

Moderno napovedovanje vremena: Od meritev do sončka na mobilniku

Jure Jerman, Agencija za okolje

Mreža znanja 2018, 21. in 22. november



Vsebina

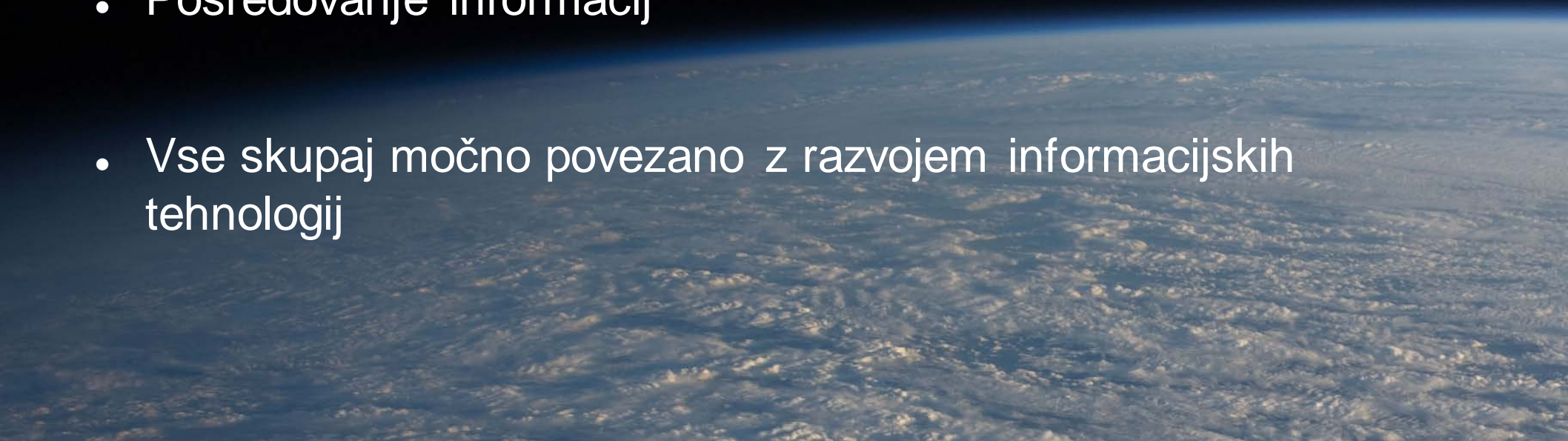
- Uvod
- Kako so povezani napredek v informacijskih tehnologijah in kvaliteta vremenskih napovedi
- Kaj so numerični meteorološki modeli in zakaj potrebujemo za njihovo računanje super zmogljive računalnike?
- Kje je Slovenija in kam gremo?



Moderno napovedovanje vremena

- Meritve stanja ozračja
- Meteorološki numerični modeli
- Posredovanje informacij

- Vse skupaj močno povezano z razvojem informacijskih tehnologij



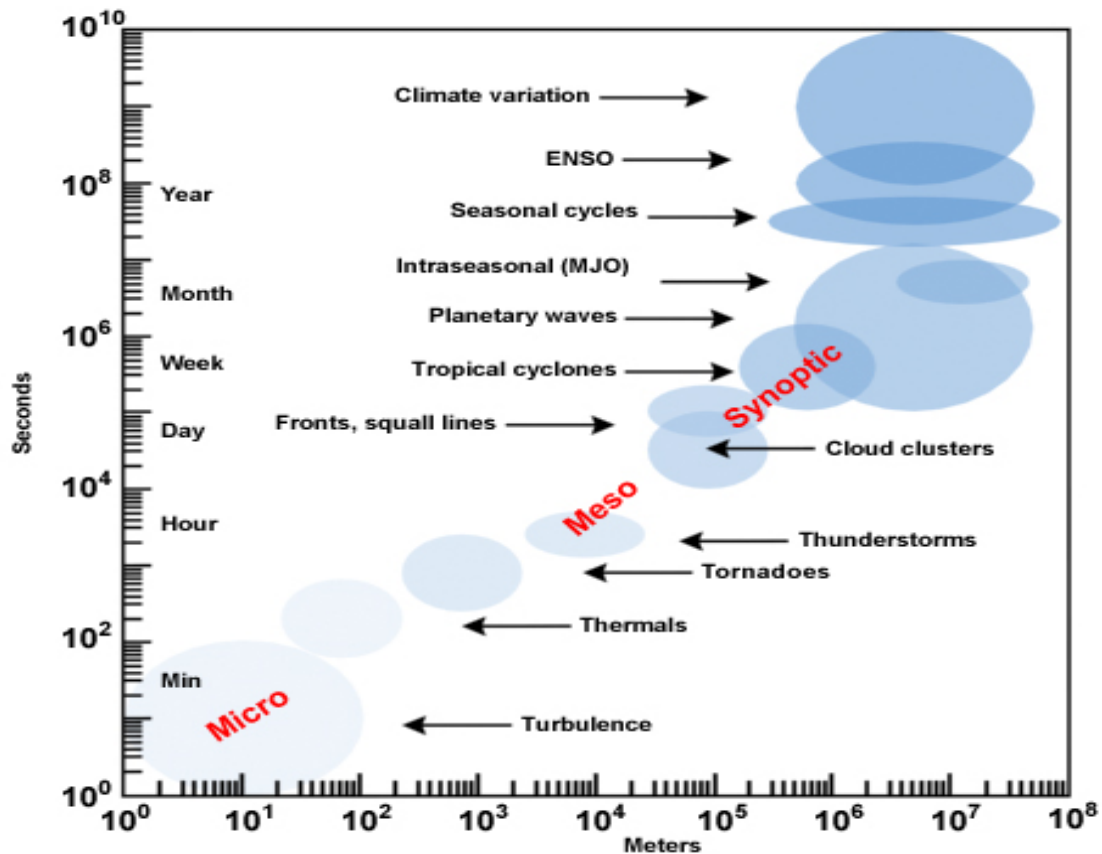
ECMWF (Evropski center za srednjeročno napovedovanje vremena)



Cilji modeliranja atmosfere

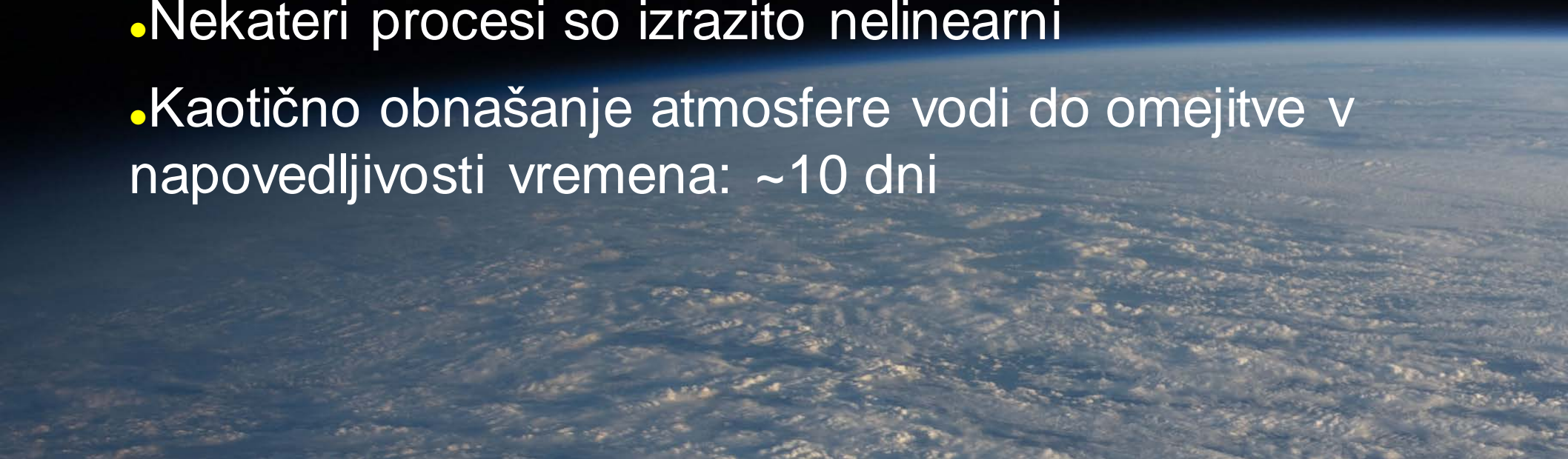
- Razumeti vreme: raziskovalni modeli
- Napovedovati vreme: prognostični modeli:
 - Globalni prognostični modeli
 - Modeli za napovedovanje vremena na omejenem območju.
- Napovedovanje klime: Klimatski modeli
- *To so vse meteorološki modeli!*

Vreme in vremenski procesi: različne časovne in prostorske skale procesov



Bistven problem problem: Energija v različnih prostorskih in časovnih skalah

- Dogaja se intenzivna izmenjava energije med različnimi skalami v vseh smereh
- Nekateri procesi so izrazito nelinearni
- Kaotično obnašanje atmosfere vodi do omejitve v napovedljivosti vremena: ~10 dni



Modeli za napovedovanje vremena

- Globalni modeli:

- Tipičen časovni doseg: 10 dni
- Tipična horizontalna ločljivost: 20 km
- Tipično število vertikalnih nivojev: 100
- Zagon 2-4 x na dan

