

# MODELOWANIE KLIMATU

*Jan Grądzki*

28.11.2005

## **Plan.**

1. Równania ruchu atmosfery.
2. GCM.
3. Wiele GCM, czyli podejście deterministyczno–probabilistyczne.

# Równania pierwotne

Bilans pędu

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p - \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} + \Omega^2\mathbf{r}$$

Zasada zachowania energii

$$c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{Dp}{Dt} - Q$$

Równanie ciągłości

$$\frac{D\rho}{Dt} = \rho \nabla \cdot \mathbf{v}$$

Równanie stanu

$$p = \rho RT$$

Oraz równanie ciągłości dla pary wodnej.

# Równania pierwotne

Ważniejsze uproszczenia:

- ☛ równowaga hydrostatyczna

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g = -\frac{gp}{RT}$$

- ☛ zaniechanie  $\Omega_{horizontal}$  w wyrażeniu na siłę Coriolisa
- ☛ inne przybliżenia dla atmosfery cienkiej w porównaniu z promieniem Ziemi

Krócej: równania Naviera – Stokesa w układzie wirującej sfery, w przybliżeniach cienkiej atmosfery i równowagi hydrostatycznej.

## General Circulation Models

**Symulacja ogólnej cyrkulacji atmosfery.** Program minimum: 3 składowe pola wiatru i pole temperatury. Szum — niechciane rozwiązania równań ruchu:

- Fale dźwiękowe w pionie — w przybliżeniu równowagi hydrostatycznej niemożliwe.
- Fale dźwiękowe w poziomie — oscylacje Lamba: maksymalna amplituda na dolnej granicy atmosfery, tam kładziemy  $\omega \equiv \frac{Dp}{Dt} = 0$ ; współrzędne izobaryczne.
- Fale grawitacyjne (wypornościowe)

# General Circulation Models

Czynniki wpływające na zachowanie atmosfery:

- ☛ promieniowanie
- ☛ wymiana ciepła z oceanem
- ☛ parowanie i kondensacja
- ☛ aerozole
- ☛ gazy cieplarniane
- ☛ powierzchnia lądów
- ☛ chmury
- ☛ śnieg
- ☛ ...

## General Circulation Models

- ☛ Bezpośrednie przewidywanie — dodatkowe równania w modelu.  
np. pochłanianie i emisja promieniowania; ruch mas wody w oceanie
- ☛ Parametyzacje — zjawiska w skali mniejszej niż rozdzielczość modelu.  
np. chmury konwekcyjne
- ☛ wymuszanie zadane jako warunki brzegowe  
np. zawartość CO<sub>2</sub> w atmosferze

# General Circulation Models

Dyskretyzacja:

- Obliczenia na skończonej sieci punktów lub model spektralny.
- Skończony krok czasowy  $\sim 5$  min (ale niektóre wolnozmienne zjawiska liczone co kilka kroków).



# Kłopoty z chaosem

Atmosfera — układ niezmiernie wrażliwy na warunki początkowe. My mamy tylko:

- ☛ niedokładne warunki początkowe — dane z pomiarów;
- ☛ niedokładną ewolucję modelu — równania różnicowe, parametryzacje;
- ☛ niewielkie pojęcie o zmianach czynników wymuszających w przyszłości.

Ratunek:

Ulepszanie jednego modelu?

Podójście deterministyczno–probabilistyczne

# Zespoły modeli

- ☛ Perturbed Physics Ensemble
- ☛ Initial Conditions Ensemble
- ☛ Grand Ensemble

Każdy model — jeden scenariusz.

- ↪ scenariusz najbardziej prawdopodobny
- ↪ niepewność przewidywań

Testy — prognozowanie przeszłości (hindcast).

# Climateprediction.net

obliczenia rozproszone

Siedziba główna: Oxford University

Podstawa: Unified Model (Met Office)

Modyfikacje:

- ☛ Perturbed Physics (20 najściślej rozumianych parametrów);
- ☛ wymuszanie;
- ☛ warunki początkowe.

