

Fizyka procesów klimatycznych

Wykład 8

prof. dr hab. Szymon Malinowski
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
malina@igf.fuw.edu.pl

dr hab. Krzysztof Markowicz
Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski
kmark@igf.fuw.edu.pl

Pierwotnym źródłem energii w układzie klimatycznym jest Słońce a w układzie dominują strumienie energii promieniowania.

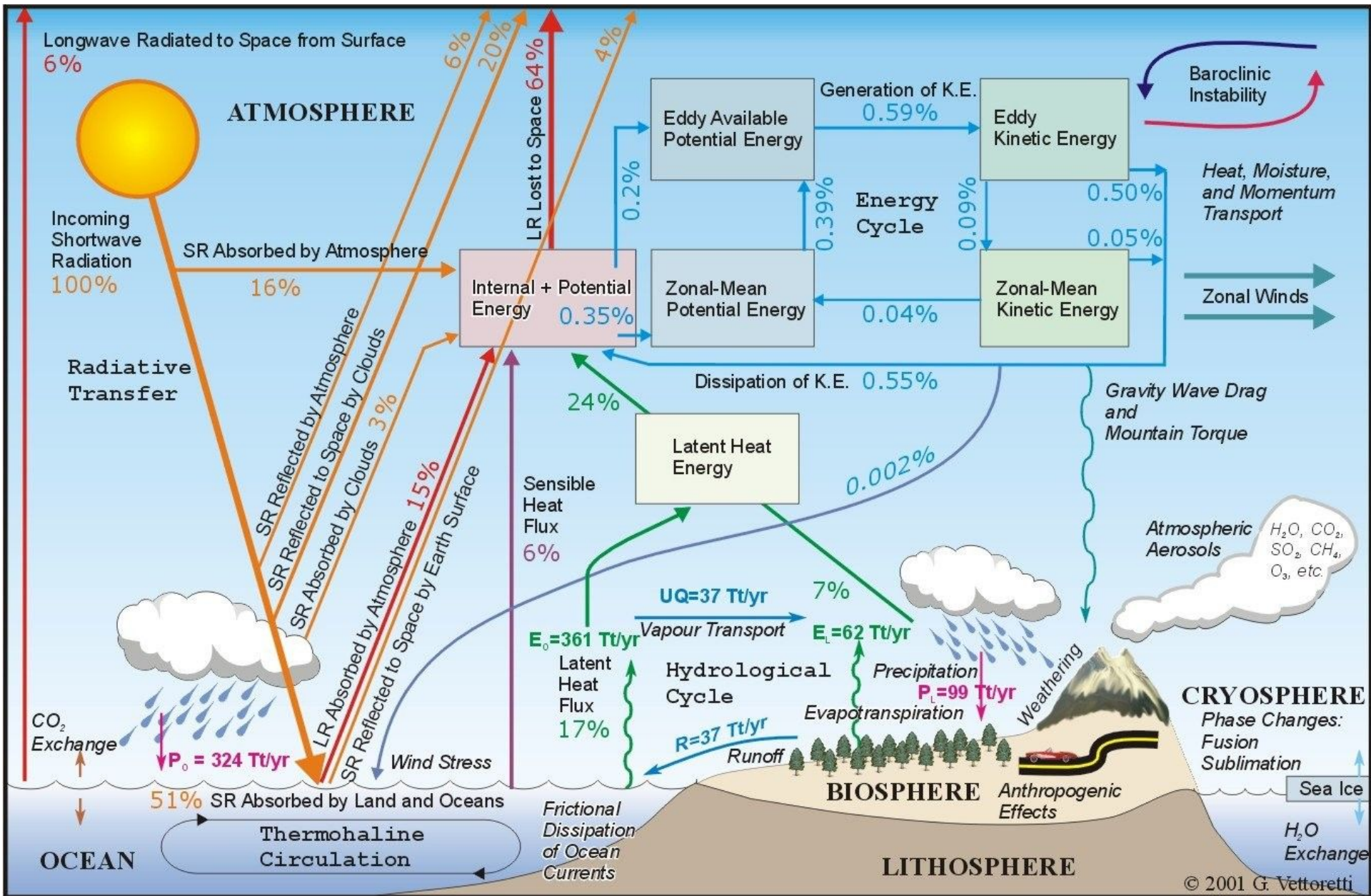
ZMIANY KLIMATU mogą mieć kilka przyczyn:

- zmiany w dopływie energii pierwotnej wskutek zmian w aktywności słonecznej i w orbicie naszej planety;
- zmiany albedo (powierzchnia Ziemi, lód, aerozole, chmury, zakwit oceanów, pył wulkaniczny);
- zmiany w składnikach gazowych atmosfery.

Zmiany te mają wpływ NIE TYLKO na strumienie energii promieniowania, ale także na redystrybucje energii przez cyrkulacje atmosferyczne i oceaniczne, cykl hydrologiczny, biosferę.

Między poszczególnymi elementami systemu klimatycznego występują związki i sprzężenia zwrotne....

System klimatyczny – jedno z wielu możliwych przedstawień



Skutkiem tych zmian jest zmiana temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi, zmiany w cyklu hydrologicznym, zmiany w cyrkulacjach atmosferycznych i oceanicznych.

Sprzężenia występujące w systemie klimatycznym mogą prowadzić do dalszych zmian albedo, cyklu hydrologicznego, strumieni energii promieniowania.

Nie dysponujemy pełną teorią działania systemu klimatycznego, jednak pewne elementy działania tego systemu w określonych, stosunkowo krótkich skalach czasu jesteśmy w stanie dobrze udokumentować.

Jak badać tak skomplikowany system?

Jak dokumentować związki przyczynowo – skutkowe?

Prócz obserwacji i badań doświadczalnych możemy wykorzystywać prawa fizyki i tworzyć prostsze lub bardziej skomplikowane systemy

– MODELE –

opisujące określone elementy lub cechy systemu klimatycznego.



Inne możliwe
przedstawienie
systemu
klimatycznego

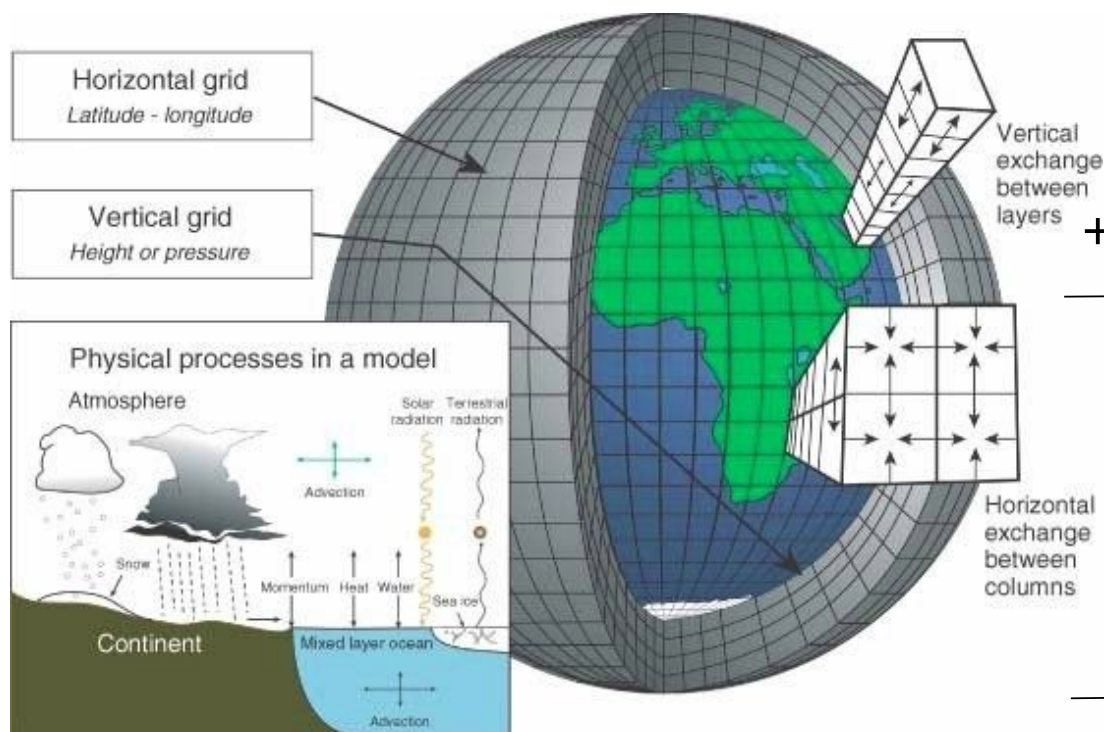
Ekstremalny sposób modelowania klimatu to budowa wirtualnej planety dzięki znajomości praw fizyki:

równania hydrodynamiki
równania termodynamiki
prawa transferu radiacyjnego
własności składników atmosfery
promieniowanie słoneczne
oddziaływanie z podłożem
przemiany chemiczne

układ równań modelu

- * „zakłęcie” w kod numeryczny
- * uwzględnienie danych
- * wielki superkomputer

wirtualna rzeczywistość, w której możemy symulować mechanizmy klimatyczne i związki przyczynowo-skutkowe.



W modelach klimatu wykorzystujemy **matematyczne sformułowania praw fizyki** co pozwala w sposób ilościowy symulować oddziaływania między elementami systemu klimatycznego.

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} + f\mathbf{k} \times \mathbf{V} = -\nabla\Phi$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial p} = -\alpha = -RT/p$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\partial\omega}{\partial p} = 0$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \right) T - S_p\omega = J/c_p$$

W ten sposób możemy np. badać odpowiedzi systemu klimatycznego na wymuszenia czy badać sprzężenia w systemie klimatycznym.

Modele klimatu mogą być proste lub skomplikowane.

Np. modele zerowymiarowe (temperatura efektywna, model szyby, model wielu szyb).

Modele zerowymiarowe z czasem (jeden z powyższych + nierównowaga radiacyjna, np. bezwładność termiczna oceanu).

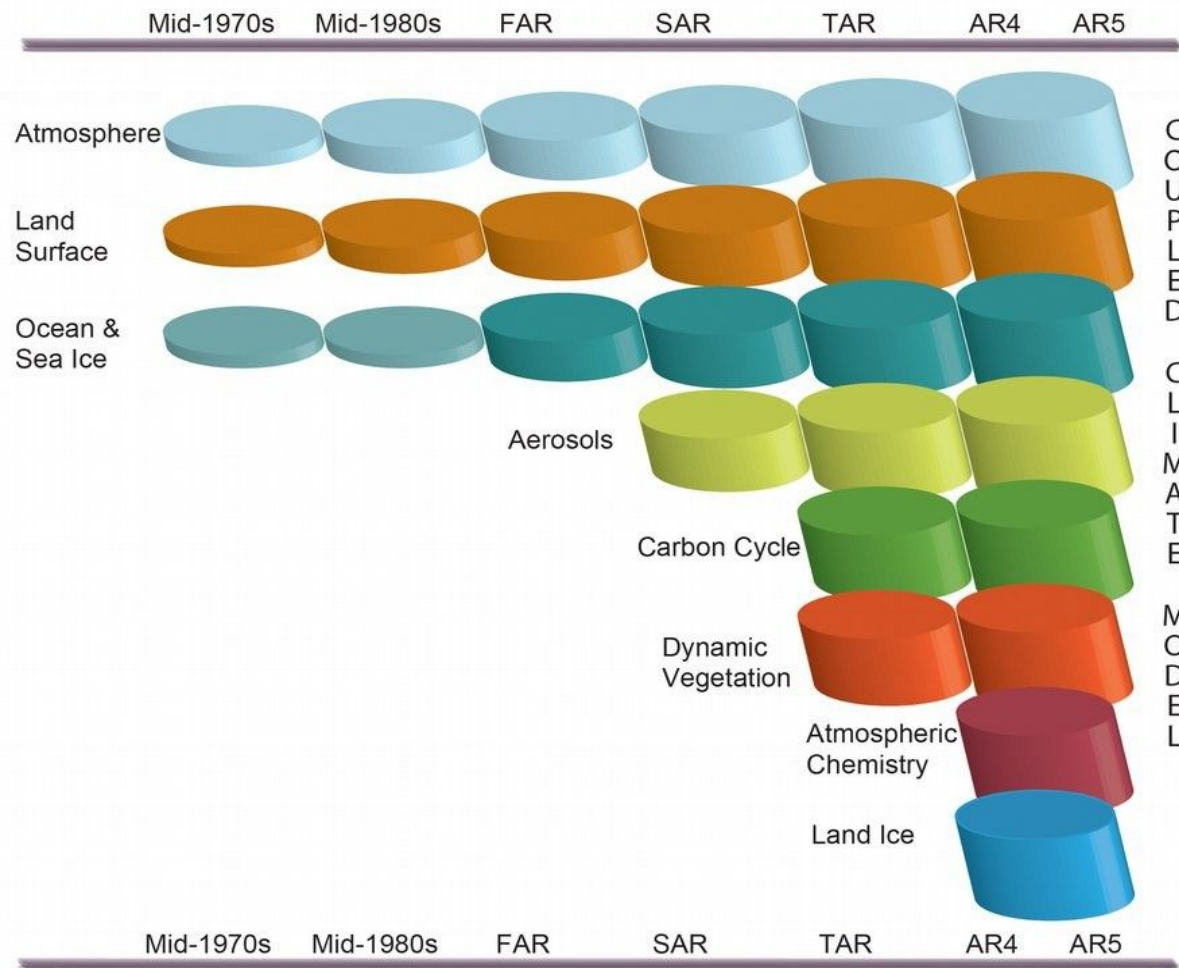
Modele jednowymiarowe (np. model równowagi radiacyjno-konwekcyjnej).

Modele dwuwymiarowe (np.. uśrednione równoleżnikowo).

Modele ogólnej cyrkulacji atmosfery (GCM).

Modele o umiarkowanym stopniu komplikacji (rzadka siatka, dużo uproszczeń).

Modele systemu ziemskiego (Earth System Models ESM).



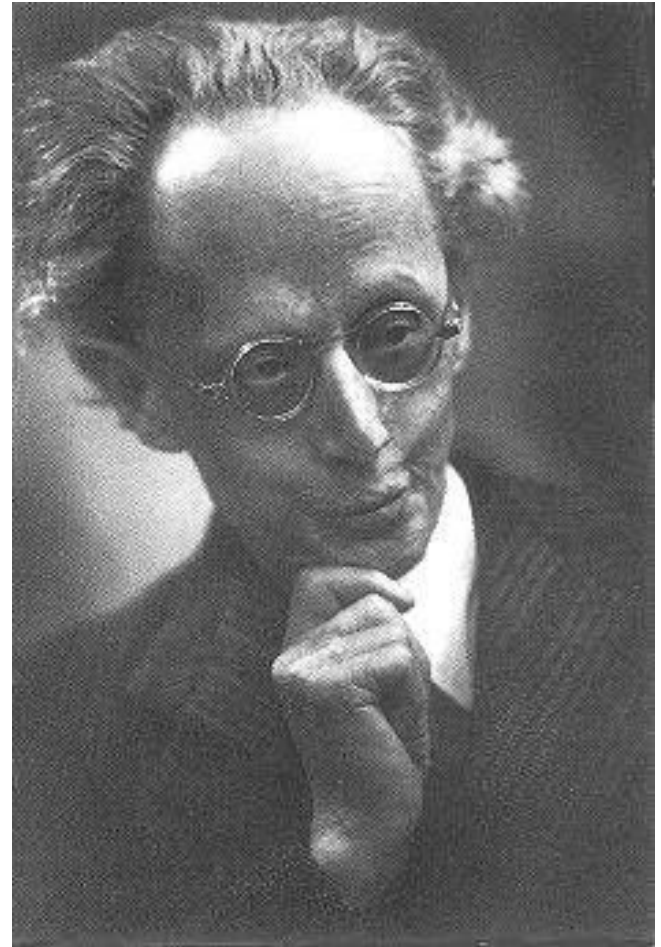
Od prostych do coraz bardziej skomplikowanych modeli: procesy uwzględniane w modelach klimatu od lat 70-tych do AR5.

Trochę historii...

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 i klimatologii dynamicznej.

