

# Předpověď počasí a Chaos ?





# Isac Newton - Principia (1686)

- Definovala Newtonovy pohybové zákony:  $F=ma$
- Chápe svět jako deterministický matematický model - tedy:
  - Známe-li výchozí podmínky lze přesně vypočítat budoucí vývoj
  - Svět je chápán jako poměrně snadno předvídatelný (řiditelný) hodinový stroj - Laplace
- příkladem: Kyvadlo - pravidelné/předvídatelné



# Henri Poincare

## Počátky teorie chaosu - aneb první pochybnosti o Newtonově fyzice

- 1887: Cena Švédského krále -  
"Je sluneční soustava stabilní?"
- Poincaré dokázal, že soustava rovnic popisující vztah mezi 3 tělesy je neřešitelná tj. nelze bezezbytku předvídat její chování



# Klimatický systém a počasí

- Dynamický a rychle se měnící systém
- Dlouhodobé předpovědi jsou vyloučeny (a vlastně je od meteorologů ani neočekáváme...)
- Nepřítomnost spolehlivých dlouhodobých předpovědí má ale ničivé důsledky -



- **PROČ** ANI DNES NEUMÍME PŘEDPOVĚDĚT POČASÍ NA NĚKOLIK TÝDNŮ ČI MĚSÍCŮ??



# Wilhelm Bjerknes (1862-1951)



Předpověď počasí je možná:

- 1) pokud známe výchozí podmínky
- 2) s použitím základních fyzikálních zákonů

# Lewis Fry Richardson (1881 - 1953)



Lewis Fry Richardson (1881-1953)

Autor první numerické předpovědi  
tj. předpovědi založené na  
matematickém modelu...

Výpočet modelu pro 1 den trvala  
6 měsíců (okolo roku 1920)

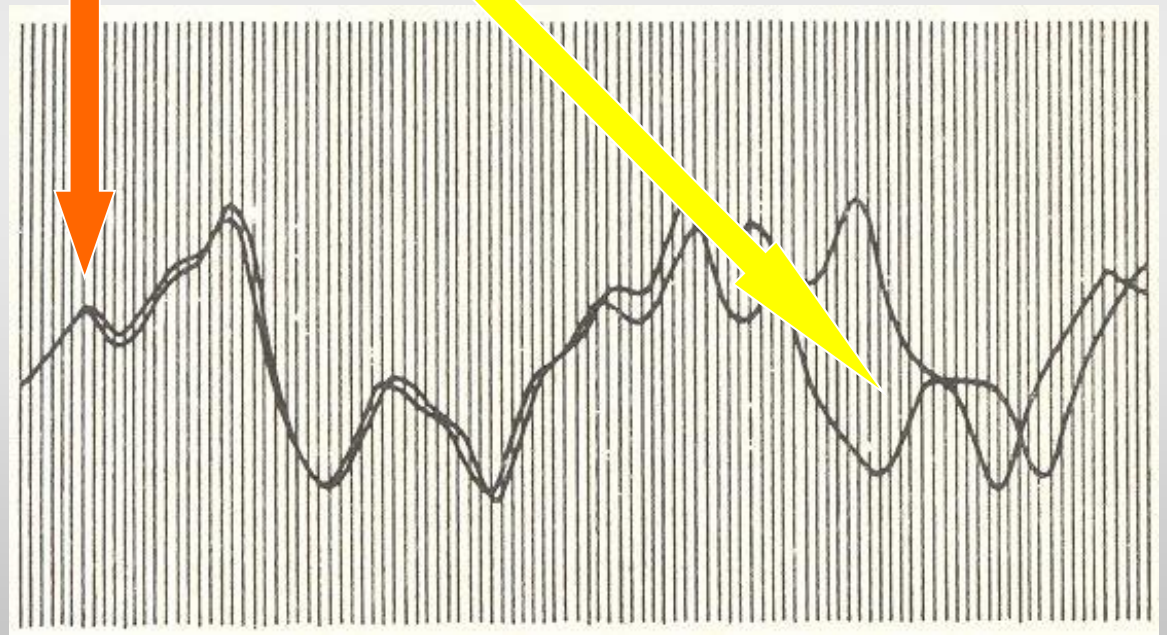


# Edward Lorenz (1917 - )

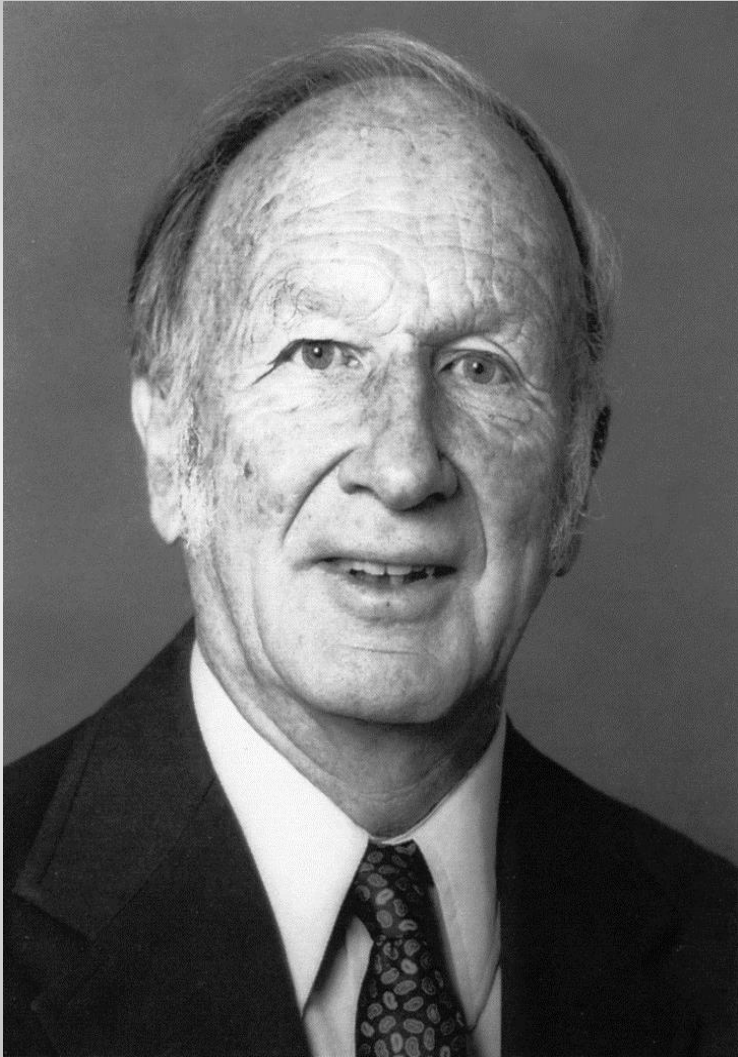
1960 - primitivní počítač na M.I.T.

12 rovnic charakterizujících základní chování atmosféry.....

...chut' na kávu a trocha štěstí - a „narodil“ se CHAOS...



# Edward Lorenz (1917 - )



“... jedno mávnutí racčích  
křídel může navždy změnit  
budoucí chod počasí”  
(Lorenz, 1963)

„ Předpověditelnost:  
Vyvolá mávnutí motýlích  
křídel nad Brazílií tornádo  
v Texasu...?“

(Lorenz, 1979)





## Počasí je „nepředpověditelné“

- „Motýlí efekt“ je dnes klíčovým konceptem v meteorologii;
- Malé změny v počátečních podmínkách mohou vést k velmi odlišným výsledkům (ALE NEMUSÍ)
- Limituje předpověditelnost počasí - nikdy nedosáhneme 100% přesnosti předpovědi
- Je příliš mnoho proměnných jejichž malá změna (chybné stanovení) se může (ale nemusí) projevit později.
- Velmi malé nepravidelnosti jsou zesíleny v průběhu času a mohou nakonec ovlivňovat vlastní chování systémů.

# Předpověditelnost

---

- Tedy nic není úplně předvídatelné.
- Dlouhodobá předpověď chování systémů je nemožná.
- Dokonce i velmi přesné stanovení parametrů chaotického systému je zbytečné pro odhad budoucího stavu systému...protože není přesné dostatečně





# Chování kterých dalších systémů lze objasnit teorií CHAOSU?

- Je to pouze teorie? NE! platí například např. pro:
  - Složené kyvadlo
  - Kapající kohoutek
  - Ekologické vztahy mezi populací predátora a kořisti
  - Epidemii spalniček
  - Nepravidelnosti v chemických reakcích
  - Nepravidelný srdeční rytmus kuřat.....



# Předpověď počasí

---

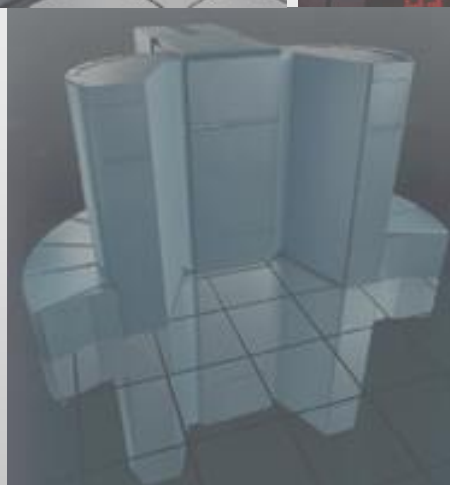
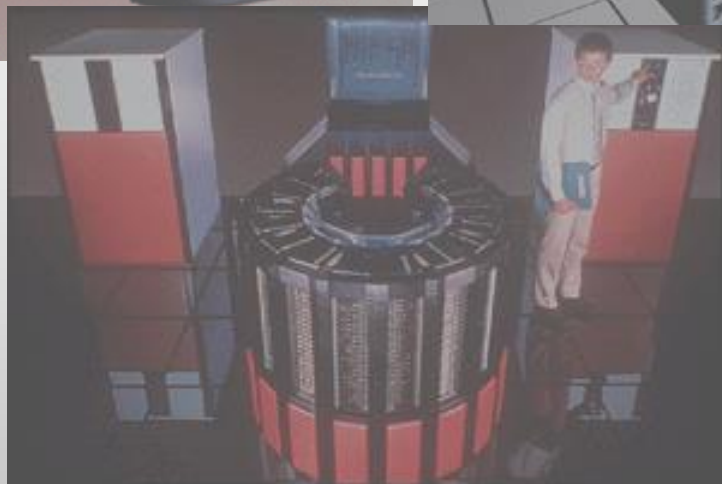
- I když chování atmosféry nelze bezezbytku předvídat ----  
---- přesto předpovídáme počasí - nebo se o to pokoušíme - JAK?



# Numerická předpověď počasí

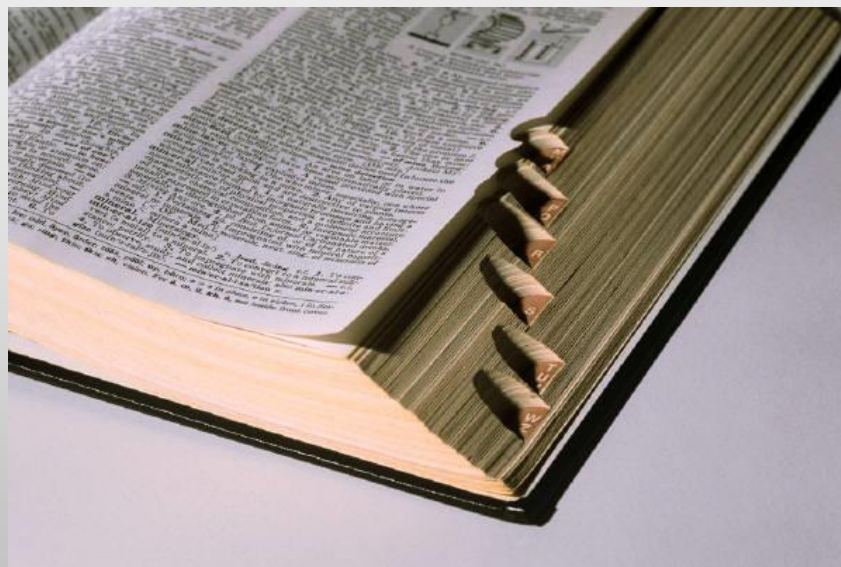
**Předpověď** polí meteorologických prvků, která je výsledkem časové integrace prognostických rovnic některého fyzikálního modelu atmosféry, prováděné na samočinných počítačích metodami numerické matematiky...

*Kolektiv: Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Praha, Academia 1993*



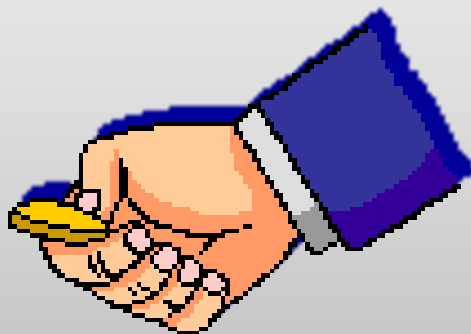
# Podle slovníku spisovné češtiny...

- **Předpověď**: pronesená domněnka nebo názor, že se něco stane. (obvykle na základě znalosti okolností).



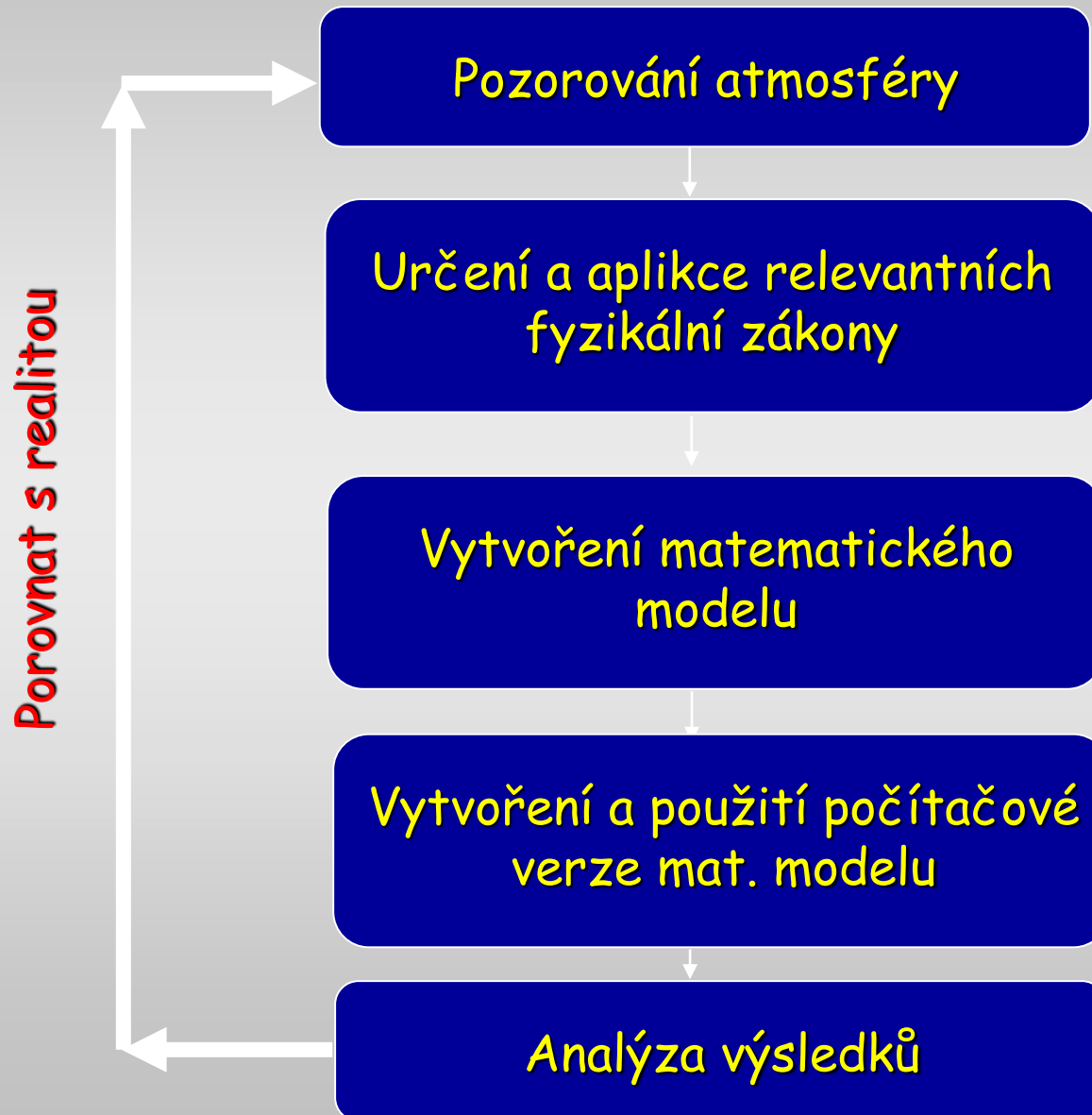
# Předpověď' podle meteorologů...

