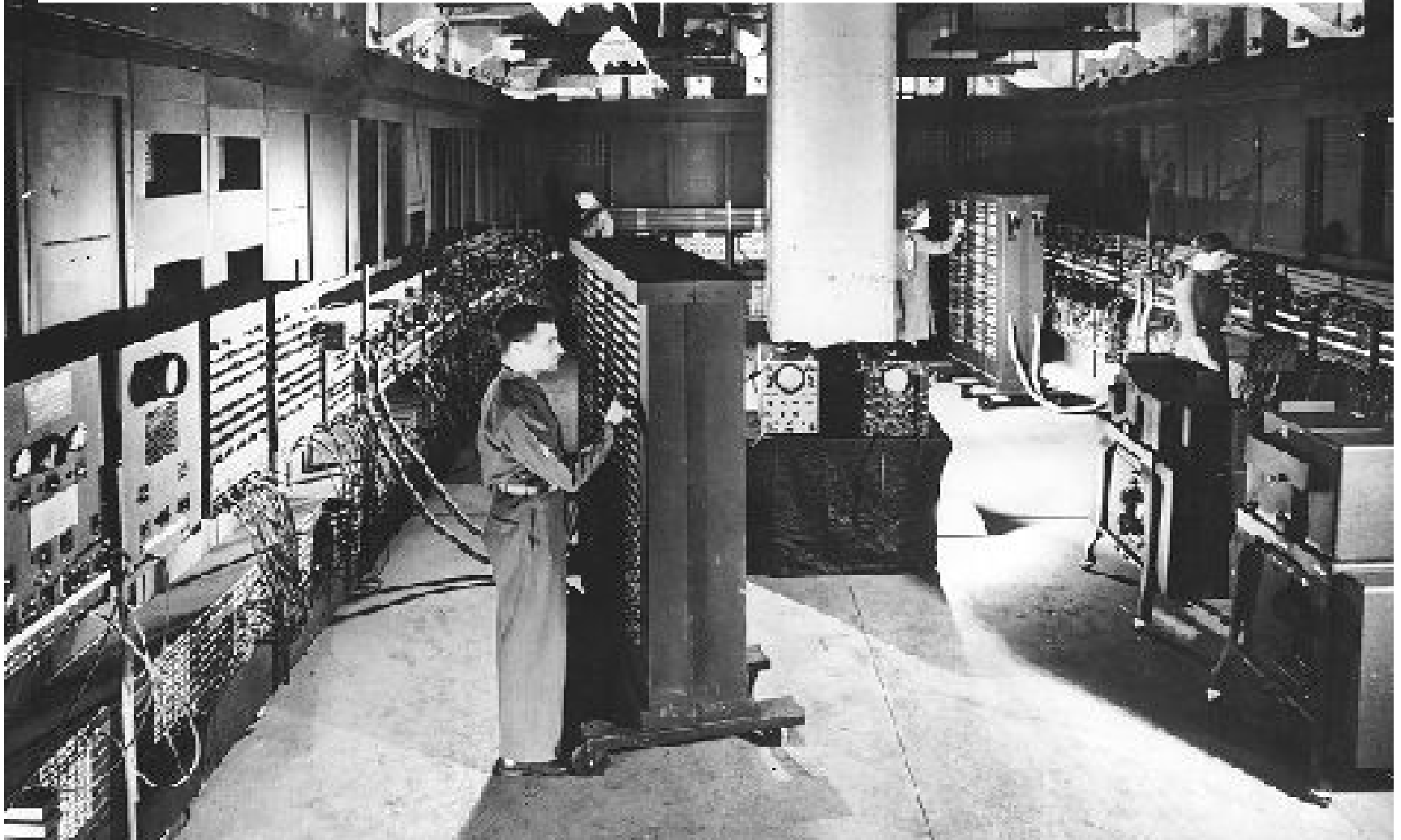




Amerykański meteorolog **Jule Charney** podczas stażu naukowego na uniwersytecie w Oslo, siedzibie norweskiej szkoły meteorologii, zaproponował daleko idące uproszczenia układu równań przepływów atmosferycznych, które pozwoliły na sporządzenie pierwszej poprawnej matematycznie i numerycznie prognozy pogody.

Charney wraz z amerykańskim matematykiem pochodzenia węgierskiego, Johnem **von Neumannem** przeprowadzili obliczenia pod koniec roku 1952 na słynnym komputerze EINAC. Było to też pierwsze poprawne numerycznie rozwiązanie zagadnienia obliczeniowej dynamiki płynów

# *Electronic Numerical Integrator And Computer*



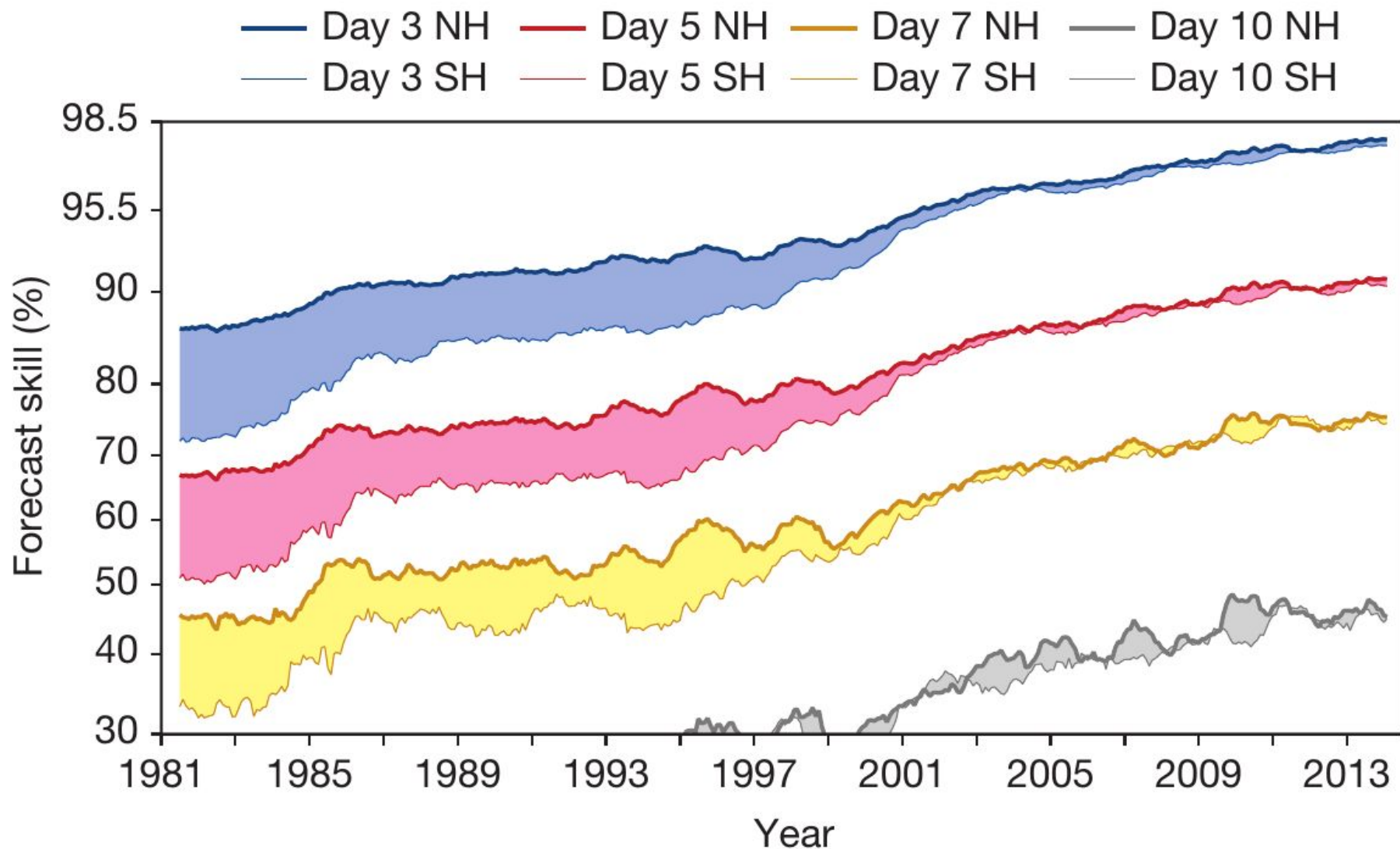
**ENIAC zajmował pomieszczenie o  
rozmiarach  
10 na 15 metrów**



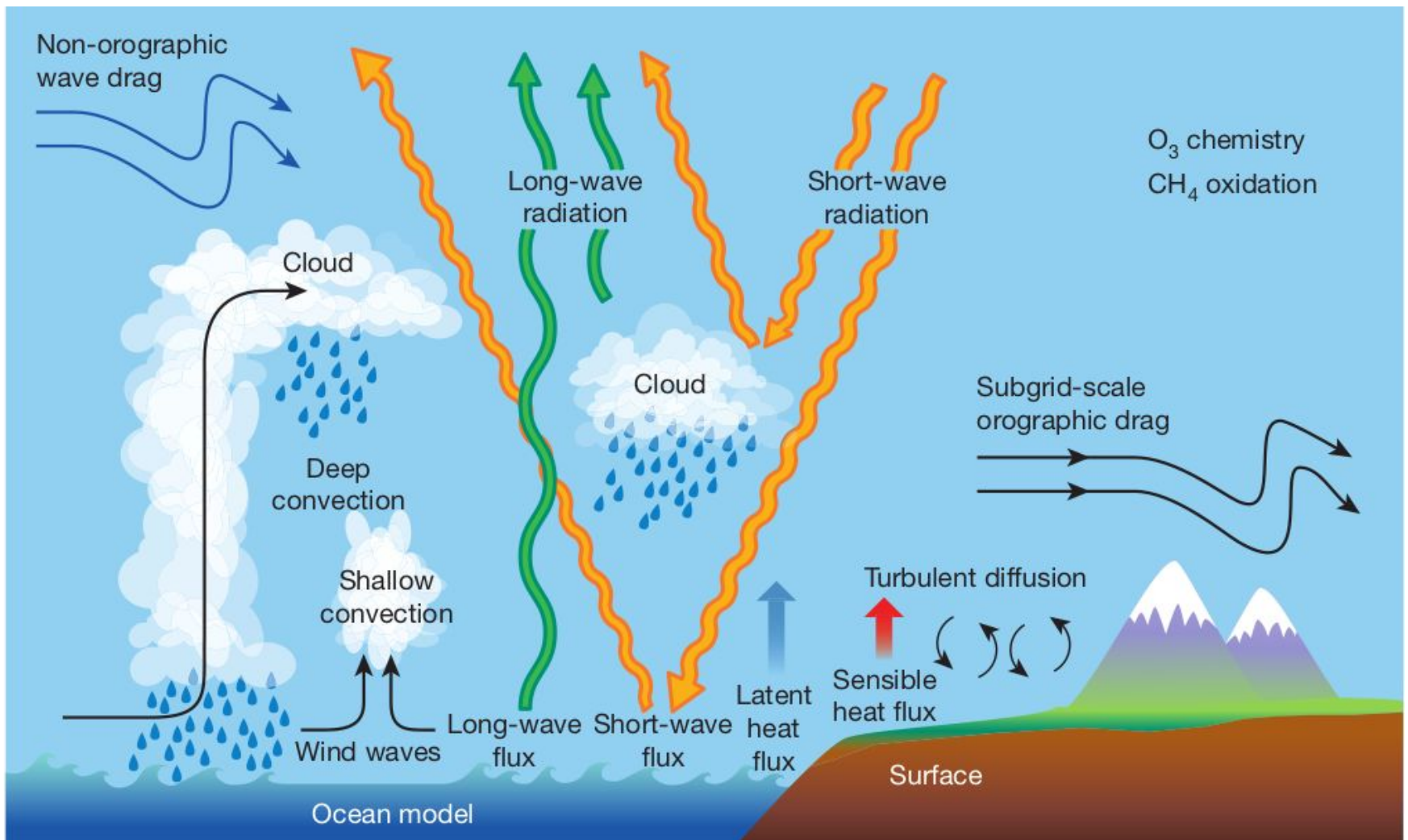
Pierwsze prognozy numeryczne nie były lepsze niż prognozy opracowywane przez doświadczonych meteorologów, były natomiast znacznie bardziej kosztowne. Tak więc do połowy lat 70. XX w. trwała rywalizacja pomiędzy metodami tradycyjnymi, wspomaganymi m.in. przez rozwijającą się meteorologię satelitarną i radarową, a metodami numerycznymi.

