

# OSNOVE MODELIRANJA ATMOSFERE

*Maja Telišman Prtenjak*

*Geofizički odsjek PMF-a*

*[telisman@gfz.hr](mailto:telisman@gfz.hr)*

*2023/2024*

# Sadržaj kolegija

- **Klasifikacija modela atmosfere-numerički modeli**
- **Osnove numeričkih shema**
- **Tipovi mreža**
- **Početni uvjeti (inicijalizacija)**
- **Rubni uvjeti**
- **Provjera uspješnosti modela**
- **Model plitke vode**
- **WRF model**

# Literatura

- Beniston, M. (1998): *From Turbulence to Climate*. Springer, Berlin.
- Durran, D. R. (1999): *Numerical Methods for Wave Equations in Geophysical Fluid Dynamics*. Springer, New York, 1999
- Haltiner G.J. i Williams R.T. (1980): *Numerical prediction and dynamic meteorology*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Jacobson, M. Z. (1999): *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press, New York.
- Lin, Y.-L. (2007): *Mesoscale Dynamics*. Cambridge University Press.
- Mesinger, F. (1976): *Dinamička meteorologija*. Građevinska knjiga, Beograd.
- Pielke, R. A. (2002): *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press, San Diego.
- Šinik, N. i B. Grisogono (2008): *Dinamička meteorologija – uvod u opću cirkulaciju atmosfere*. Školska knjiga, Zagreb.

# Modeli atmosfere

- Mi zaključujemo o pojavama u atmosferu na temelju mjerenja i/ili modeliranja.
- Atmosferski modeli su **matematički modeli** sastavljeni od seta dinamičkih (parcijalnih diferencijalnih) jednažbi koji opisuju gibanja u atmosferi.
- Pomoću matematičkih modela sintetiziramo naše znanje o nekom posebnom problemu i to ne samo u meteorologiji već i u agroklimatologiji, fizici, kemiji, biologiji, ekonomiji, itd.
- U meteorologiji i klimatologiji, atmosferskim modelima uzimamo u obzir različite elemente sustava bez obzira na skalu.

# Modeli atmosfere

Imaju li mjerenja ograničenja?!

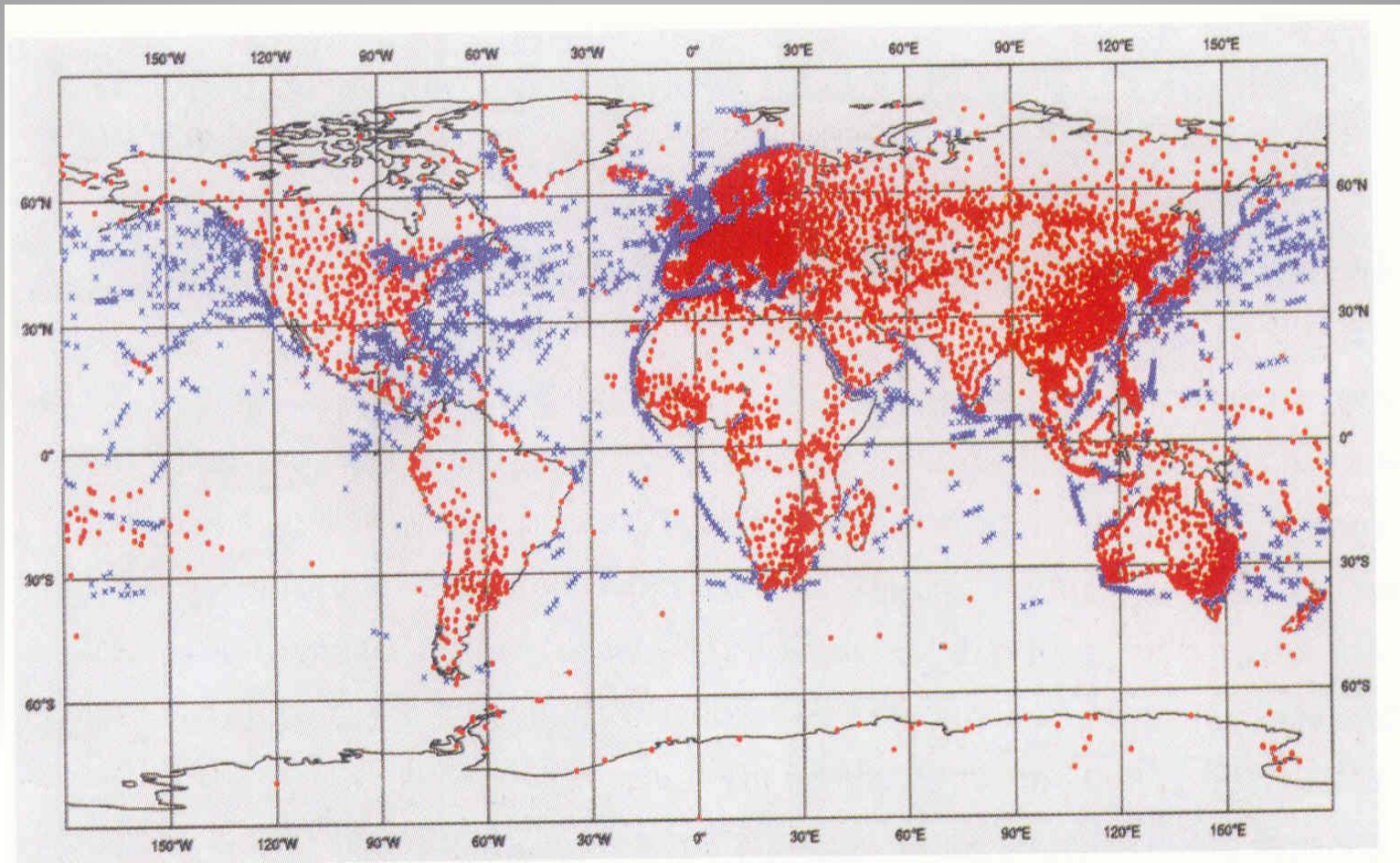
Iako mjerenja daju mnogo informacija o sadašnjim ili prošlim atmosferskim uvjetima ne daju informacije o budućoj atmosferi.

Ona pretpostavljaju da se budućnost pojava u atmosferi **ekstrapolira** na temelju podataka iz prošlosti, što nije uvijek dobar pristup.

Zašto modeli i modeliranje?!