- **předpověď'**: pronesená domněnka, že se něco stane, která pokud možno neobsahuje zjevnou lež. Mince použitá k získání předpovědi musí být pečlivě střežena před dotěrnými zvědavci.

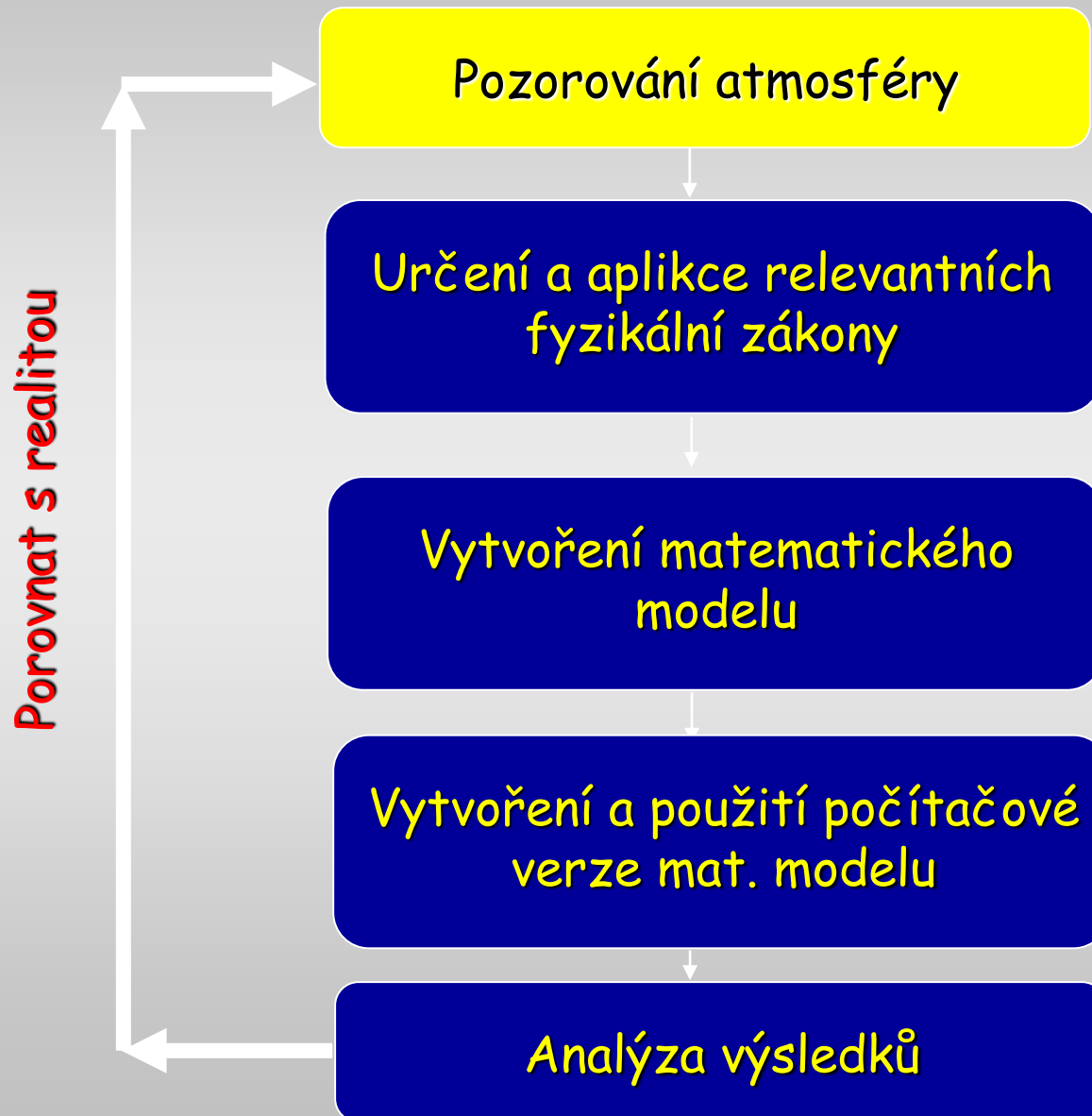




# Příprava předpovědi



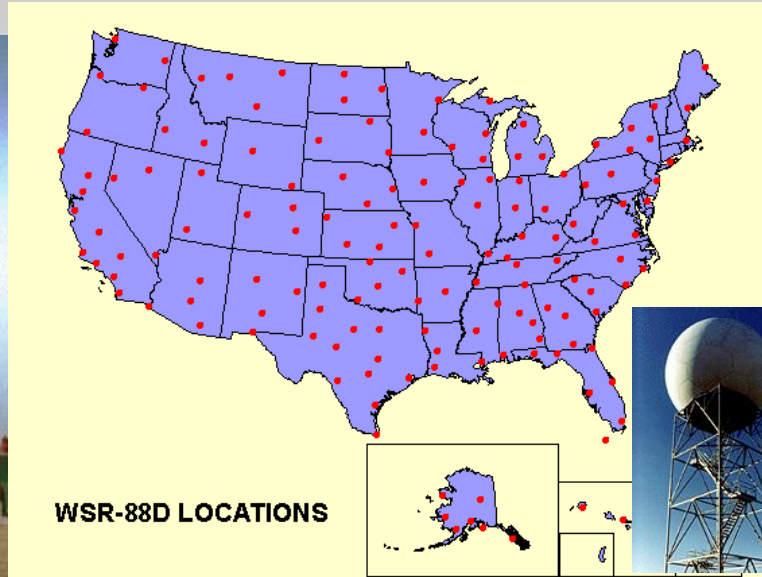
# Příprava předpovědi



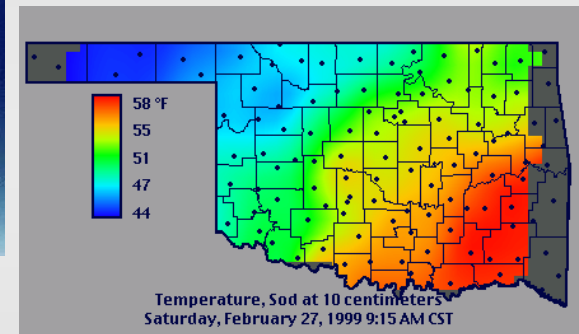
# Pozorování atmosféry



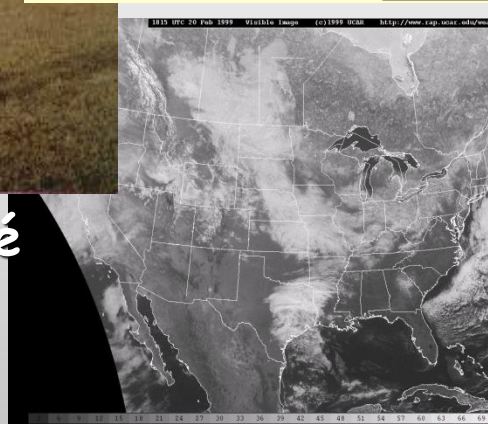
Meteorologické balóny



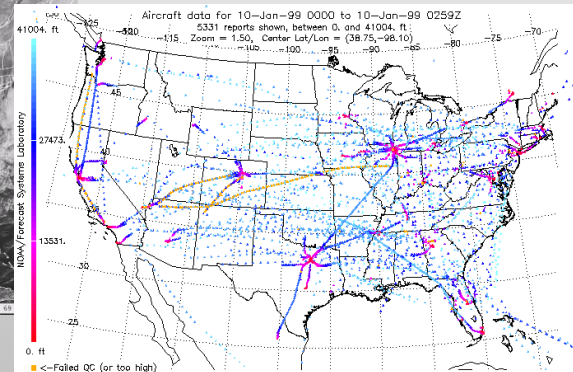
Dopplerův Radar



Automatické stanice



Satelite



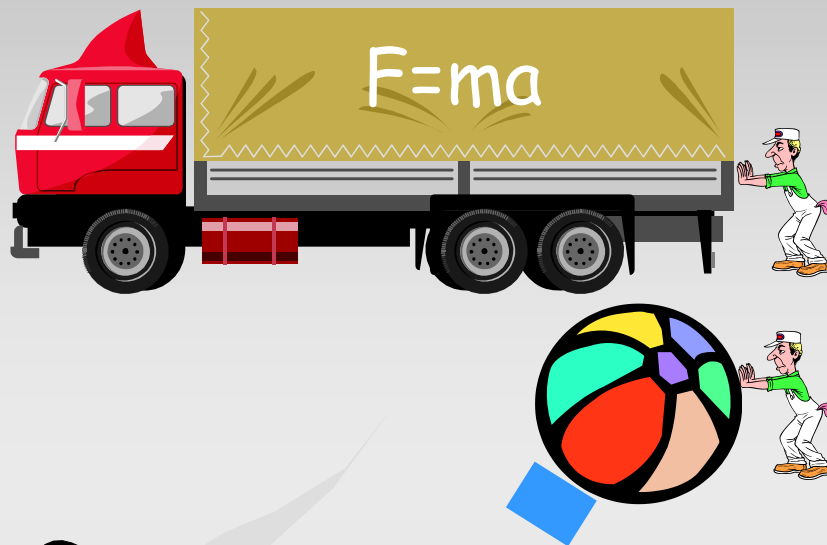
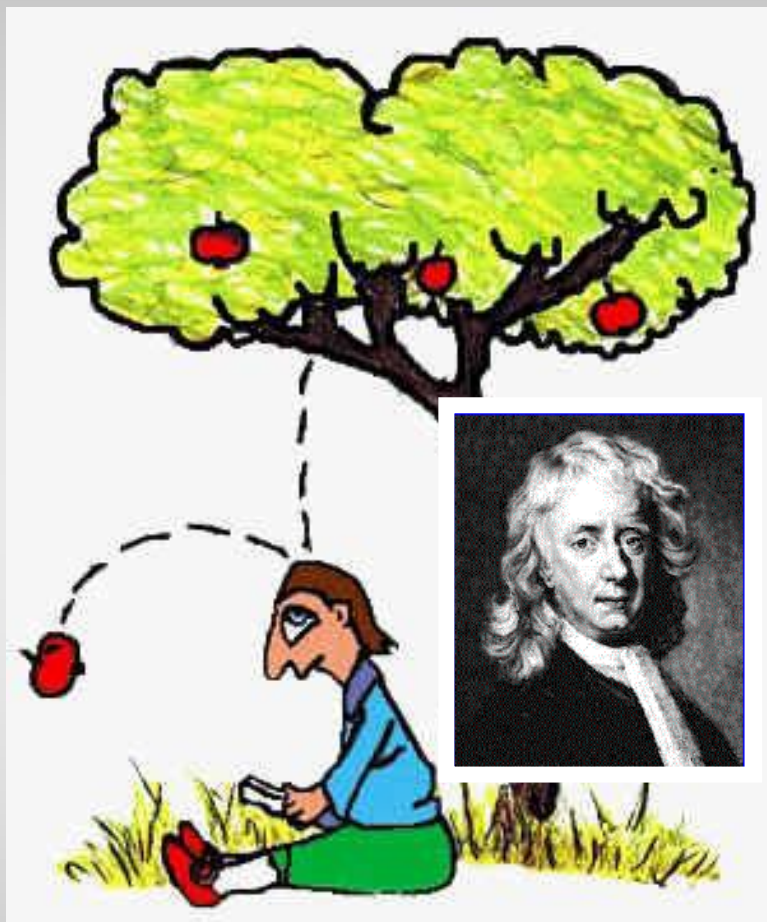
Komerční letadla