Numeryczne prognozy pogody stawały się coraz lepsze wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów, powstawaniem nowych metod numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych oraz coraz doskonalszych postaci układu równań dynamiki i termodynamiki, uwzględniających procesy radiacyjne w atmosferze, powstawanie chmur i opadów, a także oddziaływanie atmosfery z powierzchnią Ziemi.

**Prognozy numeryczne (ang. Numerical Weather Prediction, NWP).** Startując z warunku początkowego, uzyskanego na podstawie analizy stanu atmosfery, rozwiązuje się układ równań (model matematyczny) opisujących procesy dynamiczne i termodynamiczne w atmosferze (m.in. związane z oddziaływaniem promieniowania elektromagnetycznego na atmosferę, z ruchami mas powietrza oraz z cyklem hydrologicznym).



Skuteczność prognozy geopotencjału powierzchni 500 hPa w modelach globalnych.



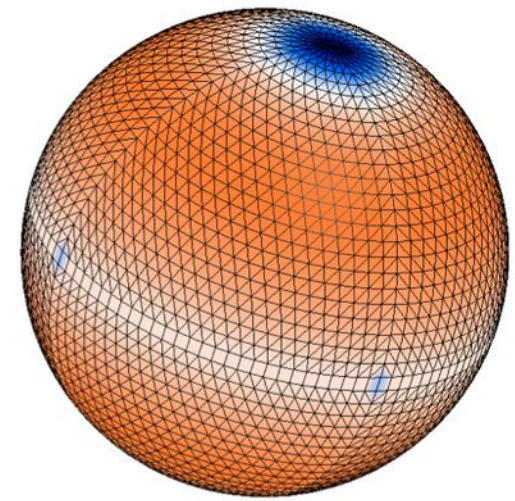
Procesy fizyczne mające znaczenie dla prognozowania pogody. Nie są one jednoznacznie rozwiązane w obecnych modelach NWP, ale są one reprezentowane poprzez parametryzacje opisujące ich wkład do rozwiązywanych skal w kategoriach masy, pędu i przenoszenia ciepła.



## Zwyczajna numeryczna prognoza pogody „od kuchni”.

Pełny model numeryczny, za pomocą którego otrzymuje się numeryczną prognozę pogody, nazywany **numerycznym modelem prognostycznym**, składa się z trzech części (poziomów):

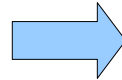
- zamkniętego układu równań opisujących zjawiska fizyczne w atmosferze (tworzącego matematyczny model meteorologiczny),
- algorytmów numerycznego rozwiązywania równań modelu matematycznego,
- kodu (programu komputerowego), który pozwala na uzyskanie rozwiązania na konkretnym superkomputerze czy maszynie obliczeniowej.

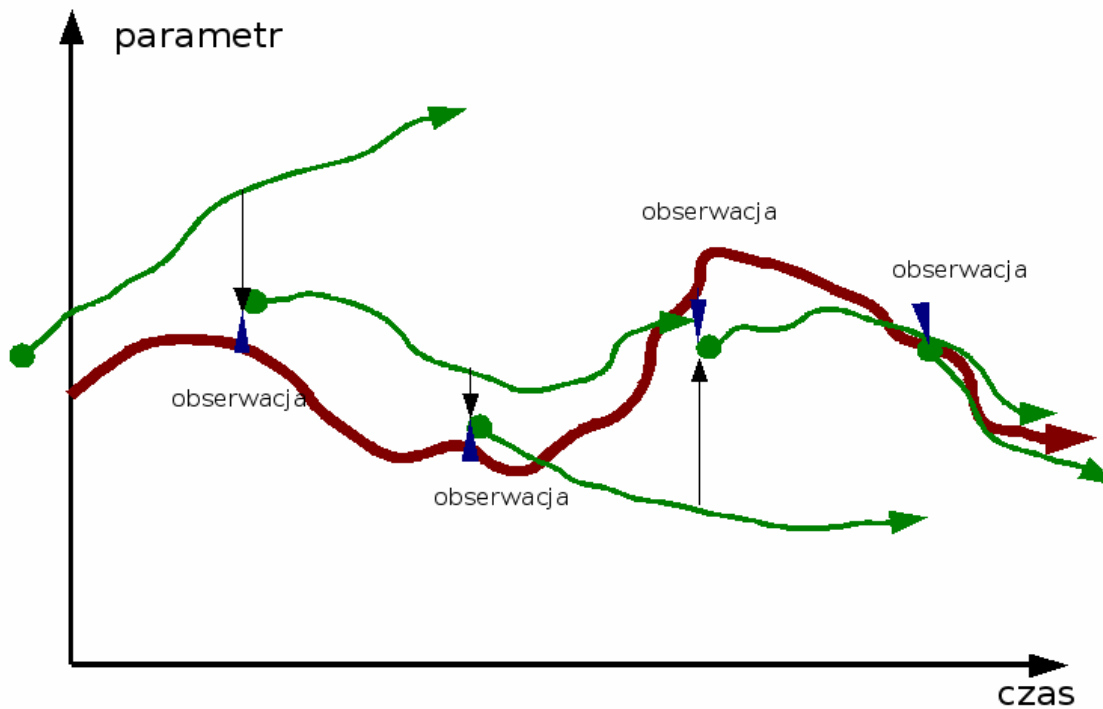


N24 octahedral Gaussian grid



Dane meteorologiczne potrzebne do rozwiązania uzyskuje się w wyniku procedury zwanej **asymilacją danych meteorologicznych**. Przebiega ona w 2 etapach; pierwszy polega na kontroli i weryfikacji danych z pomiarów i obserwacji (odrzućenie danych obarczonych błędem pomiaru lub transmisji), drugi — na przyjęciu danych wyjściowych do modelu prognostycznego, a następnie na zasilaniu bieżącej już prognozy nowymi nadchodzącymi danymi.





Asymilacja danych do modelu.

Czerwona linia – rzeczywistość.

Zielone linie – kolejne prognozy w „wirtualnej rzeczywistości” modelu.

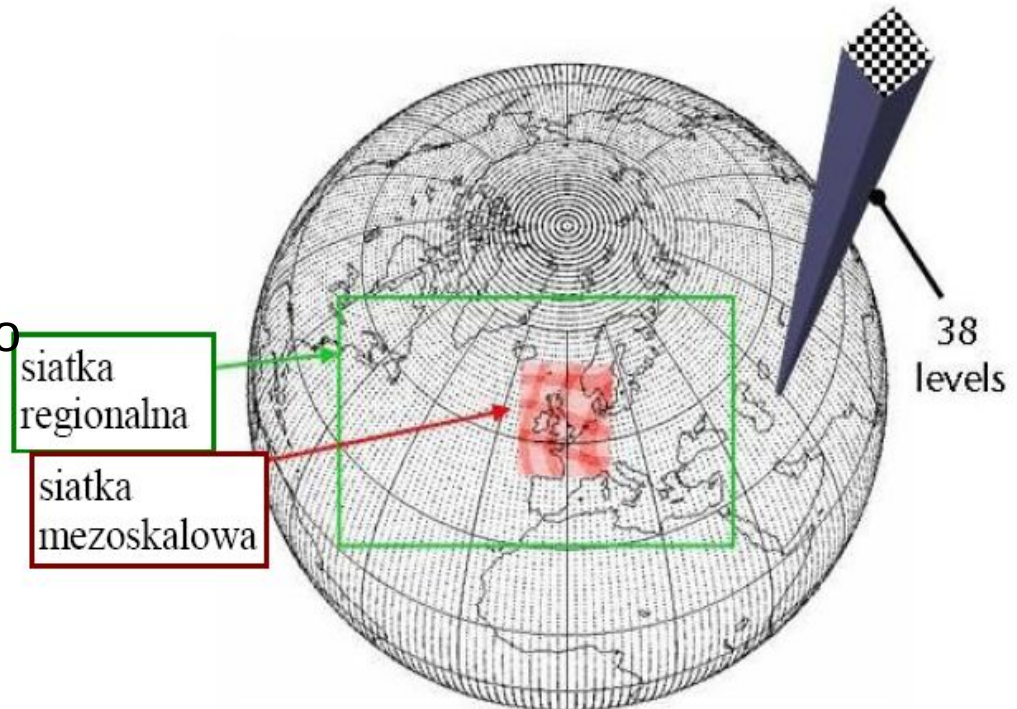
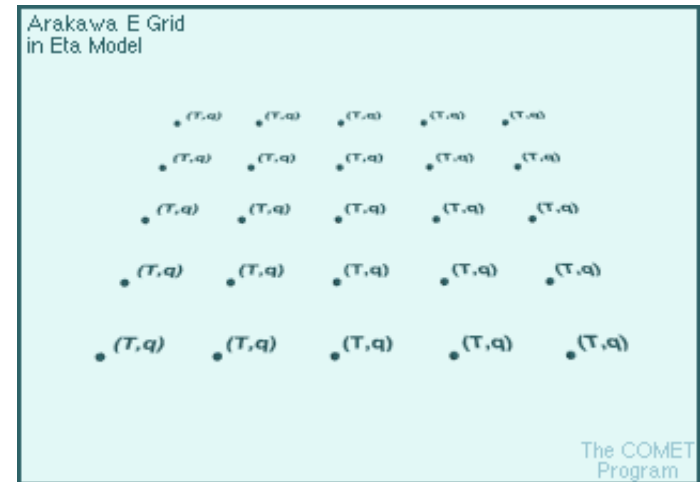
Niebieskie i czarne strzałki – wprowadzanie danych rzeczywistych do modelu i obliczenia kolejnej prognozy.