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



Vilhelm F.K. Bjerknes, 1862-1951

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

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

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

Ten układ równań:

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

Jest on podstawa prognoz pogody (nie klimatu). Teby modelować klimat trzeba jeszcze dodać informacje o dopływie/odpływie energii.

Jednak pierwszym krokiem jest rozwiązanie tego układu!

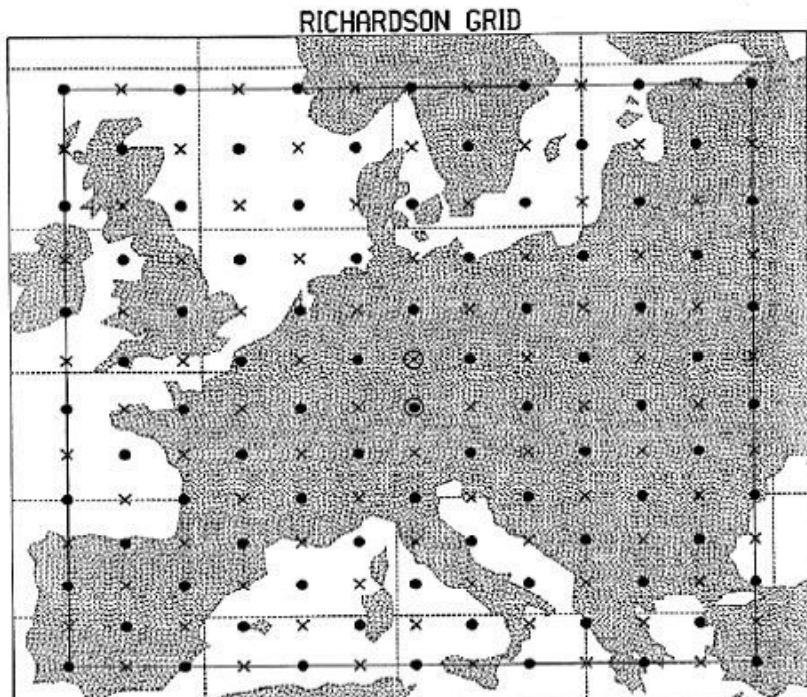
Lewis Fry Richardson służąc w wojsku jako sanitariusz polowy podczas I Wojny Światowej rozwiązał ten układ w sposób przybliżony, zastępując równania różniczkowe równaniami różnicowymi.

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.

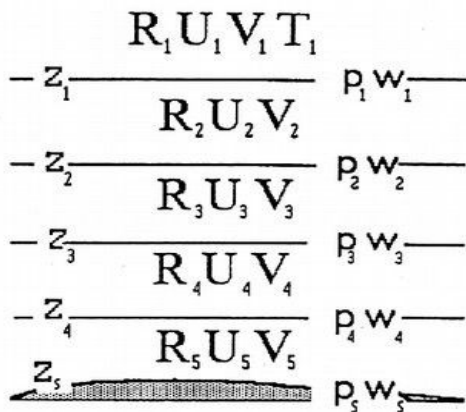


Lewis Fry Richardson 1881-1953



Rezultat obliczeń 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:

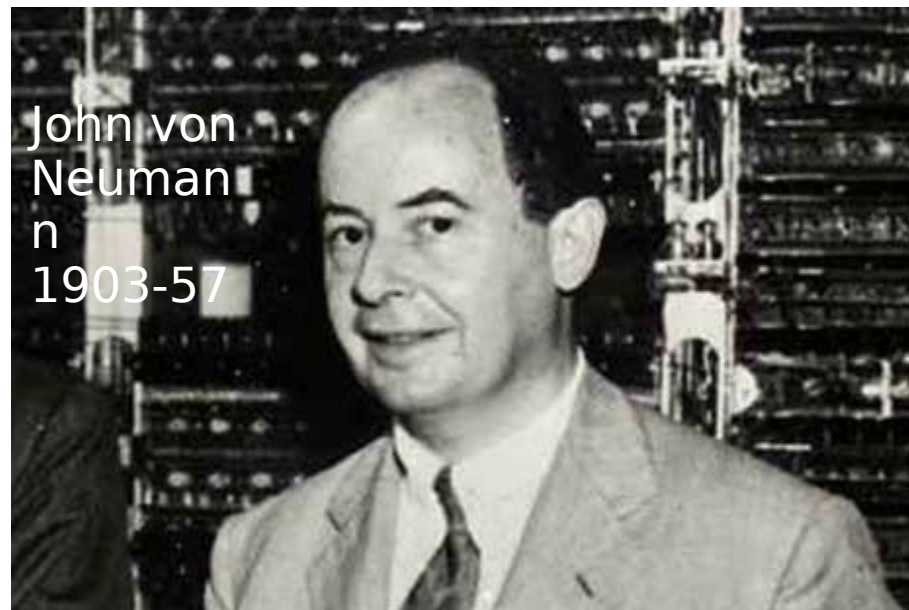
“Weather Prediction By Numerical Process”.

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 i powstania współczesnych modeli prognoz pogody i klimatu.



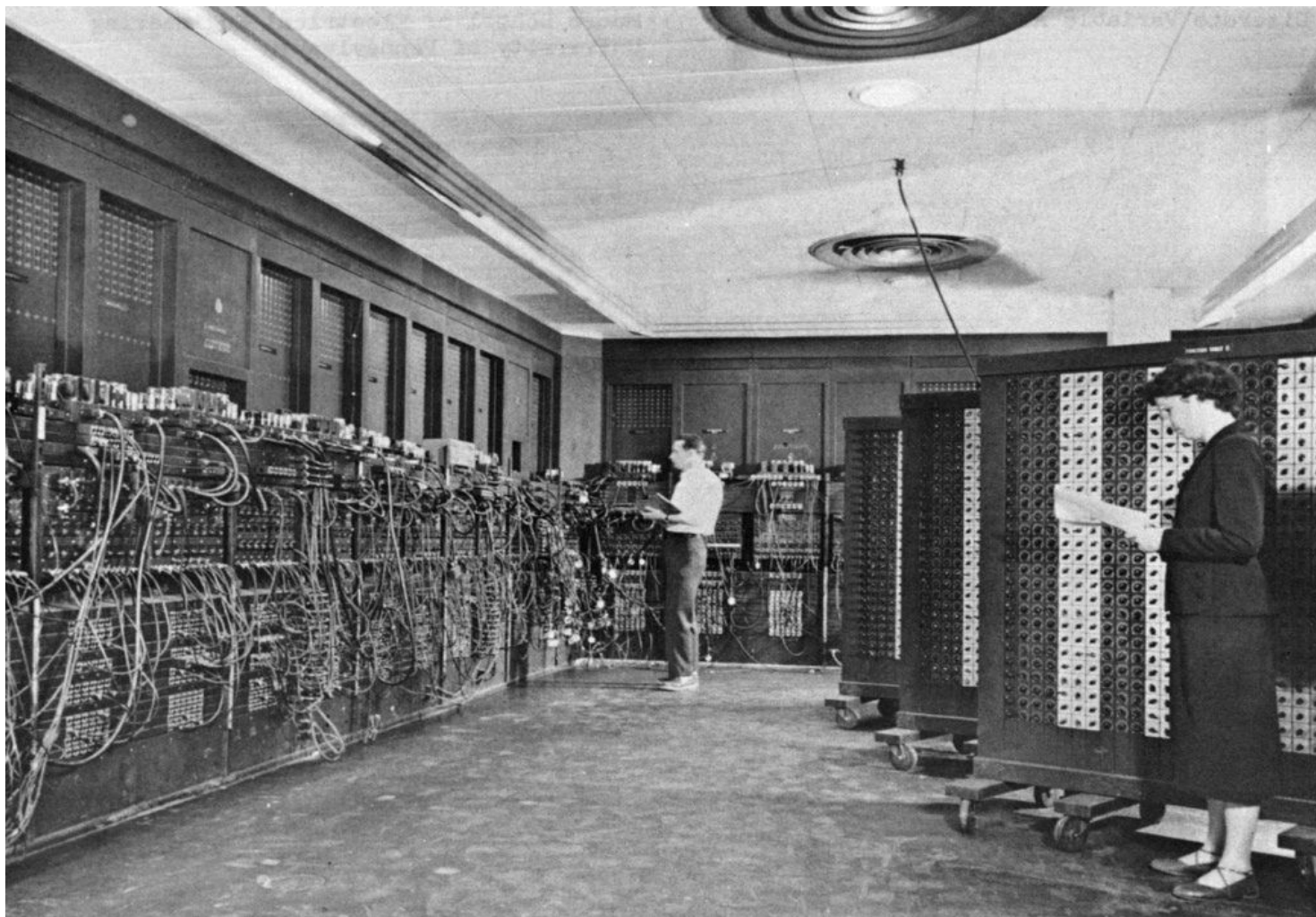
Peter Lynch, 2006: The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream, Cambridge University Press
<http://www.cambridge.org/9780521857291>



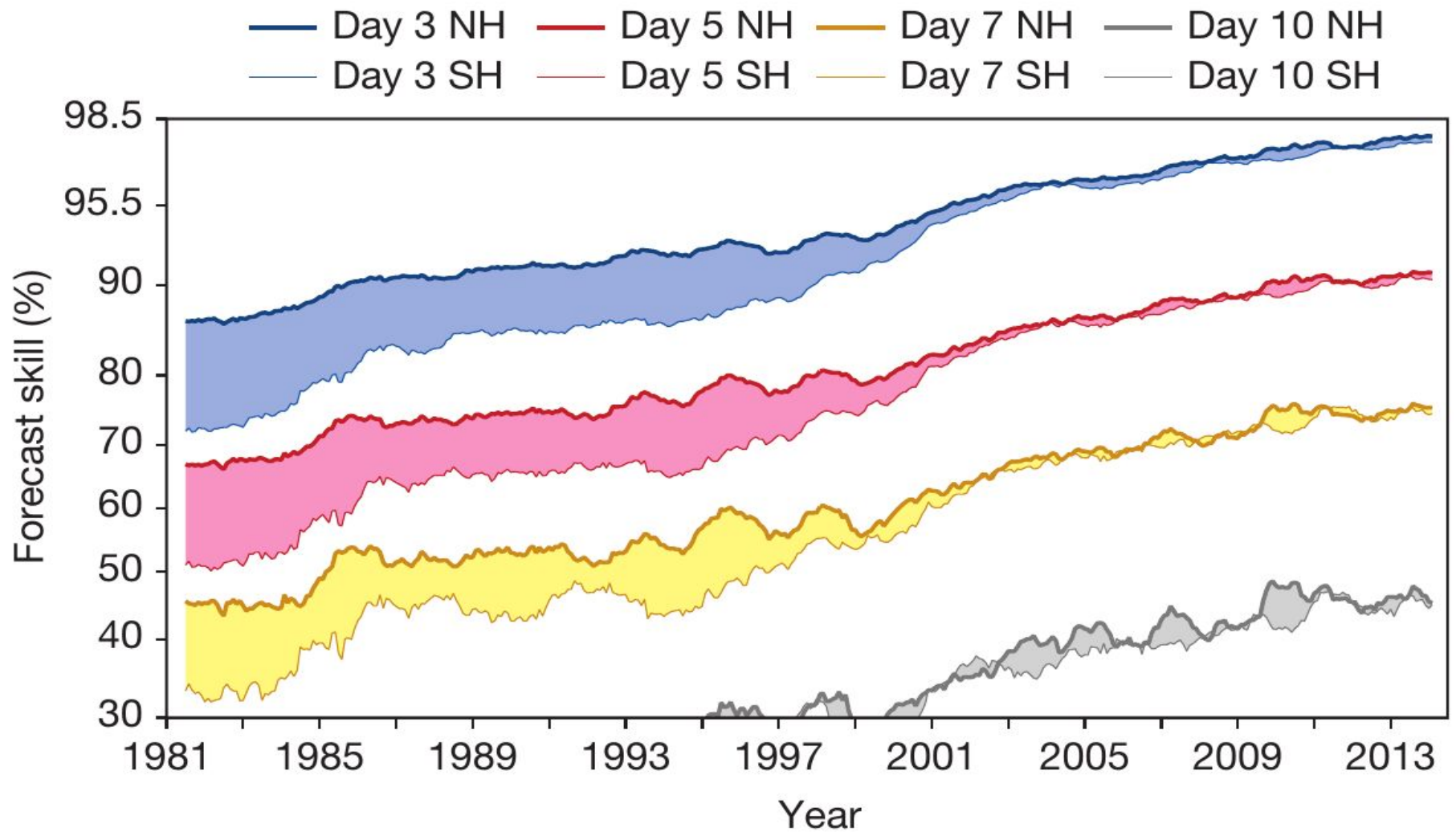
Amerykański meteorolog Jule Charney podczas stażu naukowego na uniwersytecie w Oslo, siedzibie norweskiej szkoły meteorologii, zaproponował daleko idące uproszczenia układu równań przepływów atmosferycznych, które pozwoliły na sporządzenie pierwszej poprawnej matematycznie i numerycznie prognozy pogody.

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



Skuteczność prognozy geopotencjału powierzchni 500 hPa w modelach globalnych.

The quiet revolution of numerical weather prediction, Peter Bauer, Alan Thorpe, Gilbert Brunet, Nature 2015

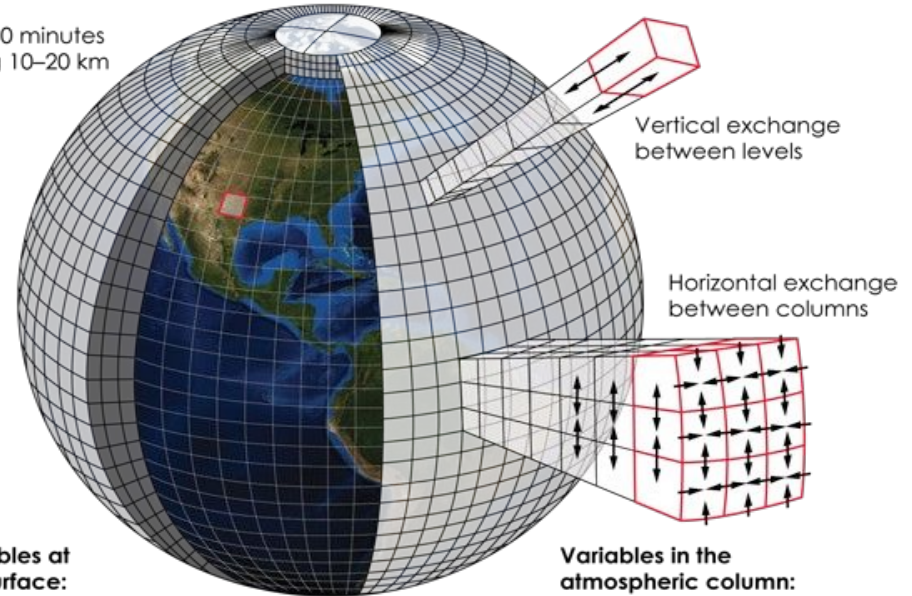
Zwyczajna numeryczna prognoza pogody „od kuchni”.

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.