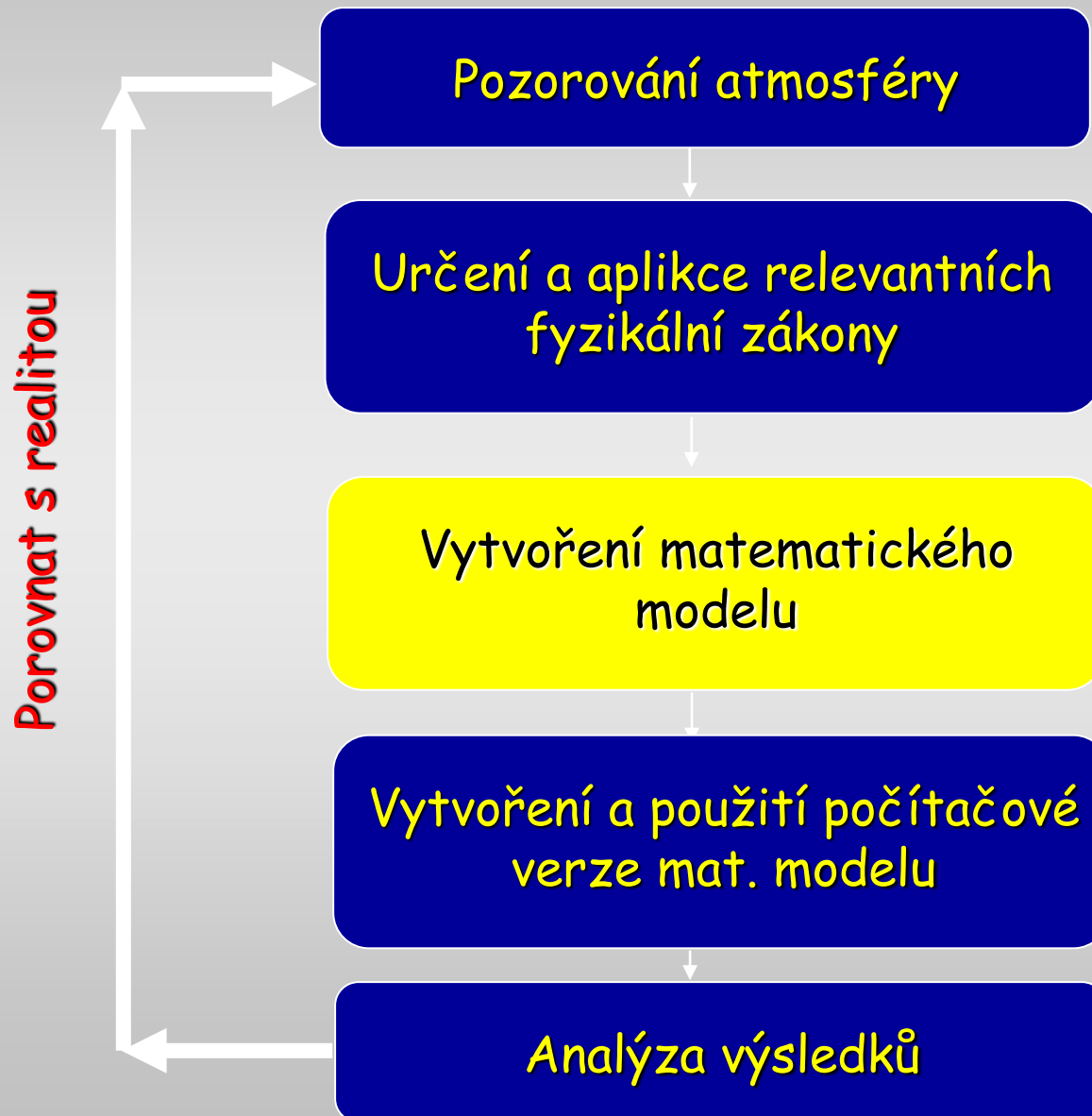
# Příprava předpovědi



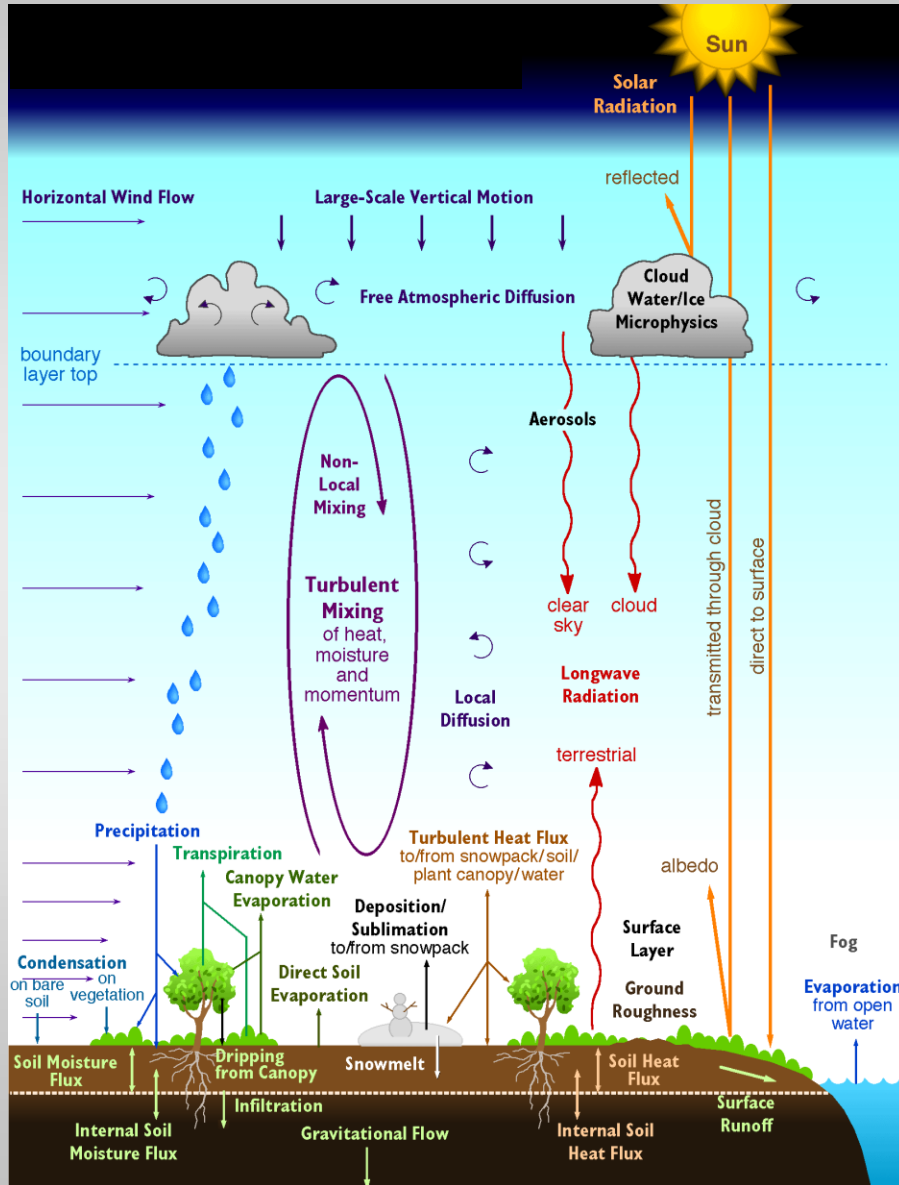
# Identifikace fyzikálních zákonů



# Příprava předpovědi



# Vytvoření matematického modelu



$$\frac{\partial u^*}{\partial t} = - \left[ u^* \frac{\partial u}{\partial \xi} + v^* \frac{\partial u}{\partial \eta} + W^{*c} \frac{\partial u}{\partial \zeta} \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left\{ J_3 (p' - \alpha \text{Div}^*) \right\} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ J_1 (p' - \alpha \text{Div}^*) \right\} \right] + \left[ \rho^* f v - \rho^{*c} f w \right] + \sqrt{G} D_u,$$

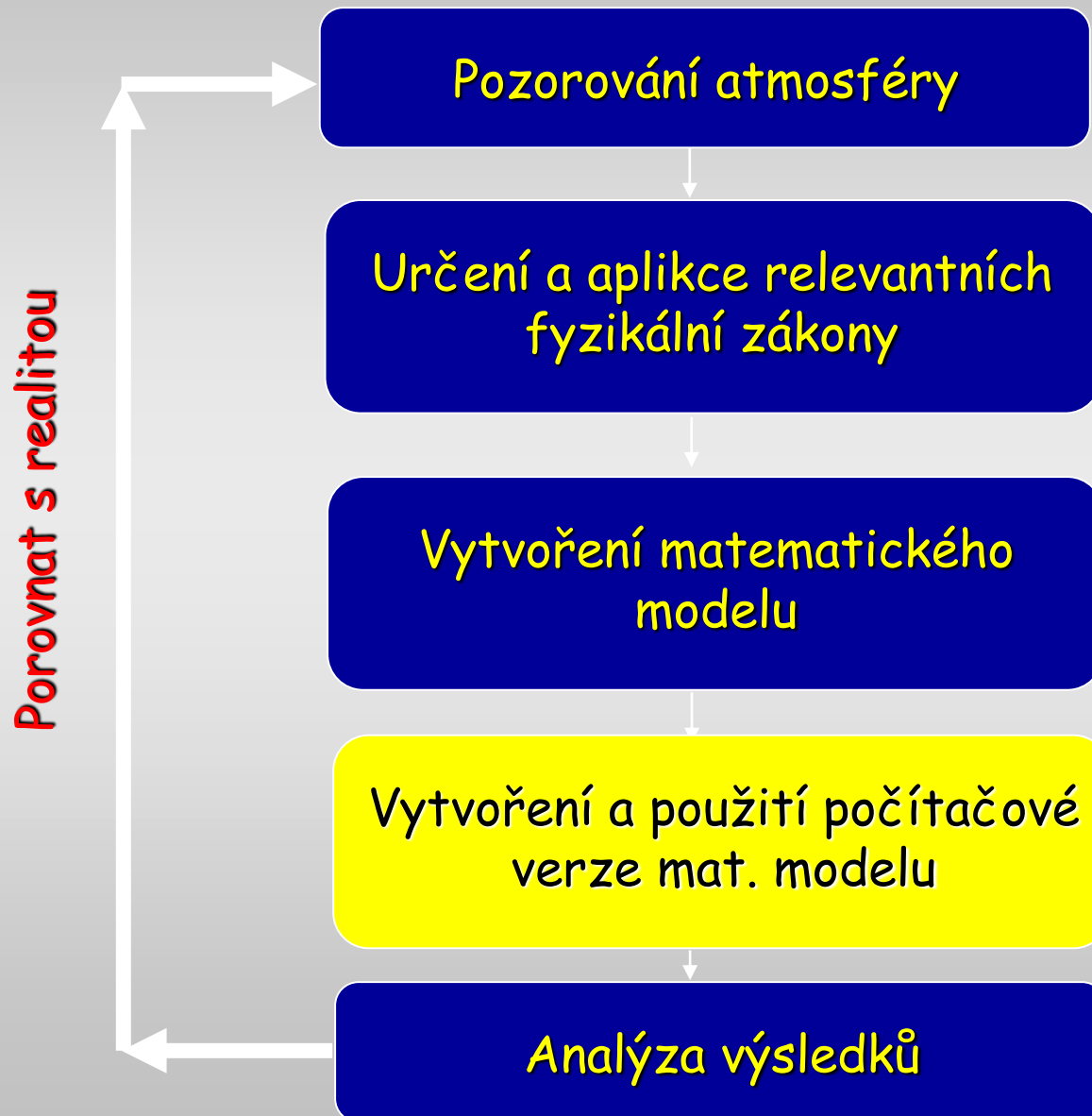
$$\frac{\partial v^*}{\partial t} = - \left[ u^* \frac{\partial v}{\partial \xi} + v^* \frac{\partial v}{\partial \eta} + W^{*c} \frac{\partial v}{\partial \zeta} \right] - \left[ \frac{\partial}{\partial \eta} \left\{ J_3 (p' - \alpha \text{Div}^*) \right\} + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left\{ J_2 (p' - \alpha \text{Div}^*) \right\} \right] - \rho^* f u + \sqrt{G} D_v,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho^* w) = - \left[ u^* \frac{\partial w}{\partial \xi} + v^* \frac{\partial w}{\partial \eta} + W^{*c} \frac{\partial w}{\partial \zeta} \right] - \frac{\partial}{\partial \zeta} (p' - \alpha \text{Div}^*) + \rho^* B + \rho^{*c} f u + \sqrt{G} D_w,$$

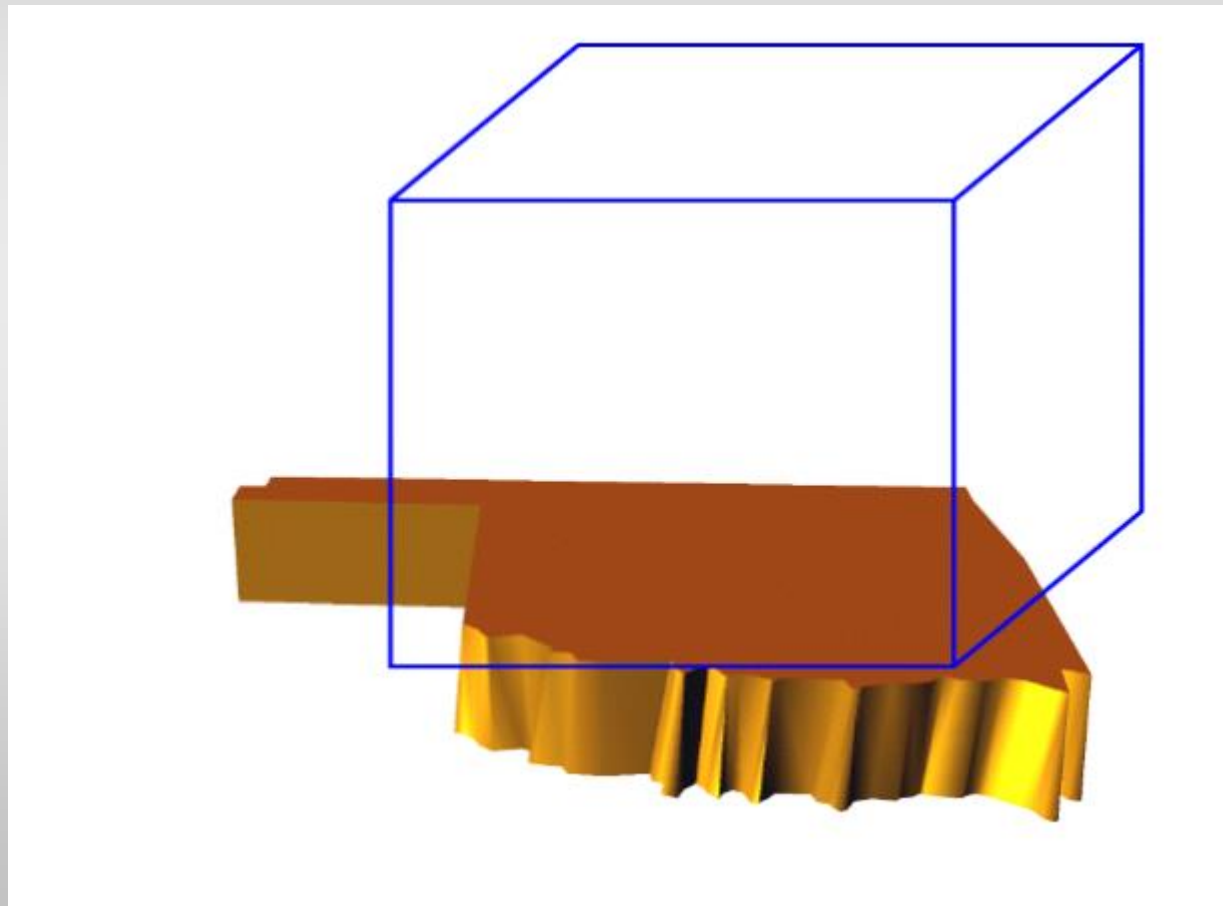
$$\frac{\partial}{\partial t} (J_3 p') = - \left[ (J_3 u) \frac{\partial p'}{\partial \xi} + (J_3 v) \frac{\partial p'}{\partial \eta} + (J_3 W^c) \frac{\partial p'}{\partial \zeta} \right] + J_3 \bar{\rho} g w - \bar{\rho} c_s^2 \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (J_3 u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (J_3 v) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (J_3 W^c) \right] + J_3 \bar{\rho} c_s^2 \left[ \frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{E} \frac{dE}{dt} \right],$$



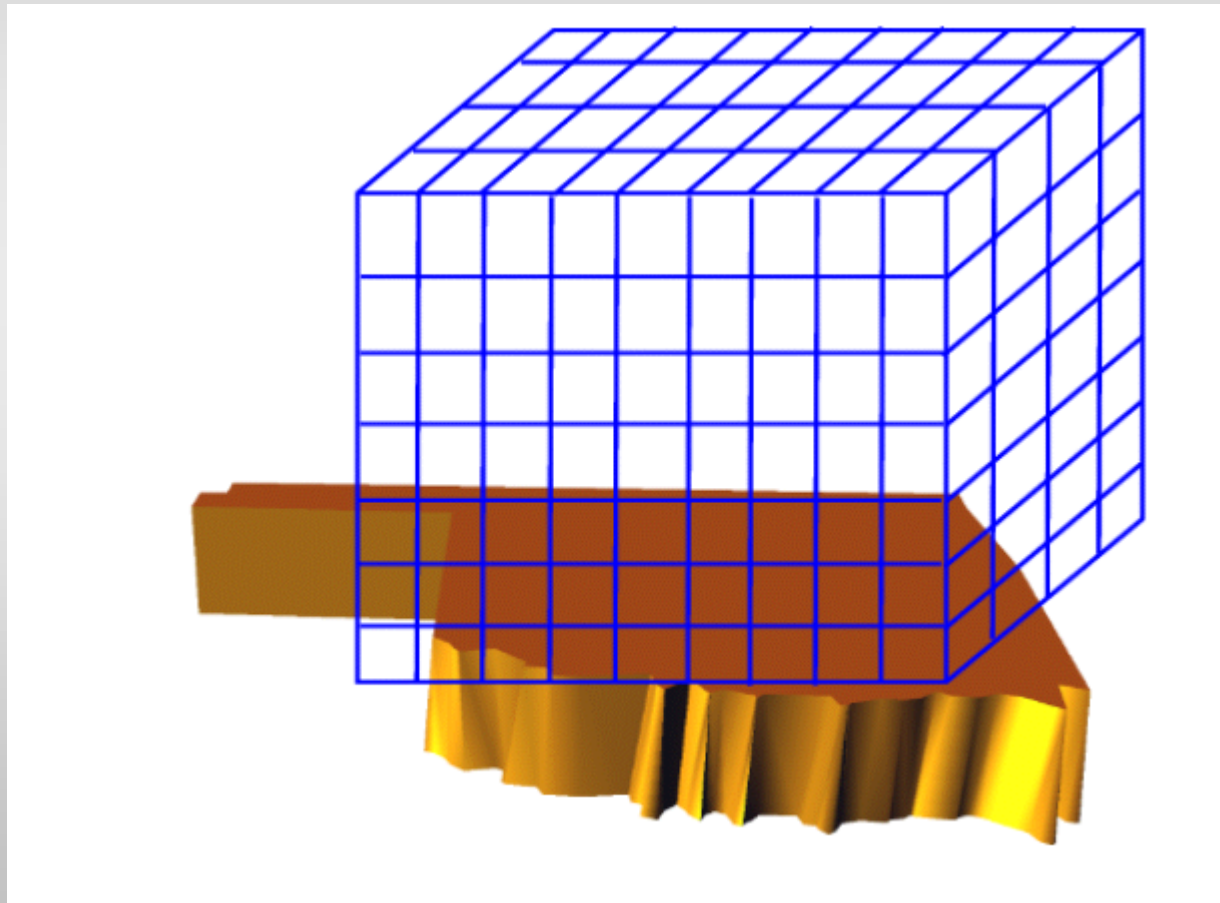
# Příprava předpovědi



# Vytvoření počítačového modelu



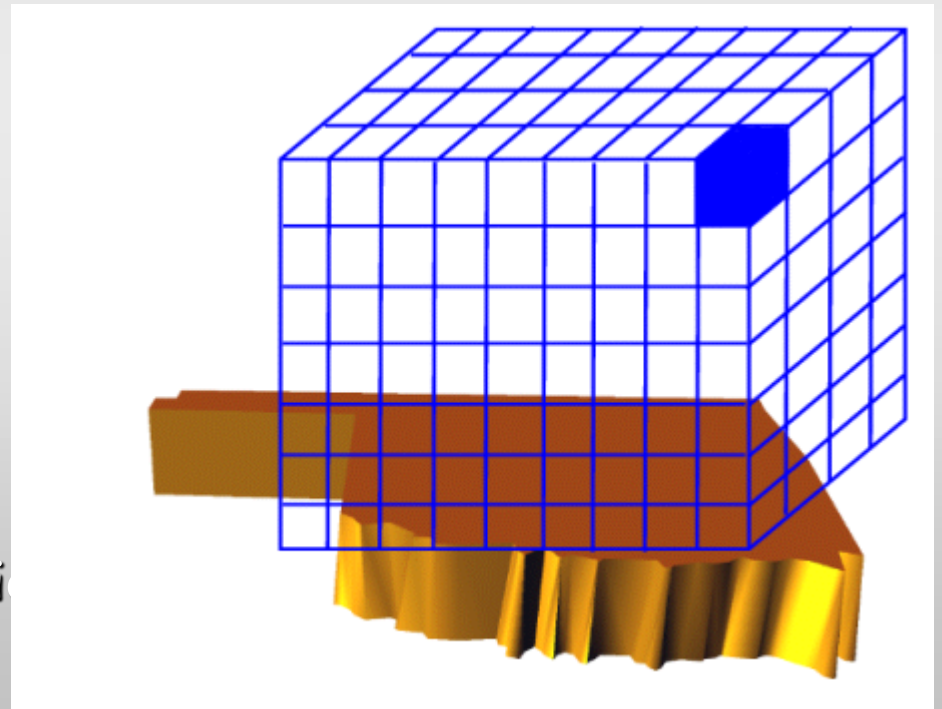
# Vytvoření počítačového modelu



# Provedení výpočtů v počítačovém modelu

- Vyřešení řady nelineárních diferenciálních rovnic

- Vítr východ/západ
- Vítr sever/jih
- Vertikální proudění
- Teplota
- Napětí vodních par
- Obsah vody v oblacích
- Množství srážek
- Obsah ledu v oblacích
- Formování krupek a krup
- Povrchová teplota
- Vlhkost povrchu
- Teplota půdy
- Vlhkost půdy
- Turbulence menší než grid