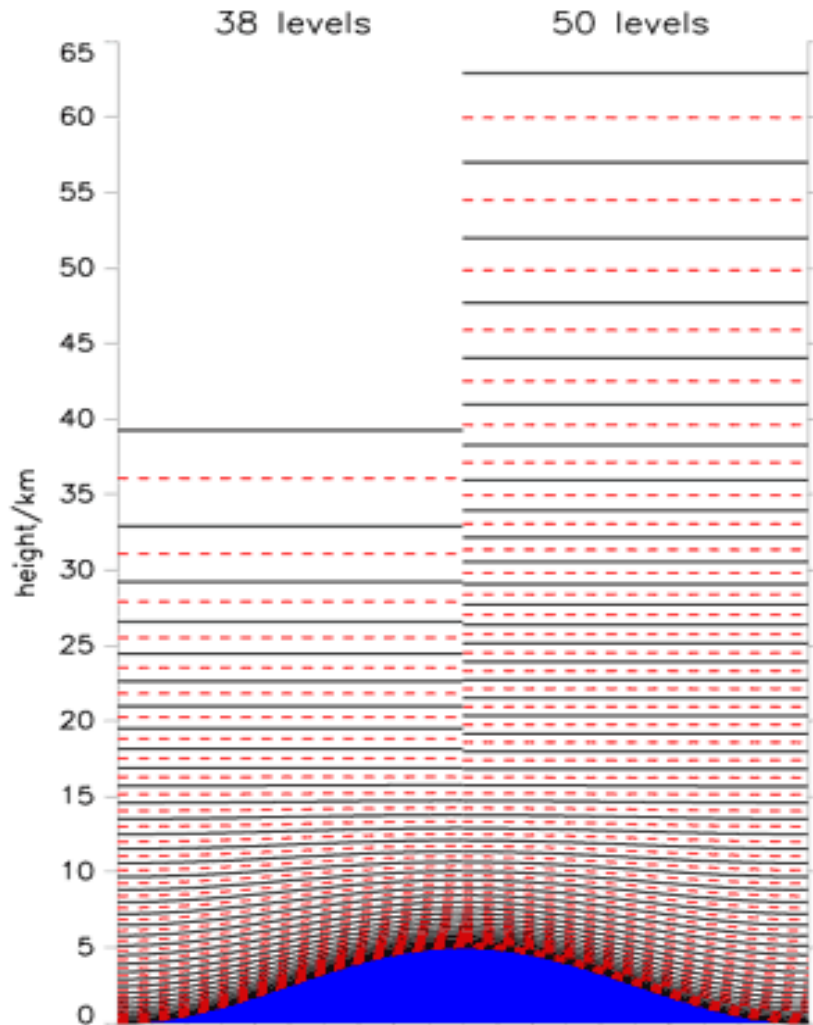
Po asymilacji danych pola parametrów fizycznych muszą być ze sobą zgodne, np. pola wiatru, ciśnienia, temperatury i wilgotności muszą spełniać zależności zakodowane w równaniach modelu.

Pola muszą też być powiązane z wirtualną postacią modelu prognostycznego, tj. tzw. siatką obliczeniową.

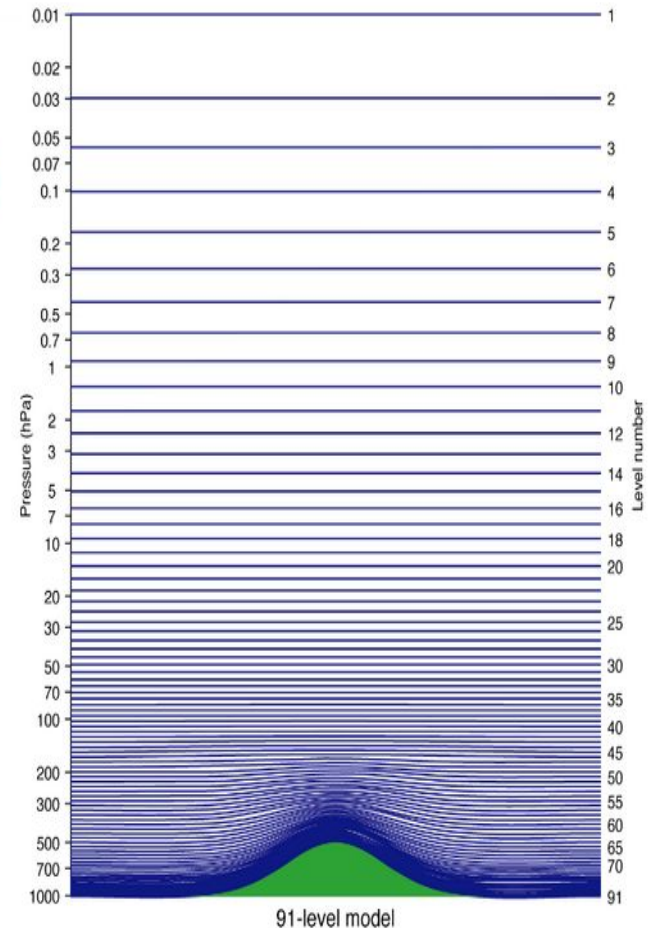
Wymiary oczka siatki w poziomie zależą od rodzaju modelu numerycznego i wynoszą od kilkudziesięciu kilometrów w przypadku **modelu globalnego** do kilku (kilkunastu) kilometrów w przypadku **modelu mezoskalowego**.



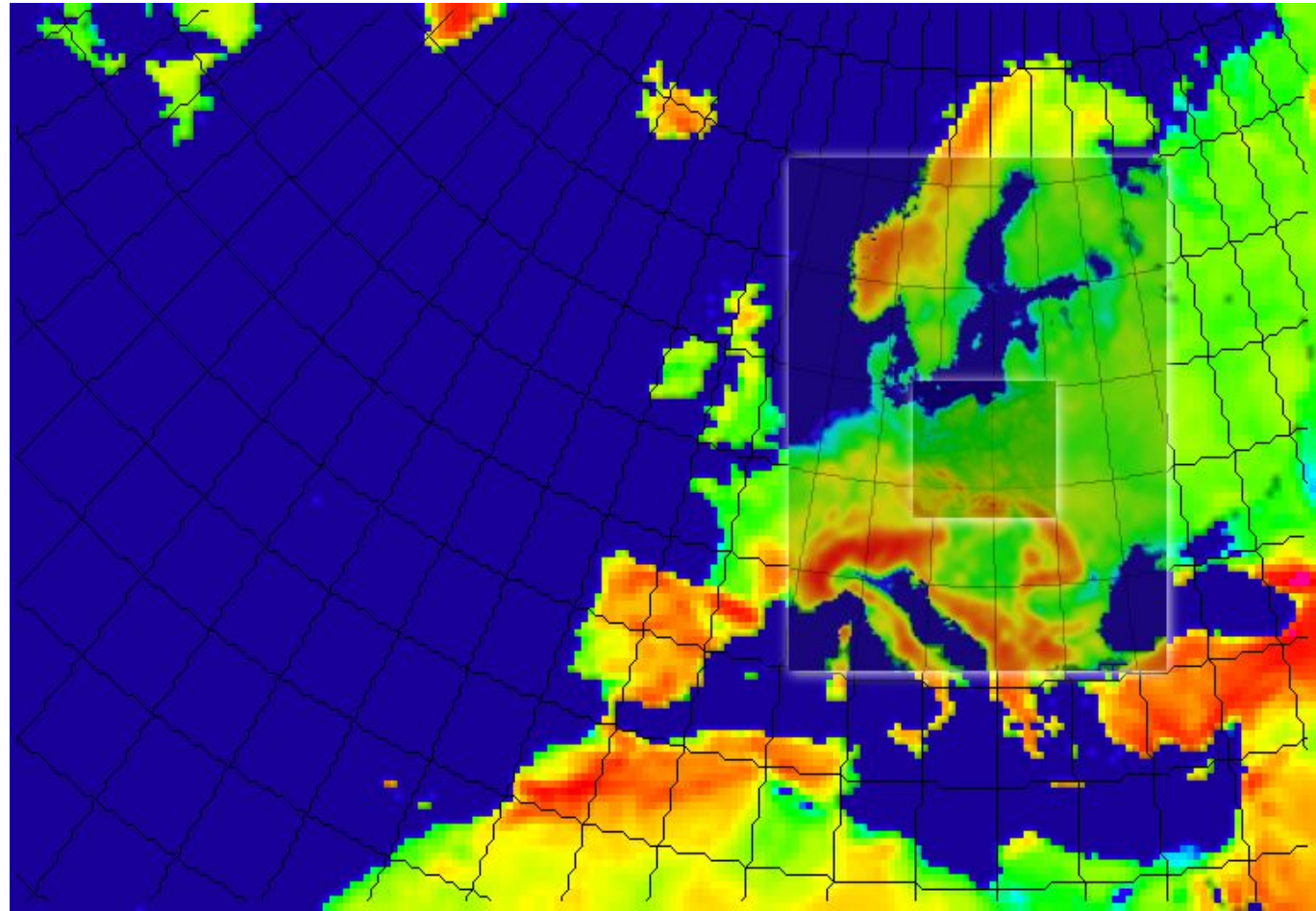
W pionie siatka obejmuje obszar troposfery i znaczną część stratosfery; ma kilkadziesiąt poziomów sięgających wys. 30–40 km, zagęszczonych w dolnych warstwach atmosfery.



**Operational  
model levels  
(91-level model)**



Zagnieżdżanie siatek obliczeniowych lub modeli pozwala, korzystając z wyników obliczeń w większej skali (warunki brzegowe) wykonać bardziej precyzyjne obliczenia na wybranych obszarach.