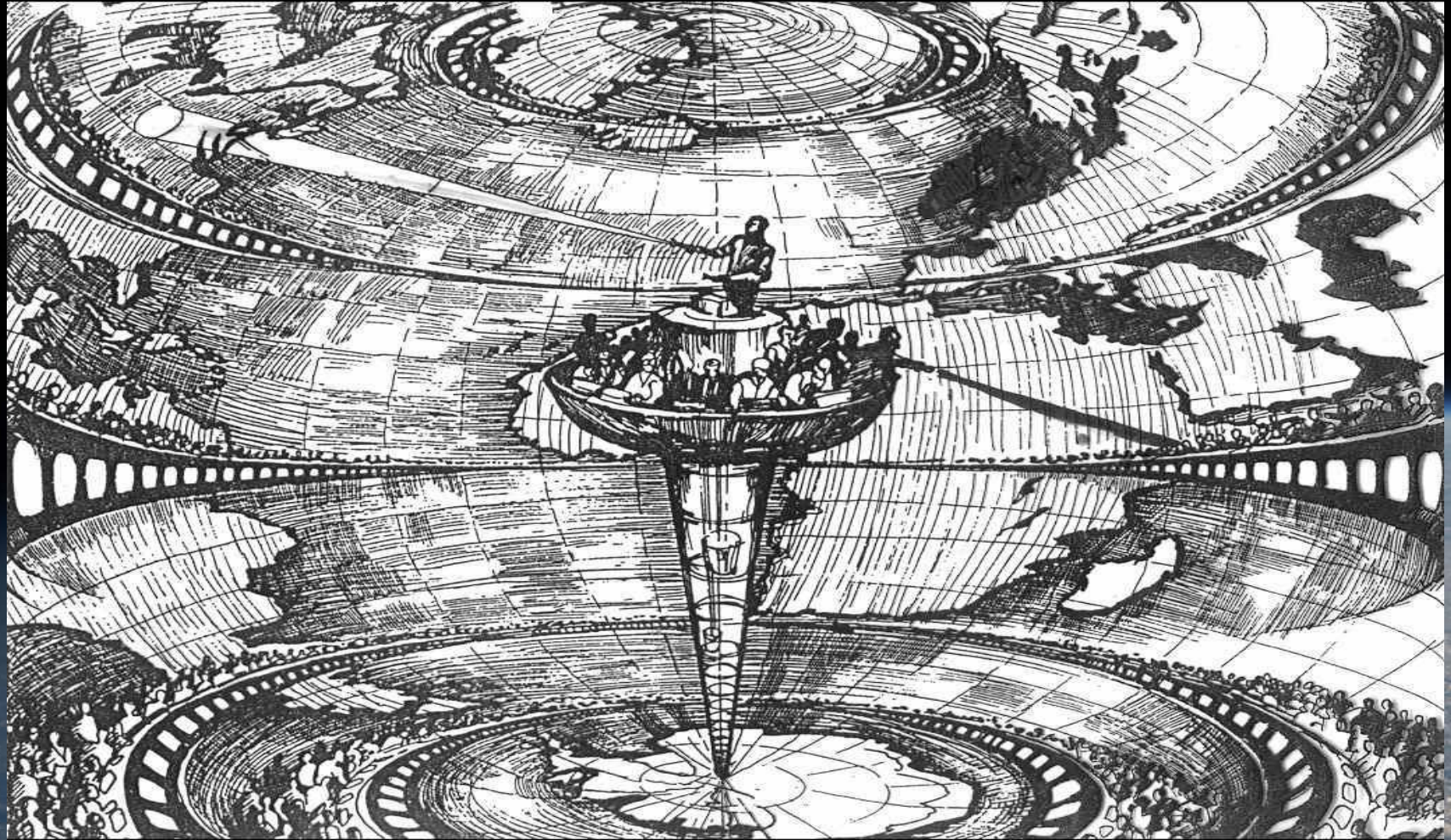
- Modeli za omejeno območje:

- Tipičen časovni doseg: 3 dni
- Tipična horizontalna ločljivost: 1- 4 km
- Zagon: 8-24x na dan



Delček zgodovine

- Bjerknæs (1904): je pokazal, da je možno napovedovati vreme z reševanjem sistema nelinearnih parcialnih diferencialnih enačb.
- Lewis Fry Richardson (prva svetovna vojna): Na osnovi Bjerknæsovih enačb je razvil prvi numerični meteorološki model in s pomočjo sodelavcev izračunal tendenco pritiska za 6 ur.
- 1937: Prva opazovanja atmosfere z radiosondami, ki so omogočala boljši vpogled v vremenske procese na večjih višinah.
- 1950: Razvoj prvega računalnika (ENIAC): matematični model atmosfere, prikaz možnosti numeričnega napovedovanja vremena.



Delček zgodovine (2)

- 1955 (USA): Prvi oddelek za numerično napovedovanje vremena
- 1958: Prva vremenska napoved izračunana 2x na dan
- 1975: Ustanovitev Evropskega centra za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF)
- Danes: Numerični modeli so onovno orodje za napovedovanje vremena in klimatske analize

In kako deluje numerični meteorološki modeli?

Numerično meteorološko modeliranje je reševanje sistema parcijalnih diferencialnih enačb z upoštevanje začetnih in robnih pogojev.



Reševanje mora biti stabilno in učinkovito: Enourno napoved vremena je potrebno izračunati v manj kot minuti

•Osnovne enačbe

- Enačba gibanja (Navier-Stokes)

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = \vec{f} = -\frac{1}{\rho_m} \vec{\nabla} p - \mathbf{g} \cdot \vec{k} - 2(\vec{\Omega} \times \vec{v}) + \vec{f}_F$$

- Ohranitev mase (kontinuitetna enačba)

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (\rho_m \cdot \vec{v})$$

- Ohranitev energije (prvi zakon termodinamike)
- Plinski zakoni ...

•Diskretizacija v fizičnem prostoru

- Kontinuum aproksimiran z mrežo računskih točk
- Najmanjše strukture, ki jih lahko simulira model, so določene z prostorsko ločljivostjo modela – razdaljo med sosednjimi mrežnimi točkami
- Prostorska ločljivost je določena z razpoložljivo računsko močjo
- Odvodi se lahko računajo kot končne razlike – ali (bolj natančno) z uporabo spektralnih metod in spektralnih transformacij
- Vertikalna koordinata je ponavadi diskretizirana drugače (z , p , Θ , σ_z , σ_p , η , hibridni nivoji)

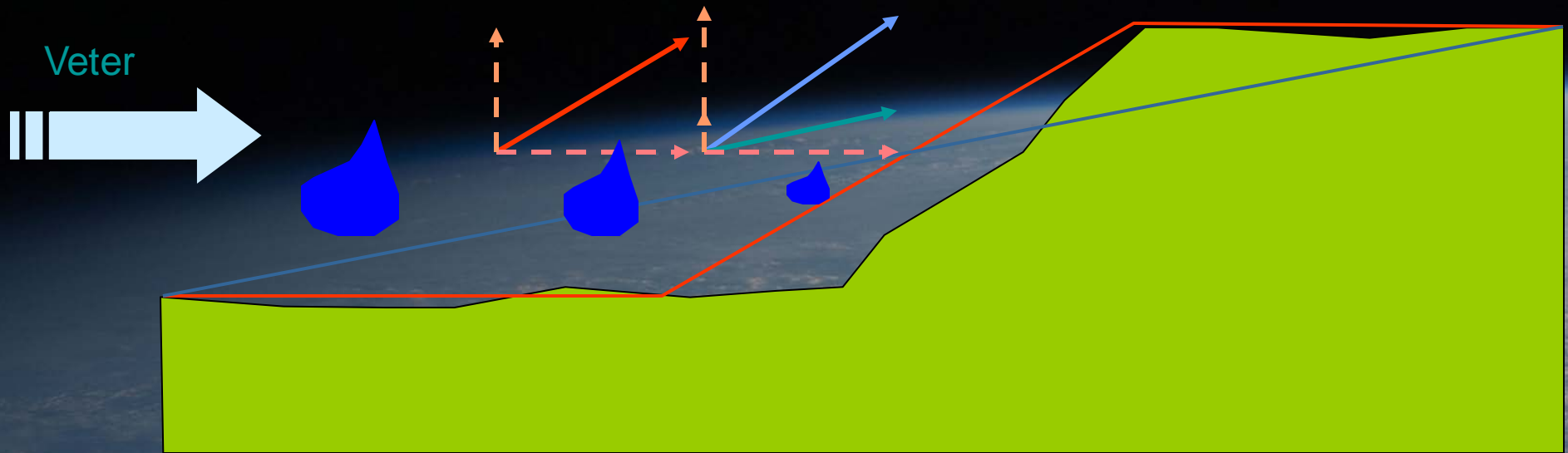
Prostorska ločljivost je pomembna

- Od razdalje med diskretnimi točkami je odvisno:
 - Kakšna je reprezentacija reliefa v modelu
 - Velikost vremenskih procesov, ki jih lahko eksplicitno računamo v modelu
- Vpliv procesov, ki so “podmrežni”, vključujemo preko fizikalnih parametrizacij
- Primer: intenziteta padavin je odvisna od hitrosti dviganja zraka:

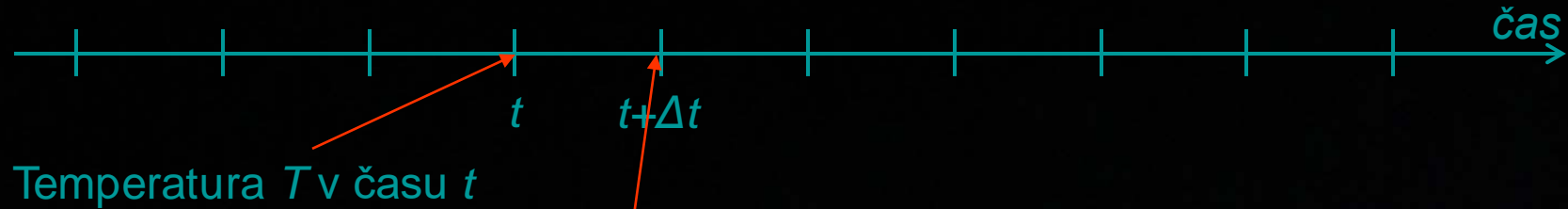
Primer pomena prostorske ločljivosti

Hitrost dviganja zraka

Bistveno pri izračunu intenzivnosti padavin:



Integracija: korakanje v času



Tendenca:

Diskretna oblika v času:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} + O[(\Delta t)^2] \quad \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \dots$$

$$\Delta T = \Delta t \left(-u \frac{\Delta T}{\Delta x} - v \frac{\Delta T}{\Delta y} + \frac{p}{R} \omega \sigma + \frac{Q}{C_p} \right)$$

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \Delta T$$

Dolžina časovnega koraka

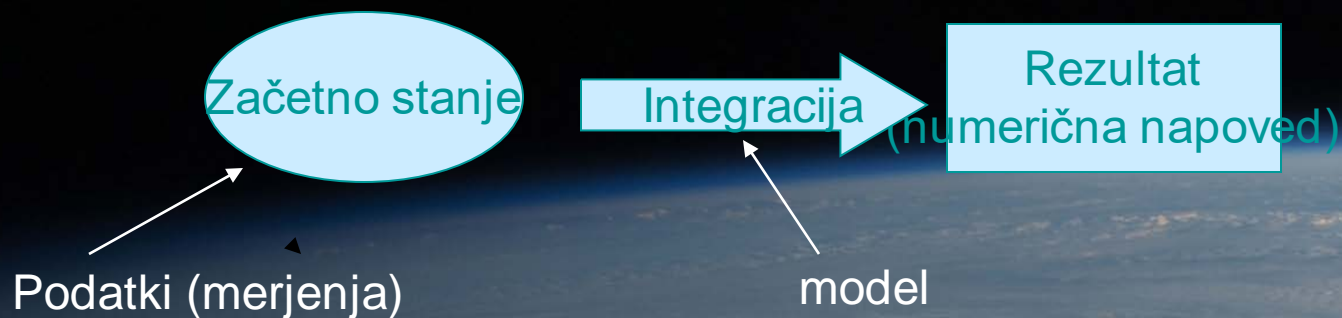
- Je odvisna od mrežne razdalje
- Numeričnih shem, ki opisujejo advekcijo (Eulerjeva, Semi-Lagrangova)
- In kompleksnosti modela (npr. mikrofizikalna shema za opis oblačnosti).

ECMWF / IFS @ 10 km: $\Delta t \sim 10$ min

ALADIN (ALARO) @ 4,4 km: $\Delta t = 3$ min

ALADIN (AROME) @ 2,5 km: $\Delta t = 60$ s

Kaj pa začetni pogoji? Asimilacija podatkov



Asimilacija podatkov → način, kako vključiti meritve ob upoštevanju prejšnjega znanja o stanju ozračja

Poskus, kako optimalno združiti meritve, staro napoved in ob tem upoštevati fizikalne zakone.

Stara napoved (oziroma) je numerična napoved iz tega modela 6 (or 3) ure nazaj.

•Asimilacija podatkov

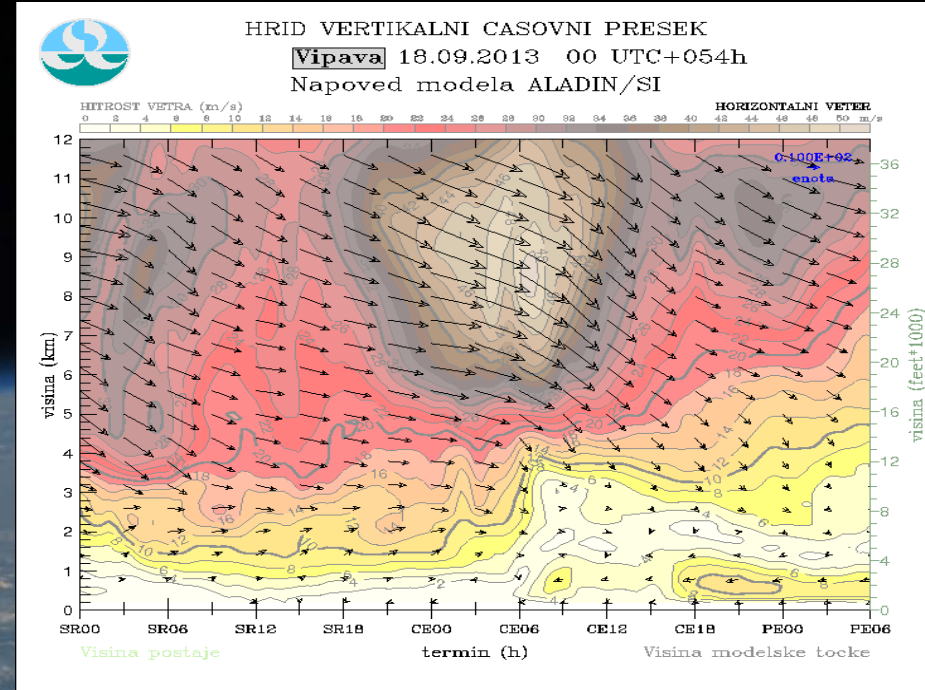
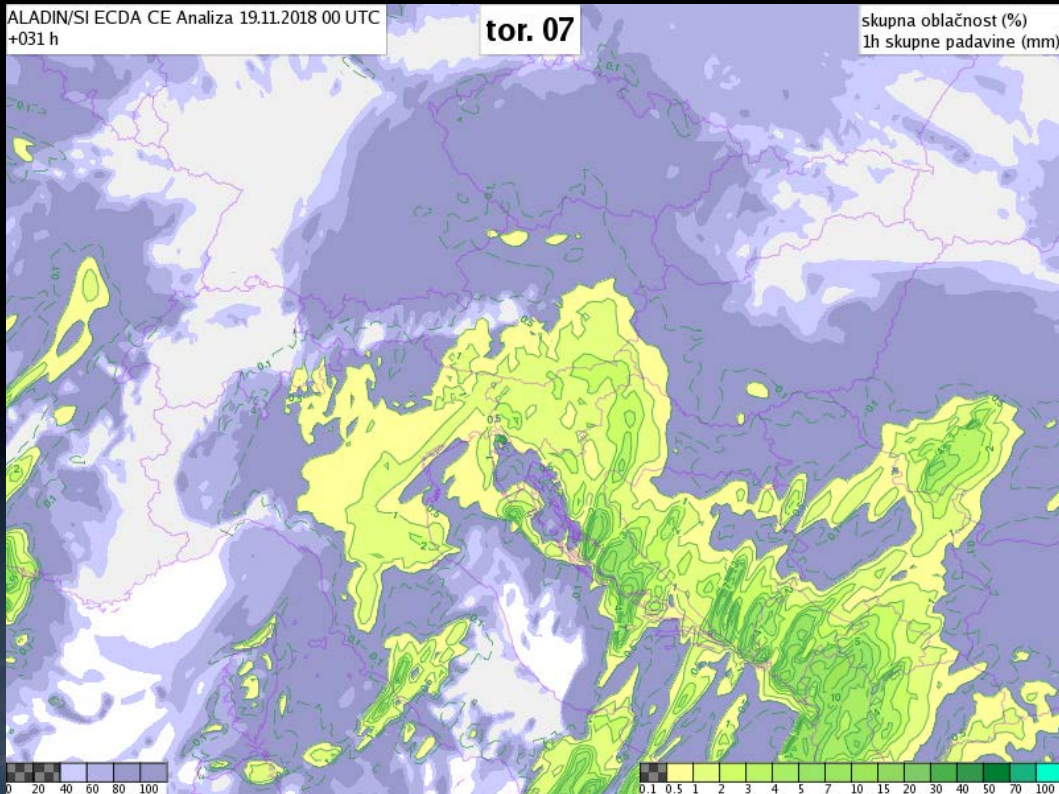
- Variacijske metode (3D-Var and 4D-Var)
 - Minimizacija razlike med analizo in prvim približkom in med analizo in opazovanji