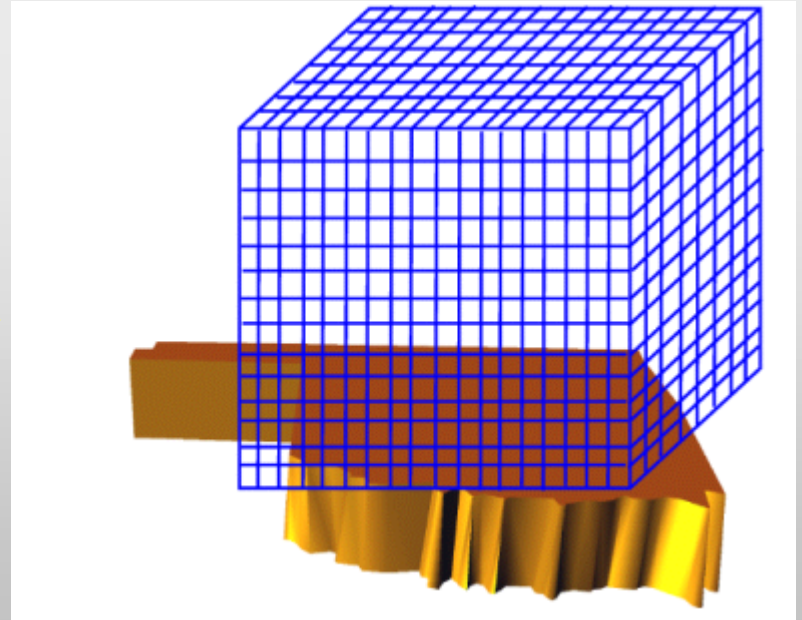
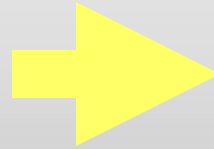
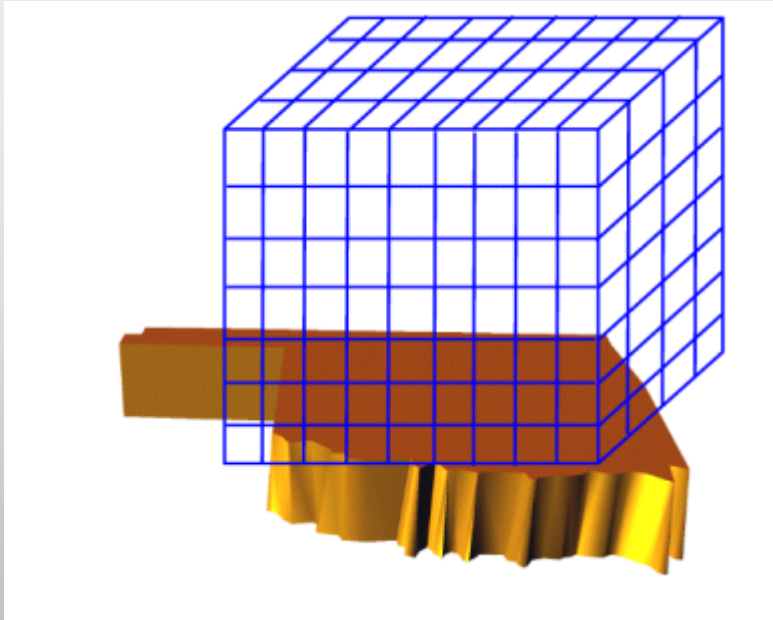
# Provedení výpočtů

- Pro jednu předpověď je třeba vyřešit miliardy početních operací
- Vyžaduje nejvýkonnější počítače na světě schopné biliónů operací za vteřinu.

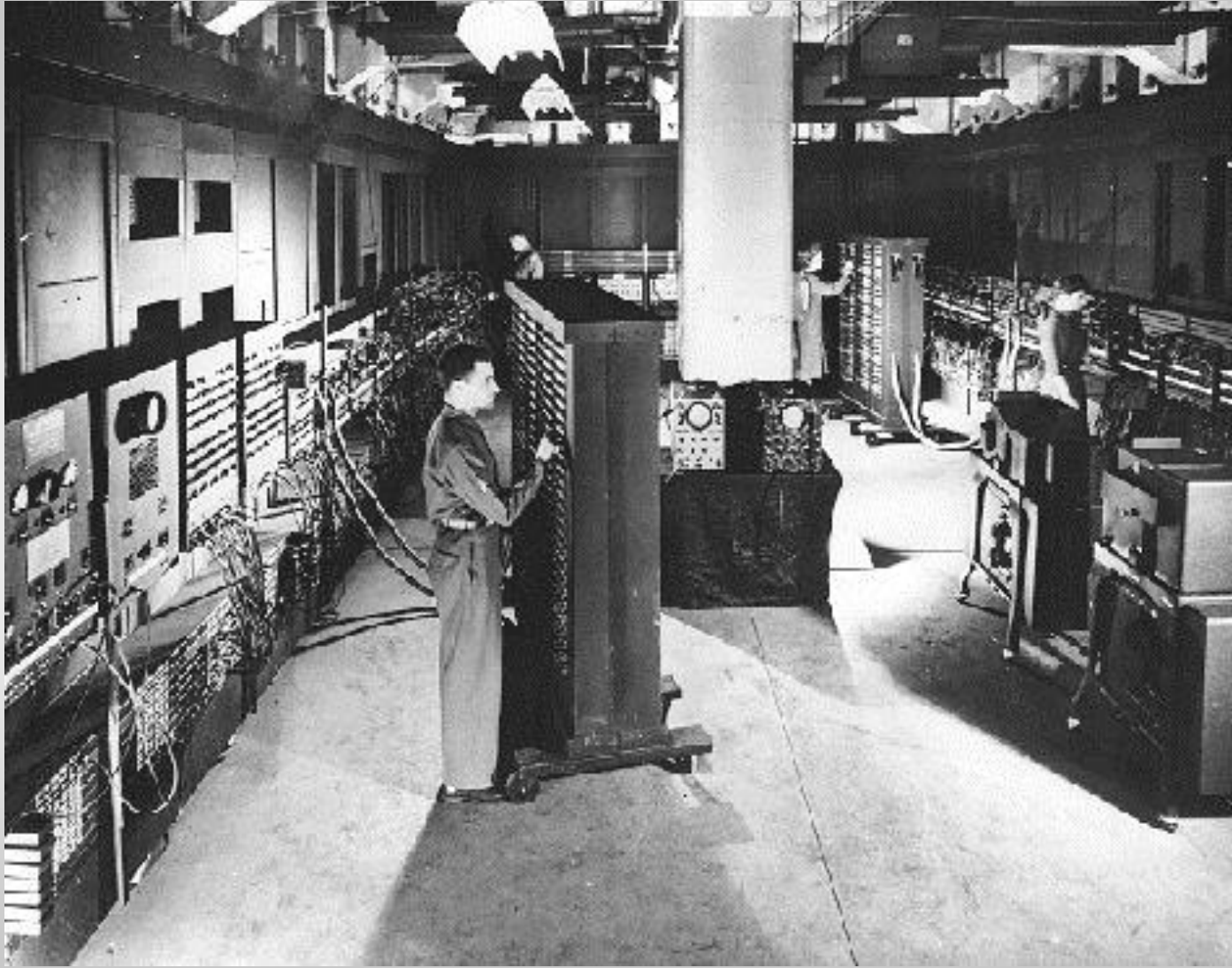


# A ještě výkonější počítače....

- Větší rozlišení umožňuje přesnější výpočty
- Ale vyžaduje více počítačového výkonu
  - zdvojnásobení počtu gridů ve 3-D znamená 16x výkonější počítač



# Počátky počítačových předpovědí ENIAC

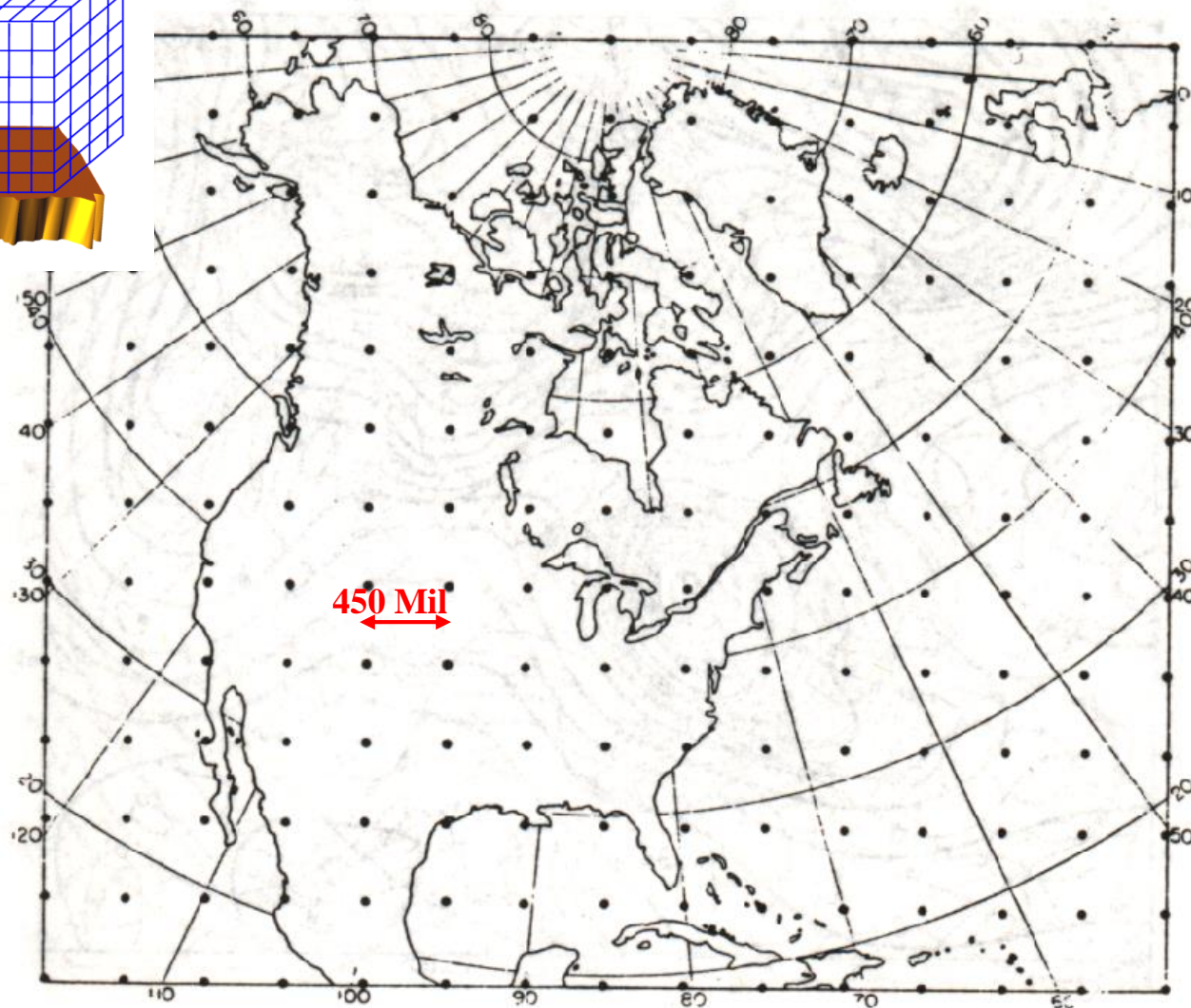
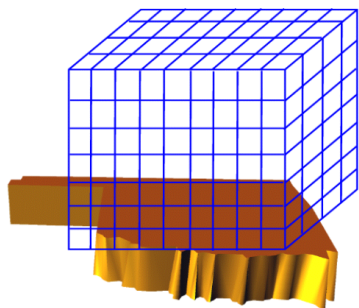


# ENIAC Versus Dnes

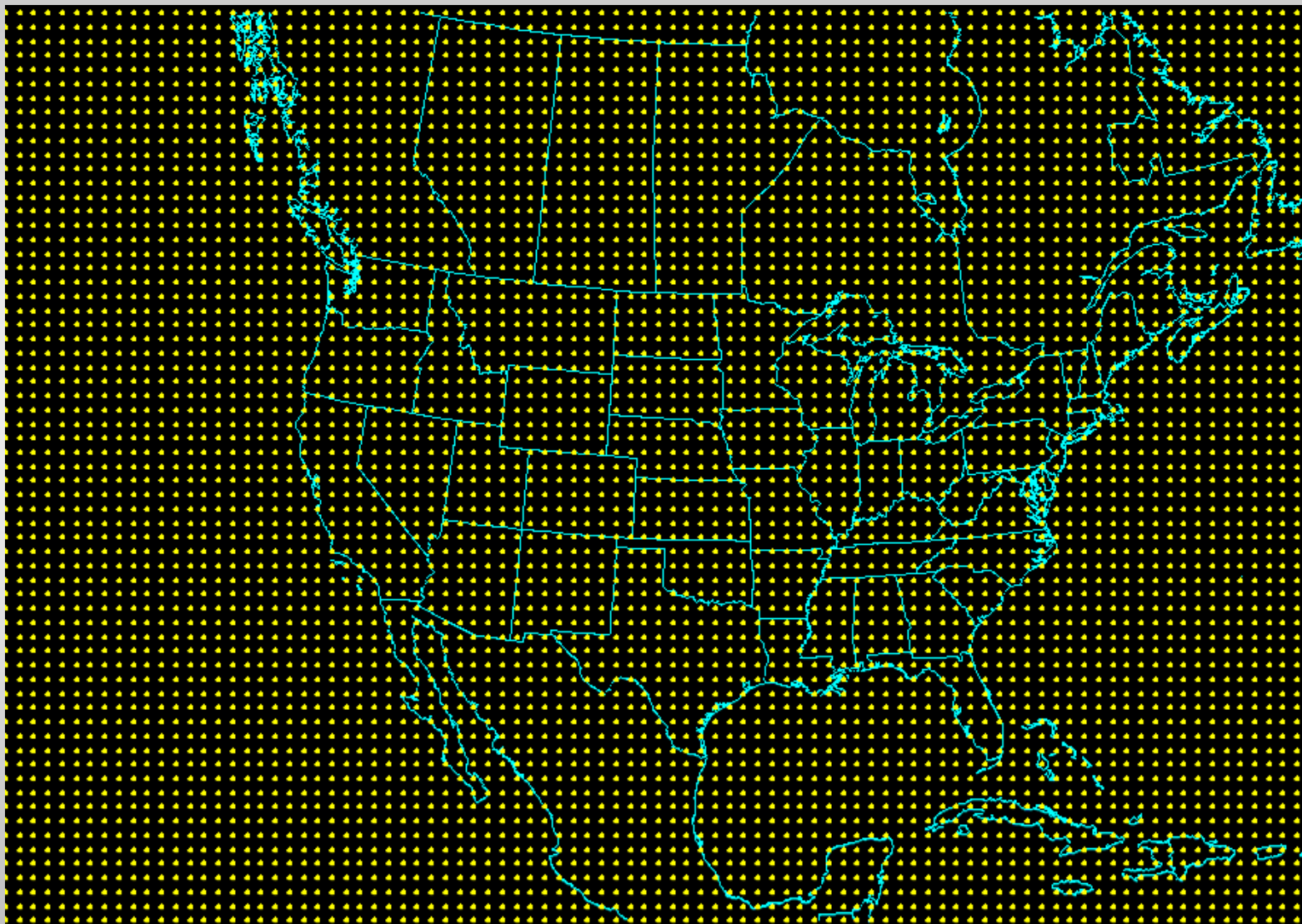
- **Hmotnost 30 tun**
- **18,000 vakuových trubic, 1,500 relé tisíce odporů a kondenzátorů**
- **maximální rychlost 5000 součtů/s a 300 násobení/s**
- **1.2 GHz Pentium IV procesor je 500 000x rychlejší než ENIAC**
- **PC s 1 GB RAM je schopen uložit 5 milionkrát více dat v RAM než ENIAC**