- (1) Smatra se da su modeli jedino oruđe prognoza za istraživanje određenog sustava ili procesa bez obzira radi li se o transportu onečišćujućih tvari u Kvarneru ili odgovor atmosfere u cjelini na promjenu koncentracija CO<sub>2</sub> plina.
- (2) Omogućuju prognozu neke pojave tamo gdje nema mjerenja (oceani, noć, kompleksan teren)
- (3) Pomoću naprednih modela mogu se promatrati samo određeni procesi unutar jednog sustava ili dio procesa unutar povratne sprege
- (4) Pomoću idealiziranih simulacija (testova osjetljivosti) učimo o pojavama

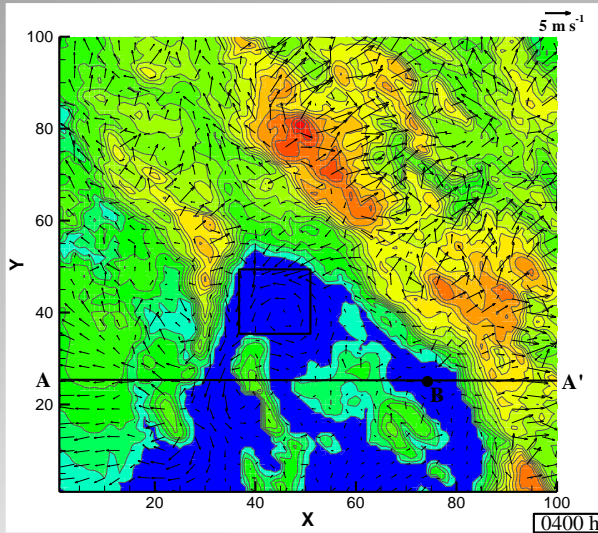
# Modeli atmosfere



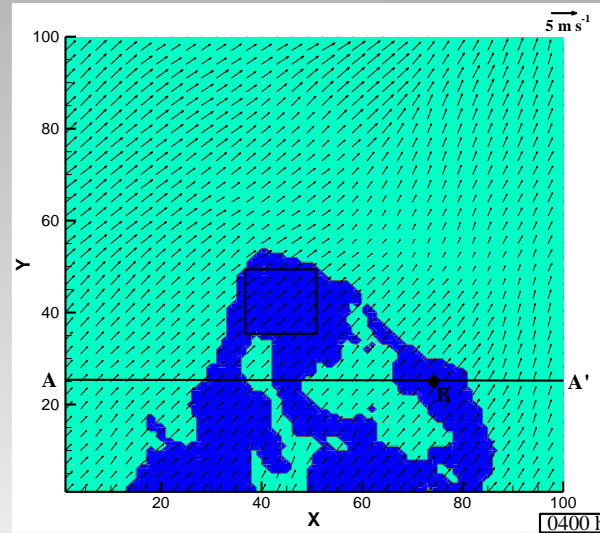
# Rezultati numeričkih simulacija

## Testovi osjetljivosti (4:00 h)

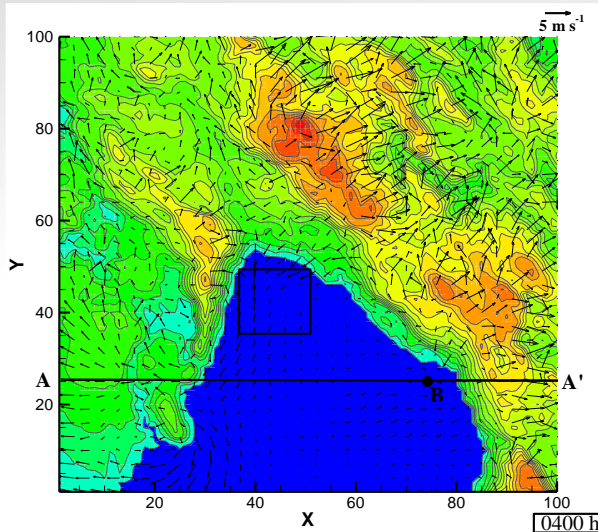
**Kontrolni slučaj**



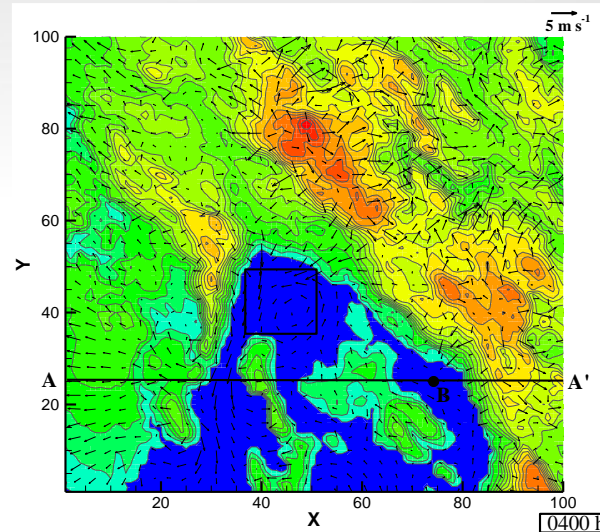
**T3  
(ht  $\leq 10$  m)**



**T1  
(bez otoka)**



**T4  
(bez sinop. vjetra)**



## Ima li veze između mjerenja i modela?

- Često se pogrešno misli da je "prirodna" separacija između modela i mjerenja. Zbog toga se današnja znanstvena zajednica obično dijeli u dvije odijeljene grupe, onu koja radi s podacima i onu koja radi s modelima.
- model koristi mjerenja kao ulazne podatke i za verifikaciju svojih izlaznih rezultata
- model je oruđe koje nam dozvoljava da testiramo naše razumijevanje nekog sustava na fizikalno-matematički konzistentan način.

Atmosferski modeli su matematički modeli sastavljeni od **dinamičkih jednadžbi** koji teorijski aproksimiraju realnu atmosferu.

Realna atmosfera ima beskonačno mnogo stupnjeva slobode koji se očituju u ogromnom broju najraznovrsnijih nelinearnih uzajamno-povratnih (eng. *feed-back*) procesa.

Čak i najsavršeniji modeli danas imaju ograničeni broj stupnjeva slobode.



# Klasifikacija modela atmosfere

- Prema načinu rješavanja osnovnih jednažbi (uz odgovarajuće prilagodbe) modele dijelimo na:
  - **Analitičke modele**
  - **Numeričke modele**
- Prema sustav jednažbi modele dijelimo na:
  - **Modele na temelju primitivnih jednažbi**
  - **Modele na temelju izvedenih jednažbi (jed. vrtložnosti, jed. divergencije, jed. ravnoteže ... )**

# Klasifikacija modela atmosfere

3 osnovna tipa parcijalnih jednažbi:

1) **Eliptične** parcijalne diferencijalne jednažbe u kojima se:

$$\nabla^2 () = F,$$

$\nabla^2$  neke veličine može prikazati pomoću neke funkcije (imamo samo promjenu u prostoru, npr. jed. ravnoteže)

2) **Parabolične** parcijalne diferencijalne jednažbe u kojima se uvodi i promjena u vremenu:

$$\partial() / \partial t = K \nabla^2 () + N$$

3) **Hiperbolične** parcijalne diferencijalne jednažbe :

$$\partial^2() / \partial t^2 = A \nabla^2 () + M$$

# Primjer analitičkog modeliranja

Osnovne jednačbe

$$\frac{du}{dt} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + N\nabla^2 u$$

$$\frac{dv}{dt} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + N\nabla^2 v$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + N\nabla^2 w$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