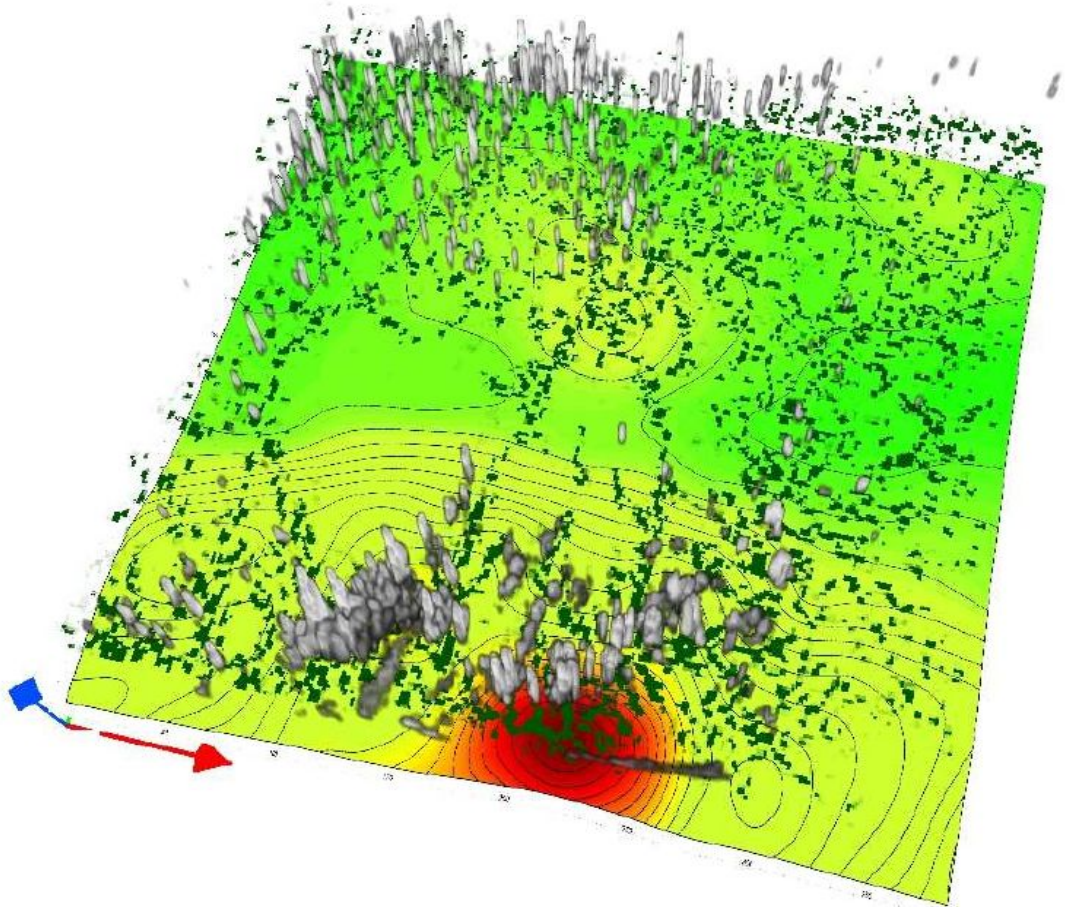




Pole chmur konwekcyjnych  
nad południową Polską.

Model EULAG na siatce  
1km zagnieżdżony w siatce  
modelu numerycznego  
UMPL.

Piotrowski , Z.P., Smolarkiewicz P.K,  
**Malinowski S.P.** And Wyszogrodzki A.A.,  
**2009**: On numerical realizability of thermal  
convection. *J. Comput. Phys.*, **228**,: 6268-  
6290; doi:10.1016/j.jcp.2009.05.023



Horyzontalne skale konwekcji: od 300 km (rozmiar kowadła) po 50-100 m- małe chmurki.

Pionowa skala – od 100m do 16km.



Oczka siatki modeli w poziomie: od kilkudziesięciu km – model globalny, do 1km -najlepsze modele mezoskalowe.

Oczka w pionie: od kilkunastu m w warstwie przyziemnej po kilkaset m w górnej troposferze i stratosferze.

Zdjęcie: NASA



## Introduction – A history

- Resolution increases of the deterministic 10-day medium-range Integrated Forecast System (IFS) over ~25 years at ECMWF:

- 1987: T 106 (~125km)
- 1991: T 213 (~63km)
- 1998: T<sub>L</sub>319 (~63km)
- 2000: T<sub>L</sub>511 (~39km)
- 2006: T<sub>L</sub>799 (~25km)
- 2010: T<sub>L</sub>1279 (~16km)
- **2015?:** T<sub>L</sub>2047 (~10km)

Average grid spacing	HRES	ENS		4DVAR inner loops			EDA		
		Medium-range	Monthly extension	1st	2nd	3rd	Outer	1st	2nd
128 km									
64 km			TL319	TL255	TL255	TL255		TL159	TL159
32 km			TL639	TL319	TL399			TL191	TL191
16 km	TL1279		TCo639				TL399		
9 km	TCo1279						TCo639		

- **2020-???:** (~1-10km) Non-hydrostatic, convection-permitting, different cloud-microphysics and turbulence parametrization, different dynamics-physics interaction ?

modele mezoskalowe muszą być o krok lub dwa z przodu..... i są



## Challenges for a New Generation of Regional Forecast Models

Yano, Geleyn,  
Malinowski

*Workshop on Concepts for Convective Parameterizations  
in Large-Scale Models III: Increasing Resolution and Parameterization;  
Warsaw, Poland, 17–19 March 2010*

Naukowcy wierzyli, że w modelach o siatce pozwalającej bezpośrednio rozwiązywać głęboką konwekcję będzie można pominąć jej parametryzację i bezpośrednio odtwarzać chmury Cb, struktury mezoskalowe, dobrze symulować opady konwekcyjne.

Jednak, jak pokazują dyskutowane na spotkaniu wyniki badań pokazują że gęsta siatka i „wyłączenie” dotychczasowych parametryzacji pociąga za sobą poważne a niedoceniane dotąd konsekwencje. **Modele generują albo biedne, silnie zlokalizowane obszary opadów konwekcyjnych, albo nie są w stanie wygenerować opadu nawet w warunkach silnej niestabilności.** Poprawa prognozy związana z zagęszczeniem siatki modelu jest nieznaczna.

**Możliwość odtworzenia rzeczywistych struktur konwekcyjnych ze wzrostem rozdzielczości siatki poprawia się bardzo powoli. Jeden z uczestników spotkania demonstrował wyniki pokazujące, że żeby dobrze odtworzyć strukturę prądów konwekcyjnych w wyidealizowanej potrzebna jest siatka modelu o rozdzielczości 50m.**

## **Wnioski:**

Nadzieja, że nowe modele numeryczne o zwiększonej rozdzielczości poprawia znacząco prognozę niebezpiecznych zjawisk konwekcyjnych nie zawsze potwierdza się.

Pomimo ogromnych postępów w modelowaniu, niekompletna znajomość podstawowych procesów fizycznych prowadzących do organizacji konwekcji oraz procesów wewnątrz chmur oraz trudności w rozdzieleniu procesów bezpośrednio rozwiązywanych na siatce modelu i tych które wymagają parametryzacji ograniczają wiarygodność wyników

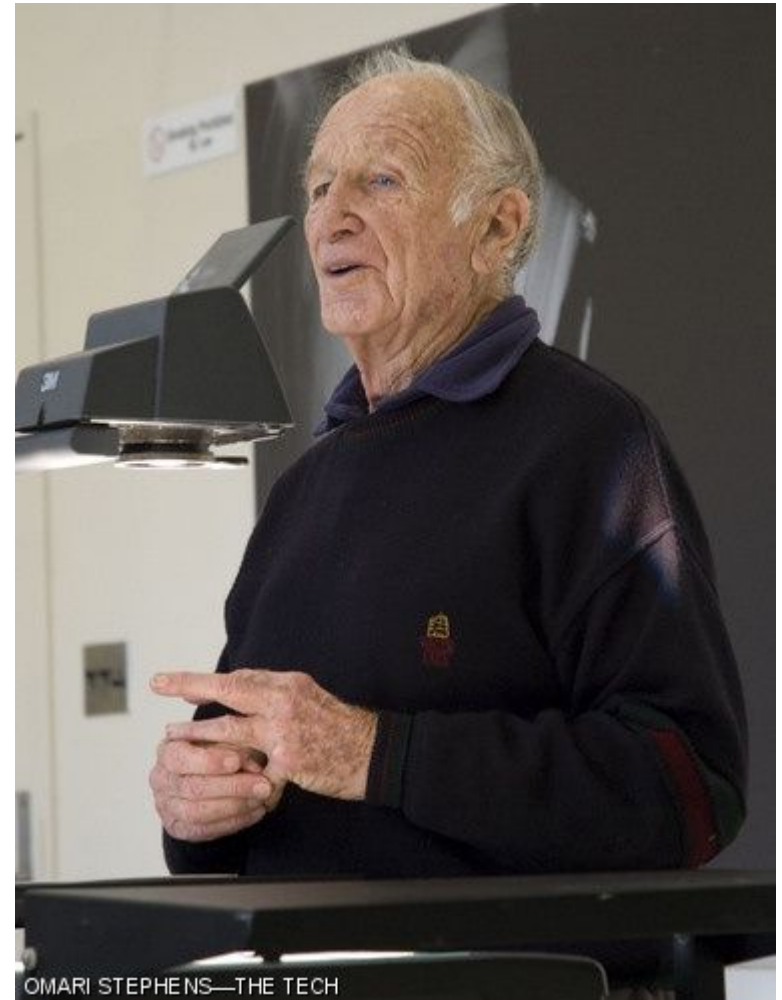
Szczegółowa i dokładna (w przestrzeni) prognoza zjawisk konwekcyjnych jest na razie poza naszym zasięgiem.

W nowcastingu rola teledetekcji radarowej i satelitarnej na długo pozostanie kluczowa.

Jak widać, mimo ogromnego postępu w nauce i technice prognozy numeryczne nie są doskonałe; można też udowodnić, że nie byłyby doskonałe nawet w przypadku znalezienia idealnego układu równań, opisujących procesy w atmosferze, i rozwiązania go niezwykle dokładnie.

Odkrycia tego dokonał w 1963 r. amerykański meteorolog Edward N. Lorenz.

To odkrycie pozwala ulepszać prognozy w inny sposób niż przez coraz dokładniejsze przybliżenia i drobniejsze siatki.