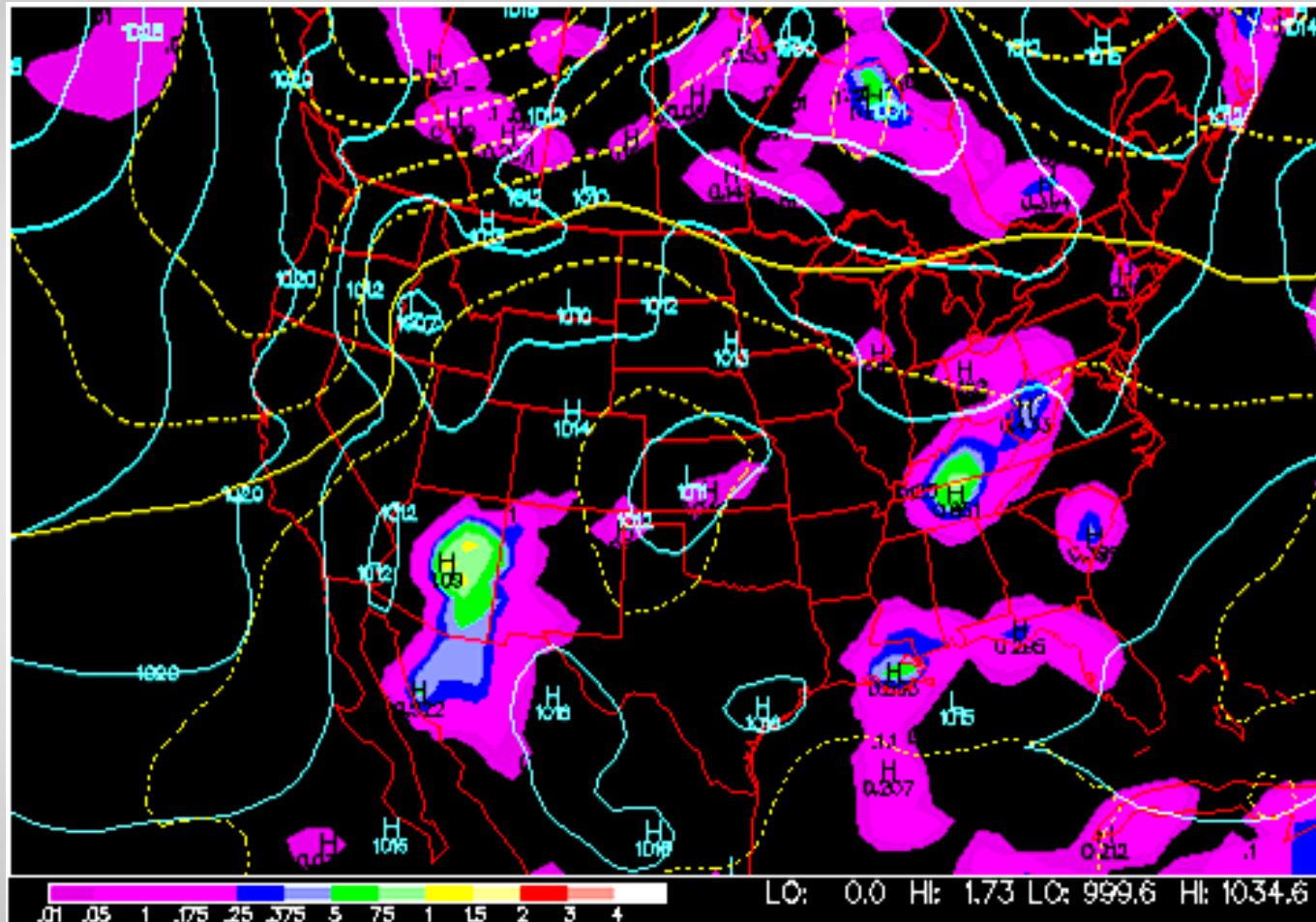
# 1950: První model pro předpověď počasí



# Dnešní modely

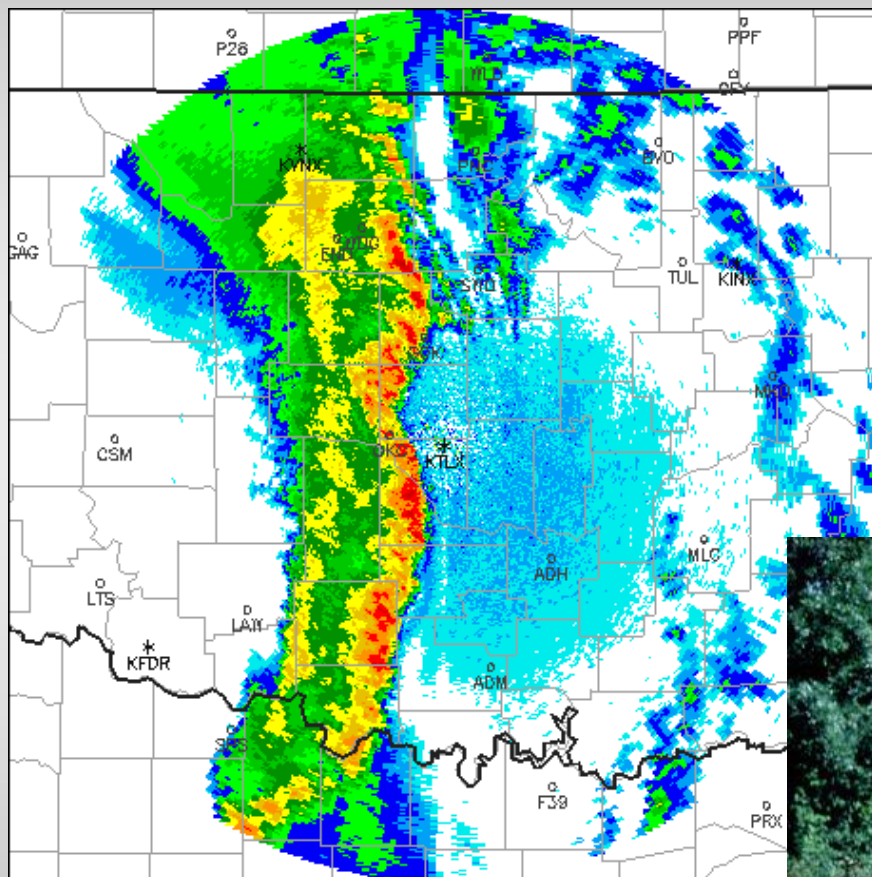


# Typická předpověď současného modelu...



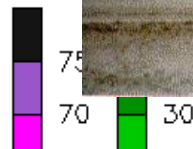


# Problém - příliš hrubé rozlišení?



K  
Oklahom  
Sun 15  
02:2

Refle  
Tilt 1  
Preci  
Max:

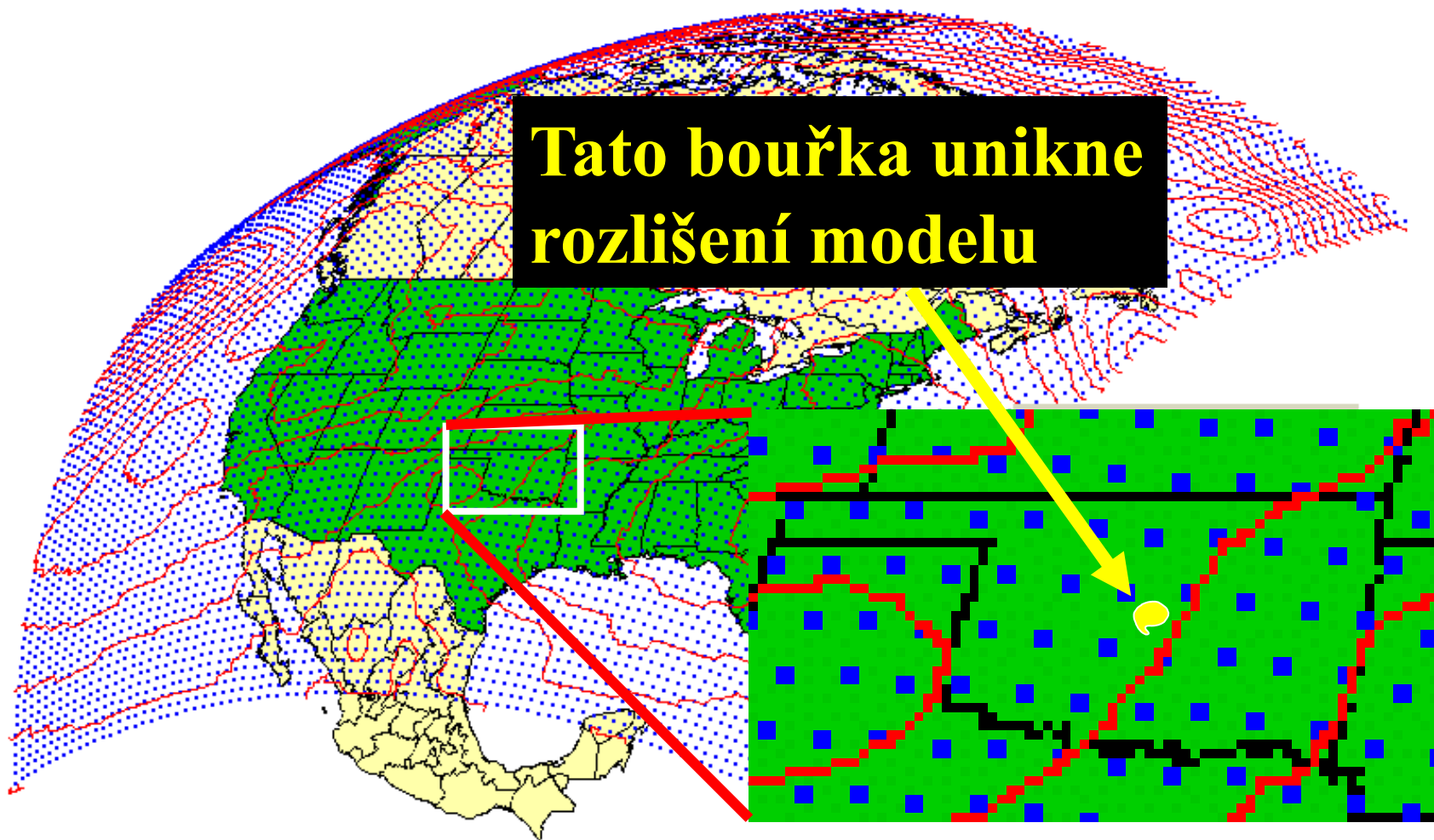


© 1993 Roger Edwards

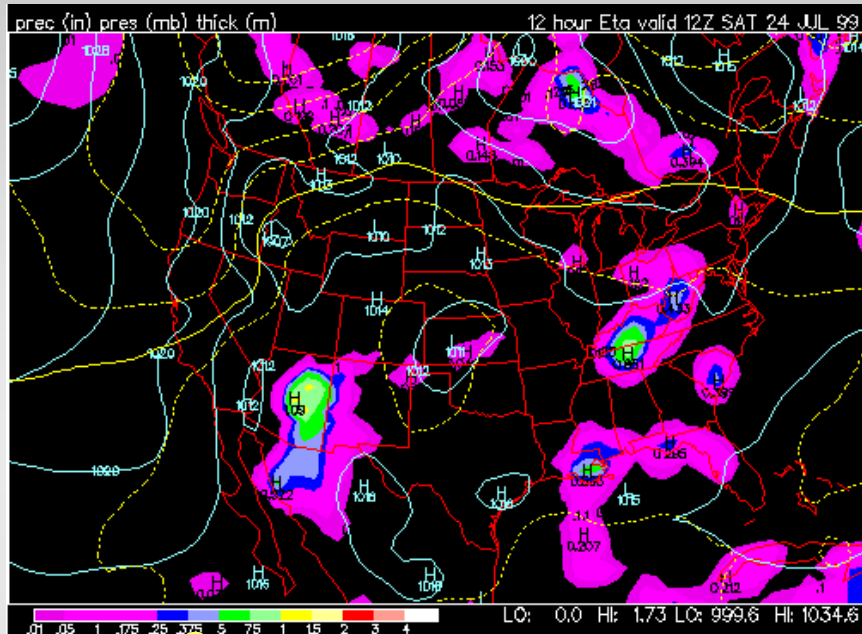
Droegemeier, 2005



**Tato bouřka unikne  
rozlišení modelu**

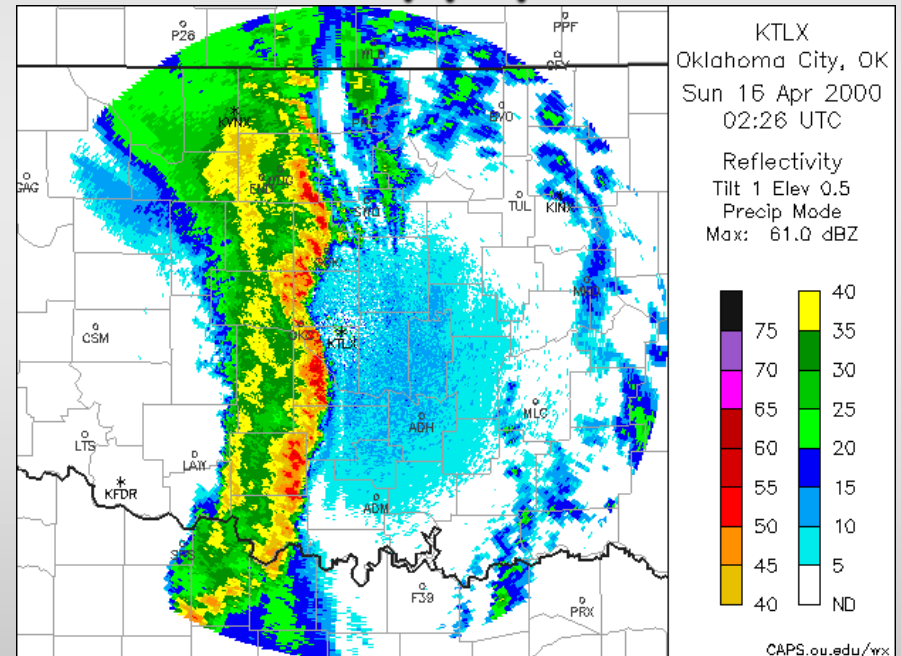


# Základní otázka:



Může počítačový model...

... přesně předvídat tento typ počasí?