Weather forecast modeling

Timestep 5–10 minutes
Grid spacing 10–20 km



Variables at the surface:

Temperature
Humidity
Pressure
Moisture fluxes
Heat fluxes
Radiation fluxes

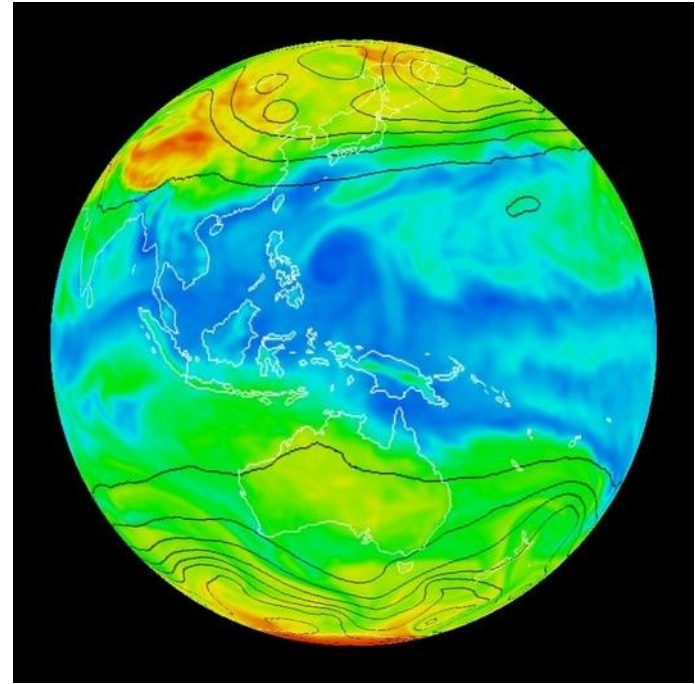
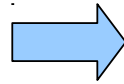
Variables in the atmospheric column:

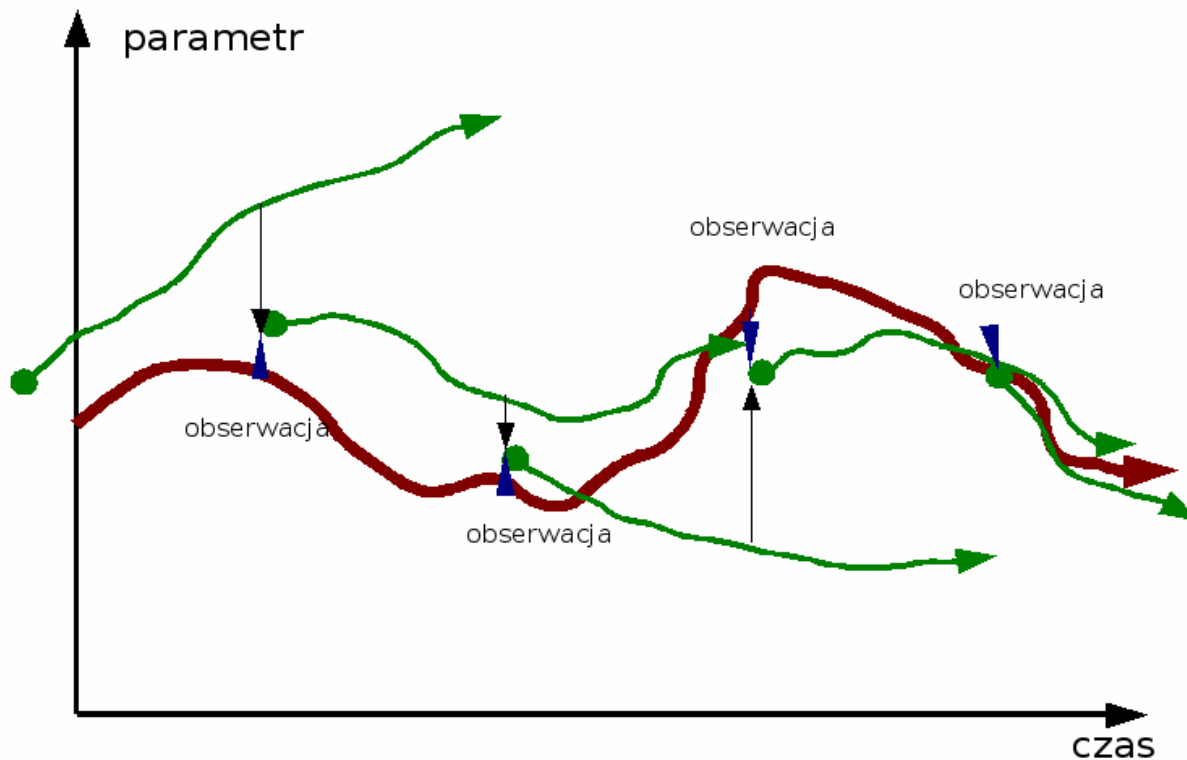
Wind vectors
Humidity
Clouds
Temperature
Height
Precipitation
Aerosols

Specyfika prognozy pogody:

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 biegnącej już prognozy nowymi nadchodzącymi danymi.





Asymilacja danych do modelu:

Czerwona linia – rzeczywistość.

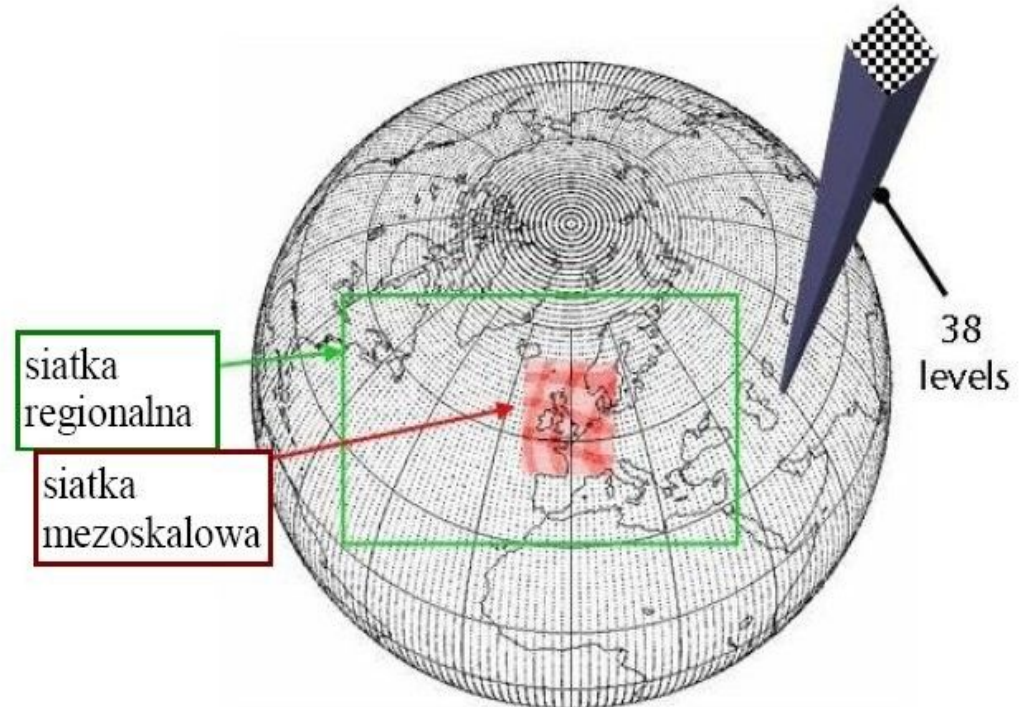
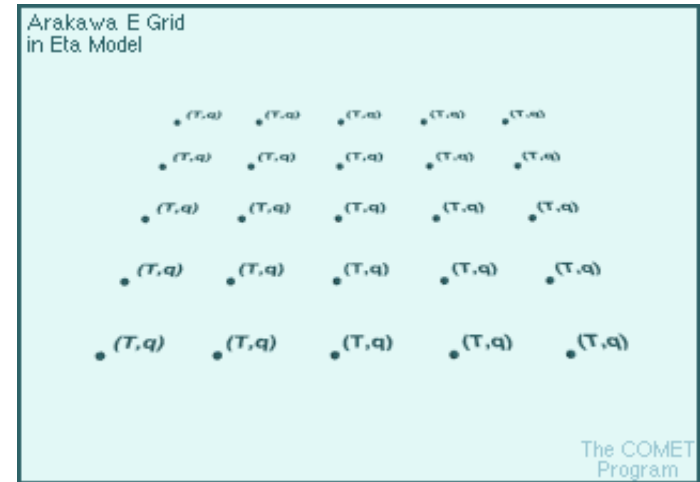
Zielone linie – kolejne prognozy w „wirtualnej rzeczywistości” modelu.

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.

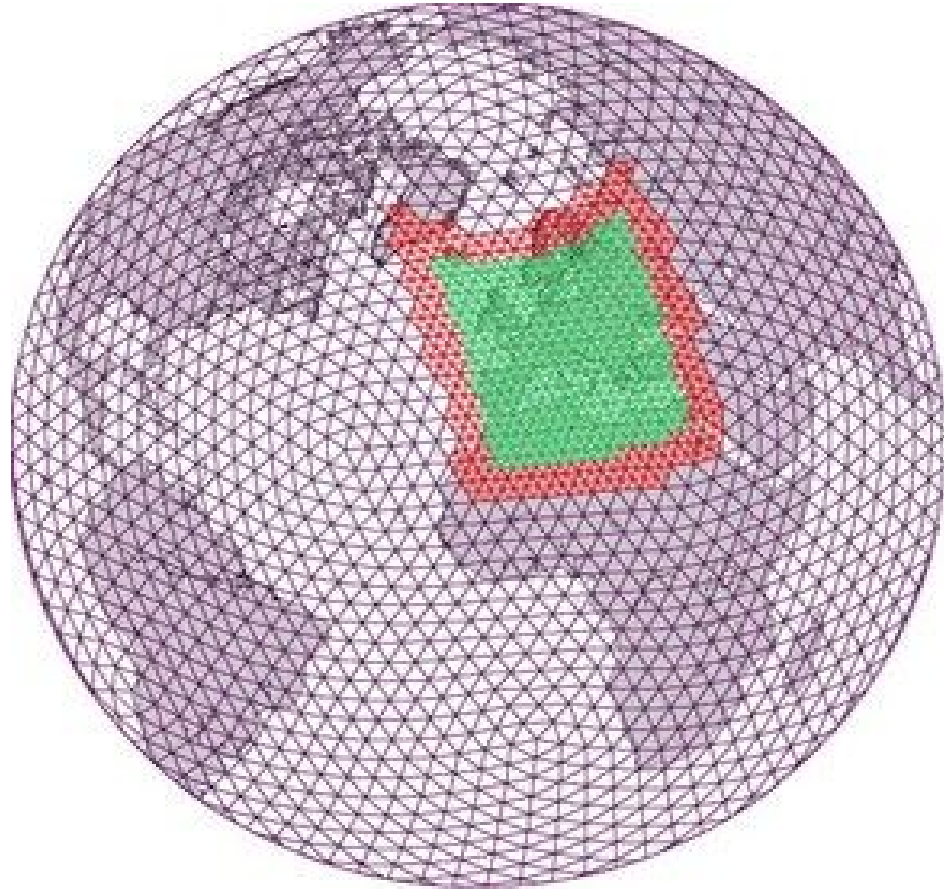
Pola muszą też być powiązane z wirtualną postacią modelu prognostycznego, tj. tzw. siatką obliczeniową.

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**.



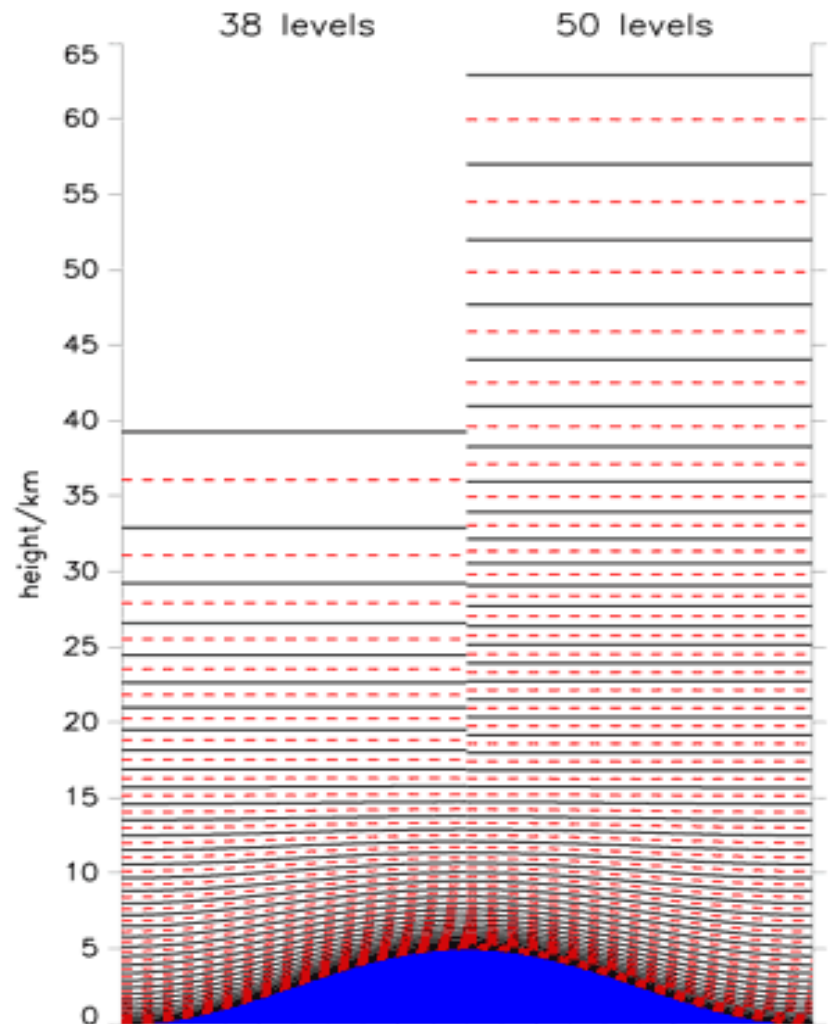
Zagnieżdżanie siatek obliczeniowych lub modeli pozwala, korzystając z wyników obliczeń w większej skali (warunki brzegowe) wykonać bardziej precyzyjne obliczenia na wybranych obszarach.

Podobnie można postępować z modelami klimatu, korzystając z symulacji modelem globalnym można symulować klimat regionalnie (Regional Climate Models).



W pionie siatka modelu prognozy pogody czy klimatu obejmuje obszar troposfery i znaczną część stratosfery;

ma kilkadziesiąt poziomów sięgających wys. 30–40 km, zagęszczonych w dolnych warstwach atmosfery.



Numeryczne modele prognoz pogody: do pobrania!!!

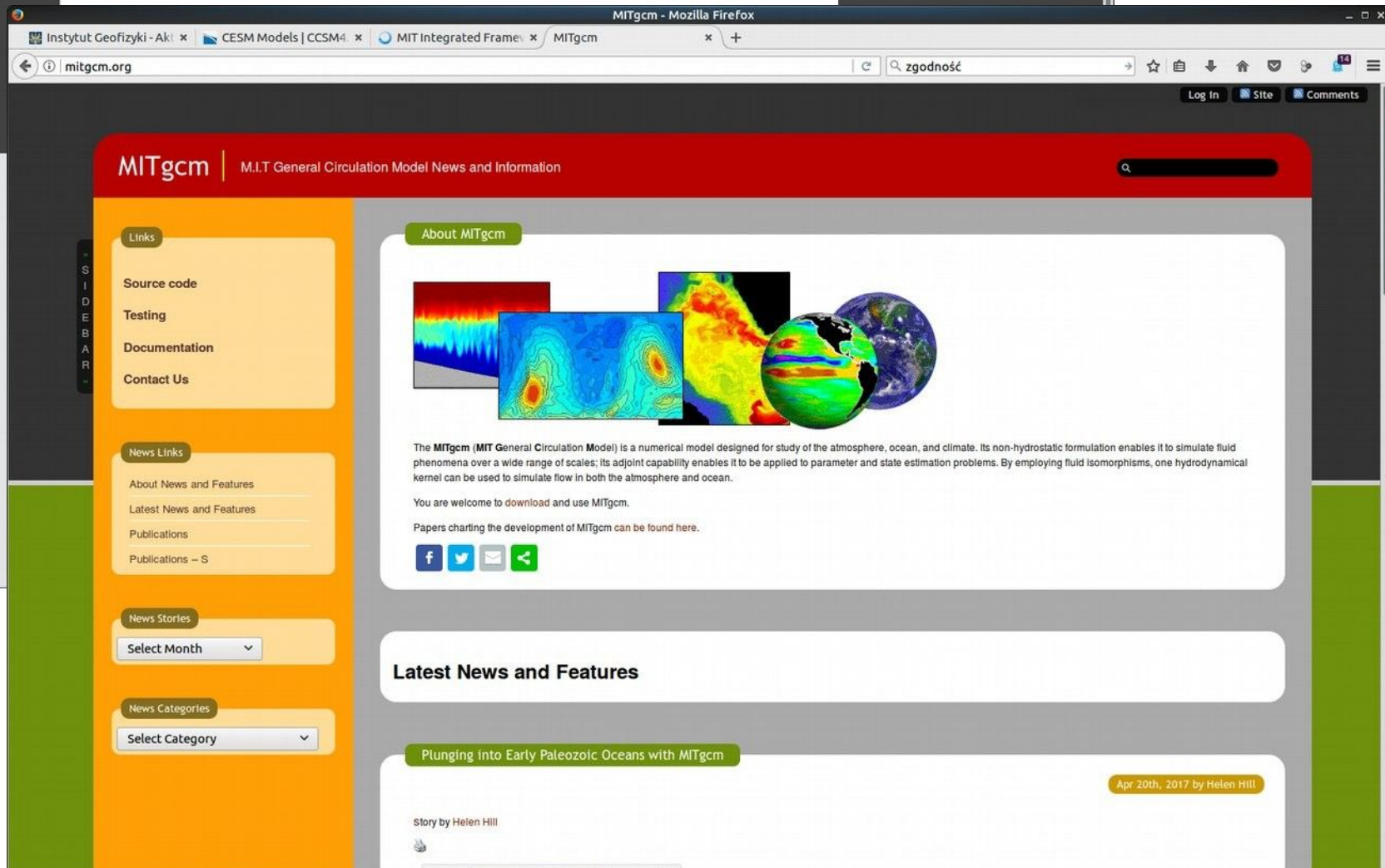
The image shows a screenshot of the WRF Model website. The top navigation bar includes 'Home', 'Working Groups', 'User Resources', 'Projects', 'Events', and 'Real-time Forecasts'. The main content area is titled 'About the Weather Research & Forecasting Model' and contains text describing the WRF model's capabilities and its collaborative development. A sidebar on the left lists various site sections like 'Introduction', 'WRF Administration', and 'Publications'. A right sidebar shows 'Upcoming Events' with a note that no events are currently scheduled.