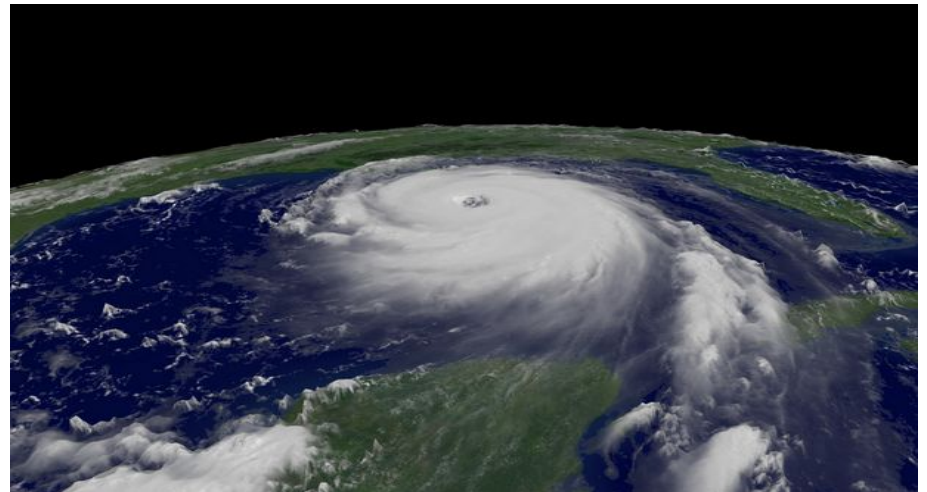
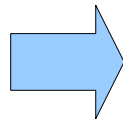
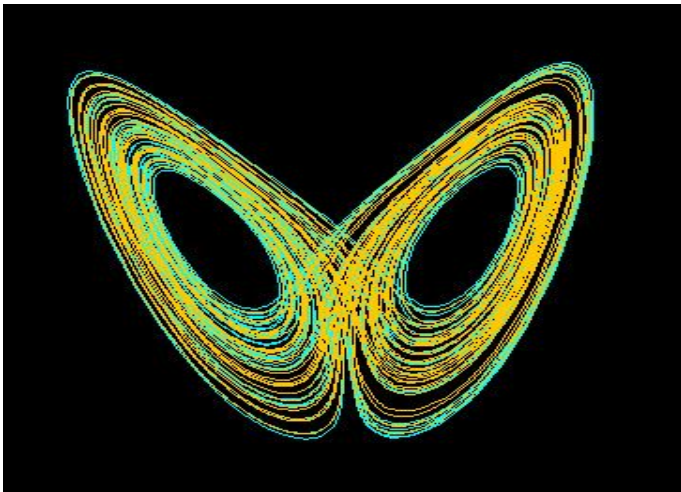




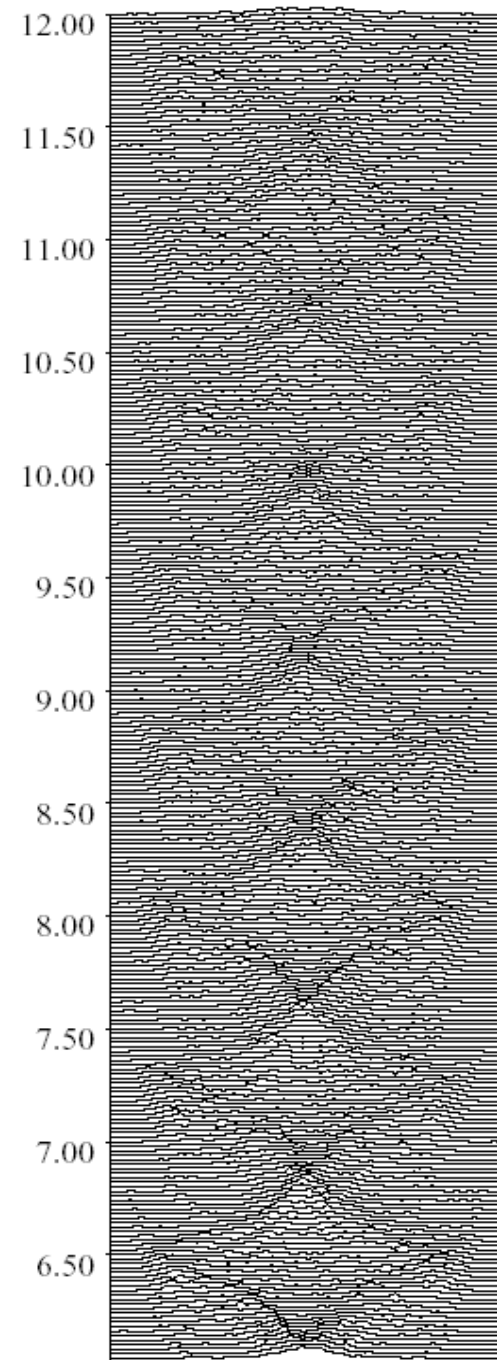
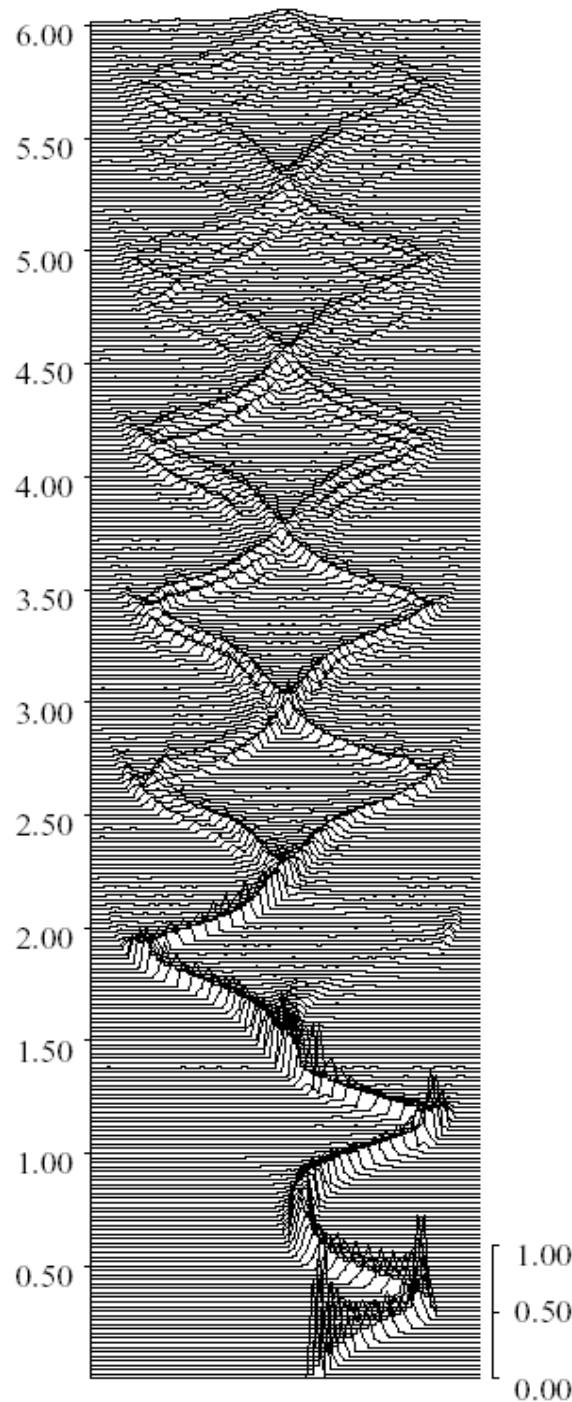
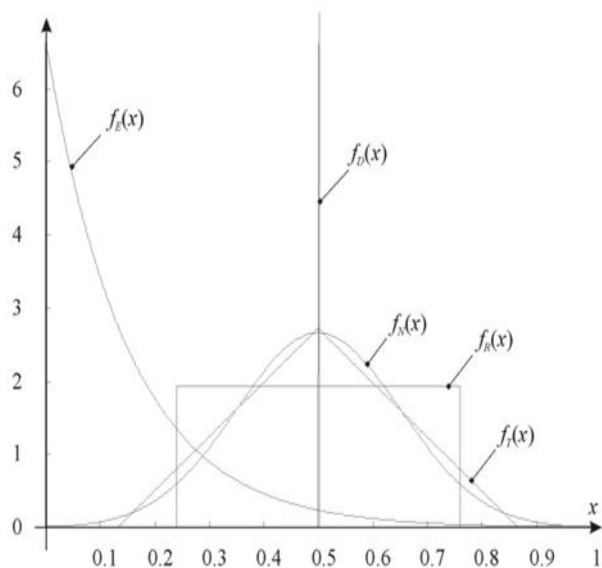
Równanie Naviera–Stokesa, które jest podstawowym równaniem dynamiki atmosfery, jest nieliniowe, co oznacza, że jego rozwiązanie (wynik obliczeń) jest najczęściej niezwykle wrażliwe na niewielkie zmiany warunku początkowego, od którego rozpoczyna się obliczenia.

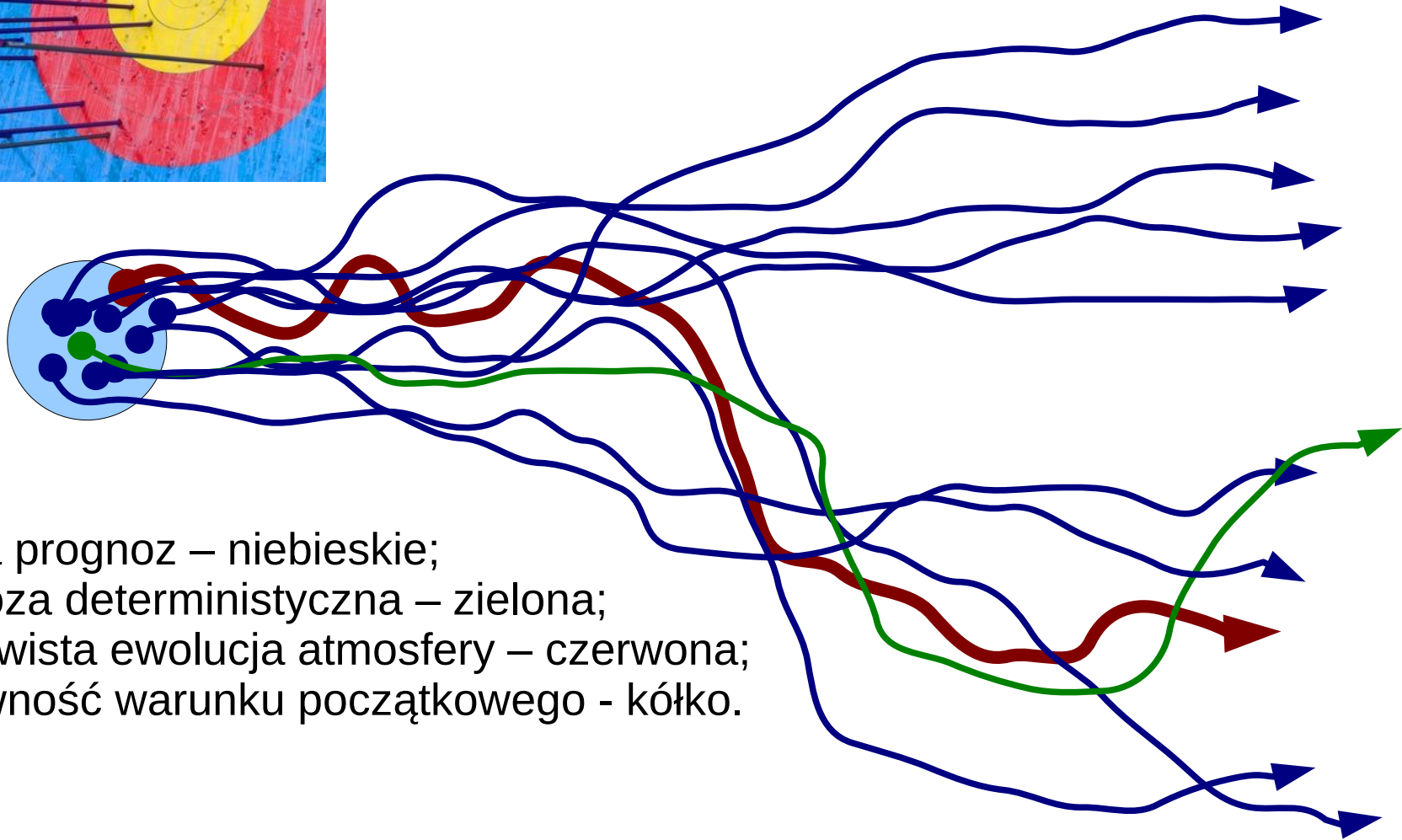
Cechę tę ma też cały układ równań opisujący przepływy atmosferyczne. Innymi słowy wynik ekstrapolacji w czasie (prognoza pogody) jest bardzo czuły na dokładność, z jaką określamy początkowy stan atmosfery.