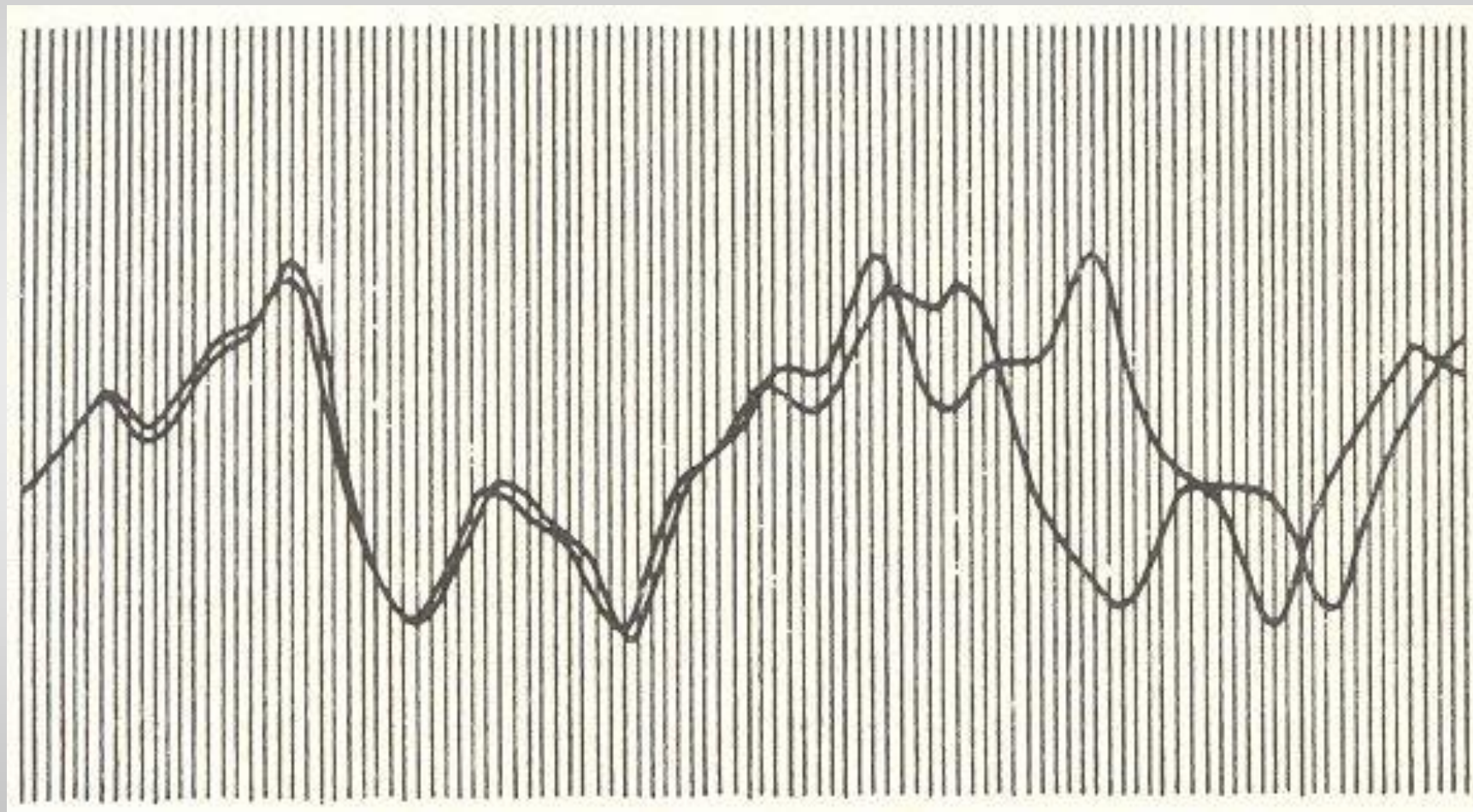


Jak lze vzít poznatky teorie Chaosu v  
úvahu při předpovědi počasí?

Lorenzův (1963)  
attractor, prototyp  
modelu CHAOSu.....



Nečekat nemožné....

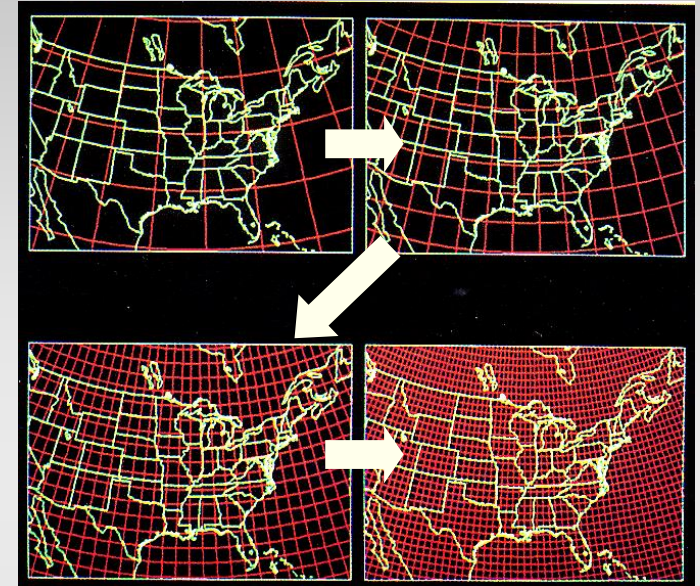


1. Zlepšit rozlišovací schopnost modelů



# Zlepšit rozlišovací schopnost modelů

- U globálních modelů roste přesnost se zvyšujícím se rozlišením
  - toto zlepšení je omezené
  - rozlišení lepší než 10 km už nehraje roli
- Dalším krokem bude zařazení simulace lokálních (ale mimořádně energeticky bohatých) advektivních útvarů tj. bouřek ve 3D