Below the website screenshot is a promotional banner for the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS). The banner features the RAMS logo, a 'Select a Destination:' dropdown menu, and a list of recent presentations:

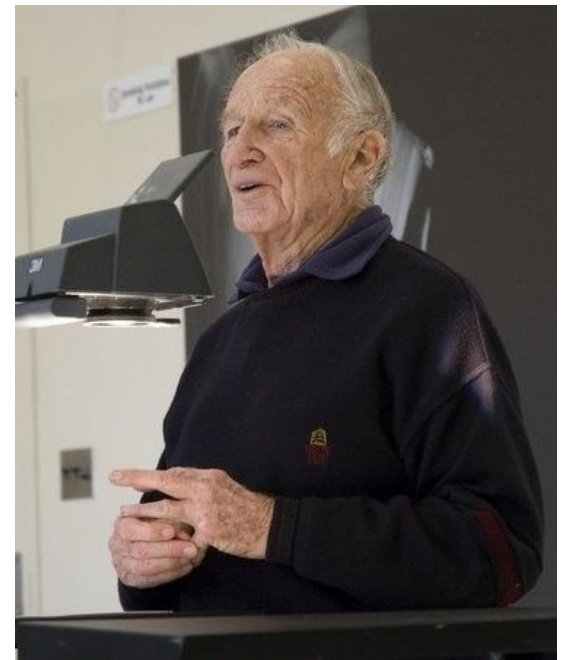
- July 2010**: Lecture on "Is Climate Predictable on 10 to 50 Year Time Scales" [here](#).
- April 2010**: Dr. Cotton's slideshow from Tucson is available [here](#).
- July 2009**: Dr. Cotton's Isle Royal slideshow has been posted [here](#).

The banner also includes the logo for the Cotton Research Group and a copyright notice: 'Page © 2002 Colorado State University, designed by Curtis Fechner, updated (July 2010)'.

Większość modeli klimatu OTWARTYCH:



Edward N. Lorenz (1917-2008):
pokazał co to znaczy przewidywalność
(ang. predictability) układu fizycznego,
argumentował że prognoza pogody
(chwilowego stanu atmosfery) jest wrażliwa
na dokładność z jaką znamy warunki początkowe
(stan startowy prognozy),
prognoza klimatu (klimat) nie zależy od stanu
Początkowego, ale może być czuła
za niewielkie zmiany w układzie.



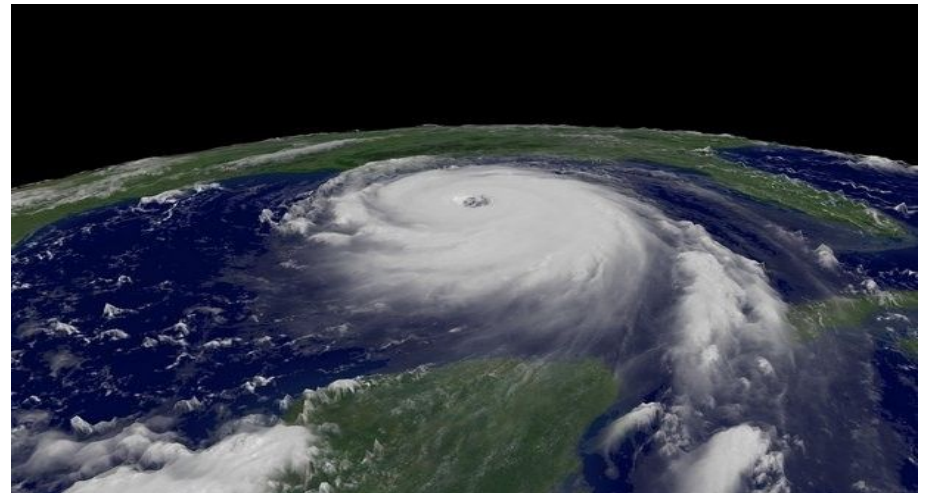
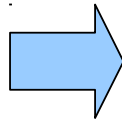
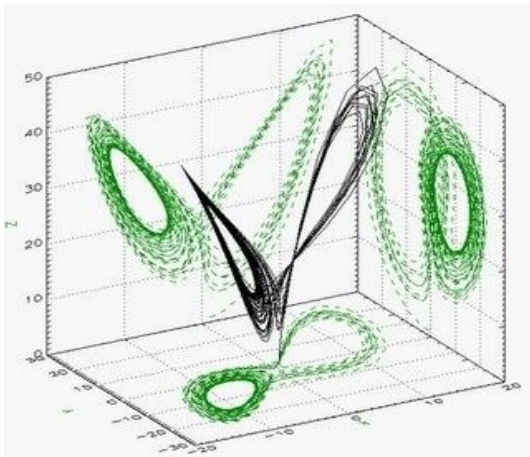
Wybrane prace:

- „Deterministic nonperiodic flow”, 1963 (atraktor Lorenza, efekt motyla);
- „The problem of deducing the climate from the governing equations”, 1964 (rozdzielenie między brakiem przewidywalności układu nieliniowego 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.

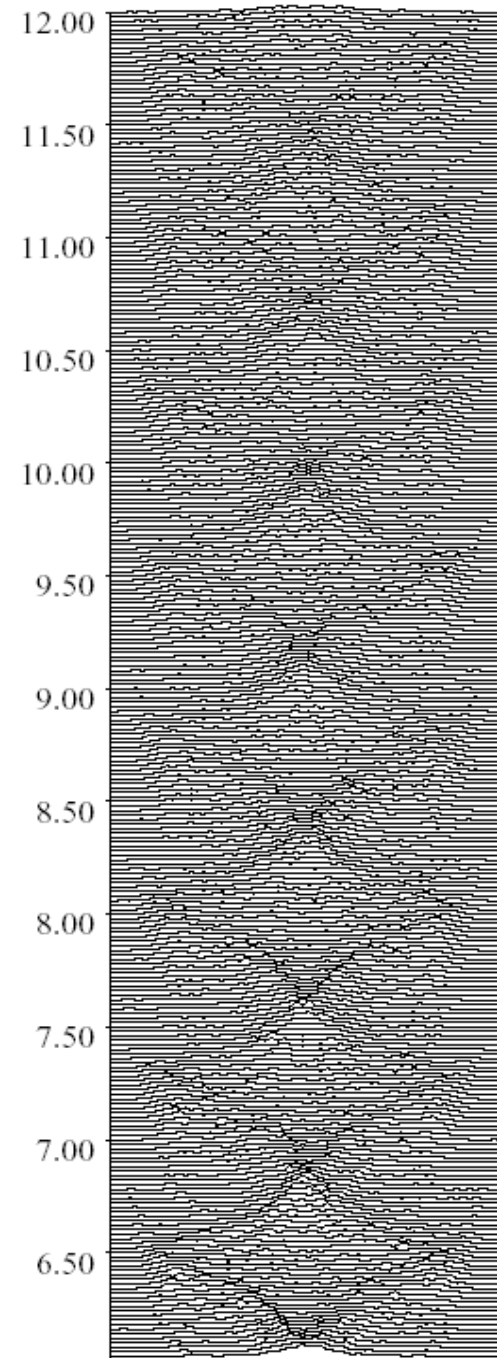
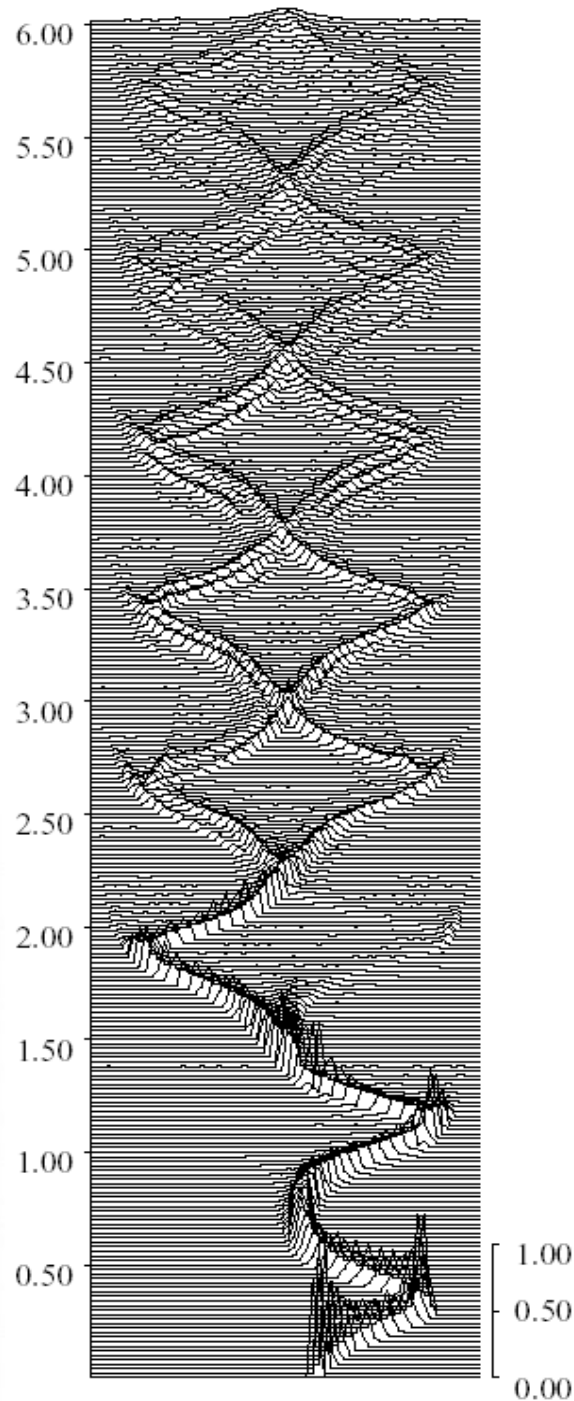
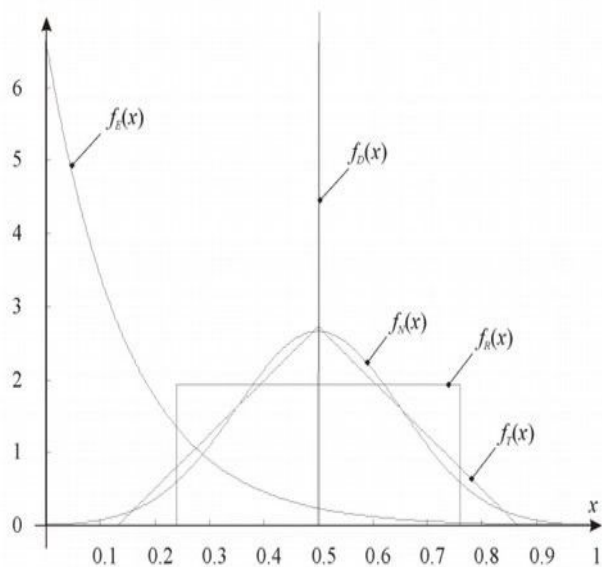
Równanie Naviera–Stokesa, które jest podstawowym równaniem dynamiki atmosfery, jest nieliniowe, co oznacza, że jego rozwiązanie (wynik obliczeń) jest najczęściej niezwykle wrażliwe na niewielkie zmiany warunku początkowego, od którego rozpoczyna się obliczenia.

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.



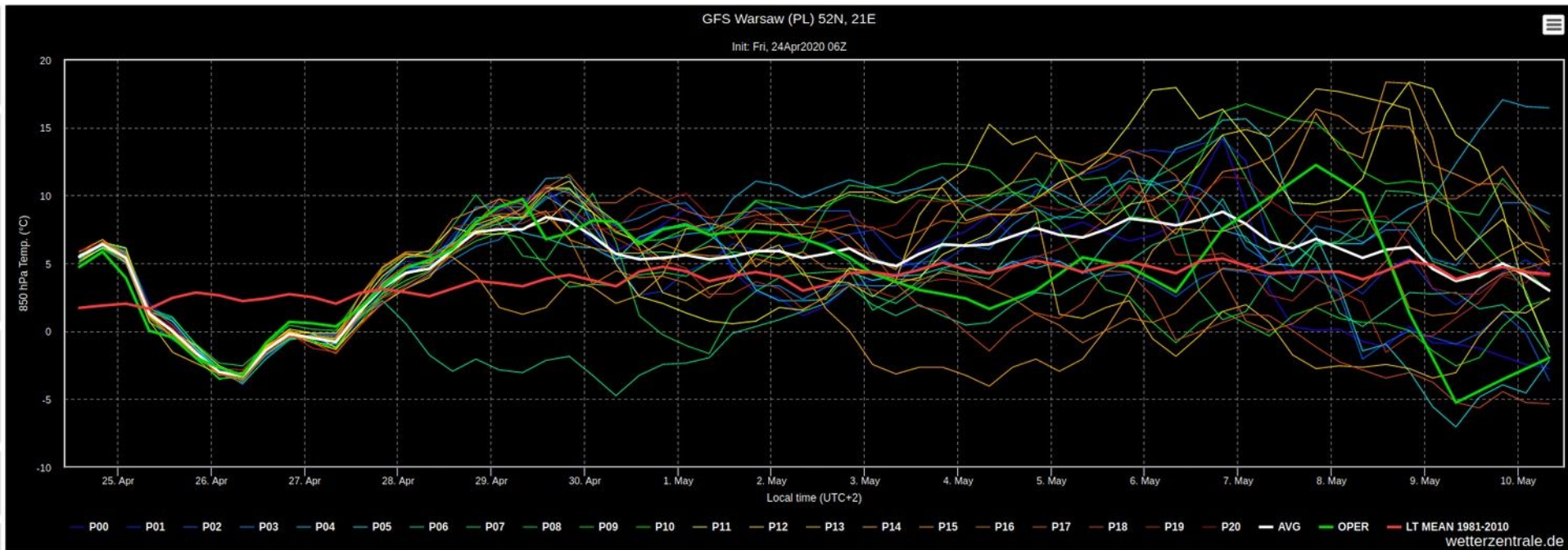
Odkrycie Lorenza
można zilustrować w
języku teorii
prawdopodobieństwa,
ściślej mówiąc
analizując tzw. rozkład
prawdopodobieństwa.



Idea prognozowania metoda wiązek
(ang. ensemble forecasting).



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



Przewidywalność pogody:

poszczególne realizacje procesu dynamiczno-stochastycznego (prognozy pogody dla różnych warunków początkowych w zakresie błęd pomiarowego - cienkie kolorowe linie),

średnia po zespole realizacji (czarna linia),
średnia klimatyczna (czerwona linia).