Eksperymenty numeryczne:

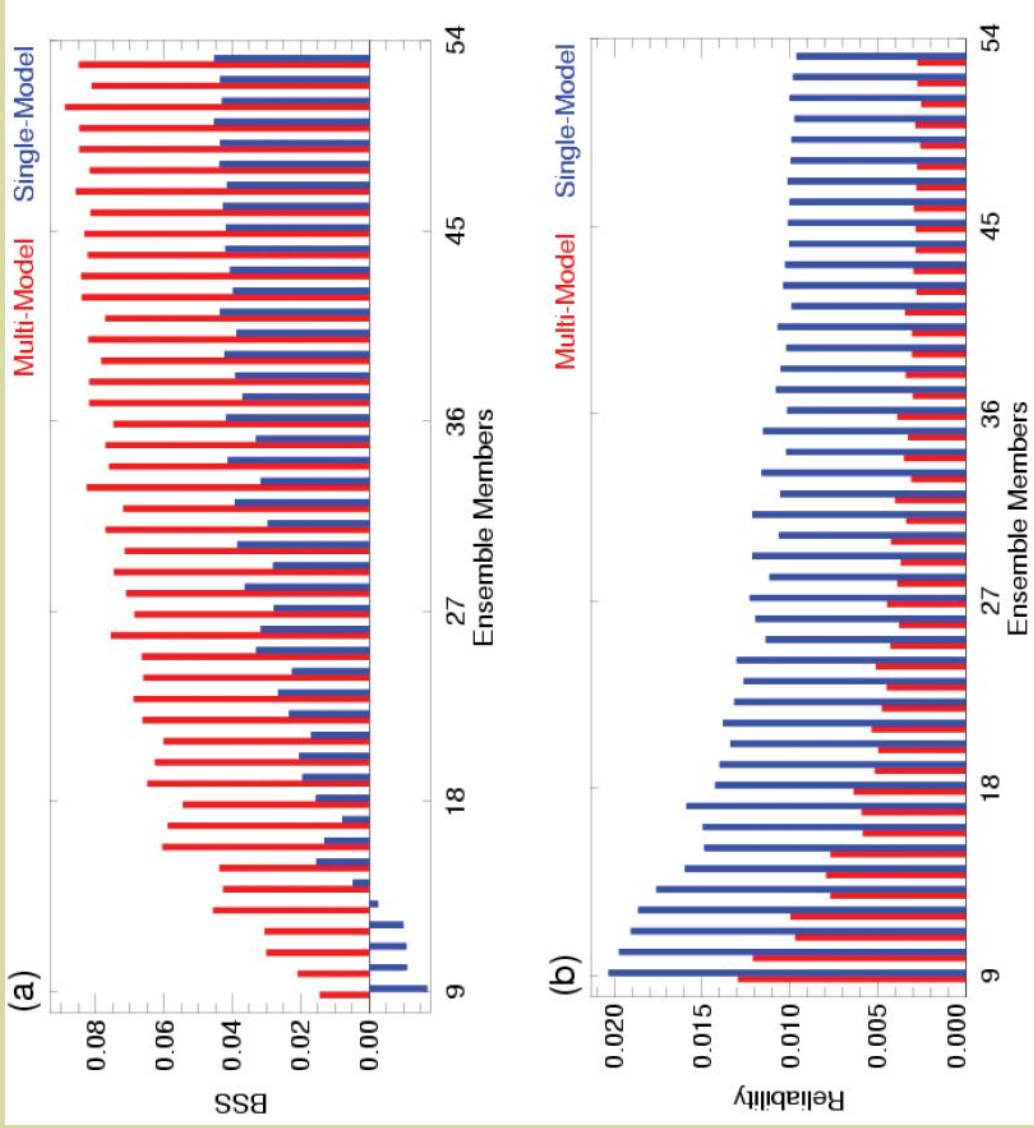
1. Badanie wrażliwości modelu.
2. Prognoza przeszłości — wyznaczenie wag.
3. Prognoza klimatu na lata 2000–2100.