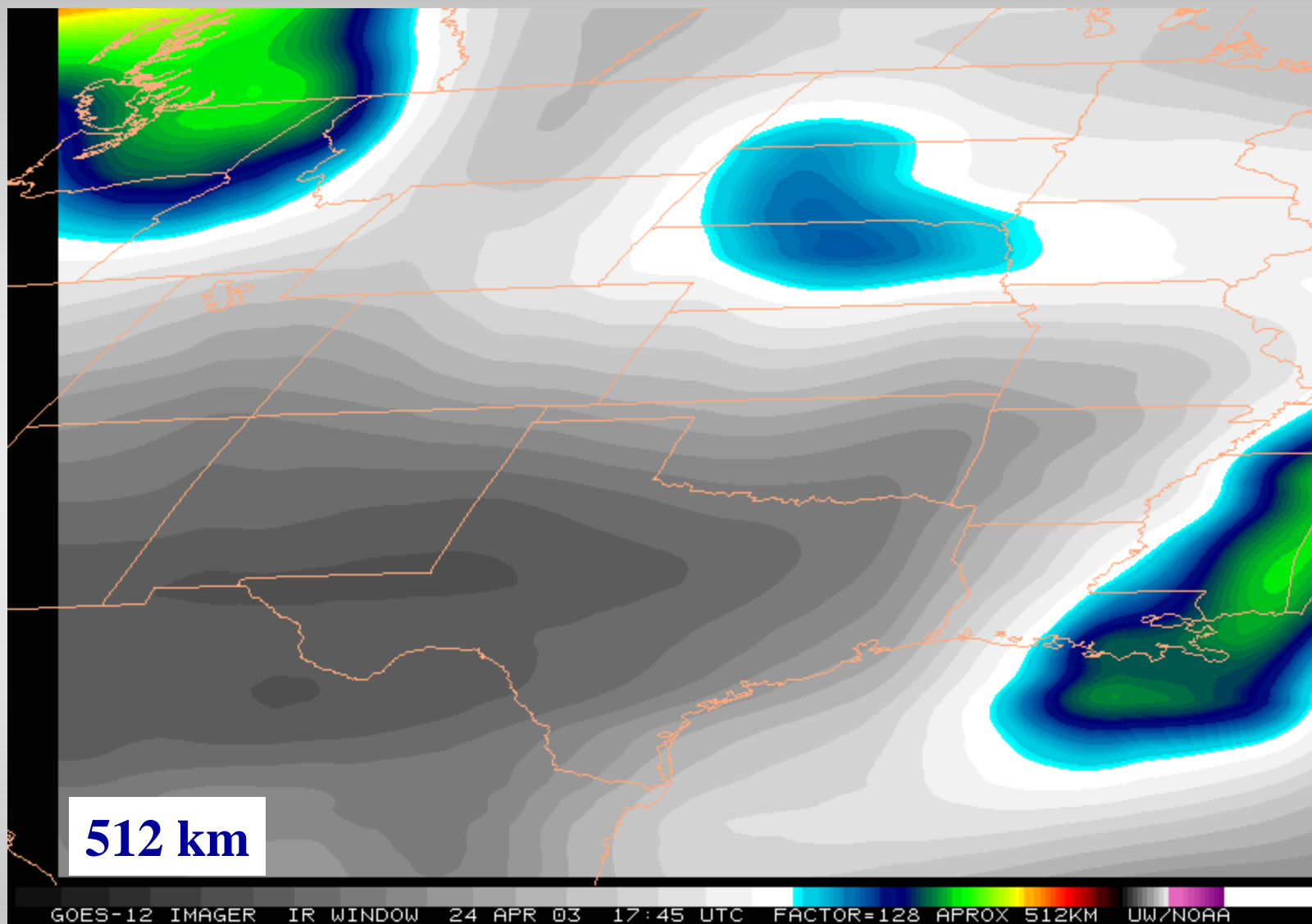


~~60 km → 30 km~~

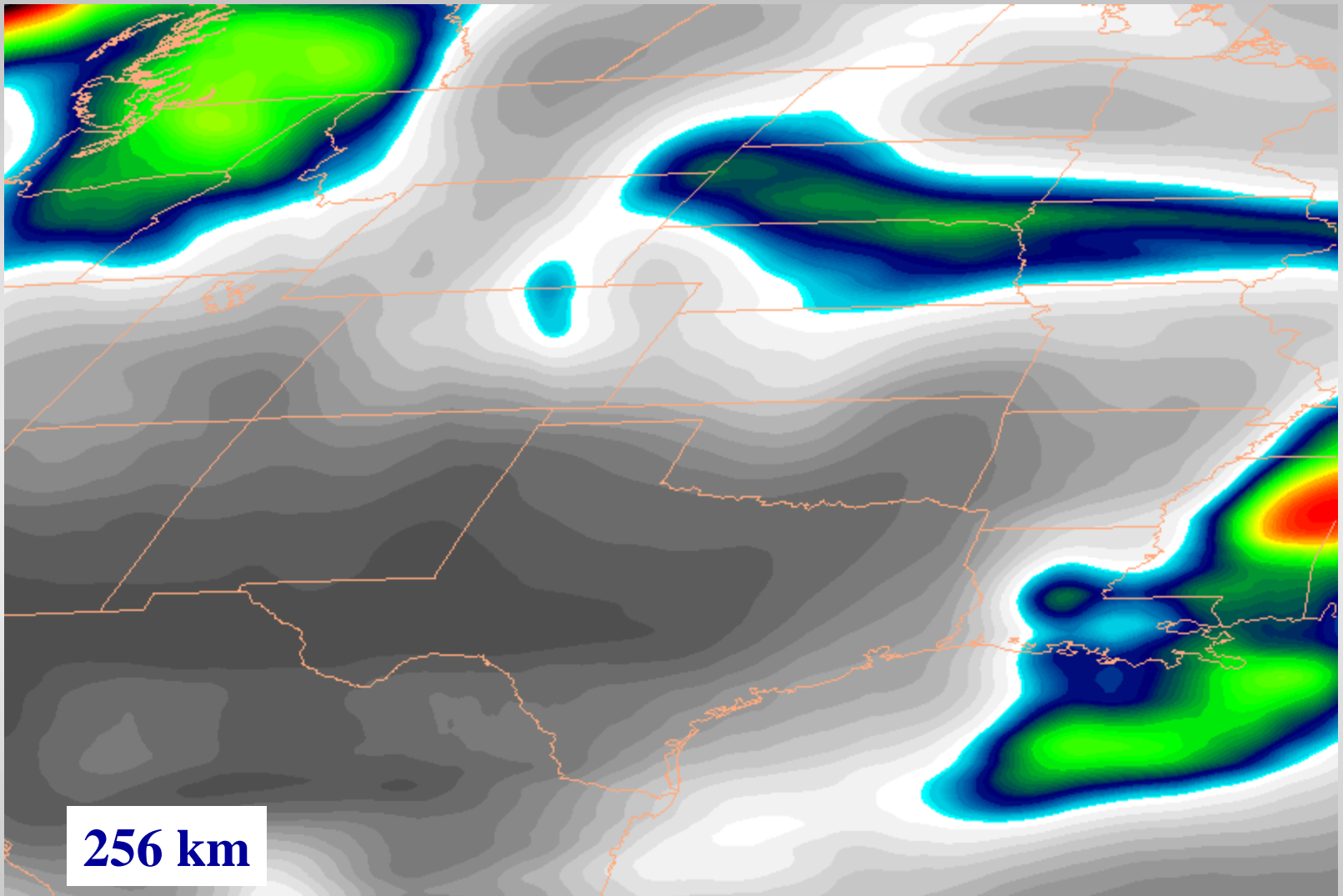
~~30 km → 10 km~~

10 km → 1 km

# Proč zlepšit rozlišení?.....

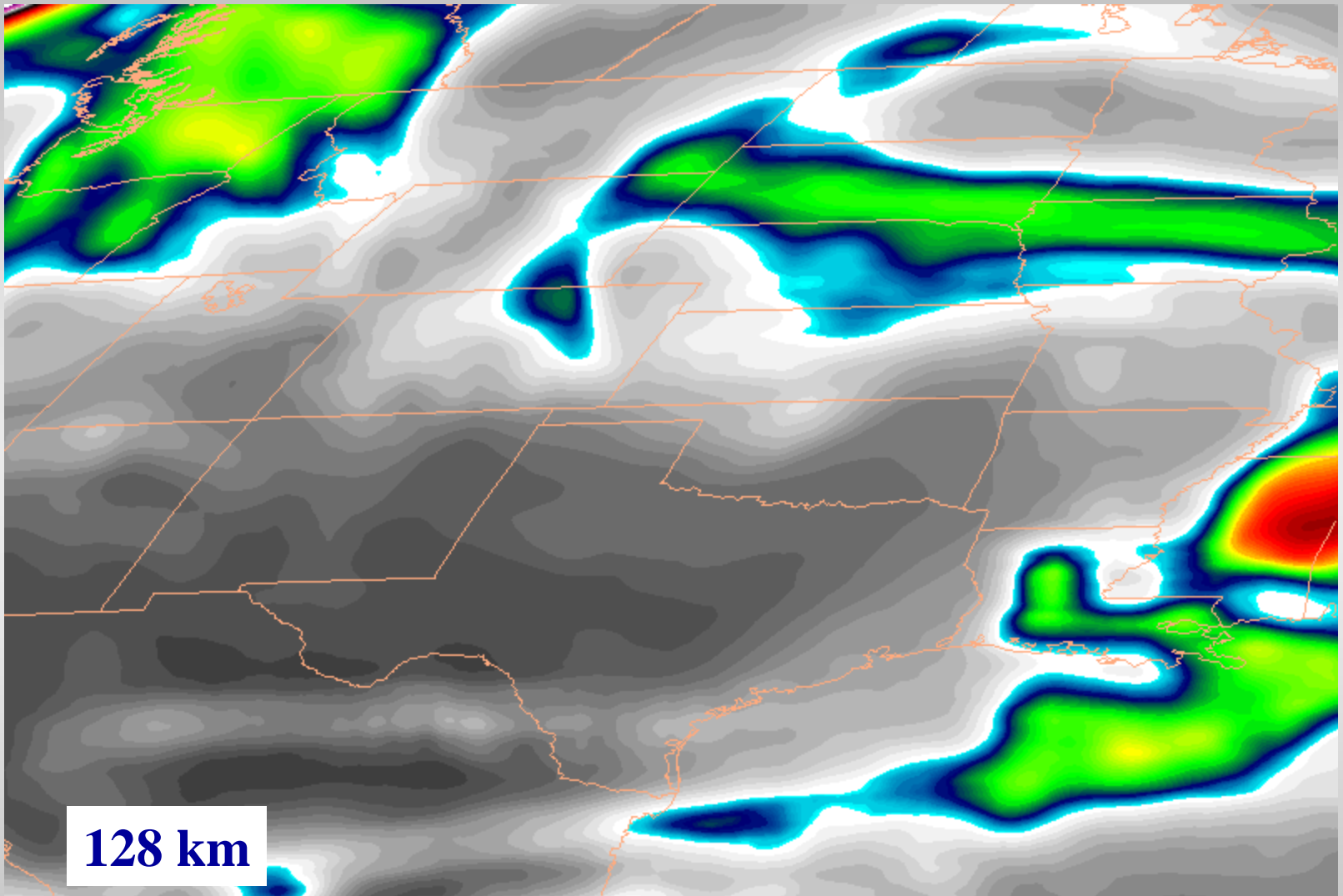


Courtesy NCAR



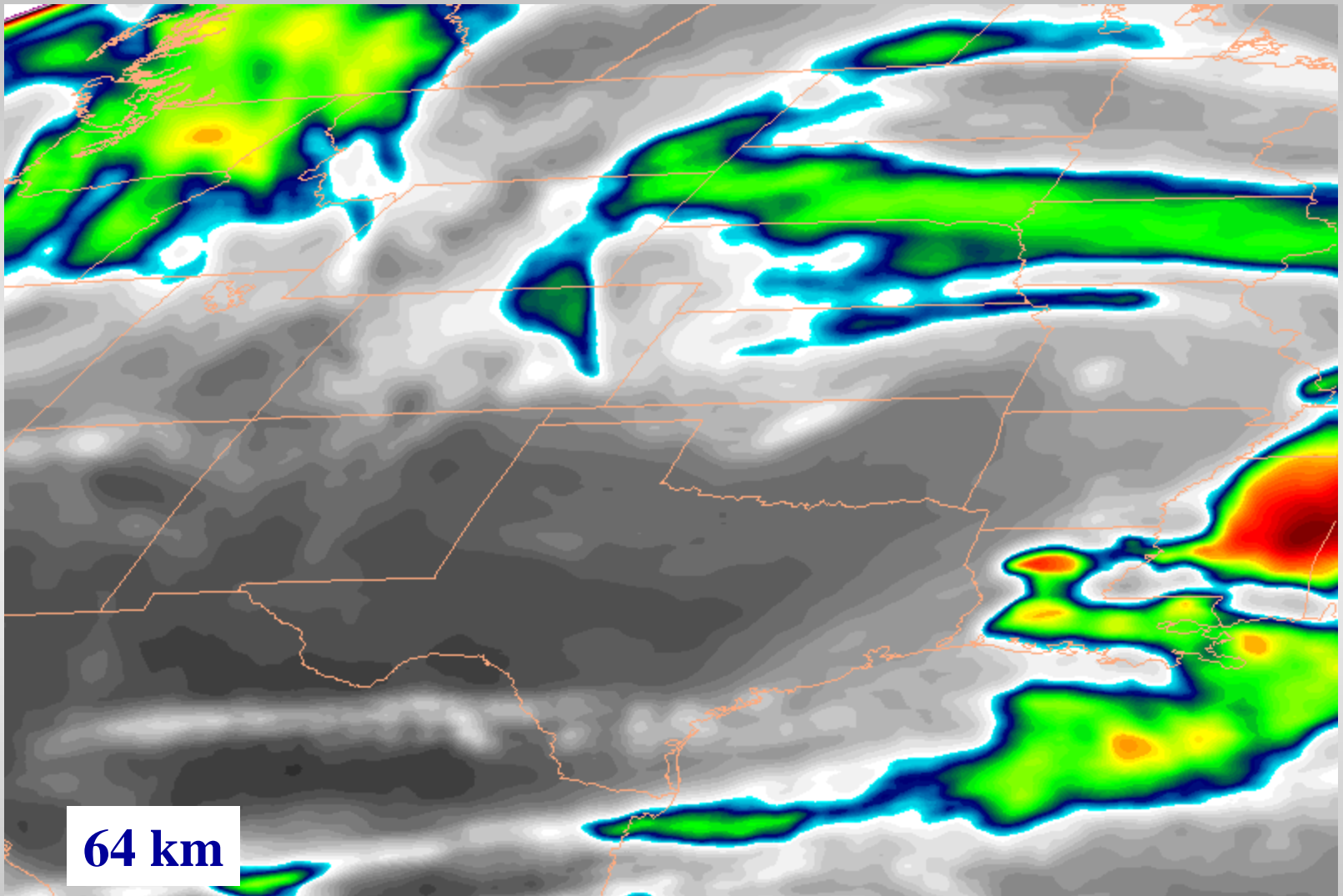
256 km

GOES-12 IMAGER IR WINDOW 24 APR 03 17:45 UTC FACTOR=64 APROX 256KM UW/NOAA



128 km

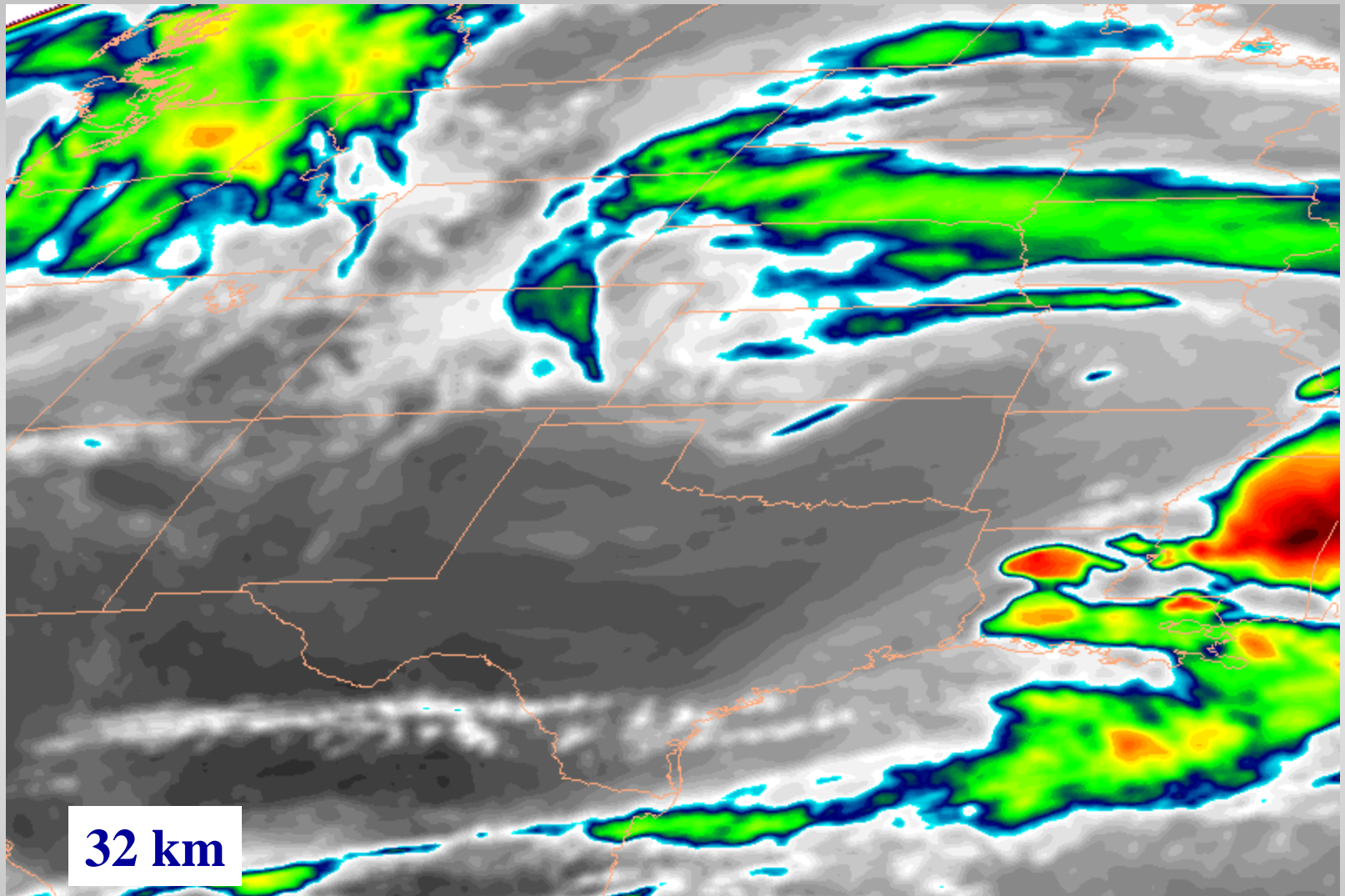
GOES-12 IMAGER IR WINDOW 24 APR 03 17:45 UTC FACTOR=32 APROX 128KM UW/NOAA



64 km

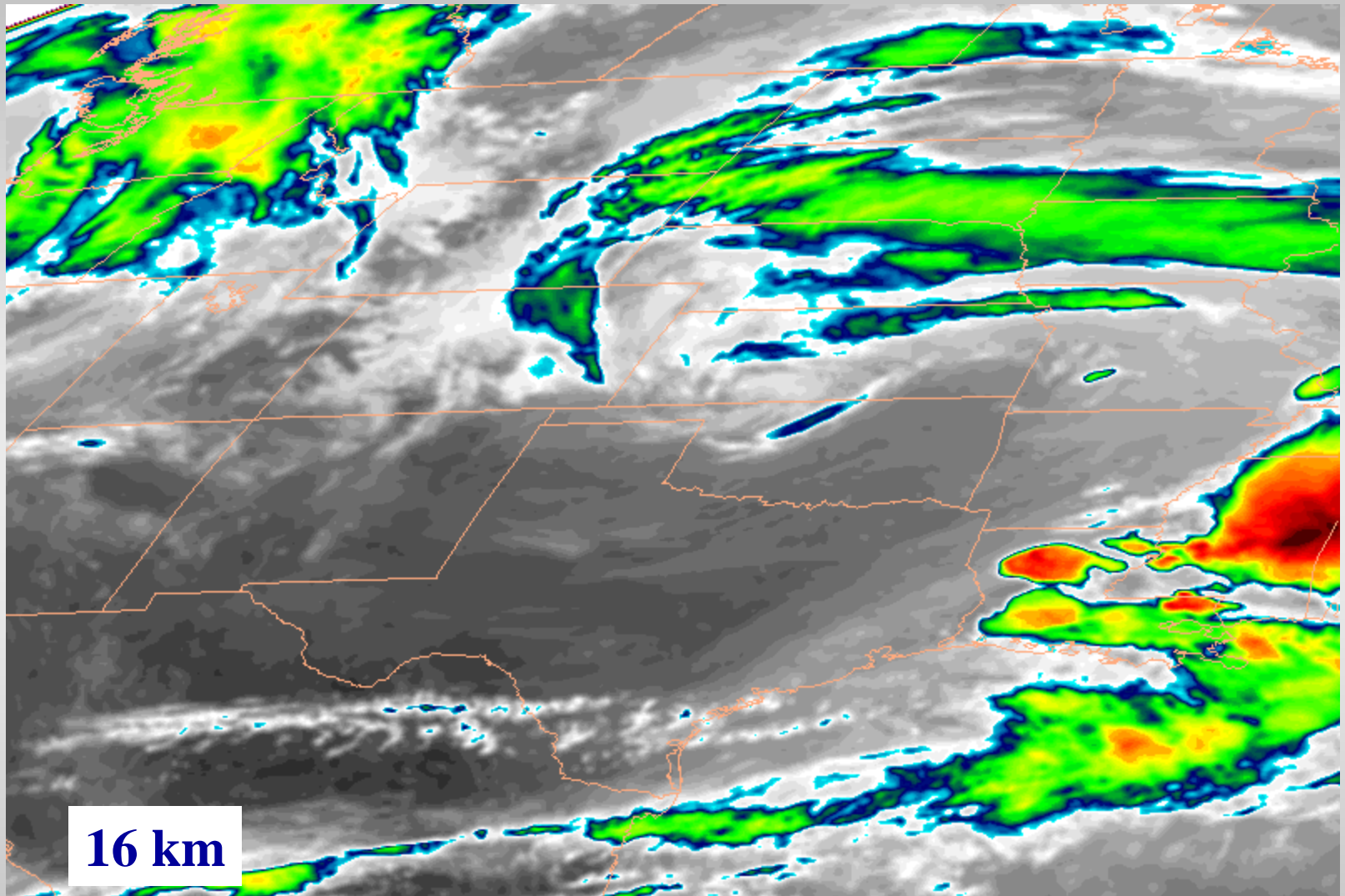
GOES-12 IMAGER IR WINDOW 24 APR 03 17:45 UTC FACTOR=16 APROX 64KM UW/NOAA



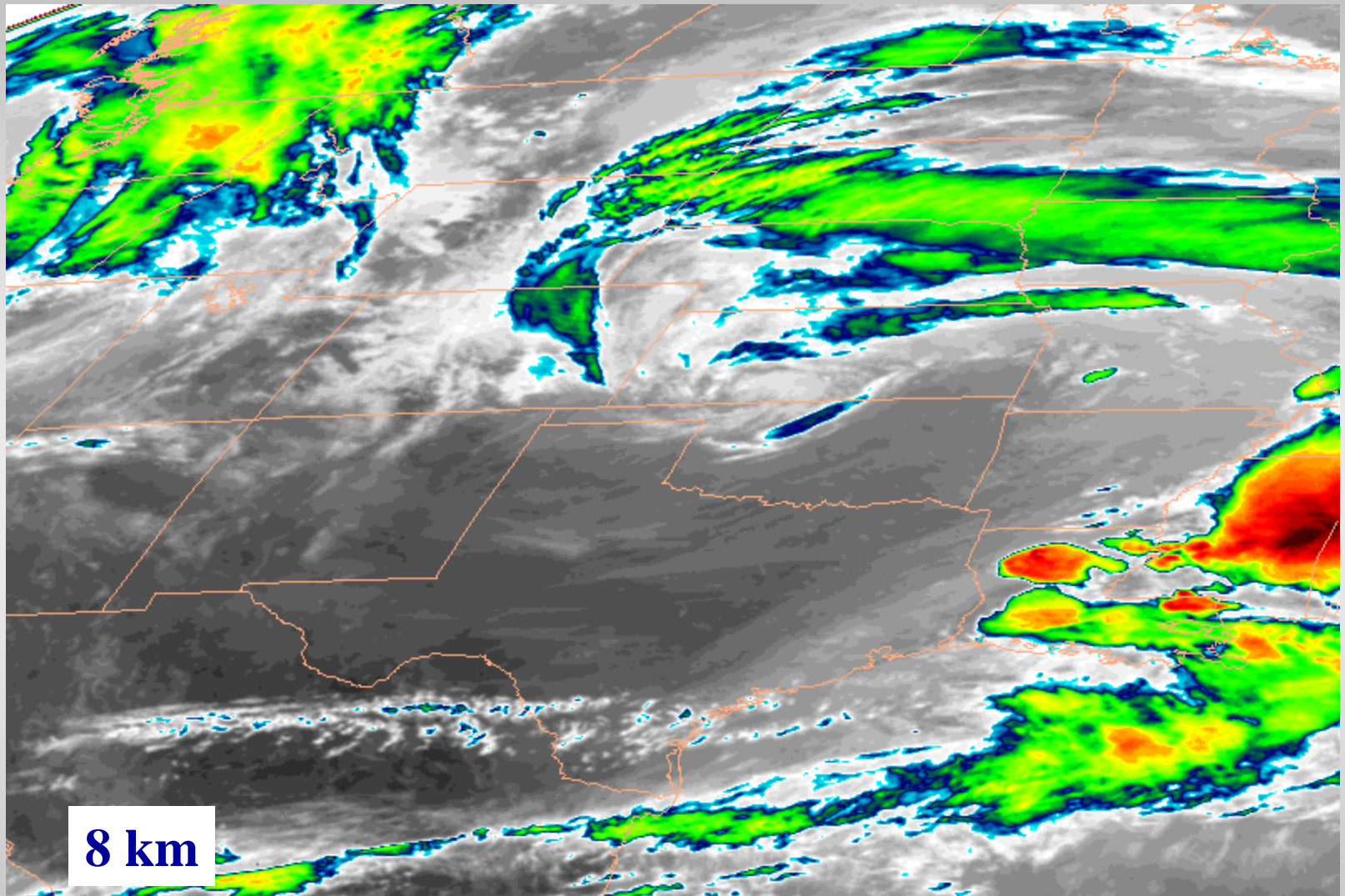


32 km

GOES-12 IMAGER IR WINDOW 24 APR 03 17:45 UTC FACTOR=8 APROX 32KM UW/NOAA



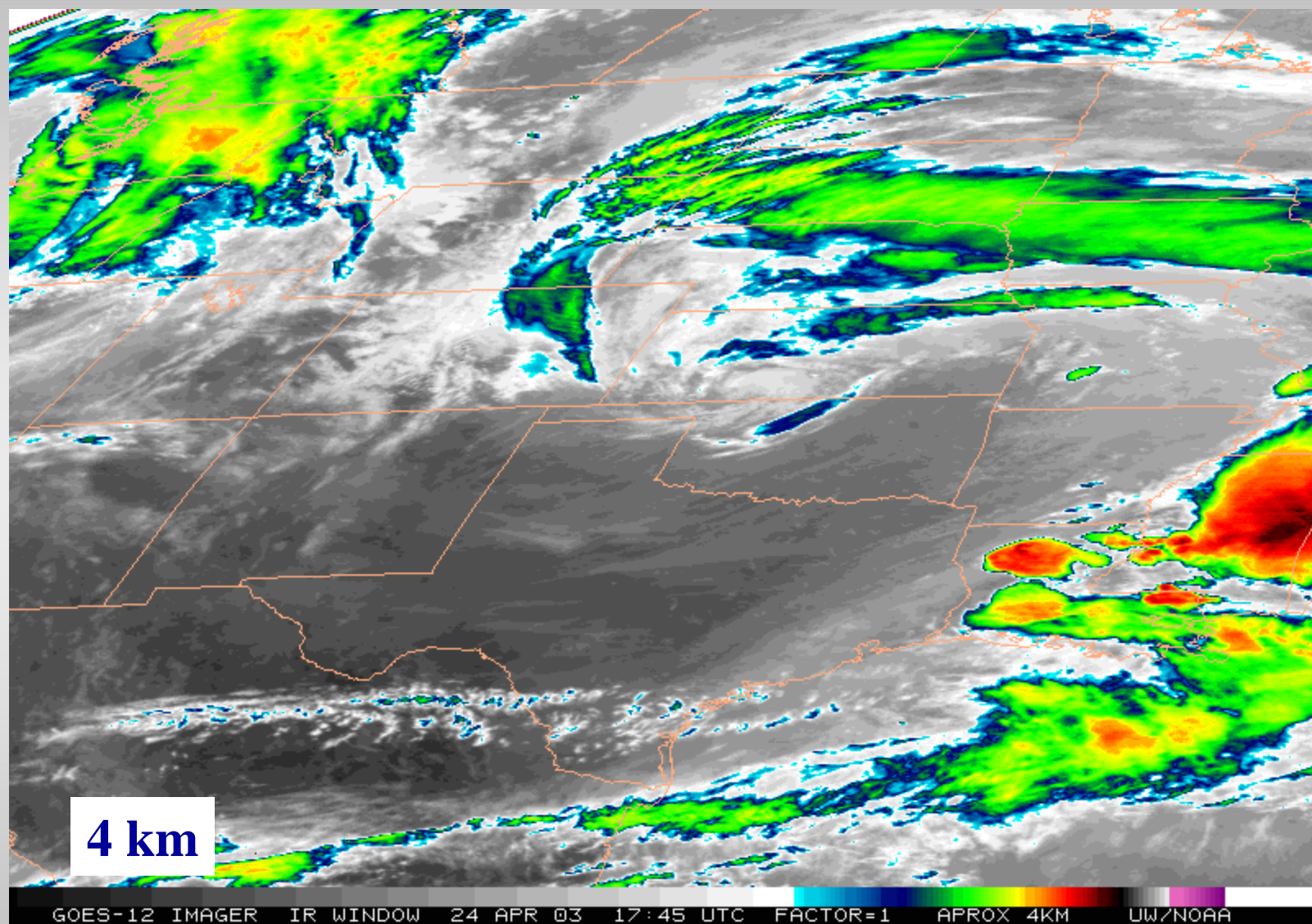
GOES-12 IMAGER IR WINDOW 24 APR 03 17:45 UTC FACTOR=4 APROX 16KM UW/NOAA



GOES-12 IMAGER IR WINDOW 24 APR 03 17:45 UTC FACTOR=2 APROX 8KM UW/NOAA



....aby naše chyba byla co nejmenší!



Každé zlepšení vyžaduje 10x výkonější počítač tj. celkem 10,000,000x!

## 2. Provést řadu simulací s nepatrně odlišnými vstupními podmínkami - *Ensemble simulace*

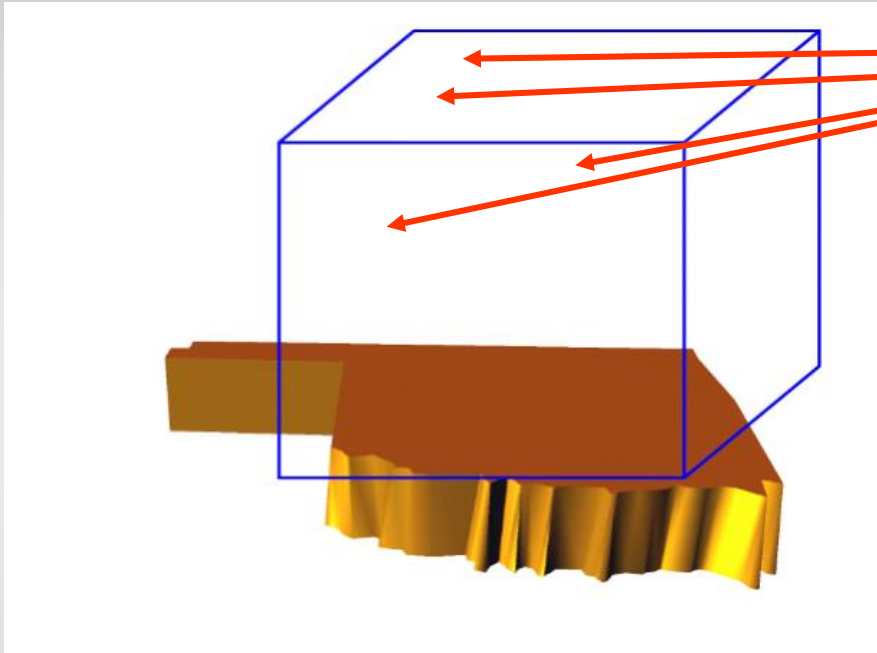
- důležité zejména u prognózy extrémních jevů





# Proč?

...protože ani v případě detailní pozorovací sítě:



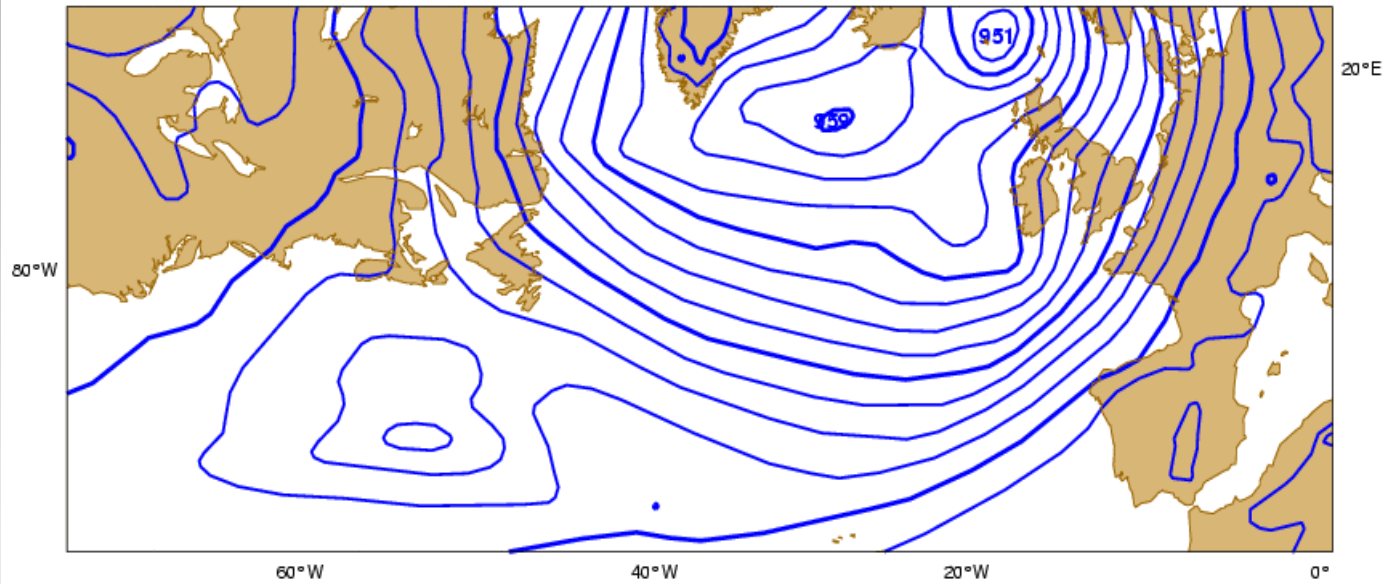
- Neznáme počáteční stav atmosféry dostatečně přesně.
- Malé chyby v měření se mohou projevit velkými chybami v předpovědi (chaos)
- Proto spíše než jeden běh modelu s jednou sadou vstupních dat volíme **několik** stejně pravděpodobných scénářů s mírně pozměněnými daty - tím zohledňujeme chybu měření počátečních podmínek.
- Tj. "ensemble forecasting"

Lothar: 08Z, 26 Dec. 1999

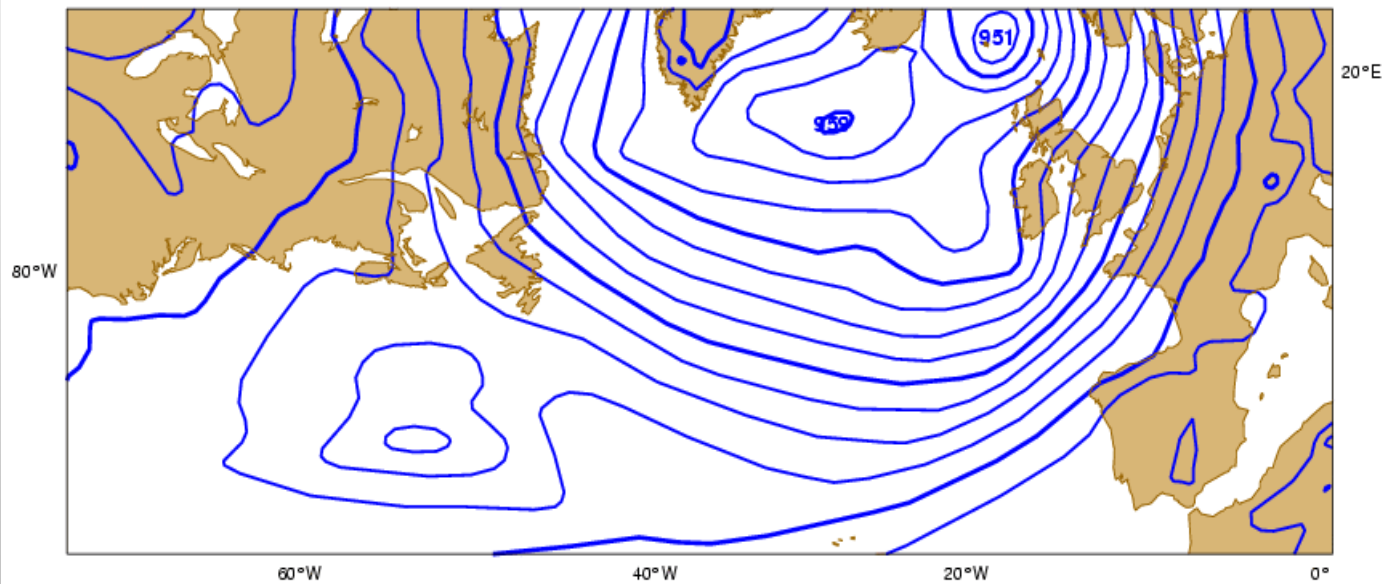
# Lothar +Martin

- 100 obětí
- 400 miliónů vyvrácených stromů
- 3.5 uživatelů rozvodné sítě bez elektřiny po 20 dní
- 3 milióny lidí bez vody

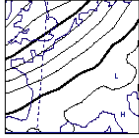
forecast 24 December 1999, 12UTC +0 h - mem no. 13 of 17



forecast 24 December 1999, 12UTC +0 h - mem no. 14 of 17

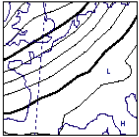


Analysis

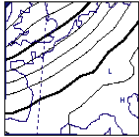


# Ensemble počátečních podmínek 24.12 1999

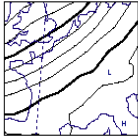
Analysis 1



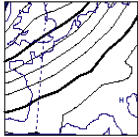
Analysis 2



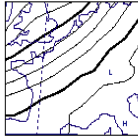
Analysis 3



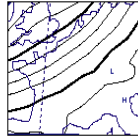
Analysis 4



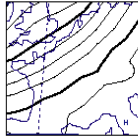