$$\frac{dT}{dt} = K\nabla^2 T$$

Opća rješenja sustava

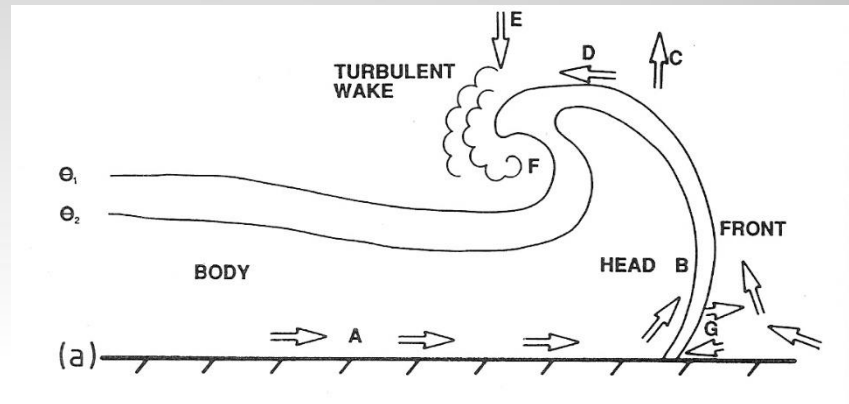
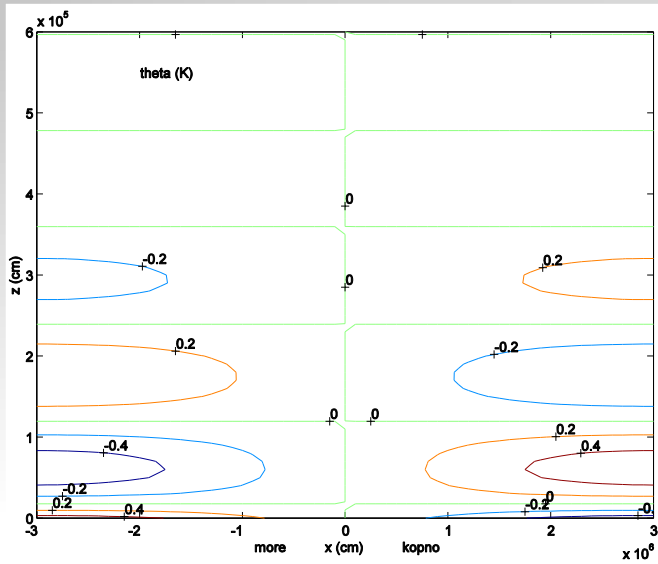
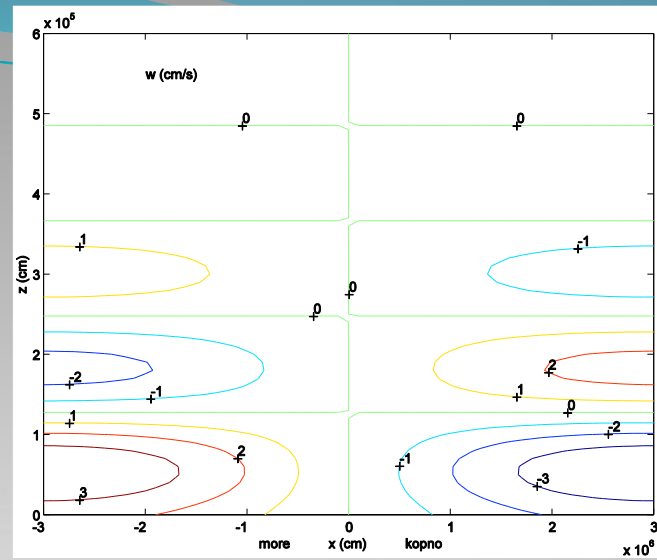
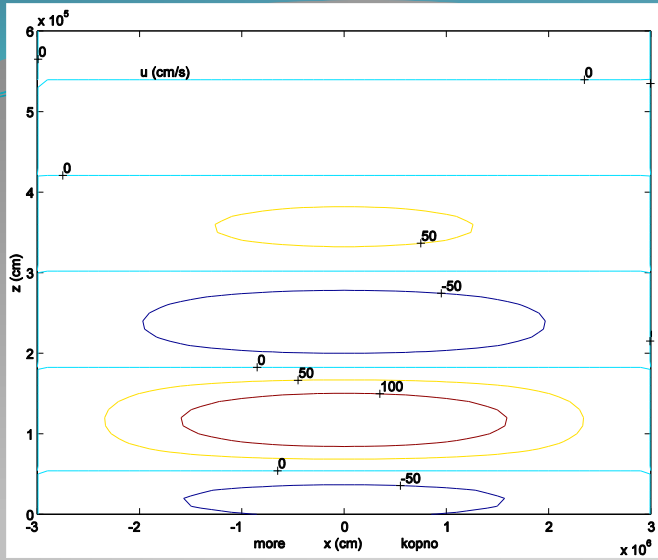
$$u(z) = -\frac{N}{l\beta} \sum_{k=1}^6 K_k s_k (s_k^2 - s_o^2) e^{s_k z}$$

$$v(z) = -\frac{l\gamma}{fs_o} (K_o e^{s_o z} - K_7 e^{-s_o z}) - \frac{f}{l\beta} \sum_{k=1}^6 K_k s_k e^{s_k z}$$

$$w(z) = -\frac{N}{\beta} \sum_{k=1}^6 K_k (s_k^2 - s_o^2) e^{s_k z}$$

$$\Theta(z) = \sum_{k=0}^6 K_k e^{s_k z}$$

$$\varpi(z) = -\frac{\rho\gamma}{s_o} (K_o e^{s_o z} - K_7 e^{-s_o z}) - \frac{\rho N^2}{l^2 \beta} \sum_{k=1}^6 K_k s_k e^{s_k z} \left[ (s_k^2 - s_o^2)^2 + \frac{f^2}{N^2} \right]$$



# Sustav primitivnih jednažbi

U Kartezijevom koordinatnom sustavu  $(x, y, z)$  one izgledaju u formi toka:

**jednažba kontinuiteta** 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

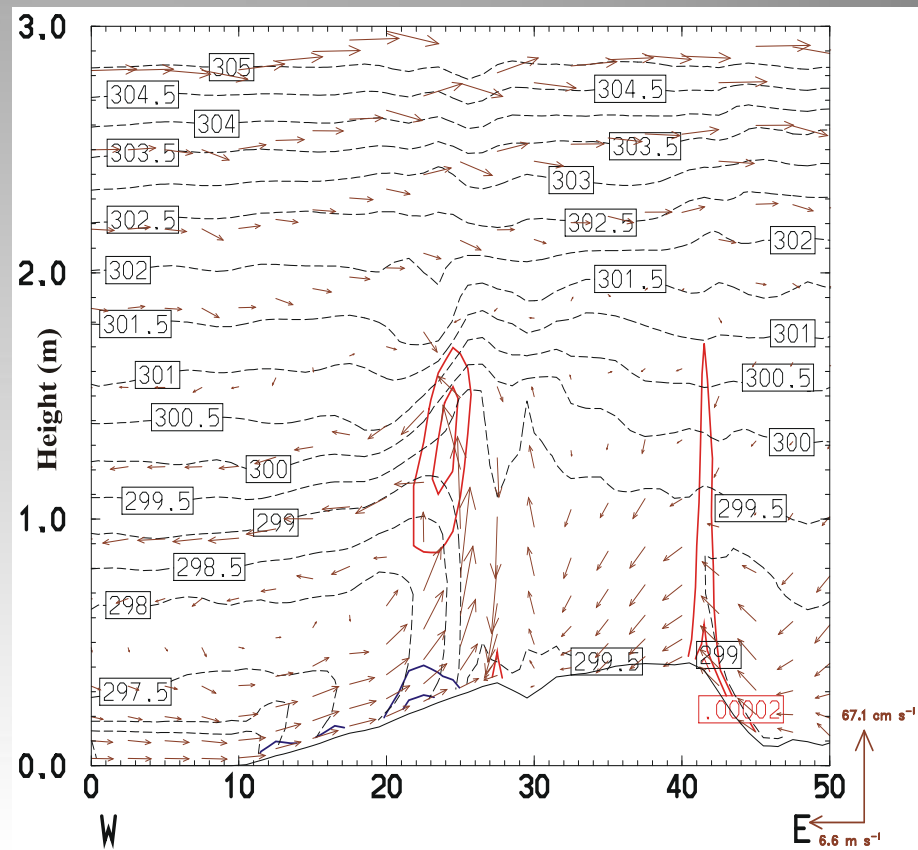
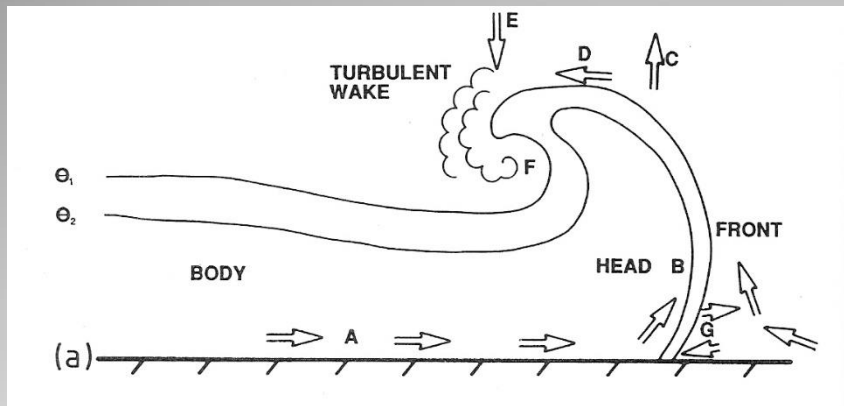
**jednažbe gibanja** 
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p'}{\partial x} + R_u + C_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p'}{\partial y} + R_v + C_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p'}{\partial z} + R_w + C_w - g\rho' \quad (4)$$

**prognostička jednažba  
za skalare**

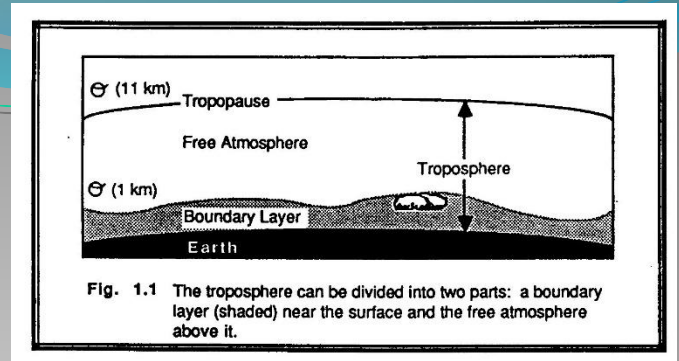
$$\frac{\partial(\rho \psi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \psi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \psi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \psi)}{\partial z} = R_\psi + Q_\psi \quad (5)$$



- Sustav jednadžbi se zatvara s parametrizacijama za turbulenciju, radijaciju, vlažne procese (oblake i oborinu), izmjenu (tokove) topline, parametrizaciju tla i vegetacije, jezera i mora, kinematičkih efekata terena i konvekcije.
- Jednadžbe su nelinearne i nemoguće ih je točno riješiti.
- Većina modela je numeričkog tipa koji koriste **osnovan sustav jednadžbi u diskretiziranom** obliku. Pomoću njih se mogu prognozirati tornada i gibanja u graničnom sloju, sub-mikroskalna turbulentna strujanja oko zgrada, kao i strujanje na sinoptičkoj i globalnoj skali.

# Dimenzije procesa u meteorologiji

| Scales         | Time<br>Length | 1 Month   | 1 Day                             | 1 Hour | 1 Min      | 1 Sec |
|----------------|----------------|---|-----------------------------------|--------|------------|-------|
|                |                | 10'000 km   | Stationary and<br>Ultralong Waves |        |            |       |
| Macro $\beta$  | 1'000 km       | Baroclinic<br>Waves                               |                                   |        |            |       |
| Meso $\alpha$  | 100 km         | Fronts<br>Hurricanes                              |                                   |        |            |       |
| Meso $\beta$   | 10 km          | Nocturnal Jets<br>Mountain Effects<br>Sea Breezes |                                   |        |            |       |
| Meso $\gamma$  | 1 km           | Thunderstorms<br>Urban Effects<br>CAT             |                                   |        |            |       |
| Micro $\alpha$ | 100 m          | Shallow Convection<br>Tornadoes<br>Gravity Waves  |                                   |        |            |       |
| Micro $\beta$  | 10m            | Dust Devils<br>Thermal Wakes                      |                                   |        |            |       |
| Micro $\gamma$ | 1m             | Plumes<br>Roughness                               |                                   |        |            |       |
|                |                | Scales  |                                   |        |            |       |
|                |                | Climato-<br>logical                               | Synoptic                          | Meso   | Turbulence |       |



- glavni procesi locirani duž dijagonale prostorno-vremenskog dijagrama

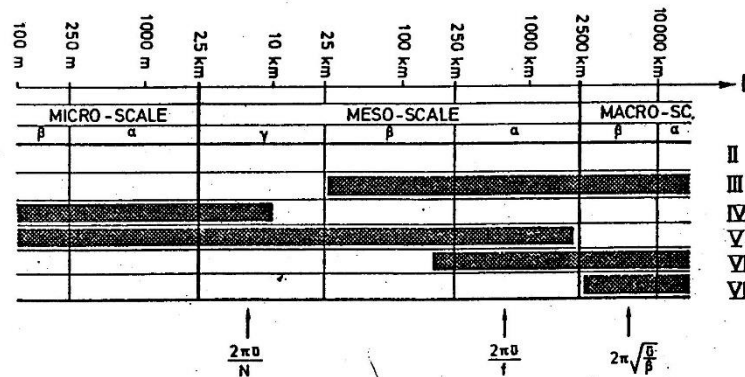
**Makroskalni procesi**

**Mezoskalni procesi**

**Mikroskalni procesi**

- procesi male skale su kratkotrajni,
- procesi na velikoj prostornoj skali su dugotrajni

**Dijagonalnost nam dopušta odvojeno modeliranje određene kombinacije prostornih i vremenskih skala !**



• Figure 9 The limits of the applicability of the investigated model assumptions (II–VII); these can not be applied in the hatched range.

- II  $\nabla \cdot (g\mathbf{v}) = 0$
- III  $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$
- IV  $dw/dt = 0$
- V  $\mathbf{v}_h \rightarrow \mathbf{v}_g$
- VI  $f = 0$
- VII  $\beta = 0$

- ne-elastičnost
- Boussinesq-ova aproksimacija
- hidrostatičnost
- gestrofička aproksimacija
- nema rotacije Zemlje
- nema zakrivljenosti Zemljine površine



# Klasifikacija modela atmosfere

• Podjela modela prema istraživanju prostorno-vremenskoj skali procesa u atmosferi:

- **Globalni/klimatski modeli (GCM)**
- **Regionalni («limited-area») ili mezoskalni modeli (RCM)**
- **Mikroskalni modeli (npr. «urban-canyon» modeli)**
- **LES (Large eddy simulations) modeli...**

• Horizontalne domene modela su ili globalne (pokrivajući čitavu Zemlju) ili regionalne (*limited-area*) (pokrivajući samo jedan dio Zemljine površine)

• Vrijedi za NWP, modele kvalitete zraka....