Niewielka przyczyna: fluktuacja temperatury czy wiatru, może po krótkim czasie wywołać ogromny skutek. To są najistotniejsze wnioski z odkrycia Lorenza, które sam autor na jednym z odczytów opisał poetycko: trzepot skrzydeł motyla w amazońskiej puszczy może wywołać huragan na Atlantyku.



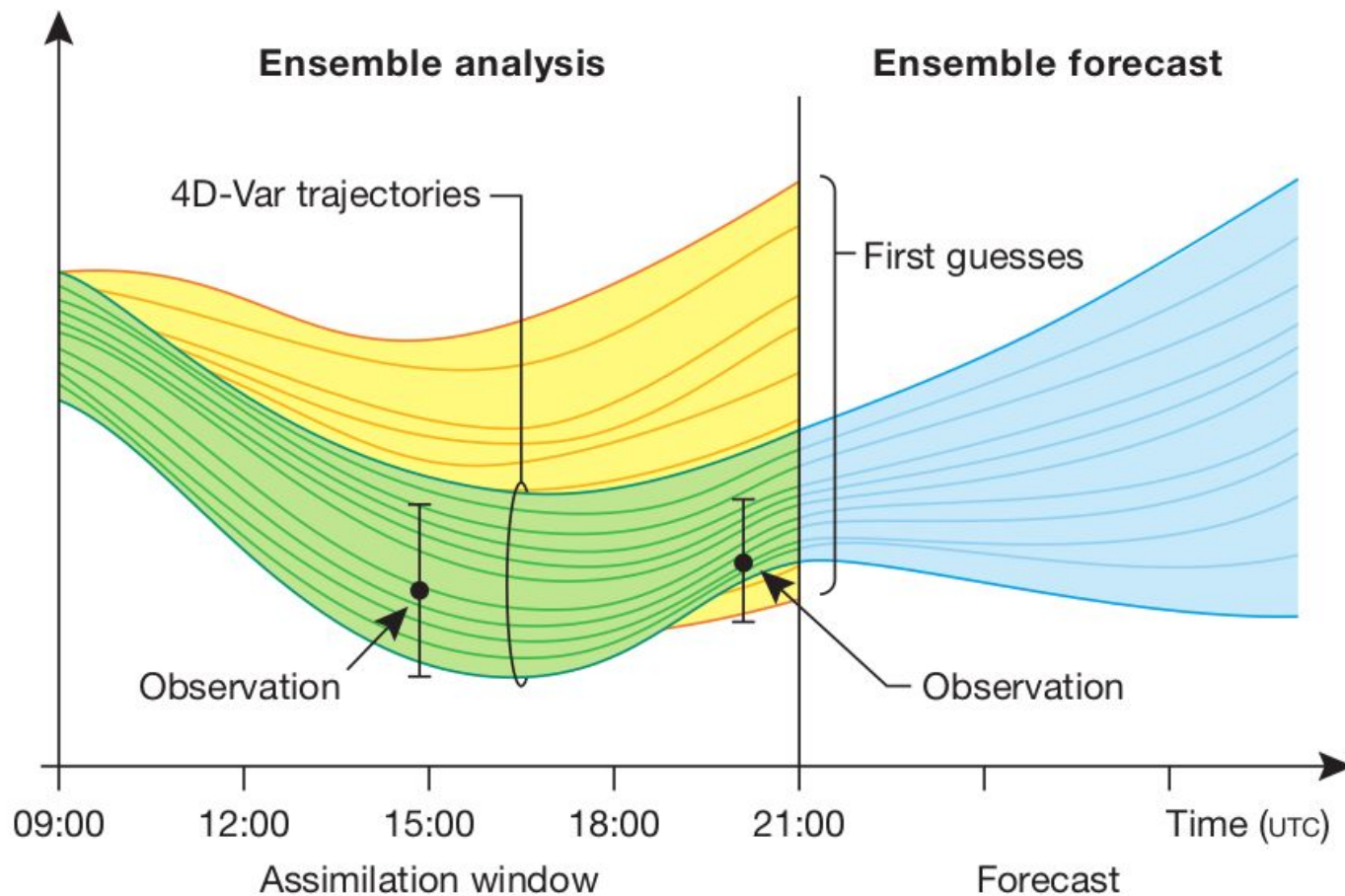
Odkrycie Lorenza  
można zilustrować w  
języku teorii  
prawdopodobieństwa,  
ściślej mówiąc  
analizując tzw.  
rozkład  
prawdopodobieństwa.





wiązka prognoz – niebieskie;  
prognoza deterministyczna – zielona;  
rzeczywista ewolucja atmosfery – czerwona;  
niepewność warunku początkowego - kółko.



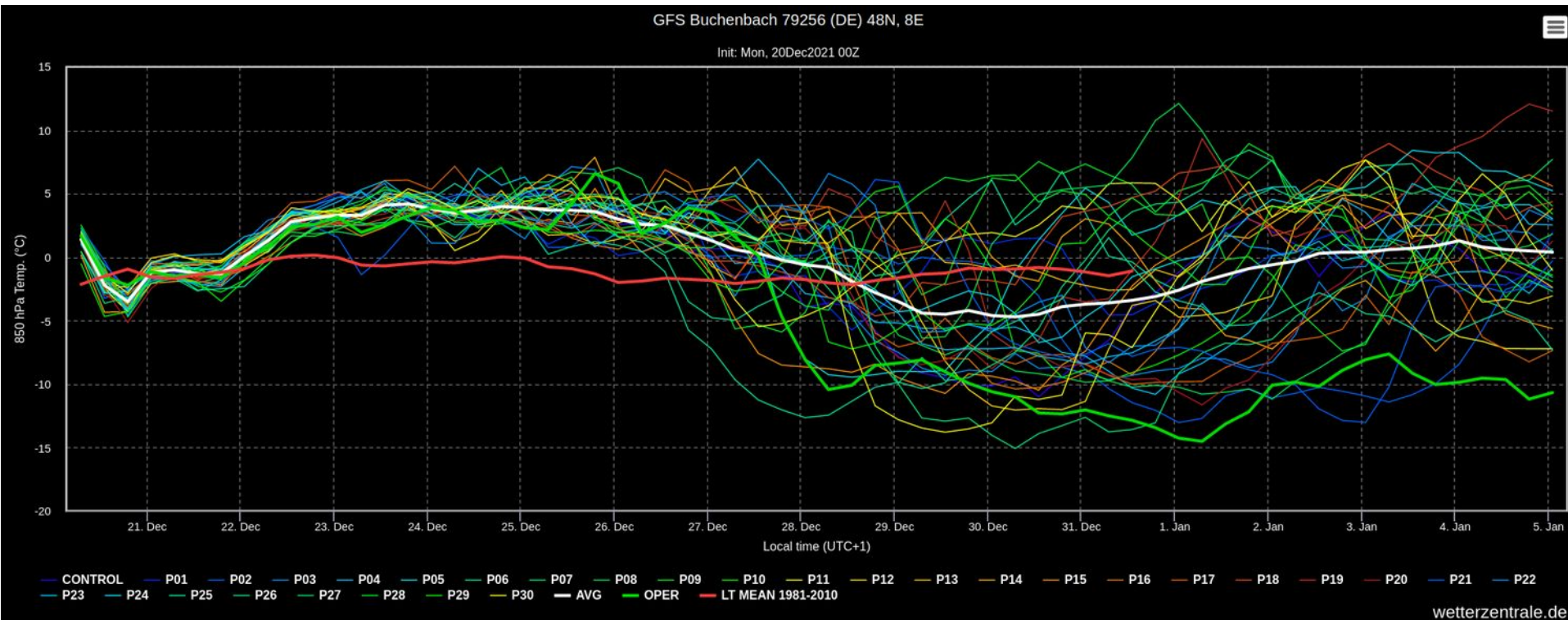


Schemat cyklu analizy i prognozy.

Poprzez minimalizację w czterech wymiarach z wykorzystaniem technik wariacyjnych, tworzone są lepsze oszacowania (trajektorie 4D-Var) są tworzone przy zmniejszonej odległości do obserwacji. Następny następny cykl prognoz ensemble jest inicjowany na podstawie tych udoskonalonych analiz.