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:

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

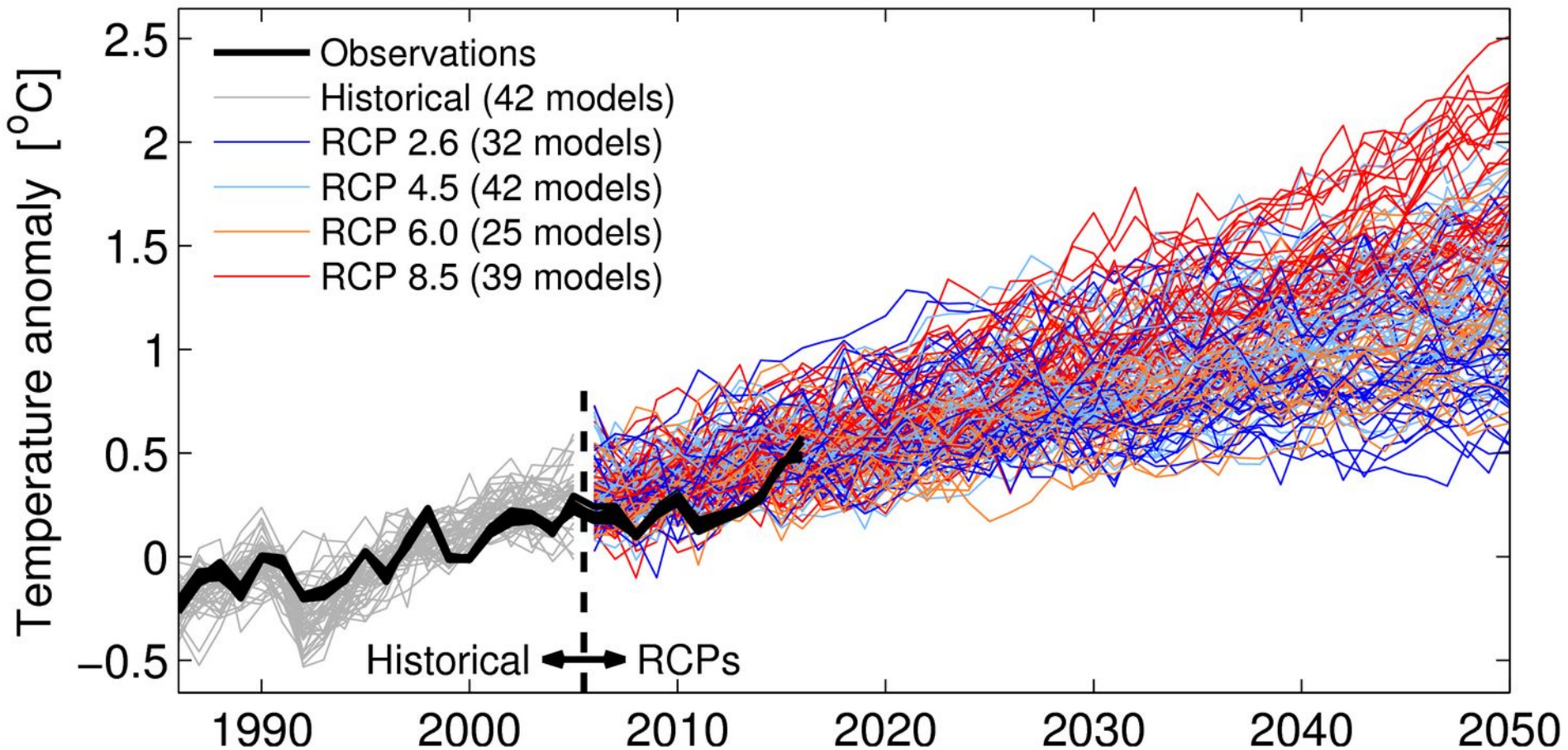
Prognoza klimatu:

badanie statystyki zachowań układu, krytycznie ważne strumienie energii i spełnienie zasad zachowania w długim czasie oraz prawidłowe modelowanie strumieni radiacyjnych.

Przewidywalność

klimatu: symulacje różnymi modelami

Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005



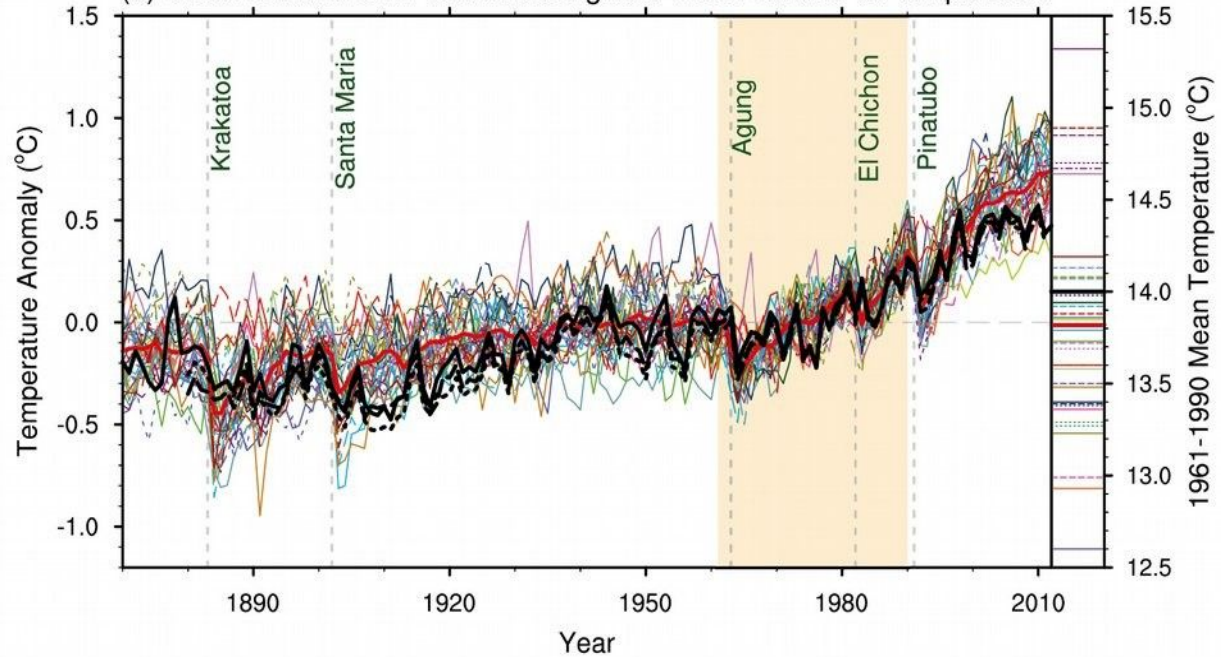
Przewidywalność klimatu:

Wiązka symulacji wykonanych modelami przebiegu anomalii temperatury globalnej w XX wieku.

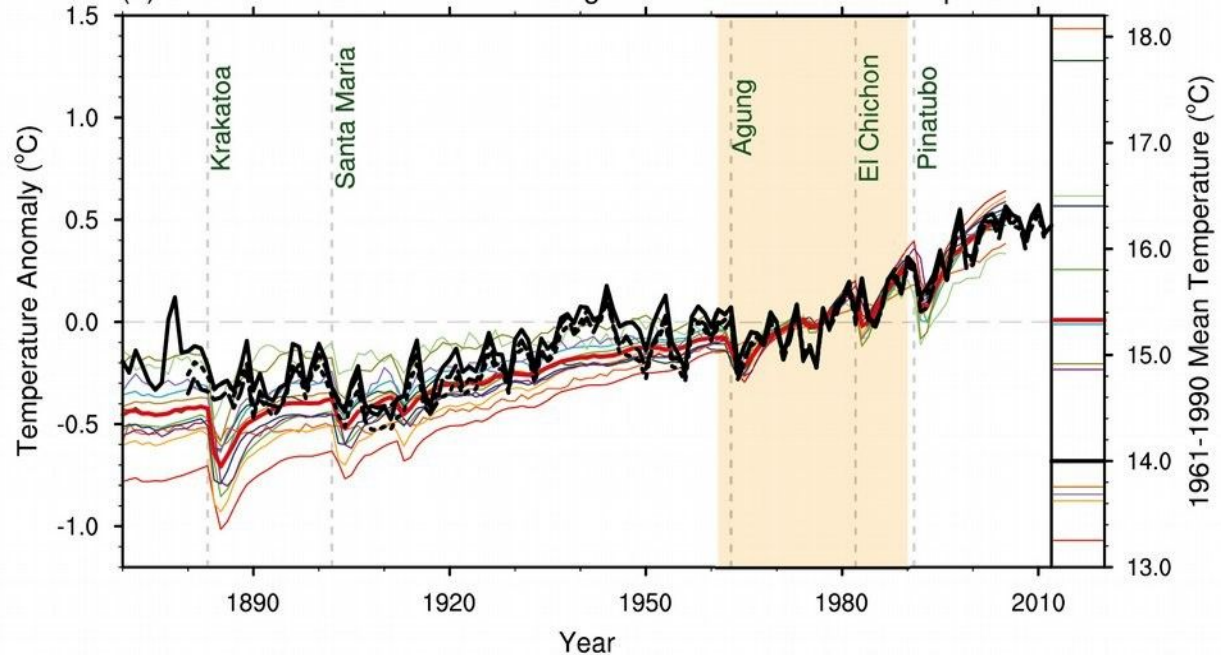
Górny panel: symulacje różnymi GSM i ESM

Dolny panel: symulacje różnymi EMIC

(a) Observed and CMIP5 simulated global mean surface air temperature



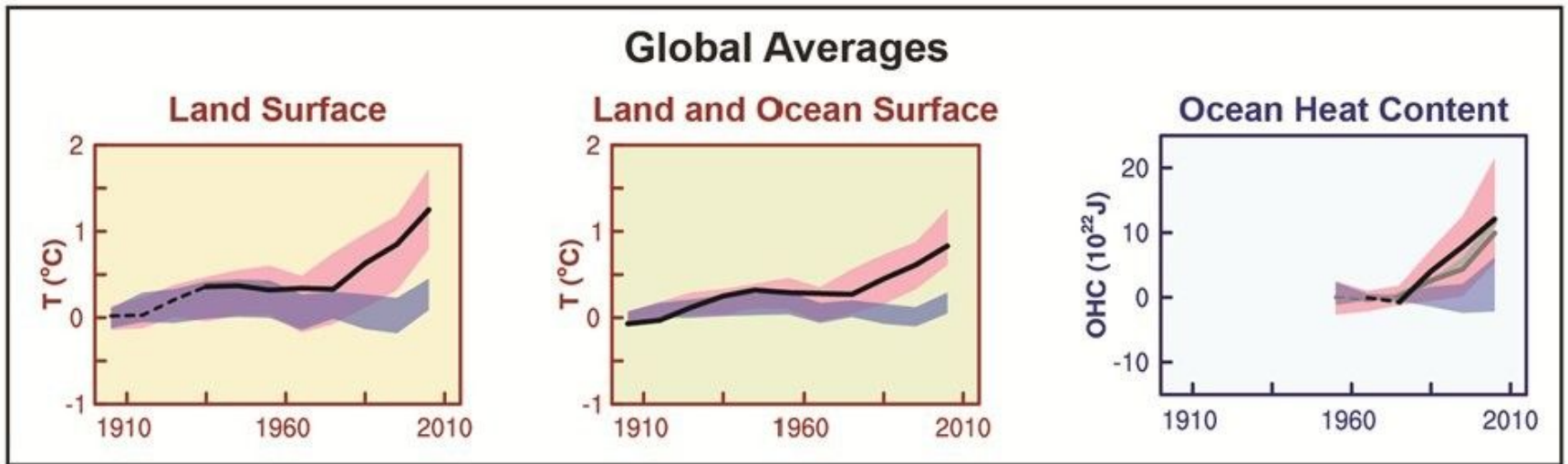
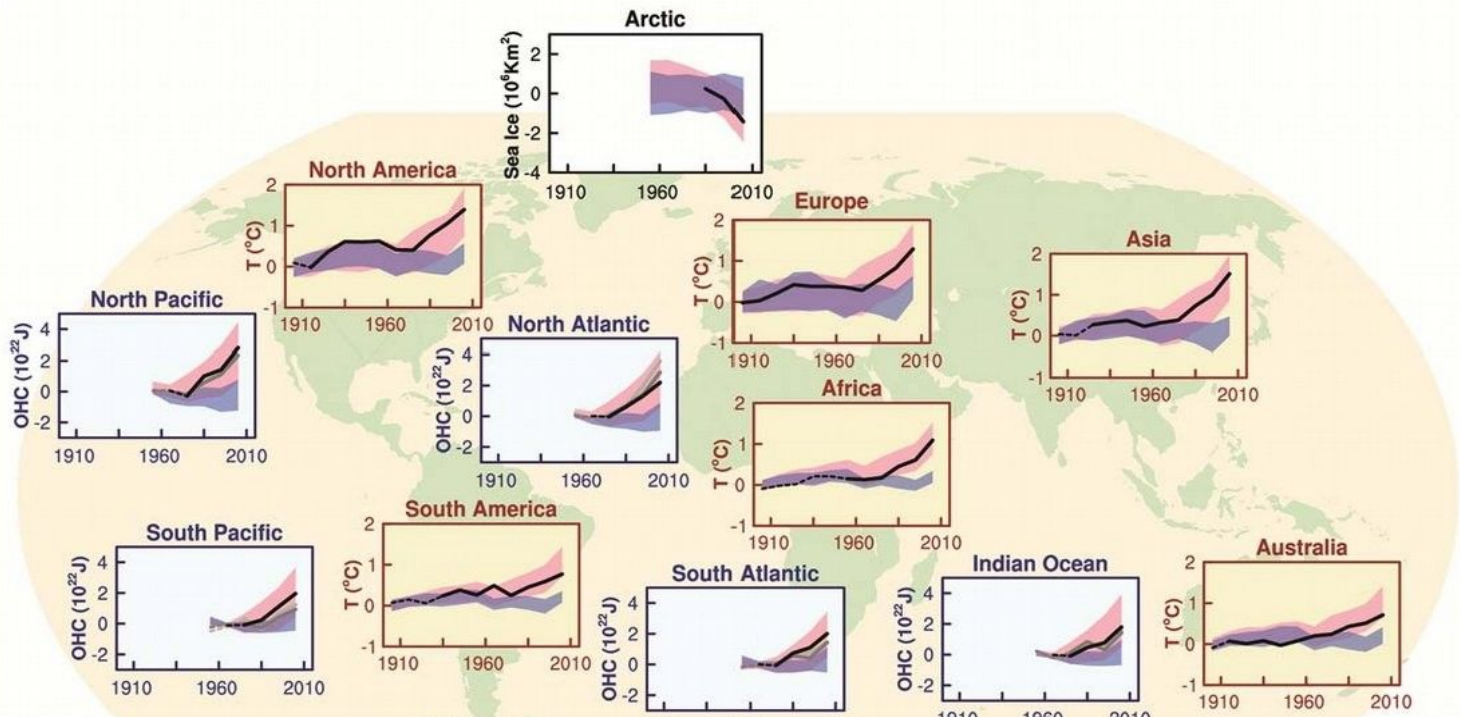
(b) Observed and EMICs simulated global mean surface air temperature



- HadCRUT4
- GISTEMP
- MLOST
- CMIP5 mean
- ACCESS1.0
- ACCESS1.3
- BCC-CSM1.1
- BCC-CSM1.1(m)
- BNU-ESM
- CanESM2
- CCSM4
- CESM1(BGC)
- CESM1(CAM5)
- CMCC-CM
- CMCC-CMS
- CNRM-CM5
- CSIRO-Mk3.6.0
- FIO-ESM
- GFDL-CM3
- GFDL-ESM2G
- GFDL-ESM2M
- GISS-E2-H
- GISS-E2-H-CC
- GISS-E2-R
- GISS-E2-R-CC
- HadCM3
- HadGEM2-AO
- HadGEM2-CC
- HadGEM2-ES
- IPSL-CM5A-LR
- IPSL-CM5A-MR
- IPSL-CM5B-LR
- MIROC5
- MIROC-ESM
- MIROC-ESM-CHEM
- MPI-ESM-LR
- MPI-ESM-MR
- MRI-CGCM3
- NorESM1-M
- NorESM1-ME
- HadCRUT4
- GISTEMP
- MLOST
- EMIC mean
- Bern3D
- CLIMBER2
- CLIMBER3
- DCESS
- GENIE
- IGSM2
- IAP RAS CM
- LOVECLIM1.2
- MESMO
- MIROC-lite
- UMD
- Uvic