## Neki poznatiji globalni numerički modeli («global circulation model », GCM):

- **GFS** Global Forecast System (previously AVN) - developed by NOAA - output is freely available
- **NOGAPS** - developed by the US Navy to compare with the GFS
- **GEM** Global Environmental Multiscale Model - developed by the Meteorological Service of Canada (MSC) ([http://www.weatheroffice.gc.ca/charts/index\\_e.html](http://www.weatheroffice.gc.ca/charts/index_e.html))
- **IFS** developed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (<http://www.ecmwf.int/>)
- **UM** Unified Model developed by the UK Met Office, but is hand-corrected by professional forecasters
- **GME** developed by the German Weather Service, DWD, NWP Global model of DWD
- **ARPEGE** developed by the French Weather Service, Météo-France ([http://www.meteo.fr/meteonet\\_en/meteo/rec.htm](http://www.meteo.fr/meteonet_en/meteo/rec.htm))
- **IGCM** Intermediate General Circulation Model - developed by members of the Department of Meteorology at the University of Reading

## Neki poznatiji mezoskalni numerički modeli:

- **WRF** The Weather Research and Forecasting Model was developed cooperatively by NCEP and the meteorological research community. WRF has several configurations, including:
  - **WRF-NMM** The WRF Nonhydrostatic Mesoscale Model is the primary short-term weather forecast model for the U.S., replacing the Eta model.
  - **AR-WRF** Advanced Research WRF developed primarily at the U.S. National Center for Atmospheric Research (NCAR)
- **NAM** The term North American Mesoscale model refers to whatever regional model NCEP operates over the North American domain. NCEP began using this designation system in January 2005. Between January 2005 and May 2006 the Eta model (began in [Yugoslavia](#) (now [Serbia](#)) during the 1970s by Zaviša Janjić and Fedor Mesinger) used this designation. Beginning in May 2006, NCEP began to use the WRF-NMM as the operational NAM.
- **RAMS** the Regional Atmospheric Modeling System developed at Colorado State University for numerical simulations of atmospheric meteorology and other environmental phenomena on scales from meters to 100's of kilometers - now supported in the public domain [RAMS source code available under the GNU General Public License](#)
- **MM5** the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model
- **ARPS** the Advanced Region Prediction System developed at the University of Oklahoma is a comprehensive multi-scale nonhydrostatic simulation and prediction system that can be used for regional-scale weather prediction up to the tornado-scale simulation and prediction. Advanced radar data assimilation for thunderstorm prediction is a key part of the system. [The source code of ARPS is freely available.](#)
- **HIRLAM** High Resolution Limited Area Model
- **GEM-LAM** Global Environmental Multiscale Limited Area Model, the high resolution (2.5 km) GEM by the [Meteorological Service of Canada](#) (MSC)
- **ALADIN** The high-resolution limited-area hydrostatic and non-hydrostatic model developed and operated by several European and North African countries under the leadership of Météo-France ([ALADIN Community web pages](#))
- **COSMO** The COSMO Model, formerly known as LM, aLMO or LAMI, is a limited-area non hydrostatic model developed within the framework of the Consortium for Small-Scale Modeling (Germany, Switzerland, Italy, Poland and Greece)
- **Meso-NH** (France)

# Klasifikacija modela atmosfere

## Podjela modela prema korištenim numeričkim metodama

- Modeli konačnih razlika
- Modeli konačnih elemenata
- Spektralni modeli
- ....

Globalni modeli često koriste:

- spektralne metode za horizontalne dimenzije i
- metodu konačnih razlika za vertikalne dimenzije

Regionalni modeli obično koriste:

- metodu konačnih razlika u sve tri dimenzije.
- finije mreže za eksplicitno rješavanje mezoskalnih fenomena manje-skale (jer rješavaju jednadžbe na dijelu Zemljine površine).

Prilikom modeliranja treba voditi računa o:

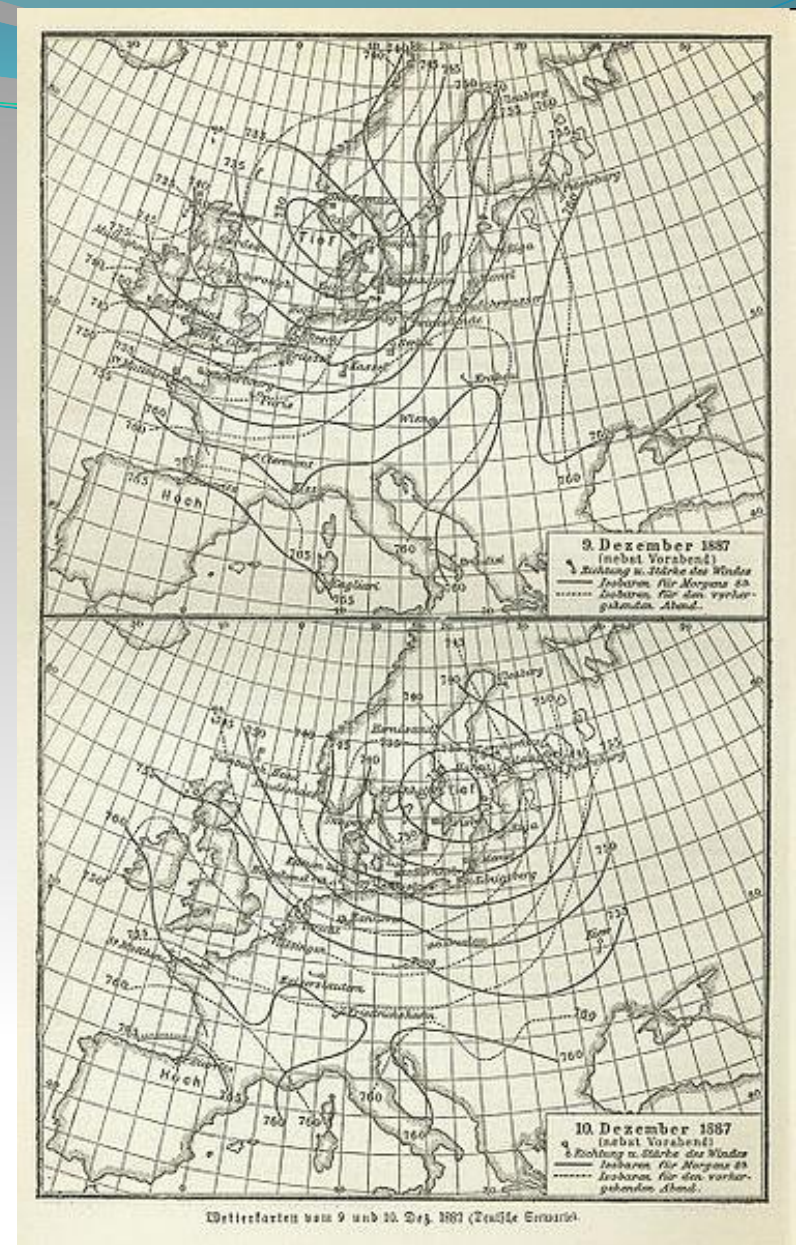
- 1) interakcije između skala i procesi koji su manji od istraživanog procesa moraju prikazati na fizikalno koherentan i numerički efikasan način.
- 2) Interakcije između skala postaju netrivialne kada se primjenjuju na nelinearne sustave. Fluidi u geofizici, su izrazito nelinearni i to zbog advekcije raznih svojstva  $\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}, \nabla(\rho \vec{V})$  i  $\vec{V} \cdot \nabla T$

U **linearnom** sistemu, krajnji efekt forsiranja od manjih skala prema forsiranju na skali interesa je jednostavno superpozicija efekata svakog forsiranja individualno.