# DEMETER

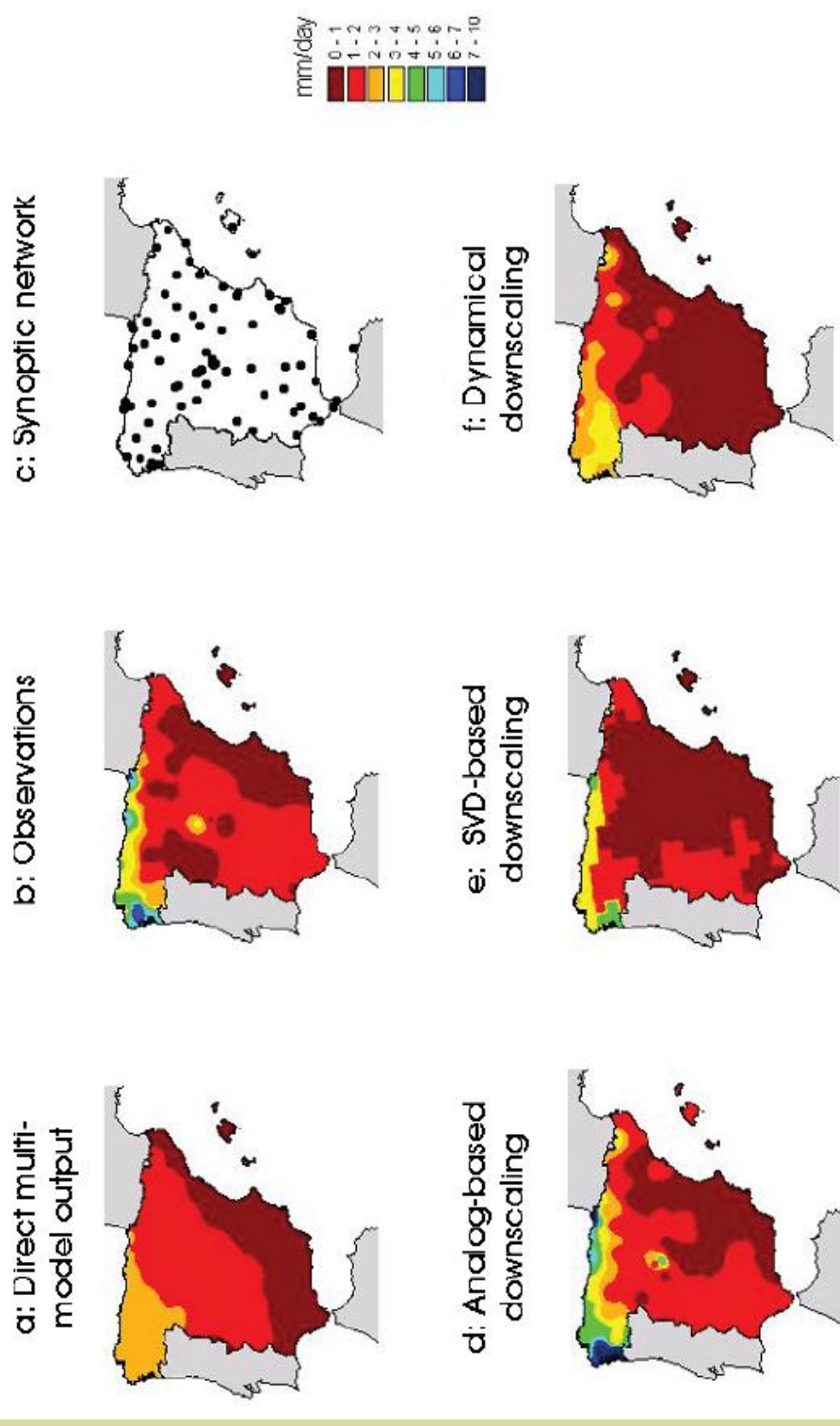
## obliczenia na superkomputerach w ECMWF w Reading

European Centre for Medium-range Weather Forecasts  
Development of a European Multimodel Ensemble for seasonal to inTERannual prediction

- ☛ 7 modeli z różnych ośrodków → Perturbed Physics.
- ☛ Initial Value Ensemble.
- ☛ Wspólna baza wyników i przewidywań.
  - 6-miesięczna prognoza;
  - Prognozowanie zjawisk ważnych gospodarczo: plony, zachorowania na malarię.



**FIG. 5. (a) Brier skill score and (b) reliability component of Brier score for the 1-month lead tropical summer (JJA) precipitation 1987–99 for the single ECMWF control model (blue) and the DEMETER multimodel (red). The event is “precipitation anomalies above zero.” Results are shown for different ensemble sizes from 9 to 54 members. Note that lower values of the reliability term mean better reliability.**



**FIG. 6.** (a) Three-month (Feb–Apr) average precipitation over Spain for the ensemble mean of the multimodel hindcasts (ECMWF and Met Office models) initialized in Nov 1986. Panel (b) shows the corresponding observed precipitation, which has been computed using the stations of the Spanish synoptic network shown in (c). The downscaled precipitation with the (d) analog-based, (e) MCA-based, and (f) dynamical methods is shown in the lower row.