Symulacje
uwzględniające
różne) i
nieuwzględniające
emisji
antropogenicznych
oraz dane
empiryczne
(czarna kreska)

V AR ICCP



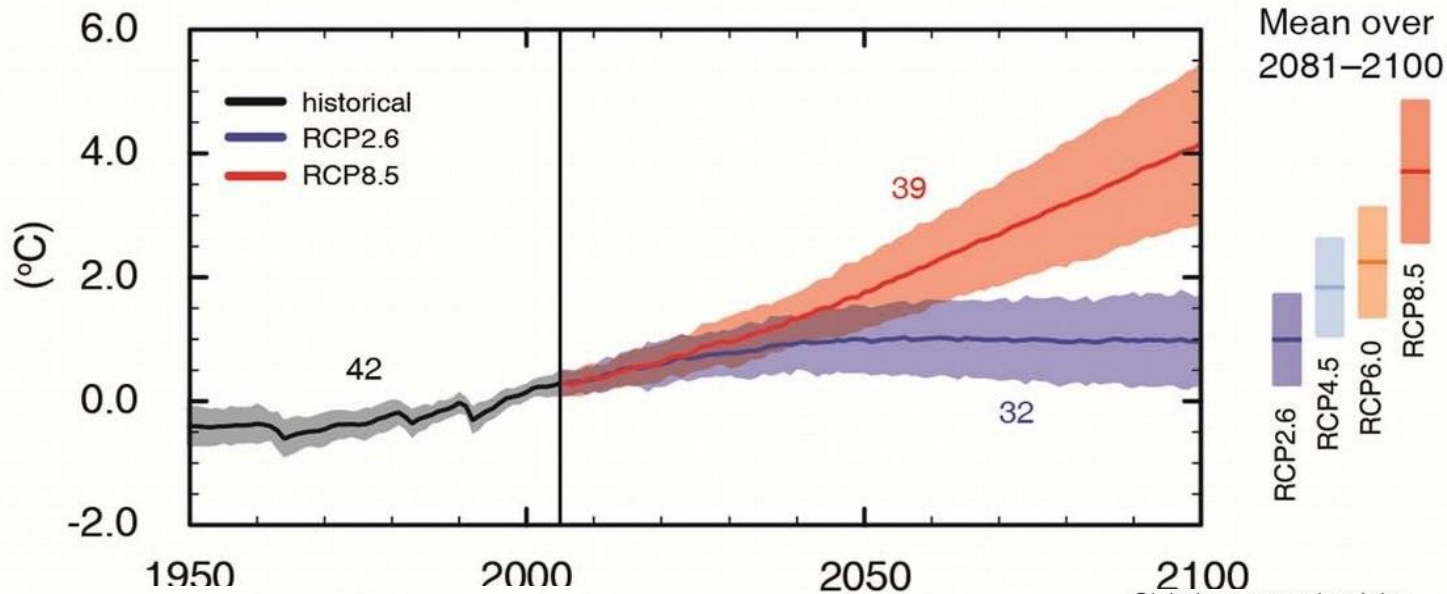
— Observations

■ Models using only natural forcings

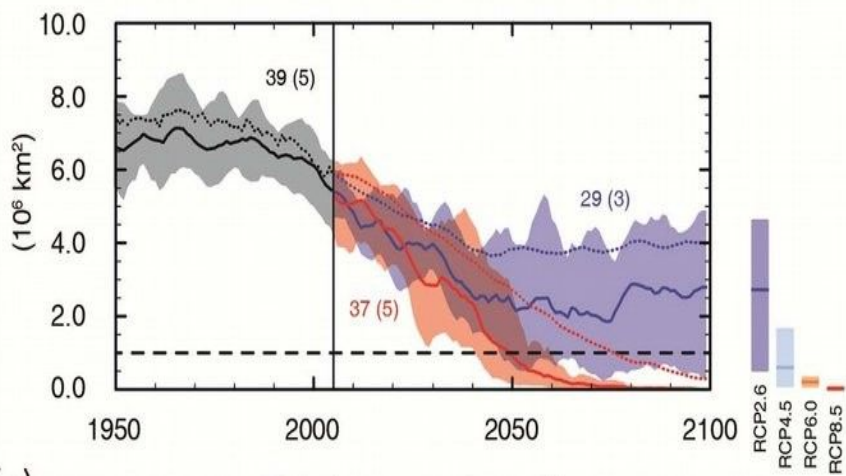
■ Models using both natural and anthropogenic forcings

Projekcje klimatu wiązką modeli dla różnych scenariuszy emisji antropogenicznych (V AR IPCC)

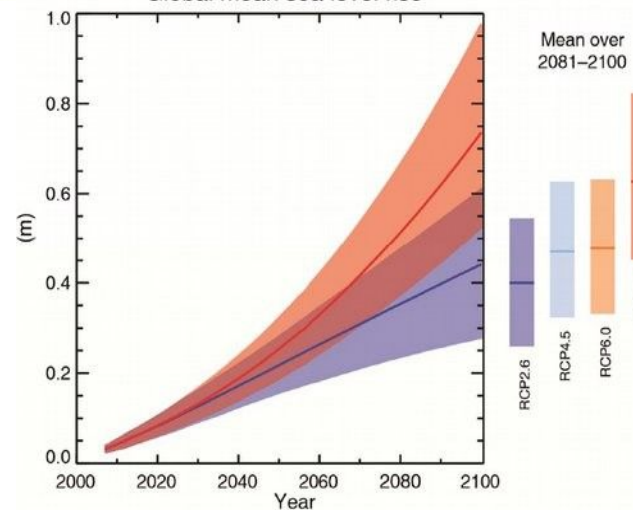
(a) Global average surface temperature change



(b) Northern Hemisphere September sea ice extent



Global mean sea level rise



Dostęp do wyników symulacji modelami klimatu jest otwarty

The screenshot shows a Mozilla Firefox browser window displaying the CMIP Overview page. The browser's address bar shows the URL cmip-pcmdi.llnl.gov. The page header includes the text "CMIP - Overview" and "WCRP World Climate Research Programme". A navigation menu at the top lists "Home", "News", "CMIP3", "CMIP5", "Accomplishments", "Links", and "Contact". A search bar is located on the right side of the header. The main content area features a section titled "CMIP - Coupled Model Intercomparison Project - Overview". This section contains a detailed description of the project, its goals, and its history. It mentions that the project was established in 1995 and is part of the WCRP. The text describes the project's focus on studying coupled atmosphere-ocean general circulation models (AOGCMs) and its role in providing a community-based infrastructure for climate model diagnosis, validation, and intercomparison. It also notes that the project is funded by the U.S. Department of Energy's Office of Science, Biological and Environmental Research (BER) program. A sub-section titled "Current Intercomparison - CMIP5" is also visible, which discusses the project's contribution to the IPCC Fifth Assessment Report and the CMIP5 intercomparison activity. This section lists three types of simulations: decadal hindcasts and predictions, long-term simulations, and atmosphere-only simulations. A link is provided to access the CMIP5 designated web-page.

CMIP - Overview - Mozilla Firefox

Instytut Geofizyki - Akademia ... CESH Models | CCSM4. ... MIT Integrated Framev ... MITgcm ... Wetter : Wetterzentra ... CMIP - Overview

cmip-pcmdi.llnl.gov

PCMDI - Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison

PCMDI Home | CAPT | AMIP | SMIP | PMIP | APE | Contact

Denmark Norway Japan United Kingdom Italy
Russia S. Korea Germany France
The Netherlands China Canada
Australia USA

CMIP Coupled Model Intercomparison Project
WCRP World Climate Research Programme

Home News CMIP3 CMIP5 Accomplishments Links Contact RSS

Home \ Overview

CMIP - Coupled Model Intercomparison Project - Overview

Under the [World Climate Research Programme \(WCRP\)](#) the [Working Group on Coupled Modelling \(WGCM\)](#) established the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) as a standard experimental protocol for studying the output of coupled atmosphere-ocean general circulation models (AOGCMs). CMIP provides a community-based infrastructure in support of climate model diagnosis, validation, intercomparison, documentation and data access. This framework enables a diverse community of scientists to analyze GCMs in a systematic fashion, a process which serves to facilitate model improvement. Virtually the entire international climate modeling community has participated in this project since its inception in 1995. The [Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison \(PCMDI\)](#) archives much of the CMIP data and provides other support for CMIP. PCMDI's CMIP effort is funded by the [Regional and Global Climate Modeling \(RGCM\)](#) Program of the [Climate and Environmental Sciences Division](#) of the U.S. Department of Energy's Office of Science, [Biological and Environmental Research \(BER\)](#) program.

Coupled atmosphere-ocean general circulation models allow the simulated climate to adjust to changes in climate forcing, such as increasing atmospheric carbon dioxide. CMIP began in 1995 by collecting output from model "control runs" in which climate forcing is held constant. Later versions of CMIP have collected output from an idealized scenario of global warming, with atmospheric CO₂ increasing at the rate of 1% per year until it doubles at about Year 70. CMIP output is available for study by approved diagnostic sub-projects.

Phase three of CMIP ([CMIP3](#)) included "realistic" scenarios for both past and present climate forcing. The research based on this dataset provided much of the new material underlying the [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#) Fourth Assessment Report (AR4).

Current Intercomparison - CMIP5

We are now beginning the process towards the IPCC Fifth Assessment Report and with it the [CMIP5](#) intercomparison activity. The CMIP5 (CMIP Phase 5) experiment design has been finalized with the following suites of experiments:

- I Decadal Hindcasts and Predictions simulations,
- II "long-term" simulations,
- III "atmosphere-only" (prescribed SST) simulations for especially computationally-demanding models.

Click on [CMIP5](#) tab to enter CMIP5 designated web-page

LLNL-WEB-414828 | Privacy & Legal Notice

Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

- Understanding past, present and future climate -

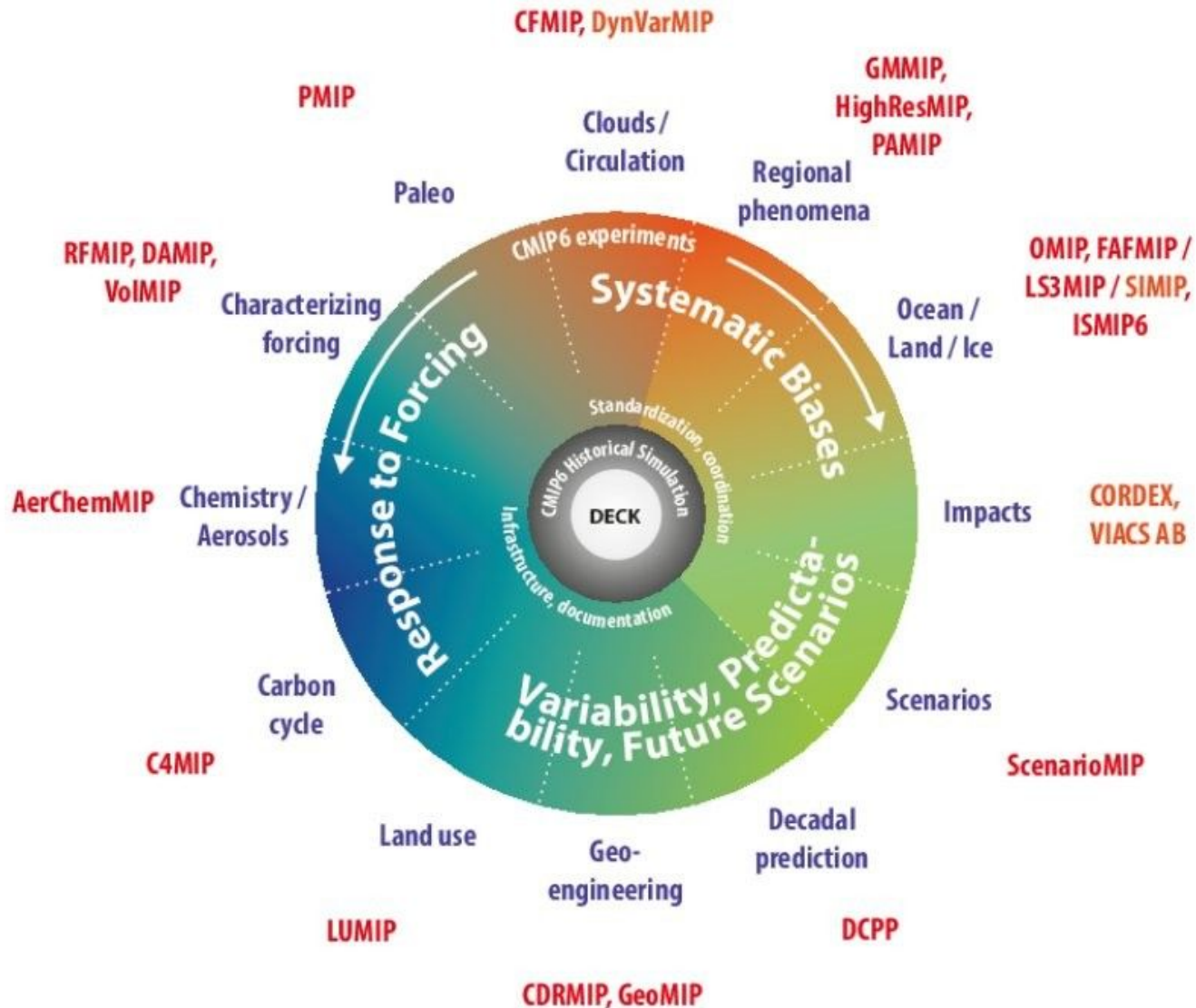
- CMIP is a project of the World Climate Research Programme (**WCRP**)'s Working Group of Coupled Modelling (**WGCM**).
- Since 1995, **CMIP** has coordinated climate model experiments involving multiple international modeling teams worldwide.
- CMIP has led to a better understanding of past, present and future climate change and variability in a **multi-model framework**.
- CMIP defines **common experiment protocols, forcings and output**.
- CMIP has developed in phases, with the simulations of the fifth phase, CMIP5, now completed, and the planning of the sixth phase, i.e. CMIP6, well underway.

- CMIP's central goal is to advance scientific understanding of the Earth system.
- CMIP model simulations have also been regularly assessed as part of the IPCC Climate Assessments Reports and various national assessments.

CMIP6 Design: Scientific Focus

- The **scientific backdrop** for CMIP6 is the **WCRP Grand Science Challenges**:
 1. Clouds, Circulation and Climate Sensitivity
 2. Changes in Cryosphere
 3. Climate Extremes
 4. Regional Sea-level Rise
 5. Water Availability
 6. Near-Term Climate Prediction
 7. Biogeochemical Cycles and Climate Change
- The specific experimental design is focused on **three broad scientific questions**:
 1. How does the Earth System respond to forcing?
 2. What are the origins and consequences of systematic model biases?
 3. How can we assess future climate changes given climate variability, predictability and uncertainties in scenarios?