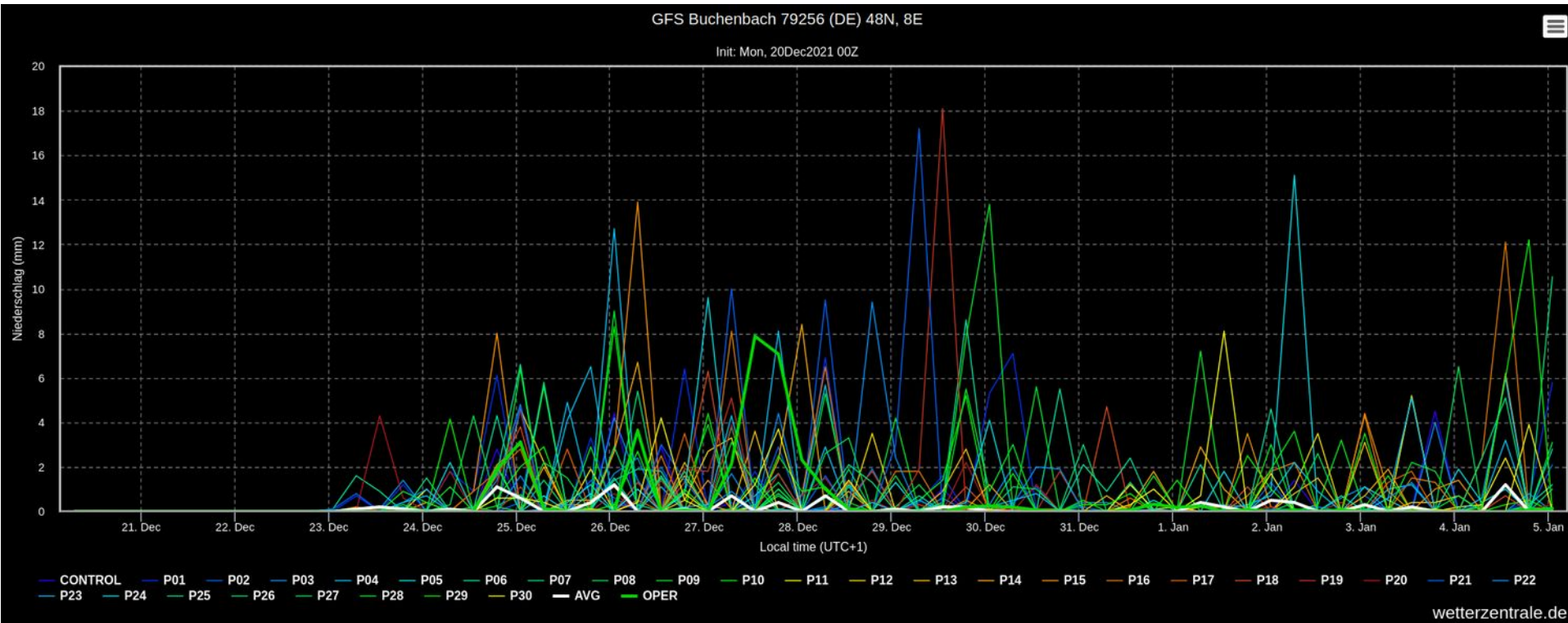


Wyżej, na 850 hPa prognoza temperatury może wyglądać tak:

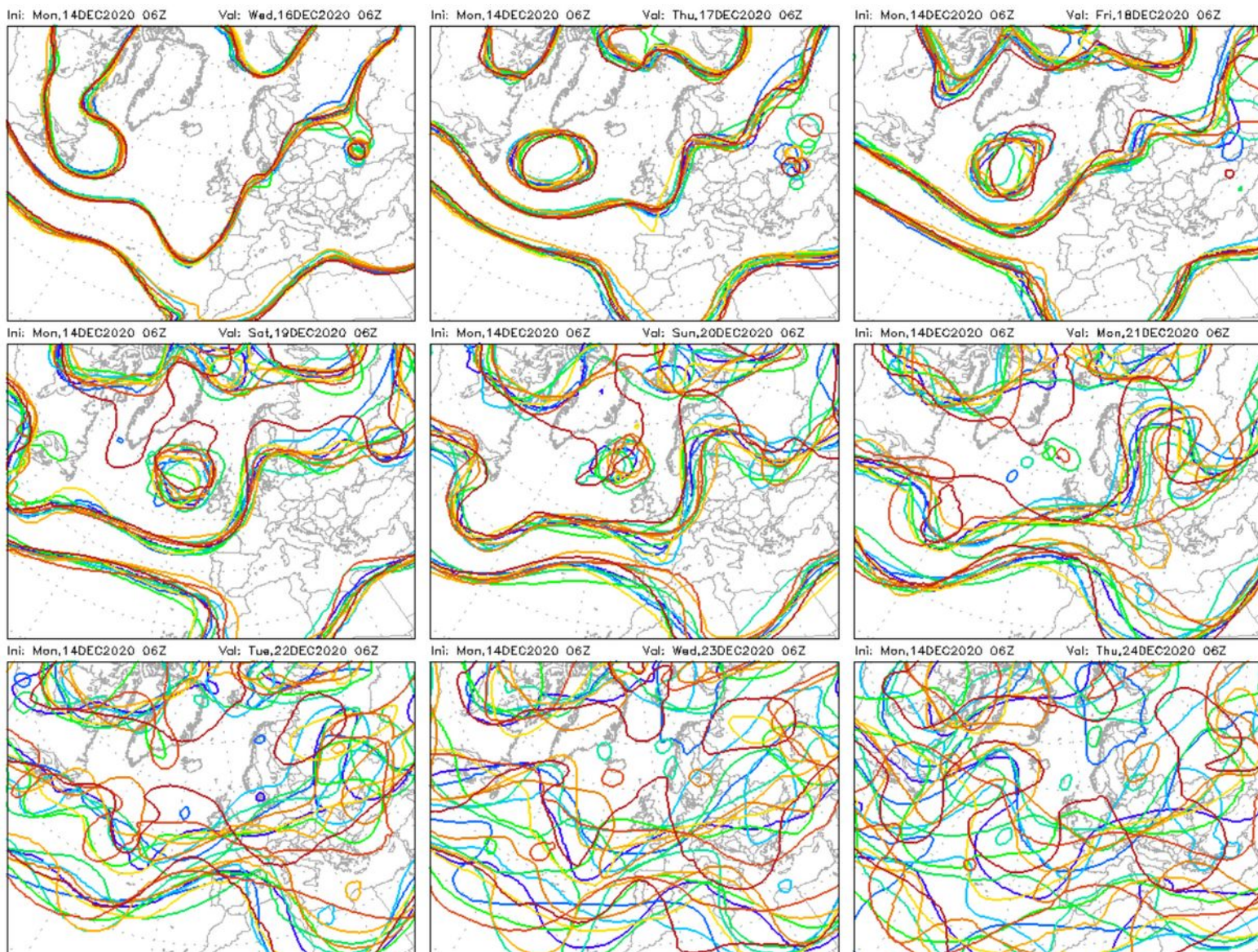




A prognoza opadu może wyglądać tak:

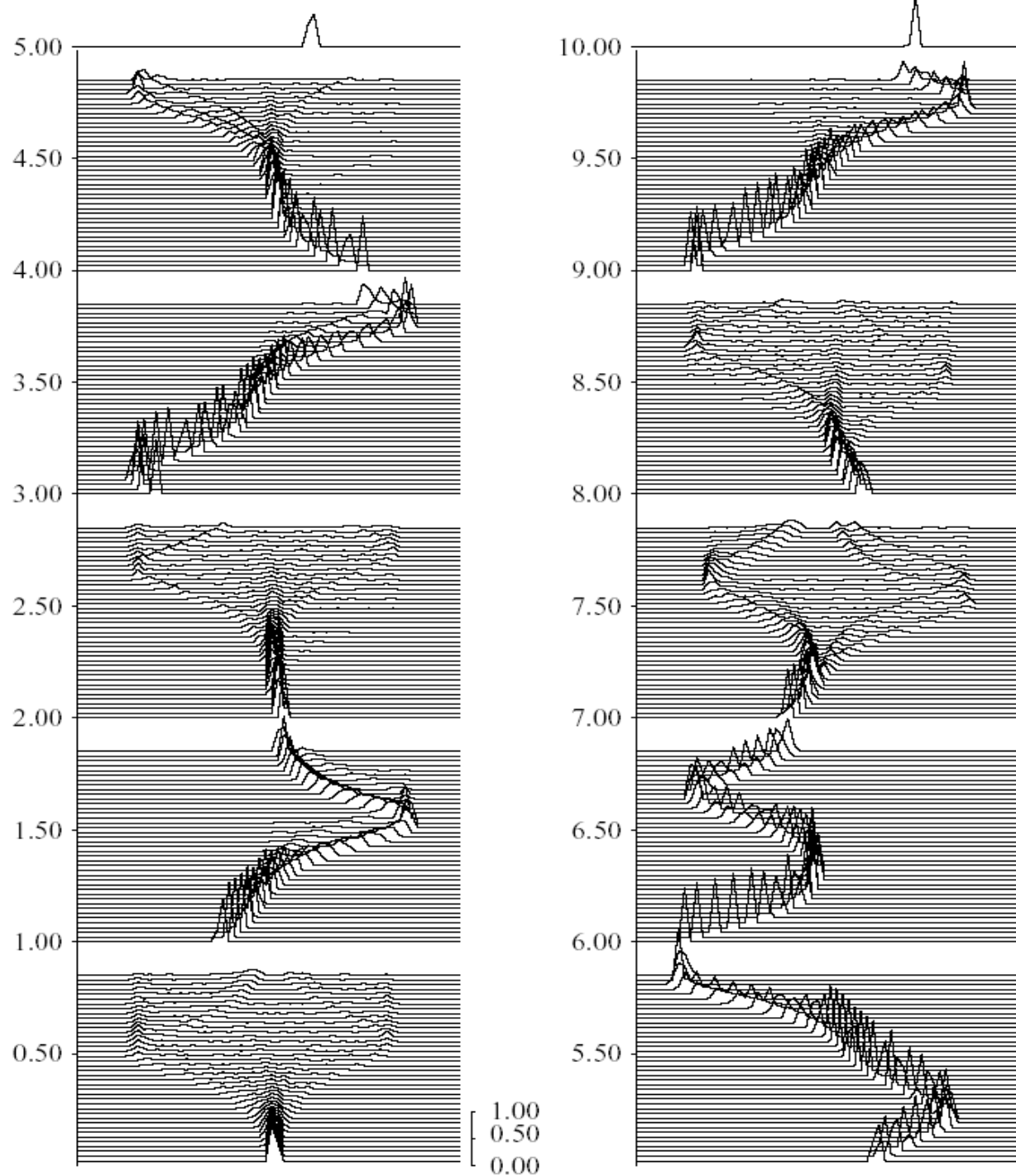


A prognoza ciśnienia w atmosferze swobodnej może wyglądać tak:





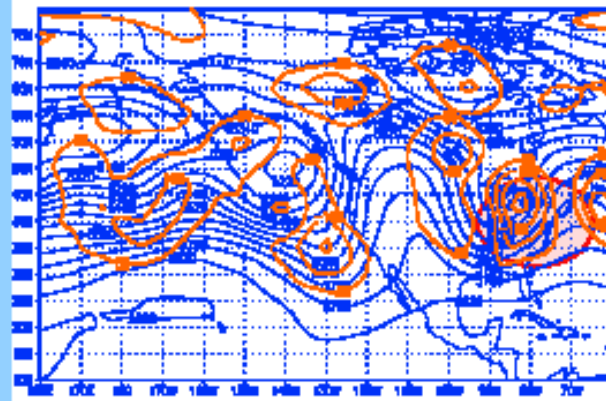
Asymilacja danych do wiązki prognoz.