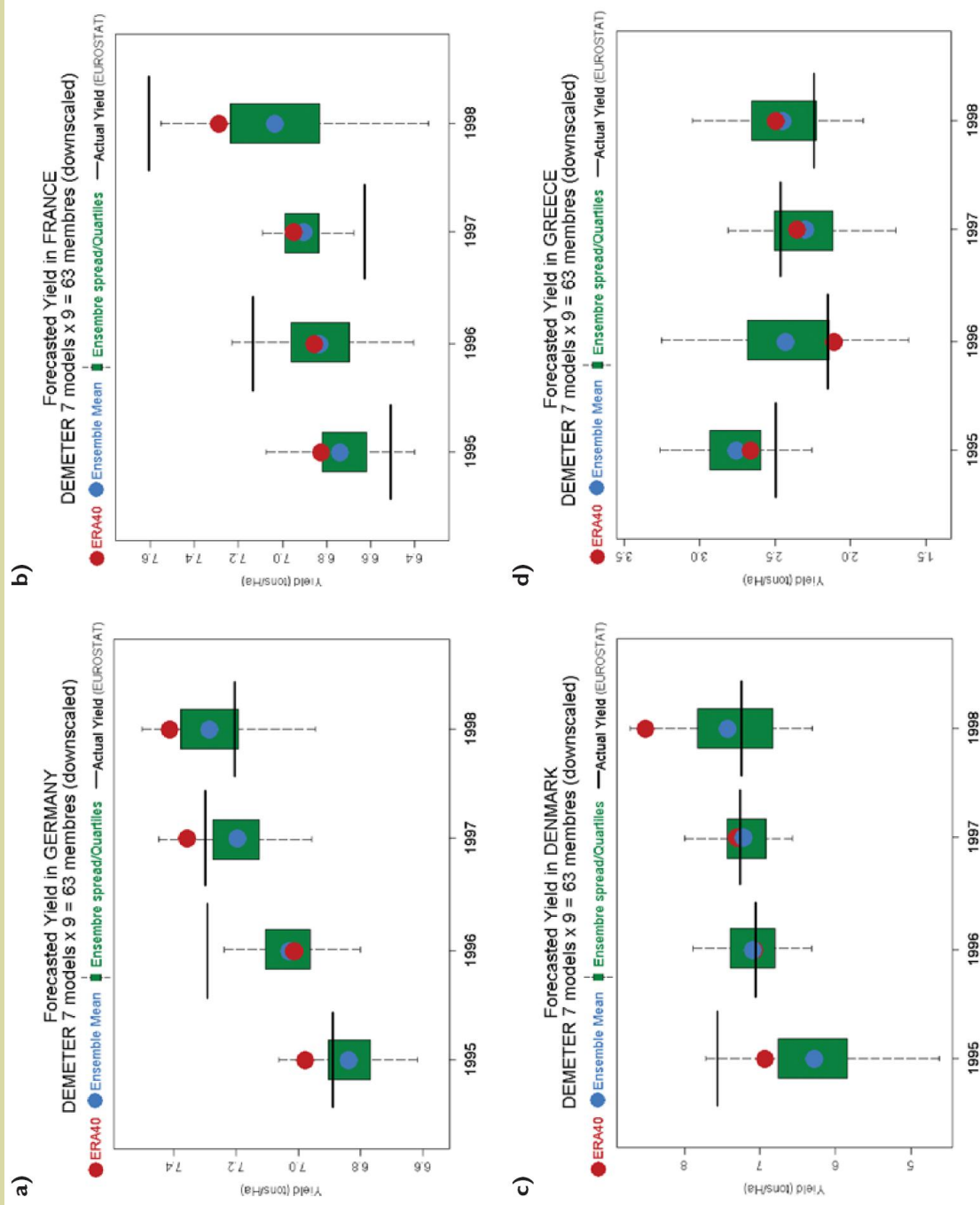


Fig. 7. Time series of the wheat yield predictions from downscaled data for (a) Germany, (b) France, (c) Denmark, and (d) Greece over the period 1995–1998. The multimodel ensemble spread is depicted by the box-and-whisker representation, with the whiskers containing the lower and upper quartile of the ensemble. The blue dots represent the ensemble mean, the yield obtained by forcing the crop model with ERA-40 data being displayed by slightly bigger red bullets. The black horizontal line corresponds to the reference value (Eurostat).

## Podsumowanie

- ☛ Dobrze znane prawa rządzące ruchem atmosfery w wielkiej skali.
- ☛ Ograniczenia: chaos; możliwości obliczeniowe komputerów.
- ☛ Ucieczka w metody statystyczne poprawia przewidywania.
- ☛ Teoretyczne podejście do niepewności modeli klimatycznych — w fazie badań.
- ☛ Temat gorących dyskusji naukowo-politycznych *dzisiaj*.