23 CMIP6-Endorsed MIPs



CMIP6: Participating Model Groups

	Institution	Country		Institution	Country		Institution	Country
1	AWI	Germany	12	DOE	USA	23	MRI	Japan
2	BCC	China	13	EC-Earth-Cons	Europe	24	NASA-GISS	USA
3	BNU	China	14	FGOALS	China	25	NCAR	USA
4	CAMS	China	15	FIO-RONM	China	26	NCC	Norway
5	CasESM	China	16	INM	Russia	27	NERC	UK
6	CCCma	Canada	17	INPE	Brazil	28	NIMS-KMA	Republic of Korea
7	CCCR-IITM	India	18	IPSL	France	29	NOAA-GFDL	USA
8	CMCC	Italy	19	MESSY-Cons	Germany	30	NUIST	China
9	CNRM	France	20	MIROC	Japan	31	TaiESM	Taiwan, China
10	CSIR-CSIRO	South Africa	21	MOHC	UK	32	THU	China
11	CSIRO-BOM	Australia	22	MPI-M	Germany	33	Seoul Nat.Uni	Republic of Korea

New in CMIP:

- 2 new model groups from Germany (AWI, MESSY-Consortium)
- 4 new model groups from China (CAMS, CasESM, NUIST, THU)
- 1 new model group from Brazil (INPE)
- 1 new model group from India (CCCR-IITM)
- 1 new model group from Taiwan, China (TaiESM)
- 1 new model group from USA (DOE)
- 2 new model group from Republic of Korea (NIMS-KMA, SAM0-UNICON)
- 1 new model group from South Africa / Australia (CSIR-CSIRO)

=====

⇒ **13 new model groups so far**

* Other models can join providing DECK and historical simulations are submitted

More models (>70)
 New models
 More complex models
 Higher resolution models

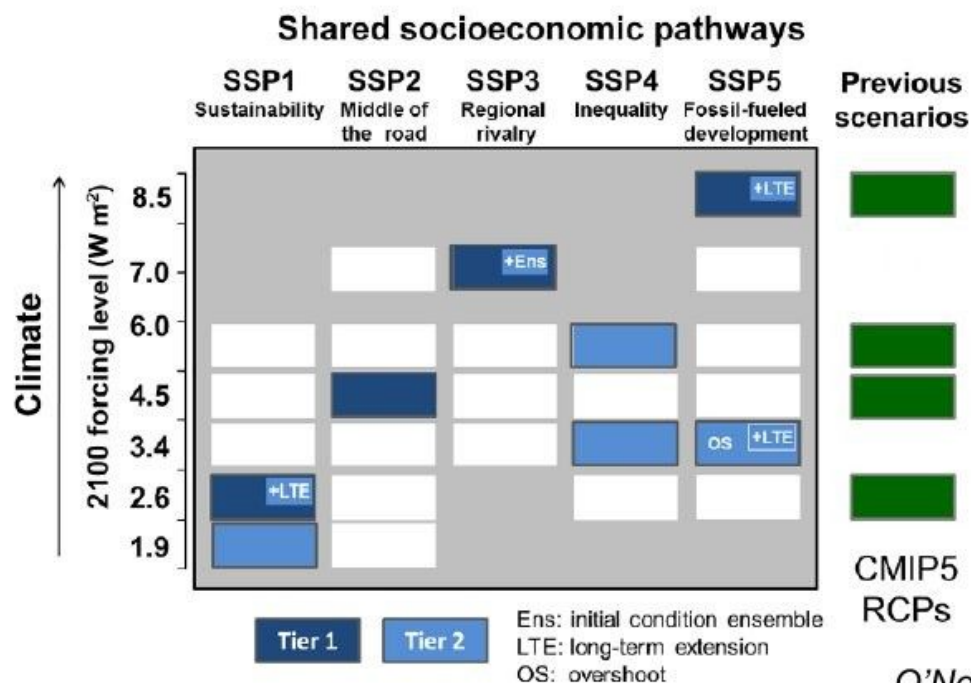


CMIP6 Modeling Groups (click on flags to reveal identity)

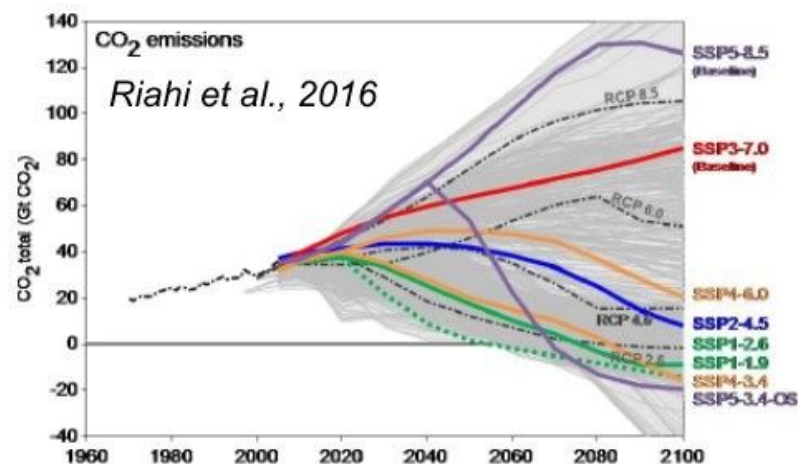


Key Messages: Model Projections / Predictions (2)

SSPs: set of baselines, with future developments in absence of new climate policies beyond those in place today



Future in CMIP6: 2015-2100 plus Extensions to 2300



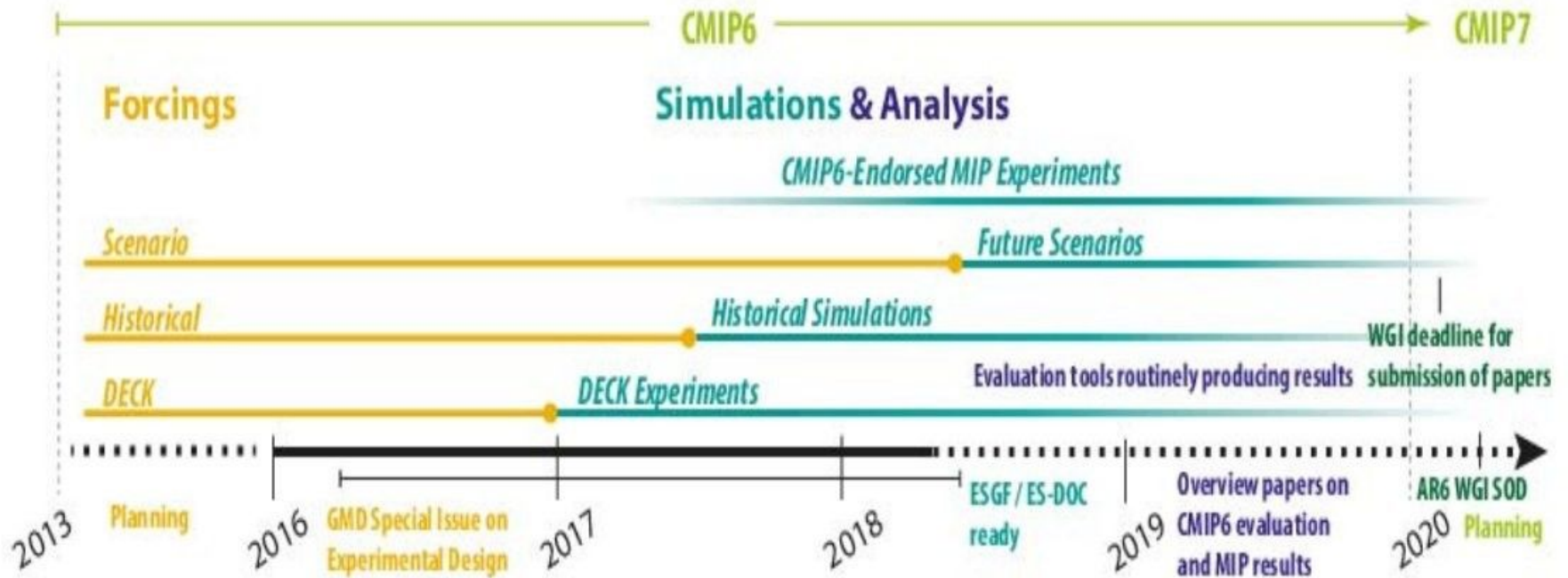
O'Neill et al., ScenarioMIP for CMIP6, GMD, 2016

ScenarioMIP: New scenarios span a similar range as the RCPs, but fill critical gaps, including

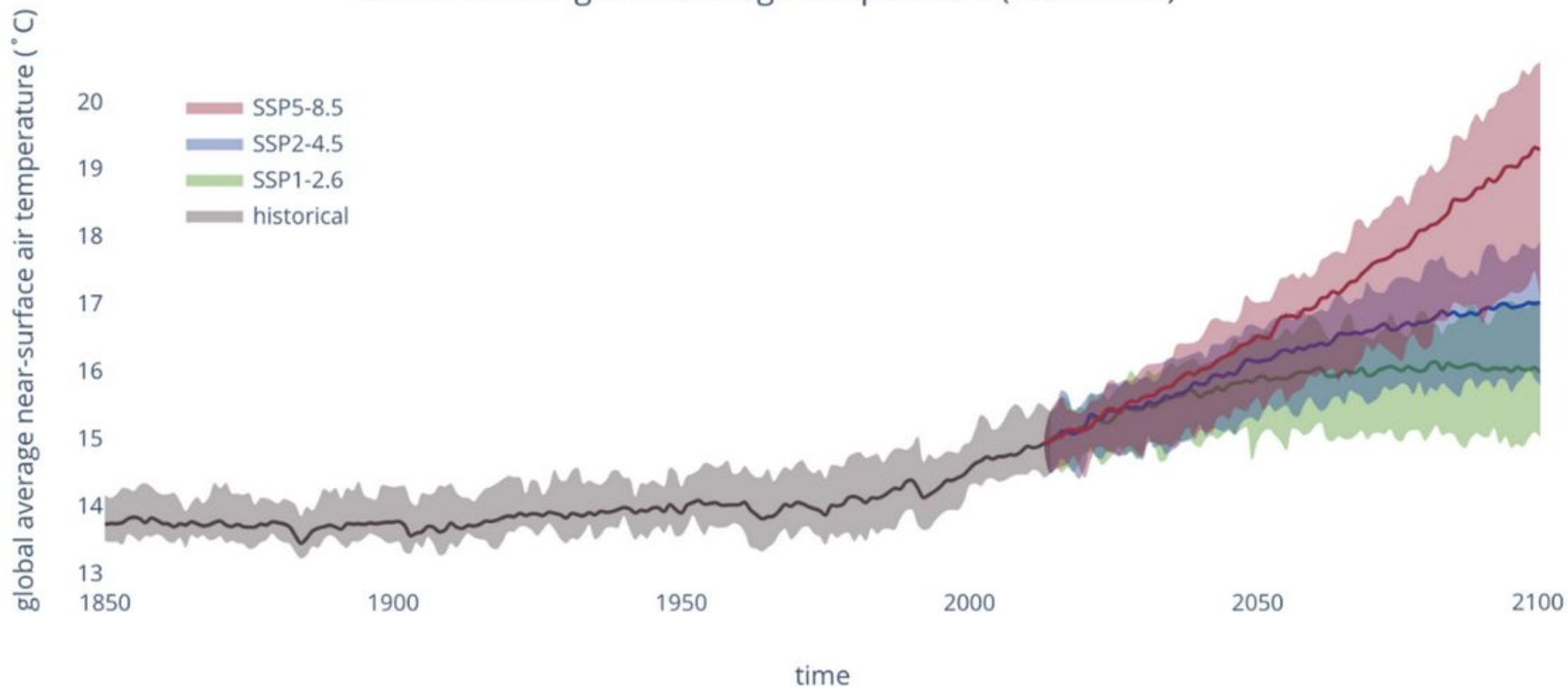
- Role of specific forcings such as land use and short-lived species (air quality)
- The effect of a peak and decline in forcing,
- The consequences of scenarios that limit warming to below 2 °C,

DCPP: Improvements in models, reanalysis, methods of initialization and ensemble generation, and data analysis will provide extended comprehensive decadal predictions

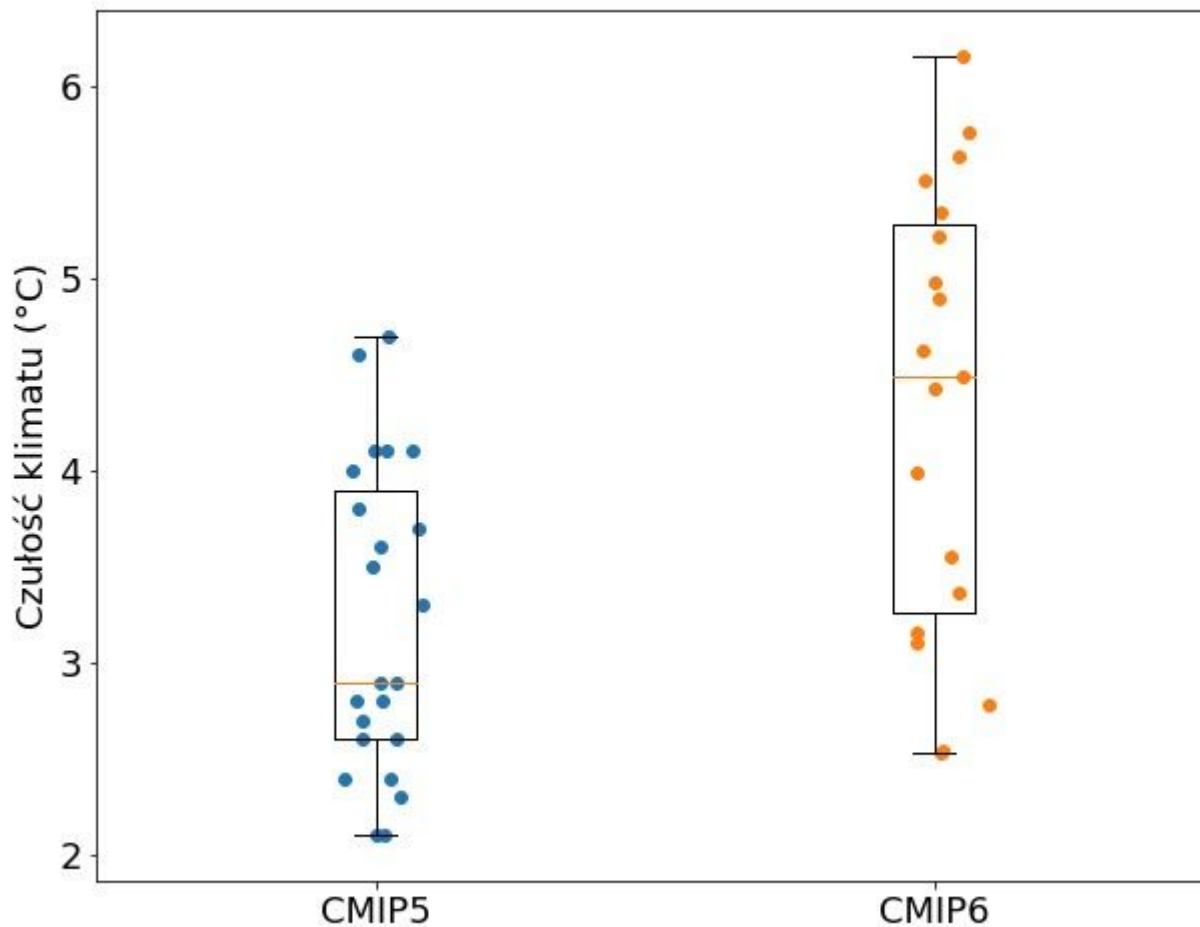
CMIP6 Timeline



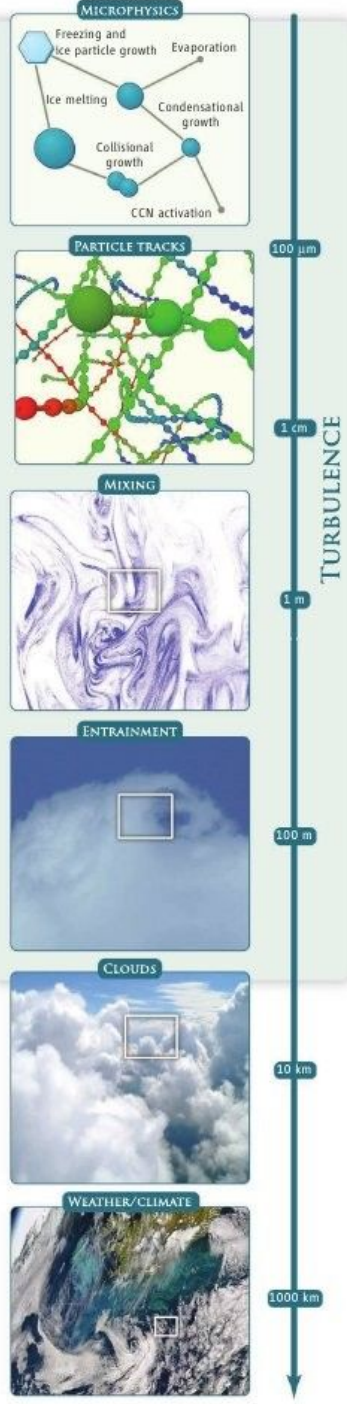
CMIP6 annual global average temperature (1850-2100)