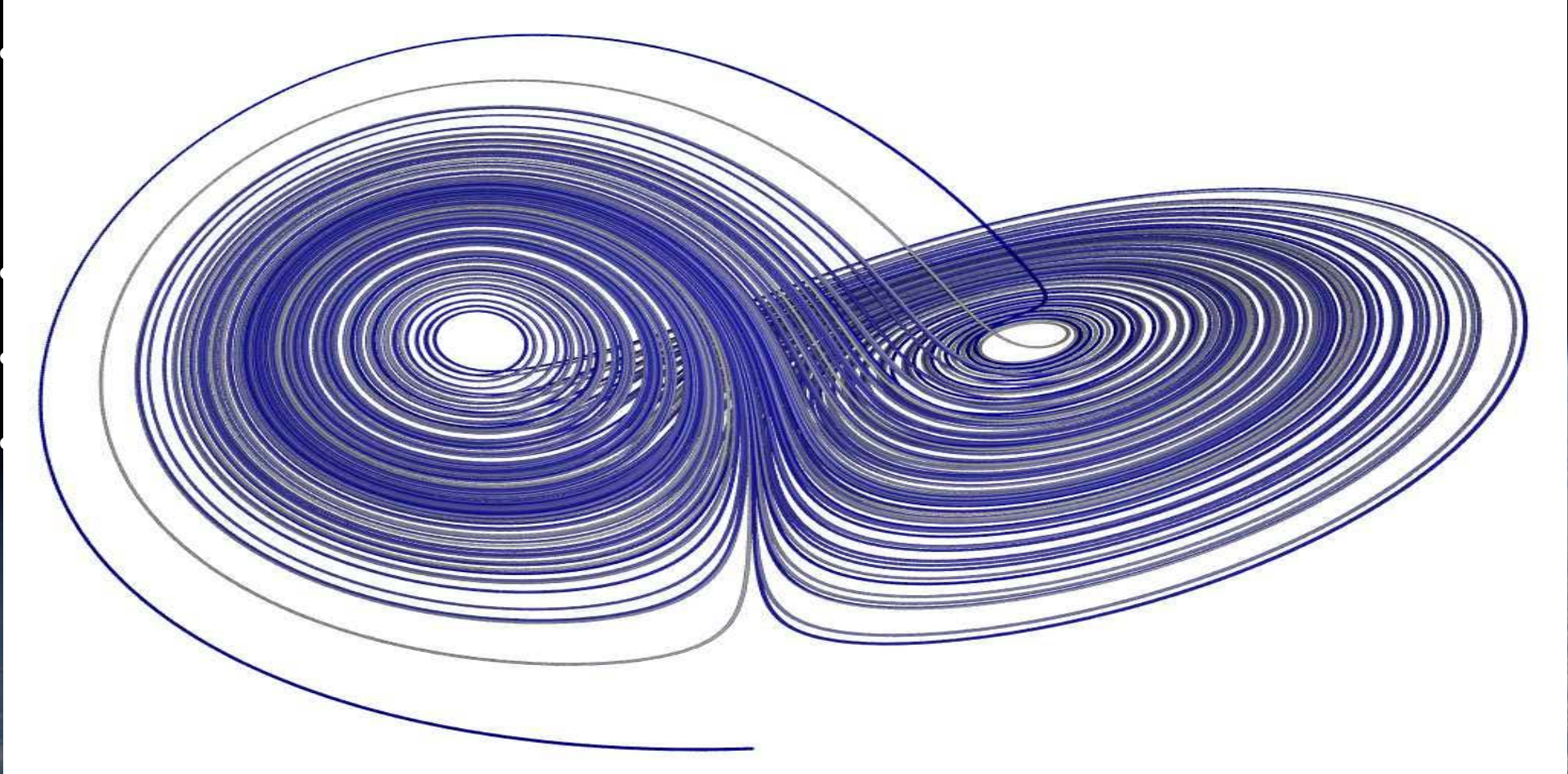
- $$J(\mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + (\mathbf{y} - H[\mathbf{x}])^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - H[\mathbf{x}]),$$

- Kalmanov filter: Sveti gral podatkovne asimilacije, vendar prekompleksen za popolno implementacijo.

Rezultati numeričnih modelov (po integraciji)

Izhodna polja v pravilni mreži točk



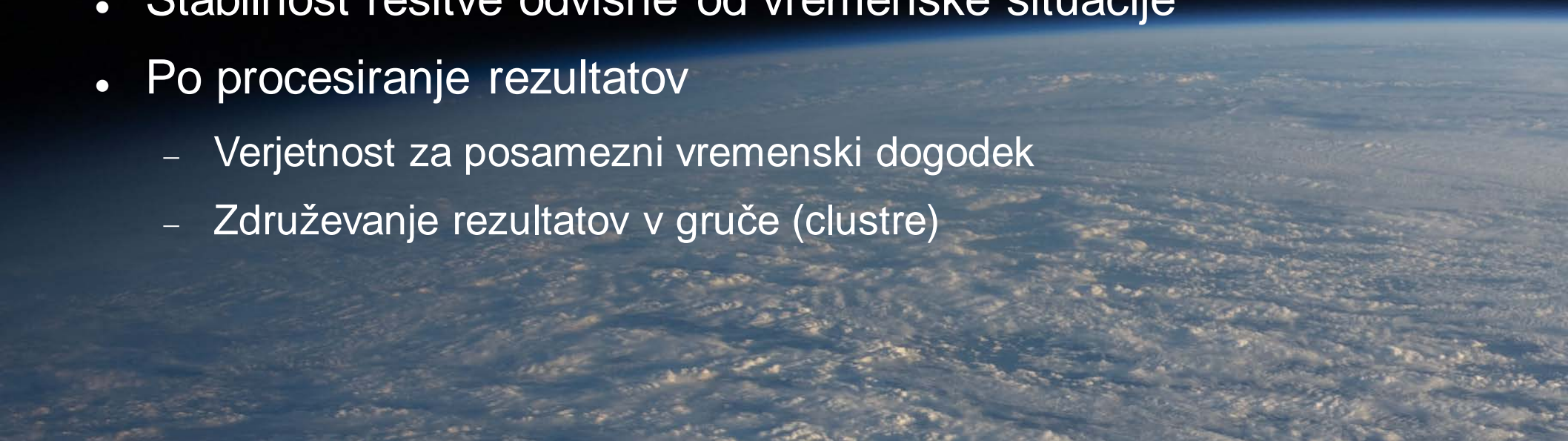


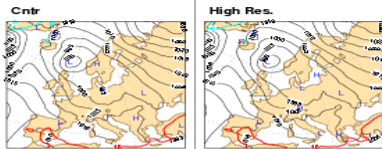
Iskanje reda v kaosu

- Iskanje večih možnih razvojev vremena v faznem prostoru s:
 - Perturbacijo začetnih ali robnih pogojev
 - Perturbacija tistih spremenljivk in na tistem mestu, kjer bo majhna motnja povzročila največjo spremembo v napovedi
 - Perturbacijo modelskih parametrov– e.g. modelske fizike
- Nato: Izračun velikega števila napovedi → veliko število trajektorij
→ Izračun statistik
 - Verjetnostne ali ansambelske napovedi

Ansambelske napovedi

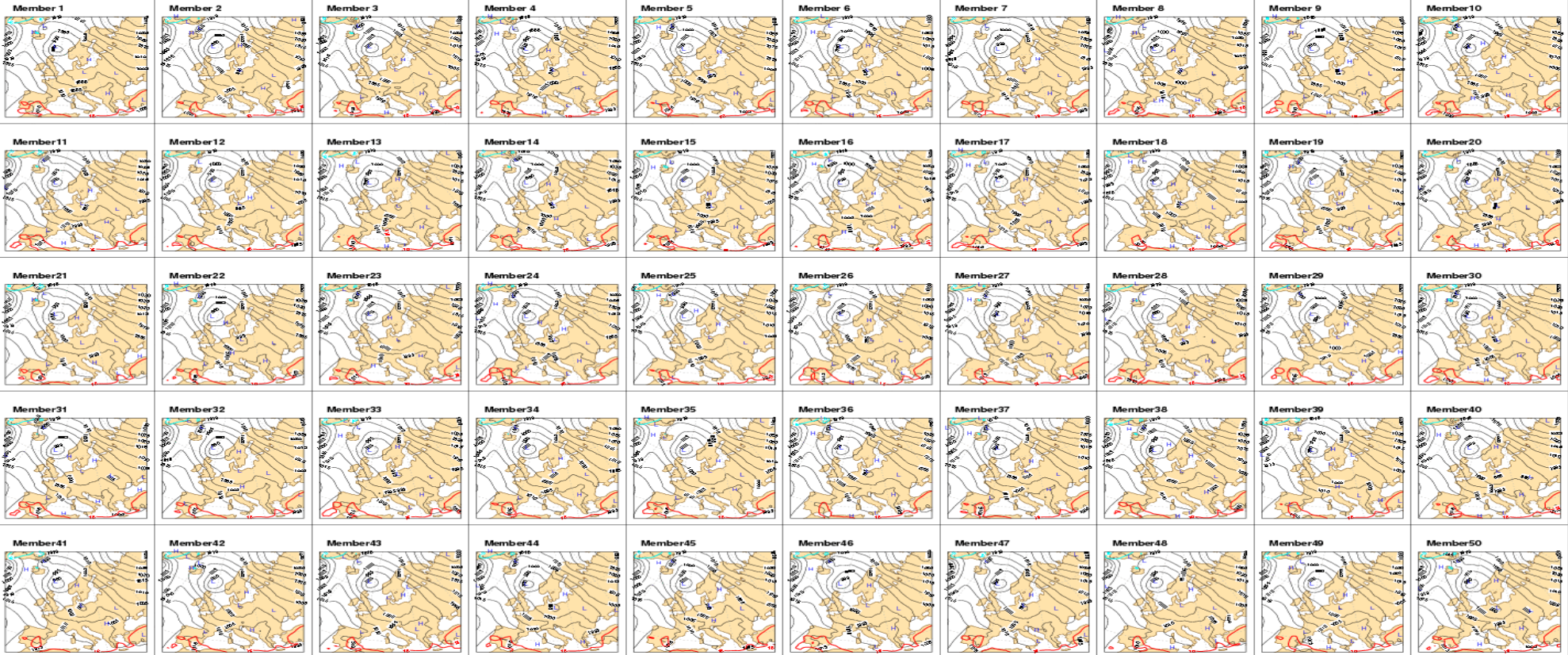
- Večje število modelov iz perturbiranih začetnih pogojev
- Robni pogoji ustvarjeni tako, da so perturbacije generirajo maksimalne odklone čez nekaj dni napovedi (na občutljivih geografskih območjih)
- Stabilnost rešitve odvisne od vremenske situacije
- Po procesiranje rezultatov
 - Verjetnost za posamezni vremenski dogodek
 - Združevanje rezultatov v gruče (clustre)