U **nelinearnom** sistemu, malen dodatak onom forsiranju koje već postoji može proizvesti dramatične efekte koji može biti u potpunosti disproporcionalan amplitudi forsiranja.

# Počeci numeričke prognoze vremena (do 1922. g)

- 650. g. p. n. e. , Babilonci su predviđali vrijeme na temelju oblaka i astrologije.
- 340. g. p. n. e. Aristotel je opisao tipove vremena u svojoj knjizi *Meteorologica*.
- Kinezi prognoziraju vrijeme od 300. g. p. n. e.
- Iz antičkih vremena također postoje izvještaji o prognozi vremena, iako se nisu sva korištena znanja dokazala kao pouzdana.
- Baziraju se na uzorcima. Npr., ako je sunce osobito crveno sljedećeg bi dana trebalo biti vedro.
- Moderno doba prognoze vremena započinje **otkrićem električnog telegrafa 1835.** Telegraf je omogućio istovremenu razmjenu izvještaja o vremenskim uvjetima (uz vjetar)
- Prethodili: Beaufort-ova skala i Fitzroy-ev barometer.



Weather map of Europe, 10 December 1887  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Weather\\_forecasting](http://en.wikipedia.org/wiki/Weather_forecasting)

# Počeci numeričke prognoze vremena (do 1922. g)

- poznat po cirkulacijskom teoremu
- Bjerknnes je predložio početkom 20. st. osnovni koncept numeričke prognoze vremena
- za dobivanje vremenske prognoze treba integrirati osnovne jednadžbe u vremenu
- početak predstavljaju mjerenja i opažanja kao inicijalno stanje atmosfere

1. *One has to know with sufficient accuracy the state of the atmosphere at a given time;*  
2. *One has to know with sufficient accuracy the laws according to which one state of the atmosphere develops from another; "from degree to degree in meridian and from hour to hour in time"*



**Vilhelm Bjerknes**  
**(1862-1951)**  
**Norveška**

<http://www.egu.eu/egs/bjerknes.htm>

- predložio set od 7 jednadžbi čija rješenja bi omogućila prognozu atmosferskog gibanja velike-skale (izračunatu kalkulatorom).

- nedostatak brzih metoda računanja i nedostatak točnih opservacijskih podataka su ograničili njihov uspjeh kao tehnike prognoze.

# Počeci numeričke prognoze vremena (do 1922.)



**Felix Maria Exner**  
(1876-1930)

<http://geschichte.univie.ac.at/de/bilder/felix-maria-exner-1876-1930-geophysik>  
Austro-Ugarska/Beč

- Prvi pokušaj prognoze Felix Exner (1908.) u Beču; 4 godine nakon Bjerknes-ovog rada. Koristi znatno jednostavniji broj jednadžbi koncentrirajući se na promjene tlaka

Koristi pretpostavke:

- da je atmosfera u geostrofičkoj ravnoteži i da je termičko forsiranje konstantno u vremenu->korištenjem temperaturnih vrijednosti računa zonalni vjetar
- Izveo je prognostičku metodu koja proračunava advekciju tlaka zapadnim vjetrom koja je modificirana dijabatičkim zagrijavanjem
- Unatoč ograničenja pristupa-> smatra se da je ovo prvi sistematski znanstveni pokušaj prognoze vremena.

# Počeci numeričke prognoze vremena (do 1922.)



**Felix Maria Exner**

(1876-1930)

<http://geschichte.univie.ac.at/de/bilder/felix-maria-exner-1876-1930-geophysik>

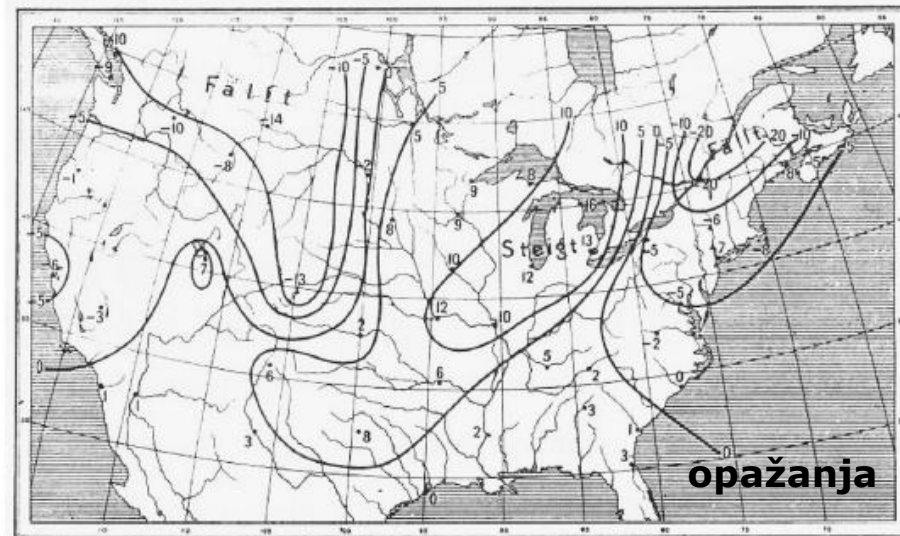
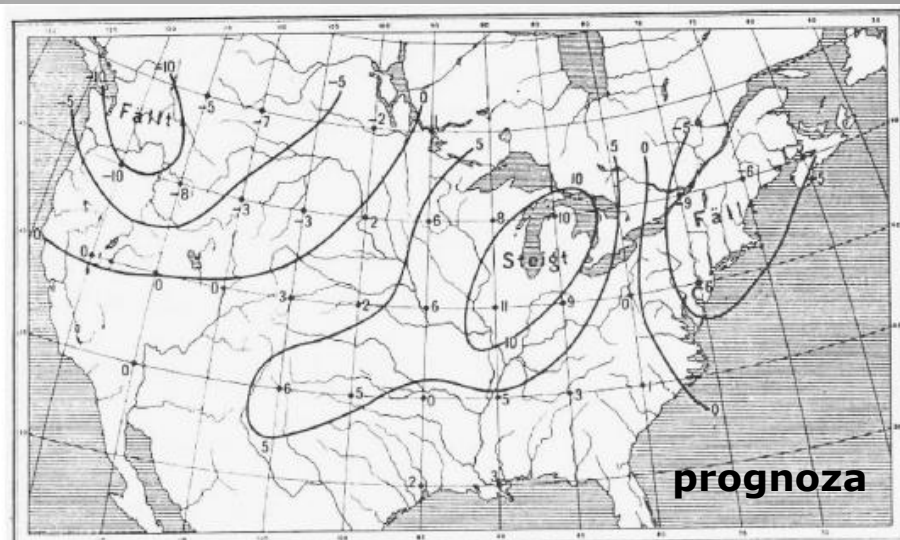
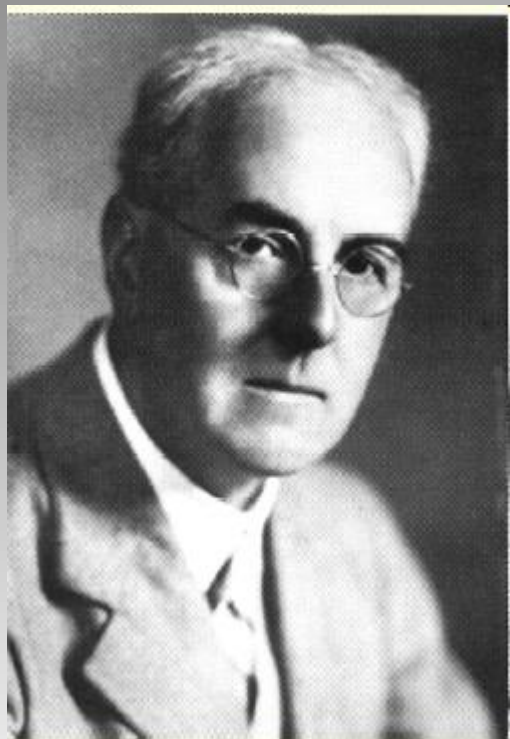