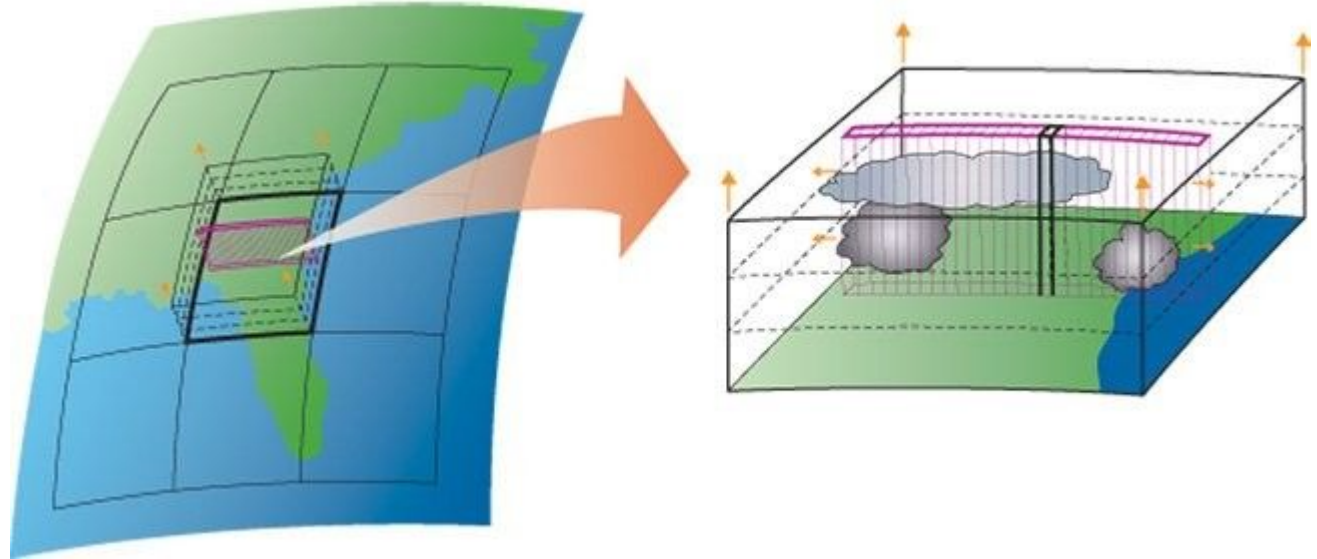
An illustration based on CMIP6 data available in the CDS showing global mean temperature between 1850 and 2100 for selected CMIP6 models. The grey shaded area shows the range of historical simulations and the coloured areas show potential future temperature change based on different greenhouse gas emission scenarios (red is pessimistic, blue is realistic and green is optimistic). Credit: Copernicus Climate Change Service, ECMWF.



Zakres oszacowań czułości klimatu modeli CMIP5, wykorzystanych w 5 raporcie IPCC (po lewej stronie) oraz wstępne rezultaty symulacji CMIP6 modelami nowej generacji (po prawej).



Jak sobie radzimy z problemami?
 „Multiscale modeling” - modelowanie wieloskalowe,
 superparametryzacje, GIGA-LES, ILES,
 explicit cloud-resolving....



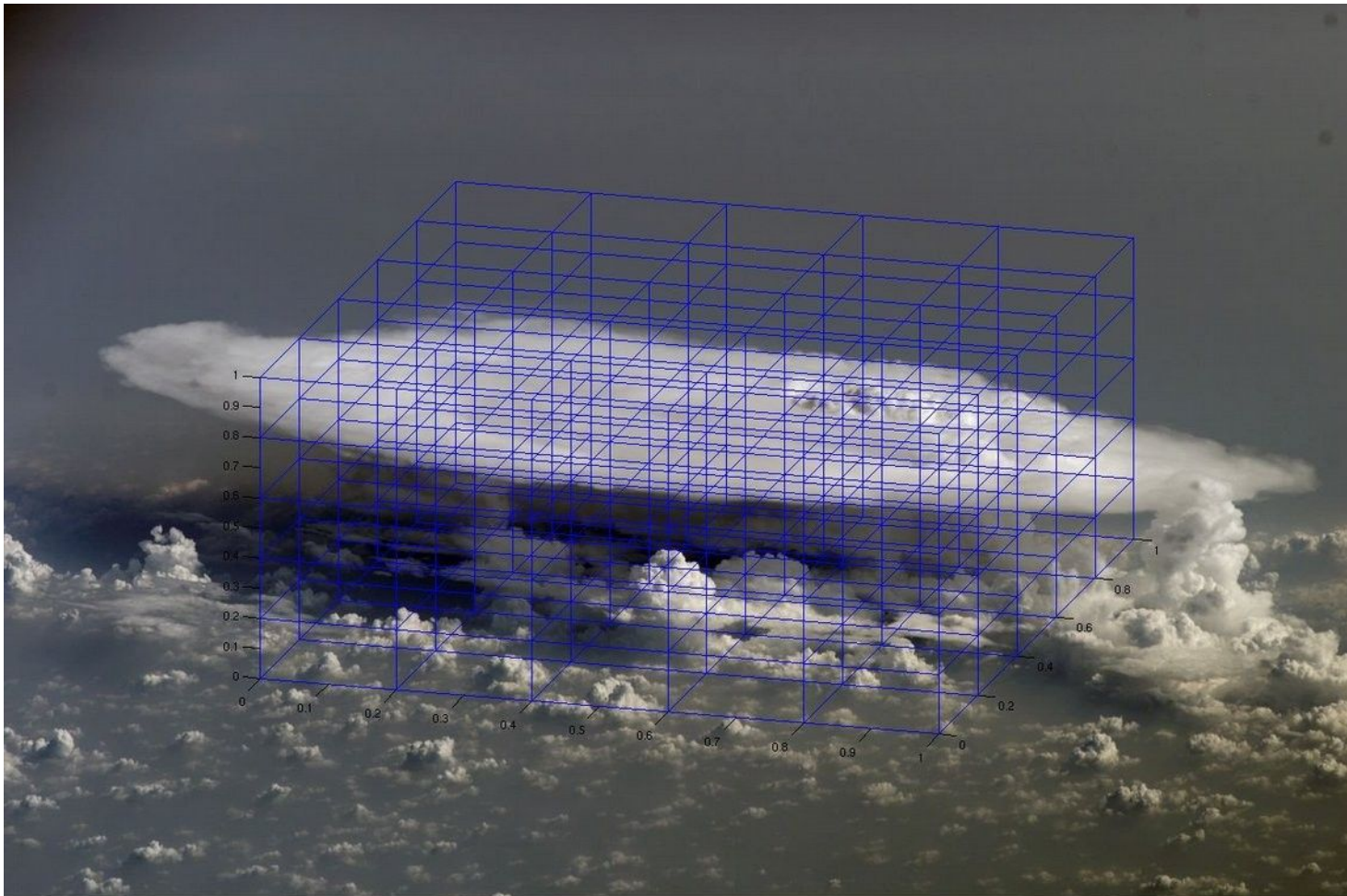
Bodenschütz, E., S.P. Malinowski, R.A. Shaw, F. Stratmann, 2010: Can We Understand Clouds without Turbulence? *Science*, **327**, 970 – 971.

Randall D.A, Khairoutdinov M, Arakawa A, Grabowski W.W., 2003: Breaking the cloud parameterization deadlock . *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **84**, 1547-1564.

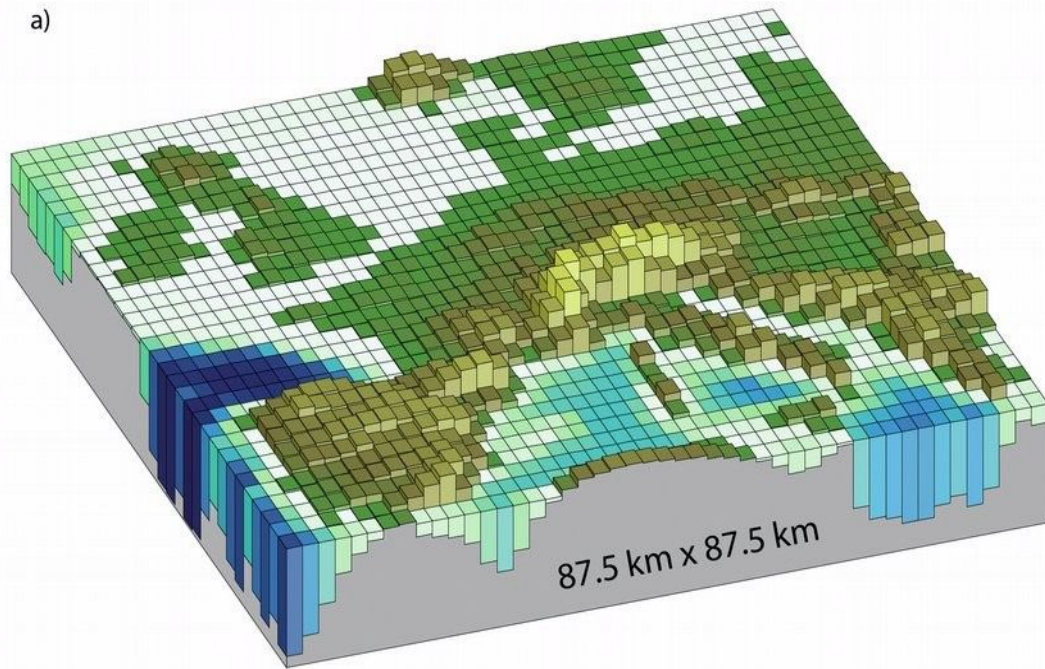
I wiele wiele innych.....

Jakie problemy napotyka modelowanie prognozy pogody i klimatu?

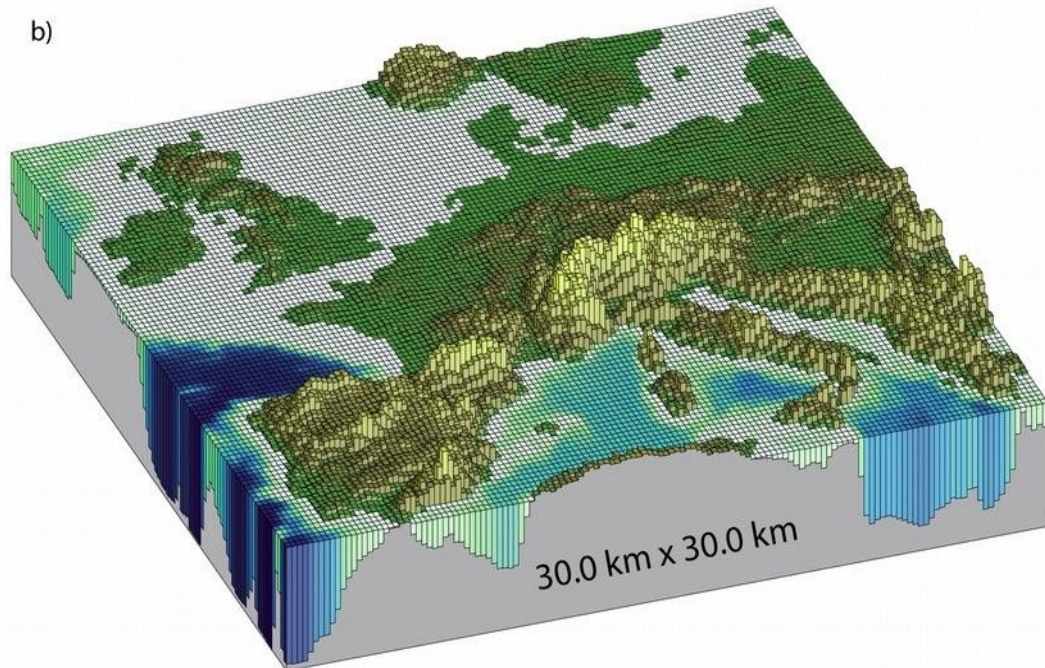
Najważniejszy to wielkoskalowość przepływów w atmosferze i oceanie i konieczność parametryzacji procesów podskalowych (o rozmiarach mniejszych niż oczko siatki i zachodzących szybciej niż krok czasowy obliczeń)



Najlepsze modele klimatu:



14 lat temu



7 lat temu

IPCC V AR

Technika prognozowania klimatu : multimodel ensemble – pozwala a priori na ocenę prawdopodobieństwa sprawdzenia prognozy – podejście bayesowskie.

Dlaczego możemy (w ograniczonym stopniu) ufać prognozom klimatu:

- 1) modele bazują na podstawowych powszechnych prawach fizyki: zasadach zachowania energii, pędu, momentu pędu, masy....
- 2) w „wirtualnej rzeczywistości” modeli wielkości fizyczne i ich statystyki zachowują się w sposób rozsądny, a kolejne ulepszenia prowadzą do poprawy zachowań modeli zgodnie z naszym doświadczeniem i oczekiwaniami;
- 3) modele odtwarzają trendy i obserwowany rozkład przestrzenny wielu zmiennych;
- 4) testy modeli na przeszłych stanach atmosfery (w tym tych sytuacjach paleo, dla których mamy odpowiednie dane) stanowią dodatkowe, niezależne źródło weryfikacji;
- 5) różnorodne modele dają zgodne (w spodziewanych granicach) wyniki symulacji na tych samych danych;
- 6) prognozy nowej generacji modeli są zgodne ze starszymi;
- 7) potrafimy zinterpretować wyniki symulacji w sensie zrozumienia procesów fizycznych i sprzężeń.

R Knutti, 2008: Should we believe model predictions of future climate change? *Phil. Trans. R. Soc. A* 366, 4647–4664 doi:10.1098/rsta.2008.0169

Odnośniki do kilku wybranych modeli klimatu:

<http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm4.0/>

<https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/icon-esm/>

https://geos5.org/wiki/index.php?title=GEOS_GCM_Documentation_and_Access

<http://web.mit.edu/globalchange/www/climate.html>

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/toolbox>

About the Project

nextGEMS is a collaborative European project. Funded by the EU's Horizon 2020 programme, it will tap expertise from fourteen European Nations to develop two next generation (storm-resolving) Earth-system Models. Through breakthroughs in simulation realism, these models will allow us to understand and reliably quantify how the climate will change on a global and regional scale, and how the weather, including its extreme events, will look like in the future.



nextGEMS is a Horizon 2020 project funded by the European Commission. It is coordinated by Bjorn Stevens at the Max Planck Institute for Meteorology and Irina Sandu at the ECMWF. The nextGEMS consortium is made up of 26 institutes:

Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

Alfred-Wegener-Institut (AWI), Germany

University of Bergen (UIB), Norway

University of Copenhagen (UCPH), Denmark

French National Centre for Scientific Research (CNRS), France

Stockholm University (SU), Sweden

University of Warsaw (UW), Poland

University of Oxford (UOXF), UK

Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR), Germany

Barcelona Supercomputing Center (BSC), Spain

University of Reading (UREAD), UK

Wageningen University (WU), The Netherlands

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Switzerland

Universität Bern (UBERN), Switzerland

Instituto Português do Mar e da Atmosfera IP (IPMA), Portugal

University of Helsinki (UH), Finland

University of Trento (UNITN), Italy

Deutsches Klimarechenzentrum GmbH (DKRZ), Germany

Universidad Complutense de Madrid (UCM), Spain

French National Institute for Sustainable Development (IRD), France

Iberdrola Renovables Energía S.A.U. (IBE), Spain

Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Senegal

Latest Thinking GmbH (LT), Germany

Karlsruhe Institut of Technology (KIT), Germany

University of Hamburg (UHH), Germany