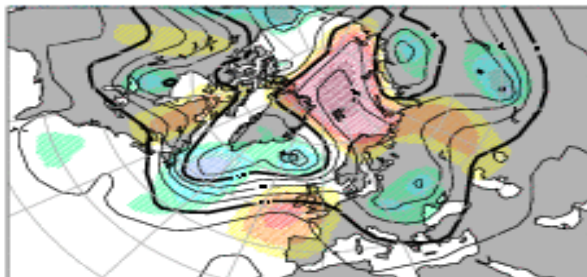
ECMWF ENSEMBLE FORECASTS

Wednesday 18 September 2013 at 00 UTC ECMWF forecast t+12 VT: Wednesday 18 September 2013 at 12 UTC
MSLP (contour every 5hPa) Temperature at 850hPa (only -6 and 16 isolines are plotted)

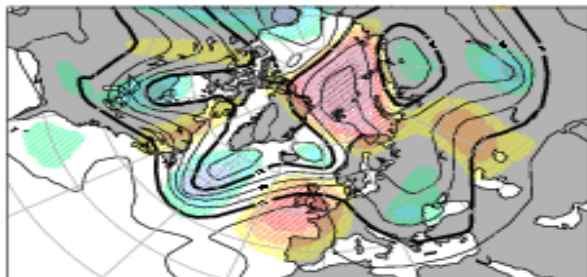


Wednesday 18 September 2013 00UTC ECMWF EPS Cluster scenario - 500 hPa Geopotential
Reference step t+72-96 Domain 75/340/30/40 Cont. in cluster=2 Det. in cluster=2

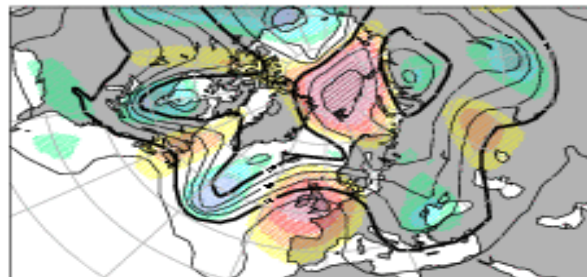
forecast t+72 VT:Saturday 21 September 2013 00UTC
Cluster: 1(of 2), population: 27, repres. member: 20



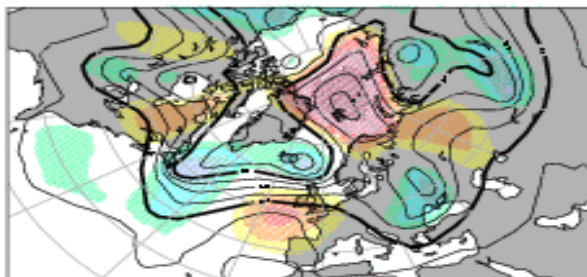
forecast t+84 VT:Saturday 21 September 2013 12UTC
Cluster: 1(of 2), population: 27, repres. member: 20



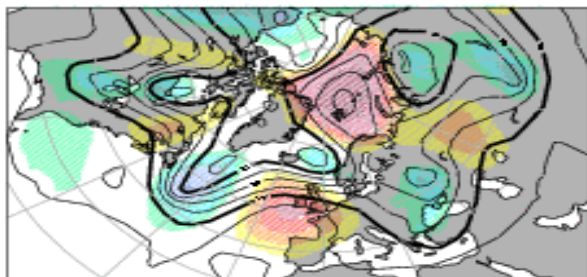
forecast t+96 VT:Sunday 22 September 2013 00UTC
Cluster: 1(of 2), population: 27, repres. member: 20



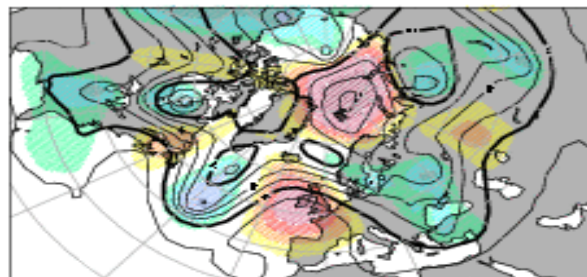
forecast t+72 VT:Saturday 21 September 2013 00UTC
Cluster: 2(of 2), population: 24, repres. member: 5



forecast t+84 VT:Saturday 21 September 2013 12UTC
Cluster: 2(of 2), population: 24, repres. member: 5



forecast t+96 VT:Sunday 22 September 2013 00UTC
Cluster: 2(of 2), population: 24, repres. member: 5



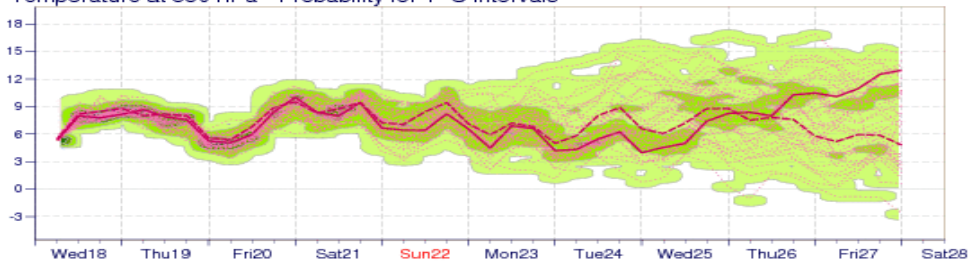
ECMWF Ensemble forecasts for SLOVENIA - LJUBLJANA

Location: 46.07°N 14.38°E

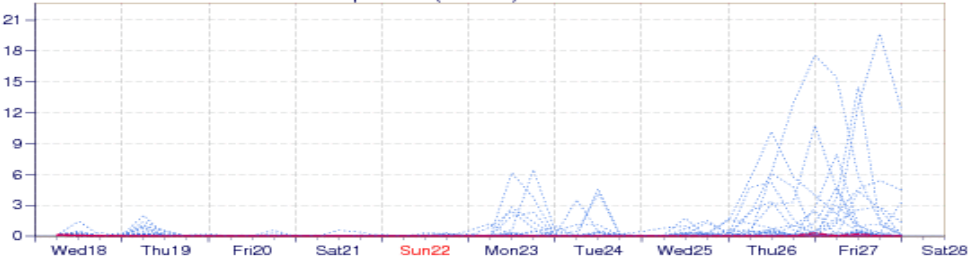
Base Time: Wednesday 18 September 2013 00 UTC



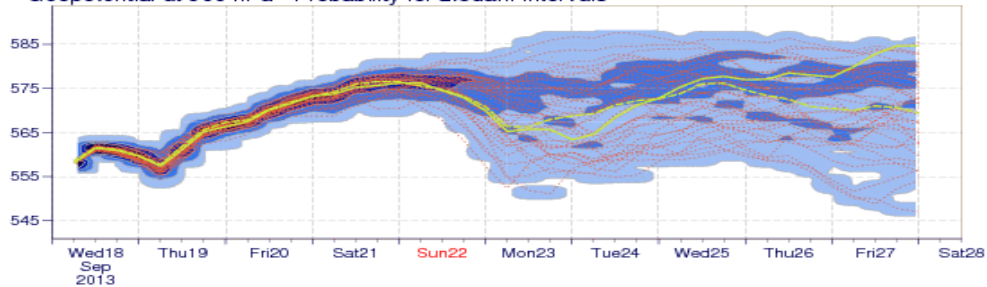
Temperature at 850 hPa - Probability for 1°C intervals



Ensemble members of Total Precipitation (mm/6h)



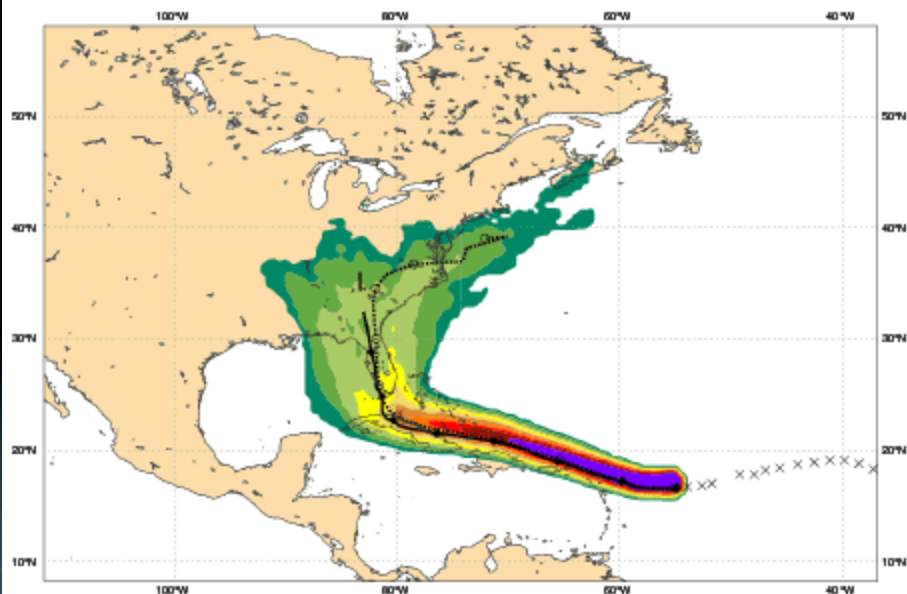
Geopotential at 500 hPa - Probability for 2.5dam intervals