Figure 1.3 Top: Exner's calculated pressure change between 8 p.m. and midnight, 3 January 1895. Bottom: observed pressure change for the same period [Units: hundredths of an inch of mercury. *Steigt* = rises; *Fällt* = falls]. (Exner, 1908)



# Počeci numeričke prognoze vremena (1922.-1955.)



**Lewis Fry Richardson**

(1881-1953)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Lewis\\_Fry\\_Richardson](http://en.wikipedia.org/wiki/Lewis_Fry_Richardson)

Engleska/Škotska

- Inspiriran Bjerknesevom idejom, Lewis Fry Richardson je 1922. godine izveo numeričku prognozu vremena (numerical weather prediction; NWP).
- Njegovu tehniku proračuna – **podjela prostora u kvadratiće mreže** u kojoj su se rješavale diferencijalne jednačbe **konačnim razlikama** – korištena je kasnije u prvim generacijama AGCM.
- Richardsonova metoda, bazirana na pojednostavljenoj verziji Bjerknesevih "primitivnih jednačbi" (dodajući još jednu varijablu za atmosfersku prašinu) smanjila je proračune na nivo gdje se može doći do rješenja.
- U to vrijeme tehnika prognoze vremena prezahtjevna (64000 ljudi bi bilo potrebno za svakodnevnu prognozu)
- Njegov je pokušaj da izračuna stanje atmosfere za jedan 6-h period trajao je 6 tjedana i završio neuspjehom. Razlog – nestabilnost u modelu. Proračun je dao promjenu tlaka ( $dp/dt \sim 0.7 \text{ Pa/s}$ ) u nekoj točki za 145 hPa/6 h.

# Počeci numeričke prognoze vremena (1922.-1955.)



**Lewis Fry Richardson**  
(1881-1953)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Lewis\\_Fry\\_Richardson](http://en.wikipedia.org/wiki/Lewis_Fry_Richardson)

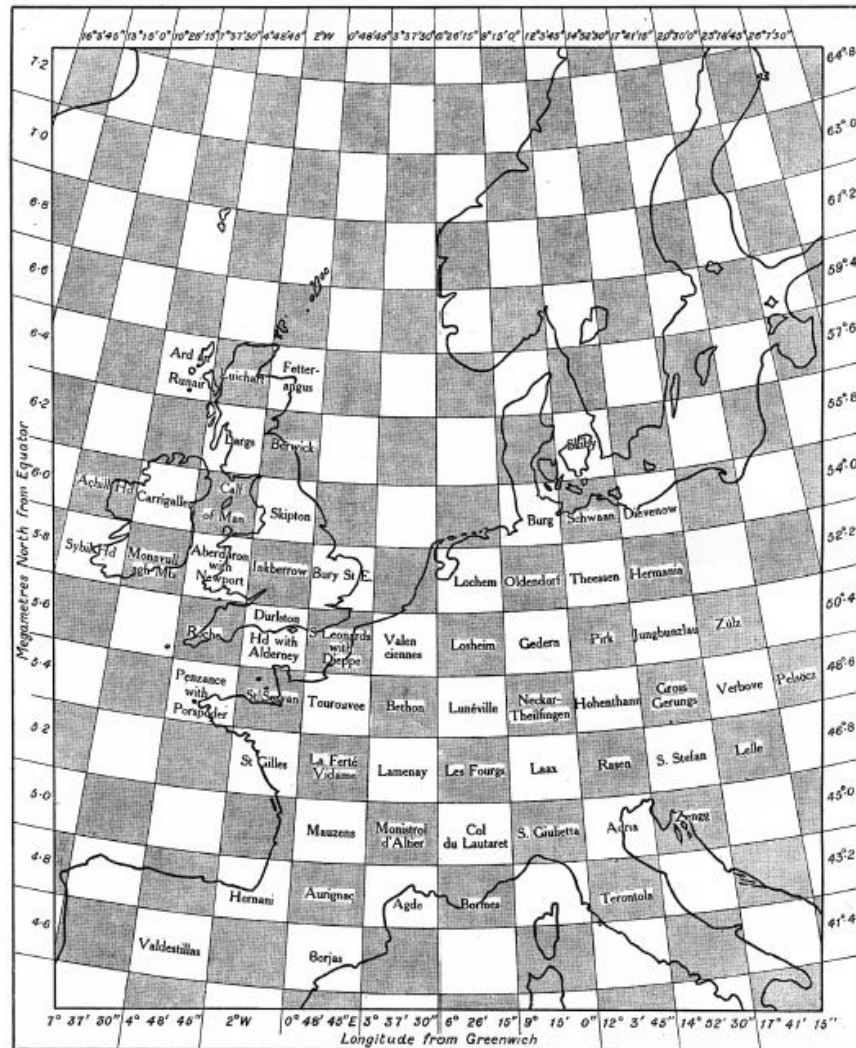


Figure 1.6 Richardson's idealised computational grid. (Frontispiece of *WPNP*)

# Počeci numeričke prognoze vremena (1922.-1955.)



## ENIAC-mašina

[http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_model)



John von Neumann  
(1903-1957)

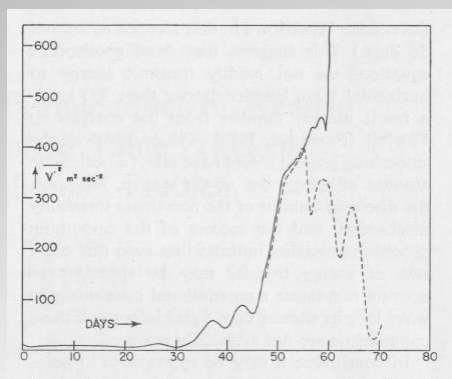
(Austro-Ugarska-SAD)

[http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_von\\_Neumann](http://en.wikipedia.org/wiki/John_von_Neumann)