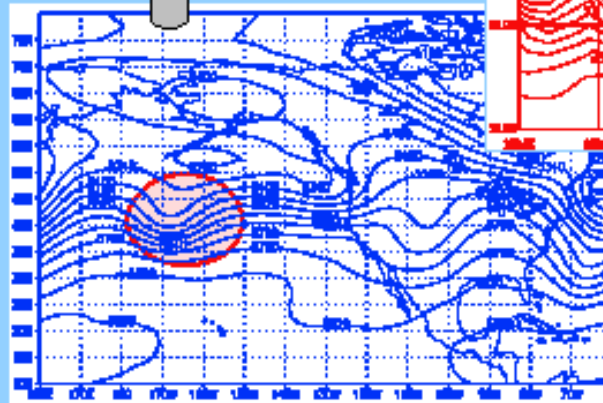
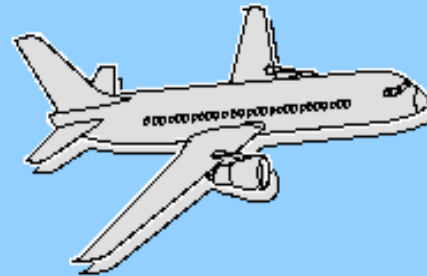
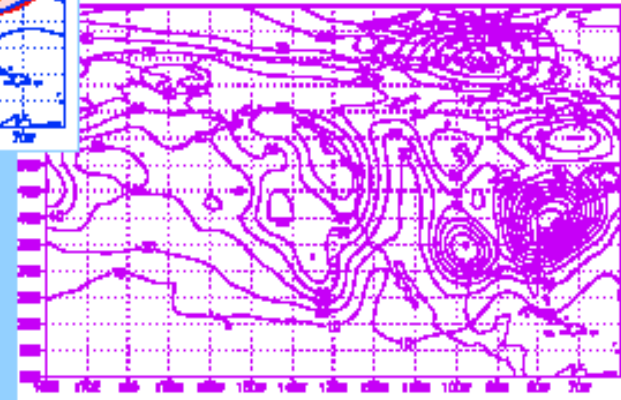
Inne możliwe podejście:

- „targeted observations” - dodatkowe pomiary w obszarach niepewności (tam gdzie „rozbiegają się” prognozy), stosowane eksperymentalnie np. przy huraganach.



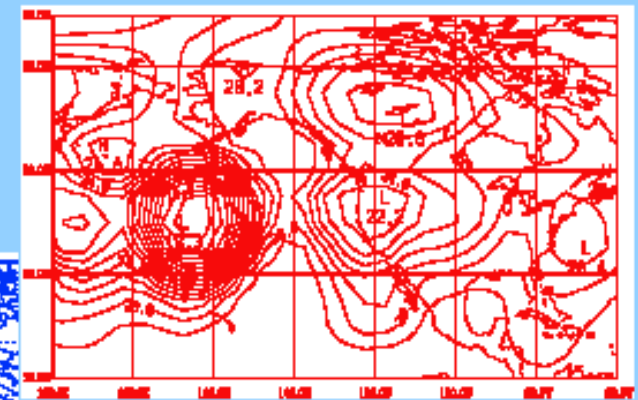
+108 HOURS  
MRF FORECAST

ENSEMBLE SPREAD



MRF FORECAST

+24 HOURS



SENSITIVITY MAP

# ECMWF forecasting system



Medium-range  
deterministic  
Forecasts (HRES)

Medium-range and monthly ENS  
forecasts

Seasonal  
Forecasts

Atmospheric model

Wave model

Atmospheric model

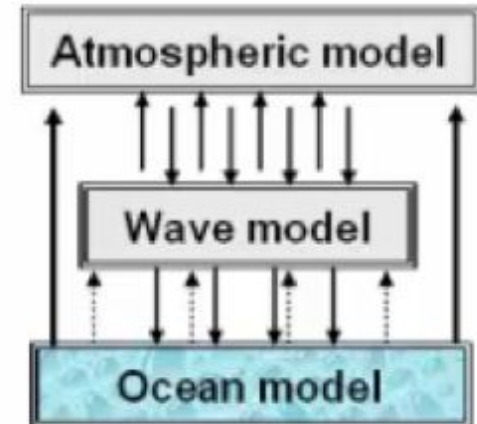
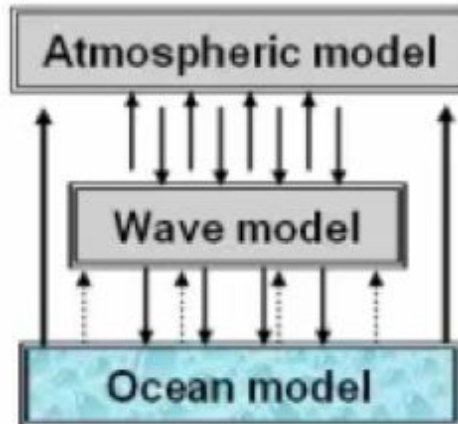
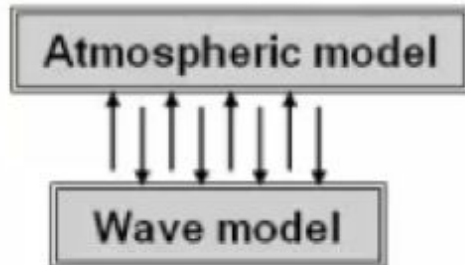
Wave model

Ocean model

Atmospheric model

Wave model

Ocean model









Edward N. Lorenz (1917-2008) pokazał co to znaczy przewidywalność (ang. predictability) układu fizycznego.

„Deterministic nonperiodic flow”, 1963 (atraktor Lorenza, efekt motyla)

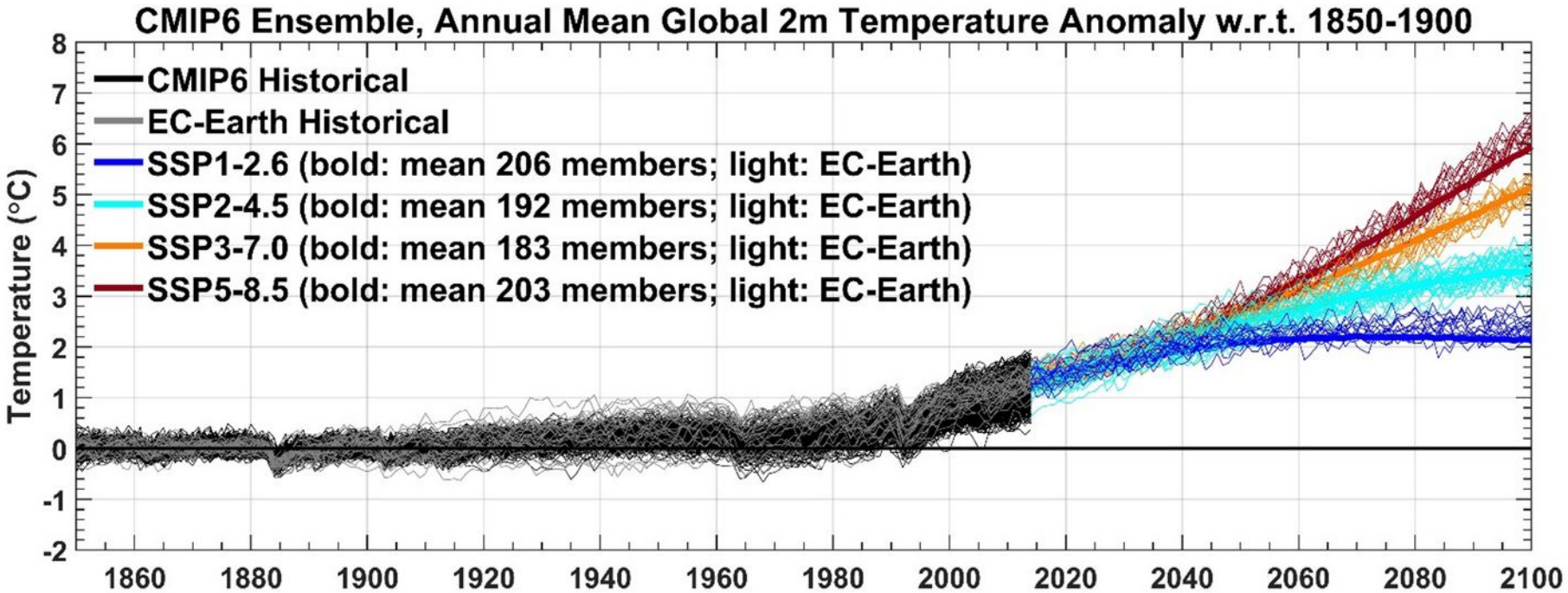
„The problem of deducing the climate from the governing equations”, 1964 (rozdzielenie między brakiem przewidywalności ze względu na nieznaną wartość stanu początkowego układu i ze względu na niepełną znajomość fizyki – równań – układu)

„Climatic change as a mathematical problem”, 1970 (nieprzewidywalność pogody -chaos- nie znaczy że klimat jest nieprzewidywalny)

„Predictability – a problem partly solved”, 2006 (bez komentarza :)

# Ewaluacja modeli klimatu.

Wiązka symulacji przebiegu anomalii temperatury globalnej w XX wieku.



**Figure 1.** The CMIP6 global annual 2m temperature anomaly with respect to the 50-year mean 1850-1900. The EC-Earth ensemble members are presented alongside the CMIP6 mean to assess where the EC-Earth simulations fit within the full CMIP6 ensemble.

Prognoza pogody:

prognoza pojedynczej realizacji procesu dynamiczno-stochastycznego, lub prognoza empirycznego rozkładu prawdopodobieństwa różnych realizacji.

Prognoza klimatu:

prognoza pewnych quasi-równowagowych statystyk realizacji procesów dynamiczno-stochastycznych przy ustalonych wymuszeniach zewnętrznych w stosunku do systemu klimatycznego.



Prognoza pogody:

zależność od warunku początkowego, krytycznie ważna  
możliwość śledzenia rozwoju pojedynczych niestabilności  
w systemie, krytycznie ważne szczegóły dynamiki.

Prognoza klimatu:

badanie statystyki zachowań układu, krytycznie ważne  
strumienie energii i spełnienie zasad zachowania w długim  
okresie czasu.

Przeszłość:

Historia metod numerycznych równań cząstkowych i przybliżenia równań ruchu.

Teraźniejszość:

redefinicja pojęcia przewidywalność -

nie jesteśmy w stanie postawić prognozy doskonałej, ale jesteśmy w stanie określić do jakiego stopnia możemy prognozie ufać (Bayesowskie, aprioryczne określenie rozkładu prawdopodobieństwa).

Pozwala nam na to wiązka prognoz „wypuszczanych” z otoczenia stanu początkowego w granicach błędu pomiaru (określenia tego stanu początkowego),

lub wiązka wielomodelowa, pozwalająca uwzględnić niepewności związane z niedokładną znajomością czy niedokładną reprezentacją zjawisk fizycznych w modelach.

Przyszłość: niezwykle „laboratorium wirtualne” planety, misje numeryczne.