Date 20170905 00 UTC @ECMWF

Probability that **IRMA** will pass within 120 km radius during the next 240 hours

tracks: **solid**=HRES; **dot**=Ens Mean [reported minimum central pressure (hPa) **943**]



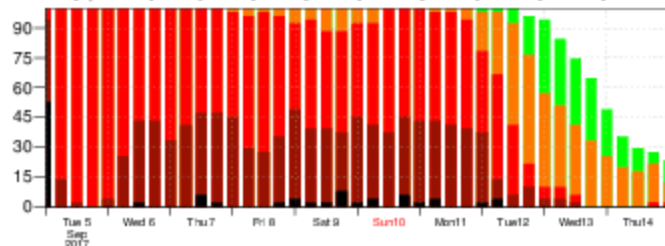
List of ensemble members numbers forecast Tropical Cyclone

Intensity category in colours: **TD**[up to 33] **TS**[34-63] **HR1**[64-82] **HR2**[83-95] **HR3**[> 95 kt]

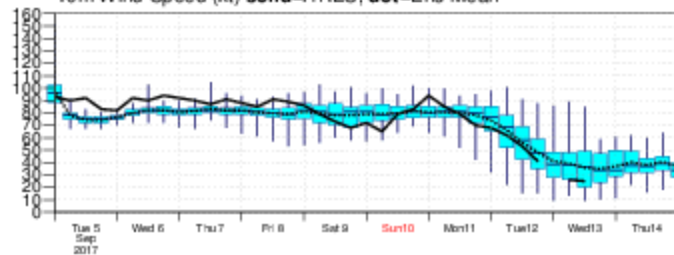


Probability (%) of Tropical Cyclone Intensity falling in each category

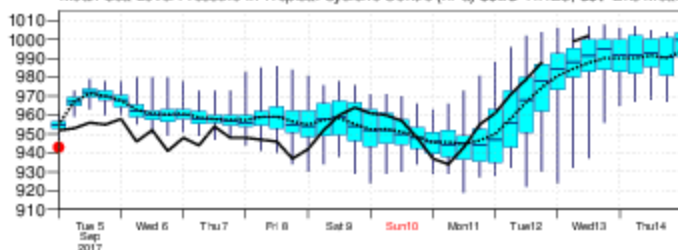
TD[up to 33] **TS** [34-63] **HR1**[64-82] **HR2** [83-95] **HR3** [> 95 kt]



10m Wind Speed (kt) **solid**=HRES; **dot**=Ens Mean



Mean Sea Level Pressure in Tropical Cyclone Centre (hPa) **solid**=HRES; **dot**=Ens Mean

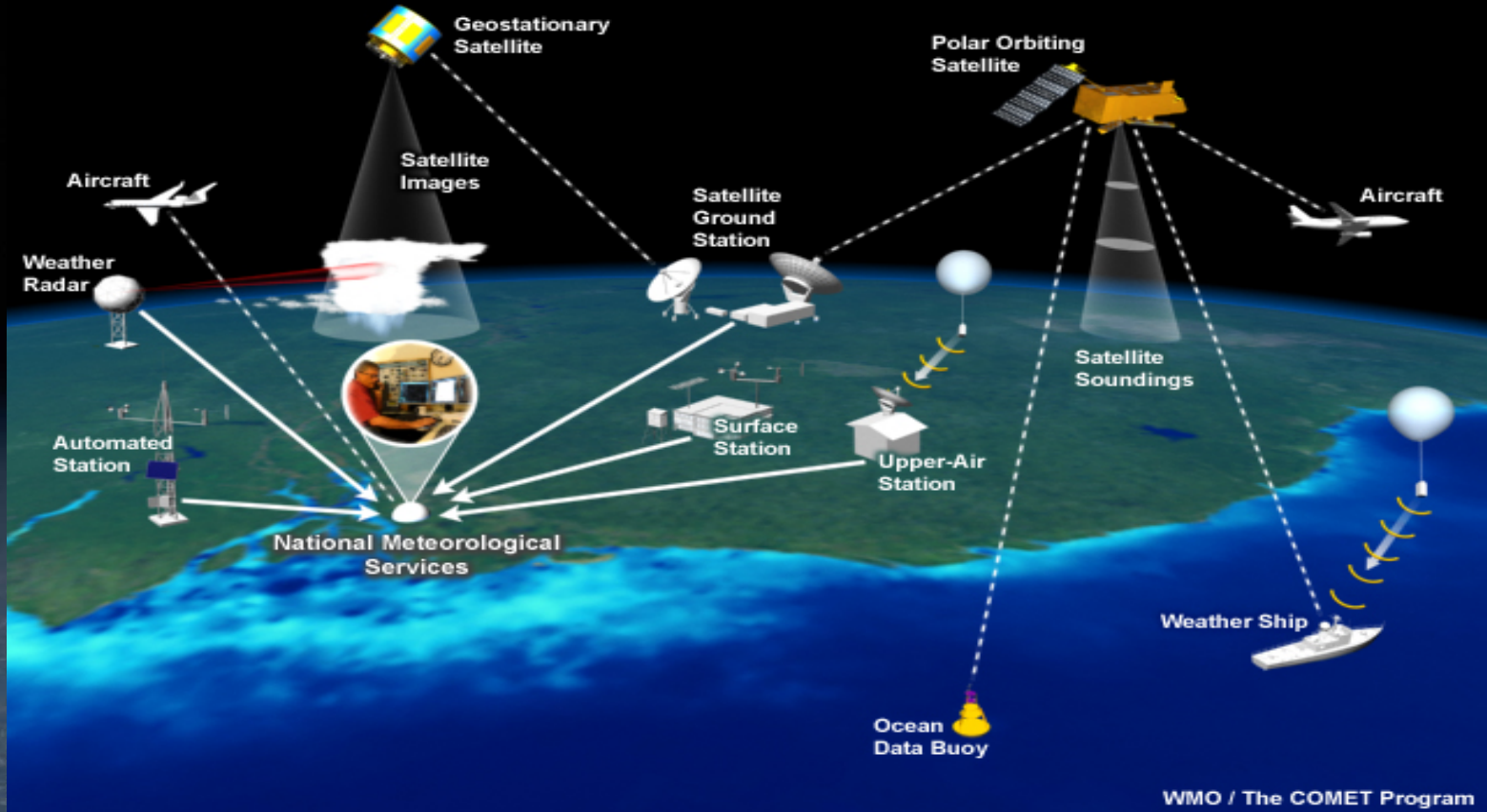


Operativni vidiki modeliranja vremena

- Sistemi, ki tečejo 24/7
- Vse se začne z opazovalnim sistemom
- Podatki se distribuirajo preko GTS (Global Telecommunication System) ...
- ... in končajo v globalnih meteoroloških centrih
- Tukaj jih prevzamejo meteorološki modeli
- Pomen standardov: standardni formati podatkov