- Matematičar John von Neumann sa Sveučilišta Princeton radio je na kompjuterskim simulacijama nuklearnih eksplozija te se zainteresirao za prognozu vremena jer su oba procesa nelinearna.
- 1946., ubrzo nakon što je ENIAC mašina postala operativna, von Neumann je započeo pripreme za numeričku prognozu vremena.
- U to doba (kao protivnik komunizma) von Neumann se nadao da će modeliranje stanja atmosfere dovesti do kontrole nad vremenom, što bi se moglo koristiti i kao ratno oružje. Npr., ruske žetve mogle bi biti desetkovane sušama koje bi bile pokrenute iz SAD.
- Prva prognoza vremena izvedena na ENIAC računalu 1950. godine (Charney, Fjortoft i von Neumann, 1950.).
- Korišten Richardsonov pristup, dijeleći atmosferu u ćelije mreže uz numeričko rješavanje barotropne jednadžbe vrtložnosti u konačnim razlikama.
- 2-D relativno uspješna prognoza je pokrila Sjevernu Ameriku
- izračunata pomoću 270 točaka s  $\Delta x \sim 700$  km i  $\Delta t = 3$  h

# Počeci numeričke prognoze vremena (1922.-1955.)

- Od 1954., u Švedskoj u Stockholm-u, prvi u svijetu provode operativno prognoze 3 puta tjedno (barotropnim modelom) za područje Sjevernog Atlantika.
- Do 60-tih godina 20.stoljeća, modeli korišteni za NWP koristili su značajna pojednostavljenja. Nakon toga modeli bazirani na Bjerknes/Richardsonovom setu primitivnih jednažbi zamjenjuju barotropne i barokline modele. Modeli su još uvijek ili regionalni ili kontinentalni.



<http://www.sjsu.edu/faculty/watkins/nonlinear03.htm>

Do 1955. g. **Norman Phillips** dovršio je 2-slojni, hemisferski, kvazi-geostrofički model (jed. vrtložnosti) i proveo simulaciju u trajanju od 1 mjeseca. Proračun je nakon 30 dana prekinut, jer je došlo do skoro eksplozivnog povećanja ukupne energije sistema, praćenog pojavom neprirodno izduženih oblika u polju brzine. Unatoč svojoj dosta jednostavnoj strukturi, često se ovaj model smatra kao **prvi AGCM**. Kako je moć računala rasla, potreba za pojednostavljivanjem jednažbi ili koncepata (barotropnost i kvazi-geostrofija) se smanjivala.



[http://www.odlt.org/dcd/ballast/norman\\_phillips.html](http://www.odlt.org/dcd/ballast/norman_phillips.html)

# Numerička prognoza vremena (1955.-1975.)

- Od kasnih 50-tih 20.stoljeća, 3 odvojene grupacije (više-manje nezavisno) razvijaju višeslojne 3-D, AGCM baziranih na setu primitivnih jednažbi od Bjerknesa i Richardsona.
- Samgorinsky i Manabe (na Princeton University, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), pod National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), gdje taj laboratorij postoji i danas)
- Mintz i Arakawa (na UCLA Dept. of Meteorology, Kalifornija, USA)
- Leith (na National Center for Atmospheric Research, NCAR)

# Numerička prognoza vremena (1955.-1975.)

Dvije važne inovacije u razdoblju od 1965-75. su:

**1) združeni atmosfersko-oceanografski modeli i**

**2) spektralna metoda**

1) Oceani imaju ogroman toplinski kapacitet te ih čini glavnom komponentom ukupnog klimatskog sistema. Zbog kratkoročnih prognoza, korišteni AGCM za numeričku prognozu vremena ne trebaju nužno uvažiti efekte oceana u proračun.

Kada se koriste kao klimatski modeli, AGCM moraju uključiti utjecaj oceana na atmosferu kao i simulirati globalnu cirkulaciju oceana.

Na početku se koristi izrazito pojednostavljen model oceana (*1-layer "swamp" oceans*) te kasnije nastavili s 2-slojnim "*mixed-layer*" oceanografskim modelima.

⇒ združeni modeli (OAGCM) postavili novi standard za klimatsko modeliranje

2) Spektralna metoda se pojavila kao alternativa metodi konačnih razlika (do tada korištenoj u AGCM). Ona izražava horizontalne promjene dinamičkih varijabli pomoću ortogonalnih sfernih harmonika. Ova tehnika pojednostavljuje rješenje mnogih nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi korištenih u globalnim modelima.

# Numerička prognoza vremena (od 1975.)

**Početakom 70-tih godina**, nekoliko drugih atmosferskih problema velike-skale je zainteresiralo javnost;

- 1) smanjenje ozonskog sloja u stratosferi
- 2) kisele kiše
- 3) problem zagađenja u višim slojevima atmosfere.

## **Uspostavljaju se novi centri za modeliranje:**

European Center for Medium Range Weather Forecasts (EU)

Max Planck Institut (Hamburg, Germany)

NASA Goddard Laboratory for Atmospheres

NASA Goddard Laboratory for Atmospheric Sciences

Colorado State University

Oregon State University

National Meteorological Center

Lawrence Livermore National Laboratory

# Numerička prognoza vremena (od 1975.)

Europske modelske grupe -- posebno **ECMWF (EU)** – počinje ugrožavati dominaciju US u modeliranju opće cirkulacije. Suprotno ostalim AGCM napravljenim 70-tih, ECMWF-ov atmosferski GCM je napravljen “iz bilježaka,” iako nakon vrlo pažljivog proučavanja glavnih AGCM, uključujući varijante od UCLA i GFDL modela. Njegove osobine su popravljane kroz kontinuirane cikluse testiranja i redizajna, do točke kada se ECMWF model za srednjoročnu prognozu smatra kao mjera (referentna točka) za prognozu vremena.

## **NCAR (National Center for Atmospheric Research, USA)**

U kasnim 70-tim, Nacionalni centar za atmosferska istraživanja postepeno je napustio dotadašnji (Kasahara/Washington) model i razvio CCM (*Community Climate Model*) koji je trebao služiti ne samo modelarima već i široj znanstvenoj zajednici s kojom je centar surađivao.

Model NCAR CCM je osobito važan upravo zbog velikog broja korisnika.



# Numerička prognoza vremena (od 1975.)

**Od 80-tih godina, razvoj numeričke prognoze vremena se manje bazira na većih inovacijama, a više na stalnim poboljšanjima postojećih tehnika.**

Značajno sofisticiranije i kompjuterski efikasnije sheme razvijene su za:

- Spektralnu transformaciju
- Hidrološki ciklus
- Združivanje oceanografskih-atmosferskih modela
- Radijaciju
- Uključivanje atmosferske kemije
- Konvekciju
- Definiranje površina (land-cover)
- Turbulenciju graničnog sloja
- Ugljikov-dioksid

Oformljeno Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

# Numerička prognoza vremena (sadašnjost)

Upotreba združenih modela:

- 1) oceanografsko-atmosferski modeli
- 2) oceanografsko-hidrološki modeli
- 3) hidrološko-atmosferski modeli
- 4) atmosferski-biosferski modeli

Cilj ⇒

združeni oceanografsko-hidrološko-atmosferski-biosferski modeli s velikim razlučivanjem ( $< 1$  km)