Opazovalni sistem

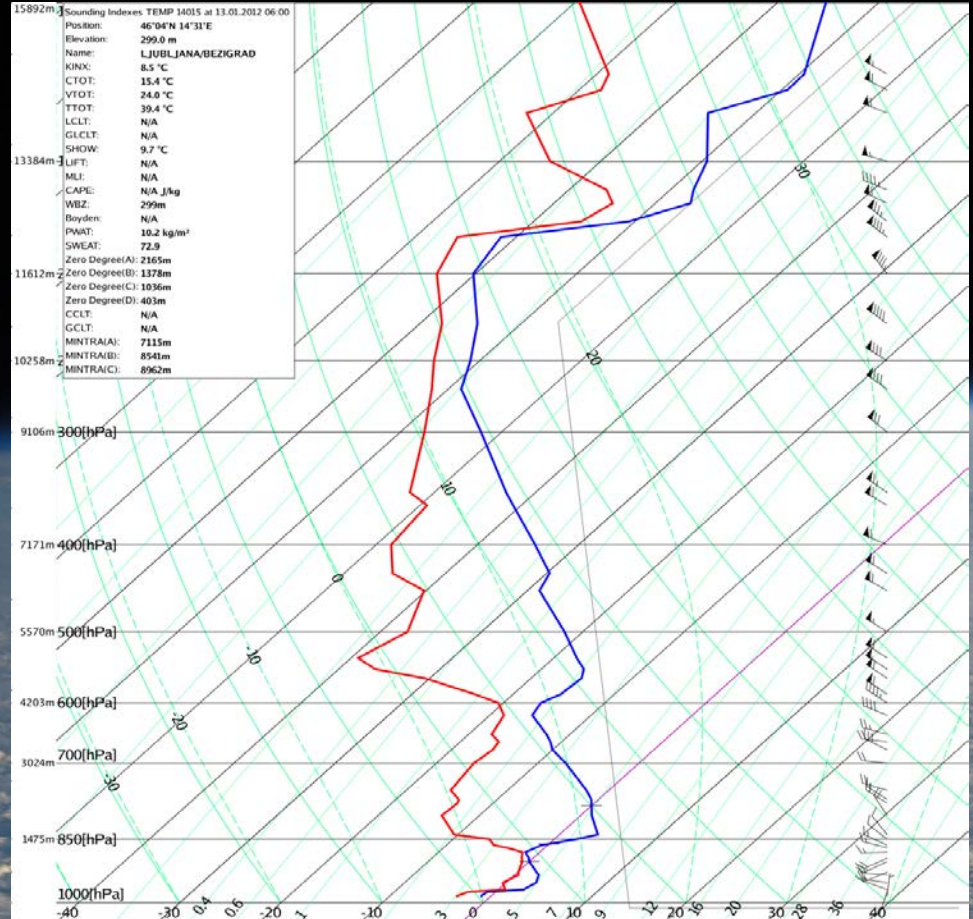
WMO Global Observing System



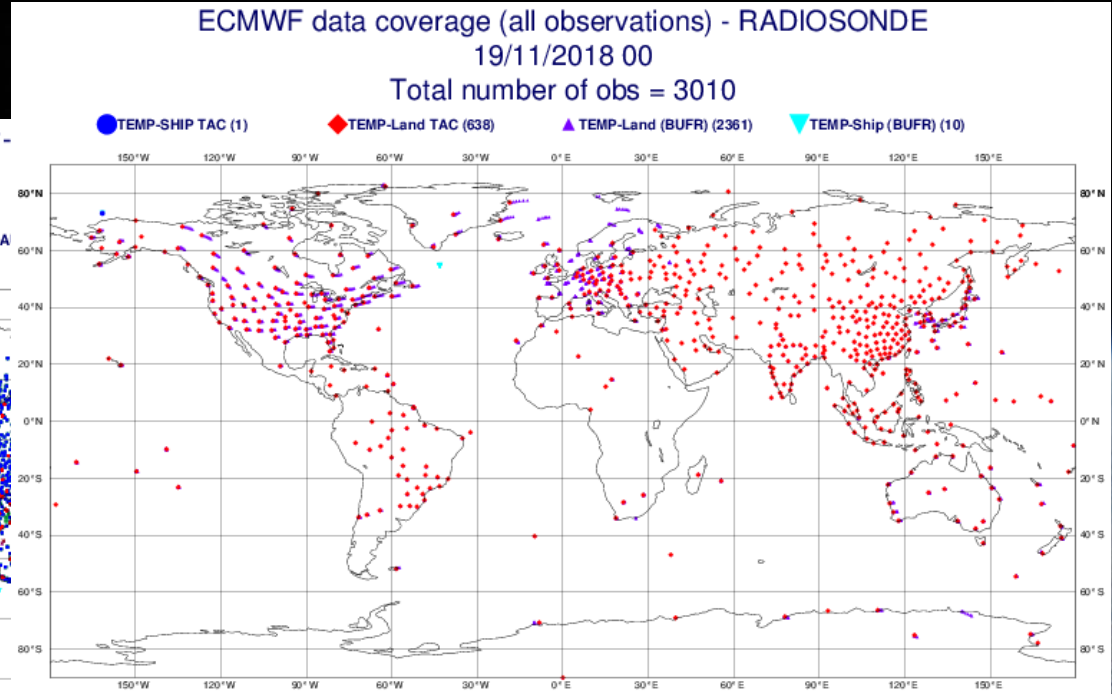
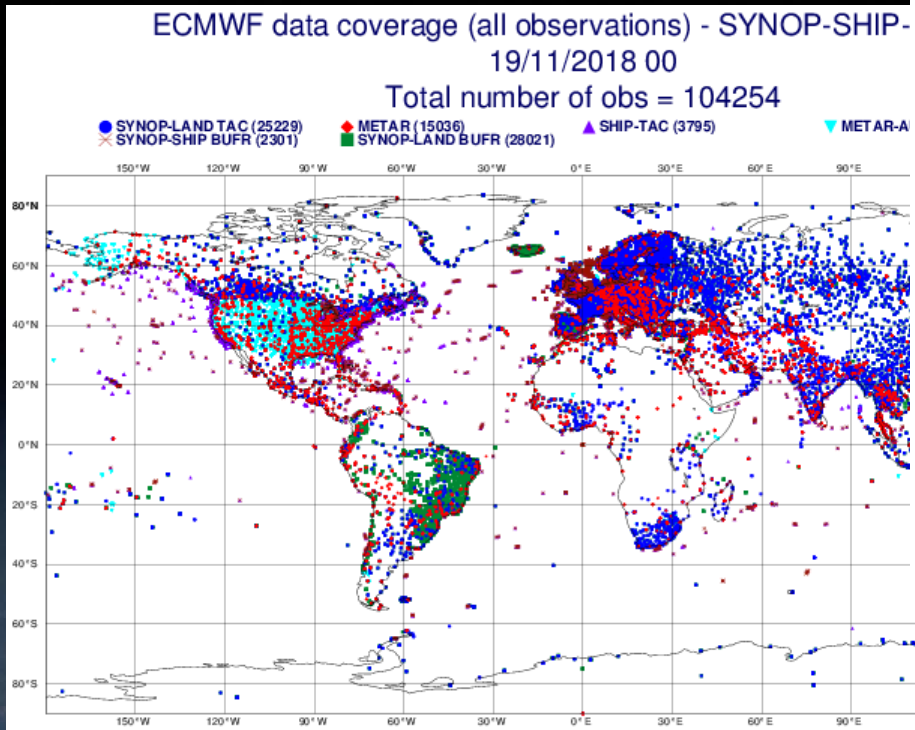
Prizemna opazovanja



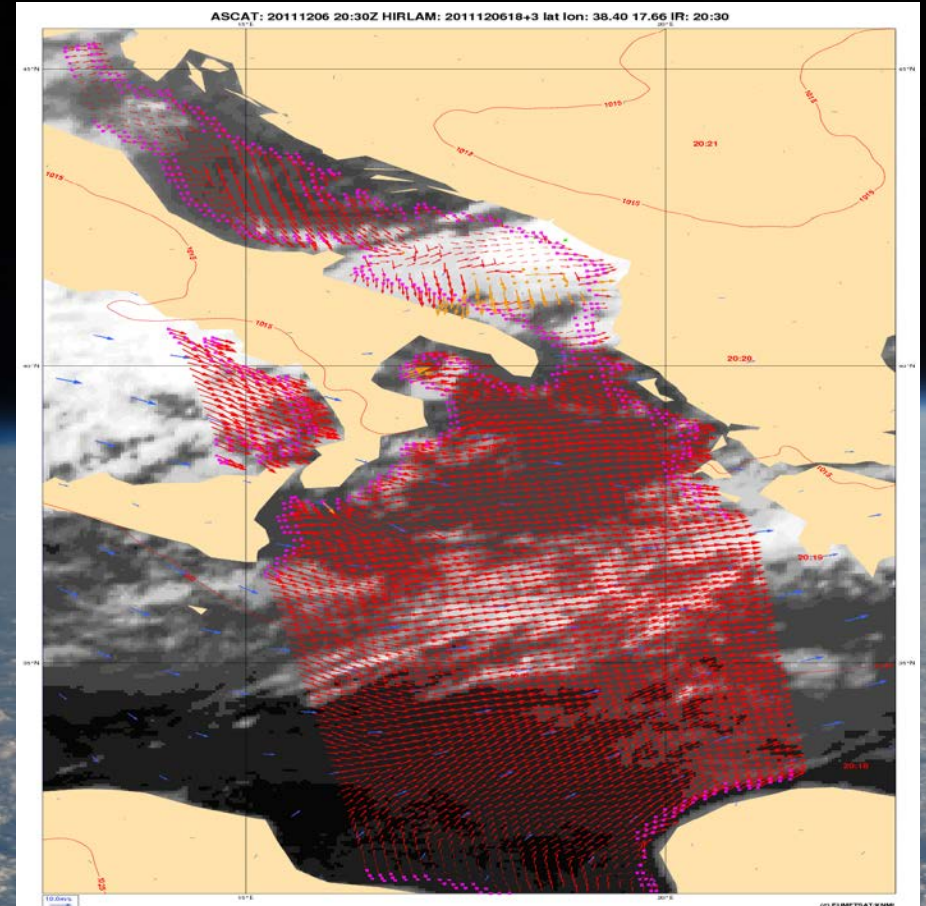
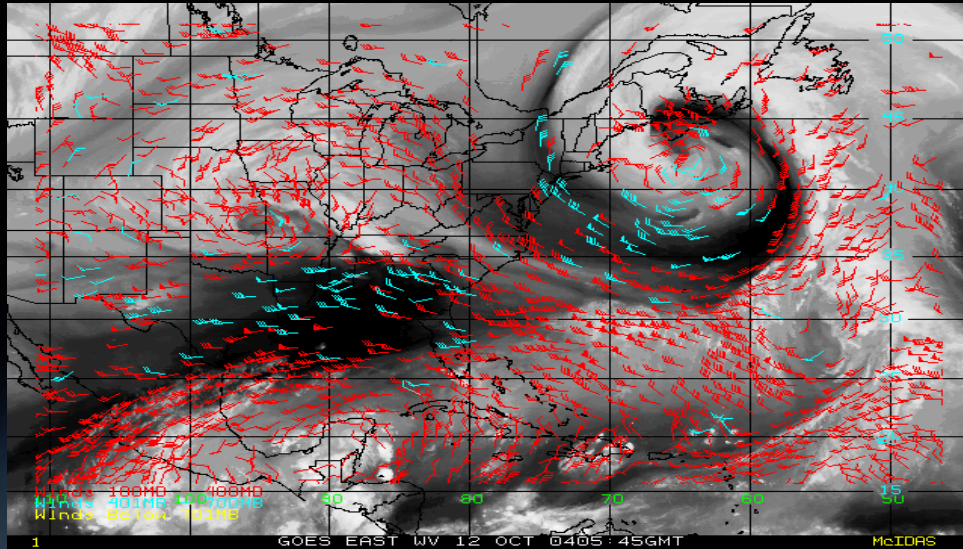
Opazovalni sistem, radiosondaže



Prizemna in višinska opazovanja



Opazovalni sistem, vloga satelitov



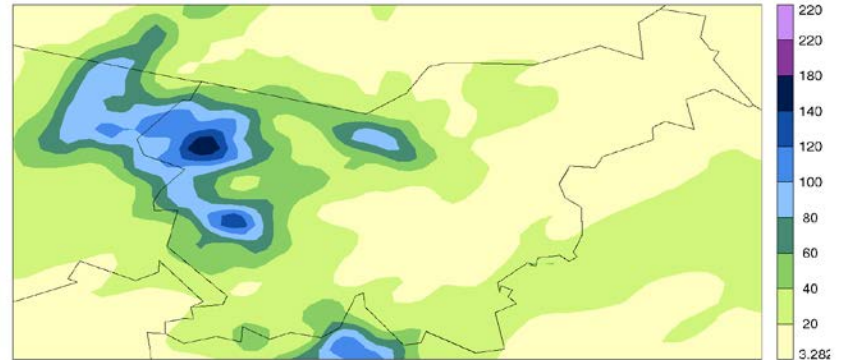
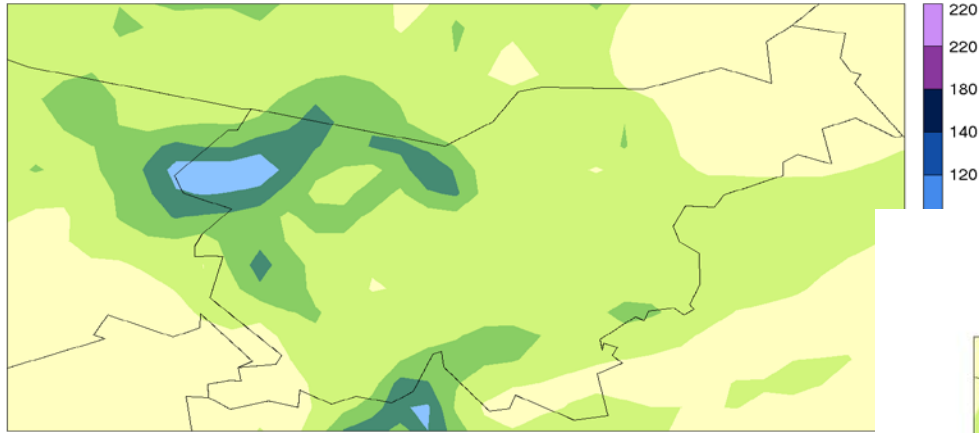
HPC – Visoko zmogljivi računalniki



Razvoj strojne opreme

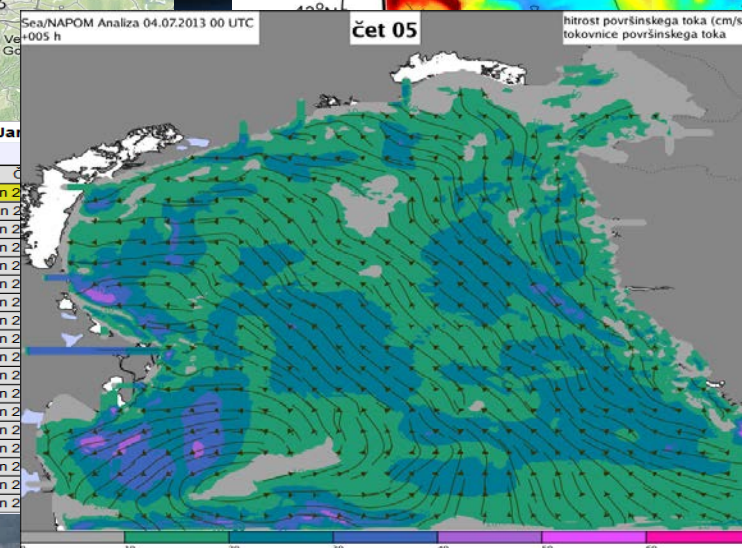
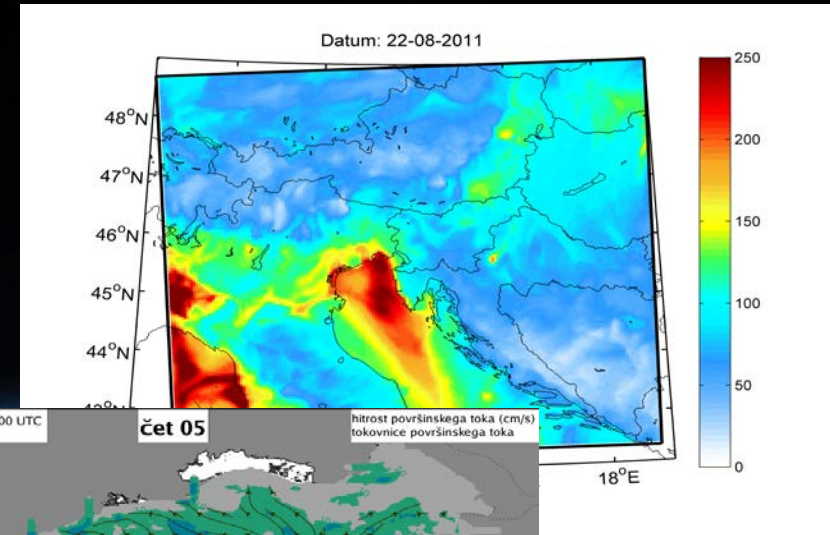
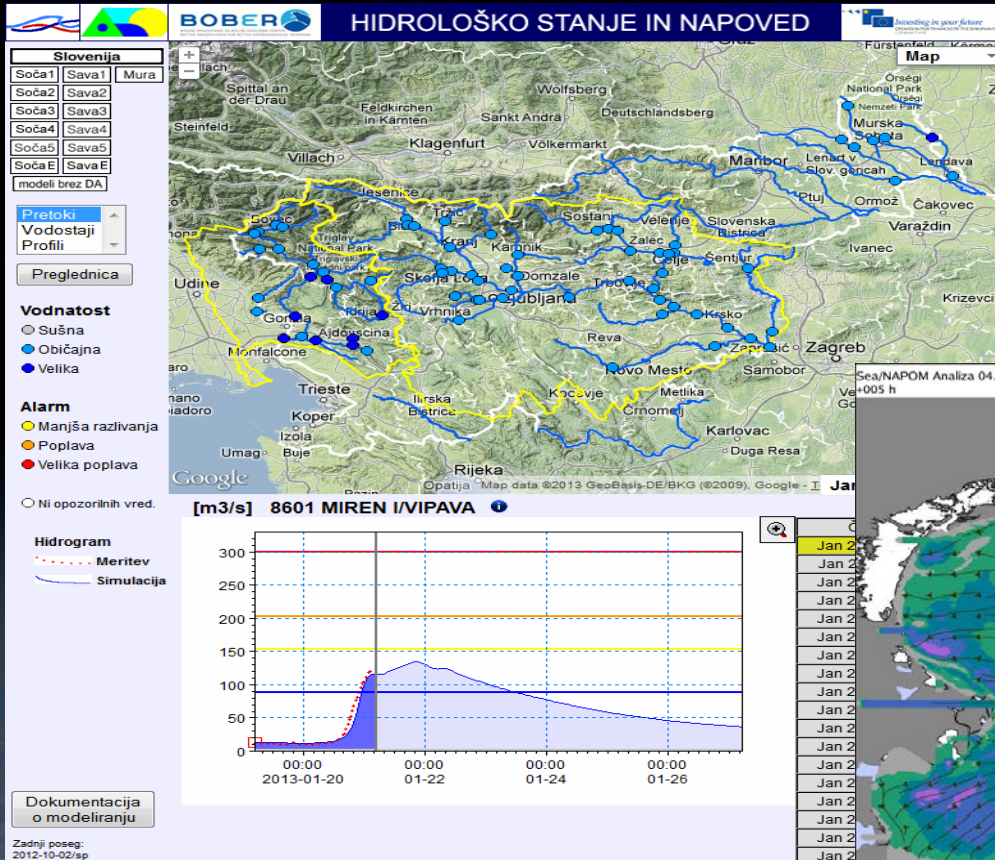
- ECMWF: 2 gruči po 100.000 računskih jeder, v prihodnosti proti 1.000.000 računskim jedrom
- GPU (grafični procesorji)
- Paralelizacija (MPI, OpenMP, Cuda, OpenCL)
- Problem: skalabilna programska koda (C++, Fortran)

Napredek pri razvoju



Napoved ekstremenega vremenskega dogodka 2007.

Rezultati numeričnih meteoroloških modelov kot robni pogoj za druge modelske sisteme



Hvala za pozornost!