Analysis 5



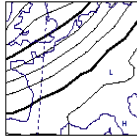
Analysis 6



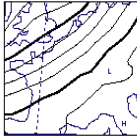
Analysis 7



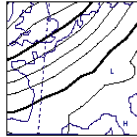
Analysis 8



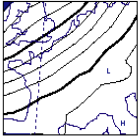
Analysis 9



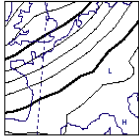
Analysis 10



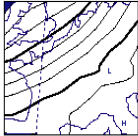
Analysis 11



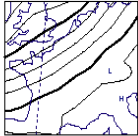
Analysis 12



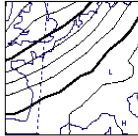
Analysis 13



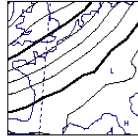
Analysis 14



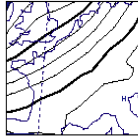
Analysis 15



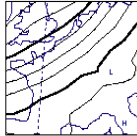
Analysis 16



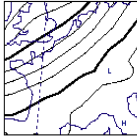
Analysis 17



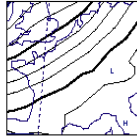
Analysis 18



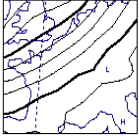
Analysis 19



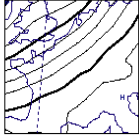
Analysis 20



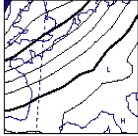
Analysis 21



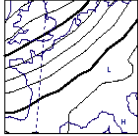
Analysis 22



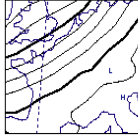
Analysis 23



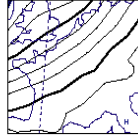
Analysis 24



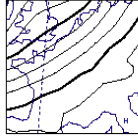
Analysis 25



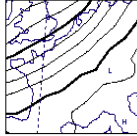
Analysis 26



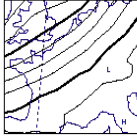
Analysis 27



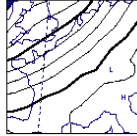
Analysis 28



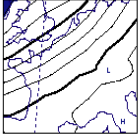
Analysis 29



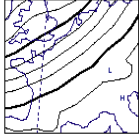
Analysis 30



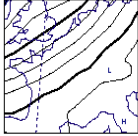
Analysis 31



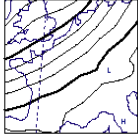
Analysis 32



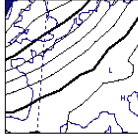
Analysis 33



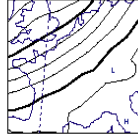
Analysis 34



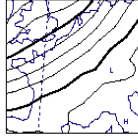
Analysis 35



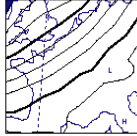
Analysis 36



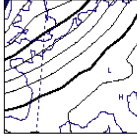
Analysis 37



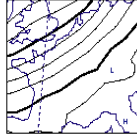
Analysis 38



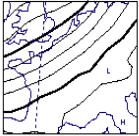
Analysis 39



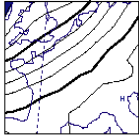
Analysis 40



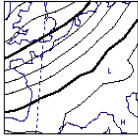
Analysis 41



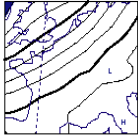
Analysis 42



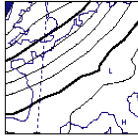
Analysis 43



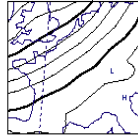
Analysis 44



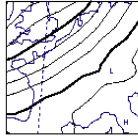
Analysis 45



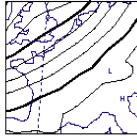
Analysis 46



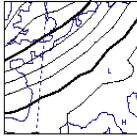
Analysis 47



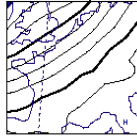
Analysis 48



Analysis 49

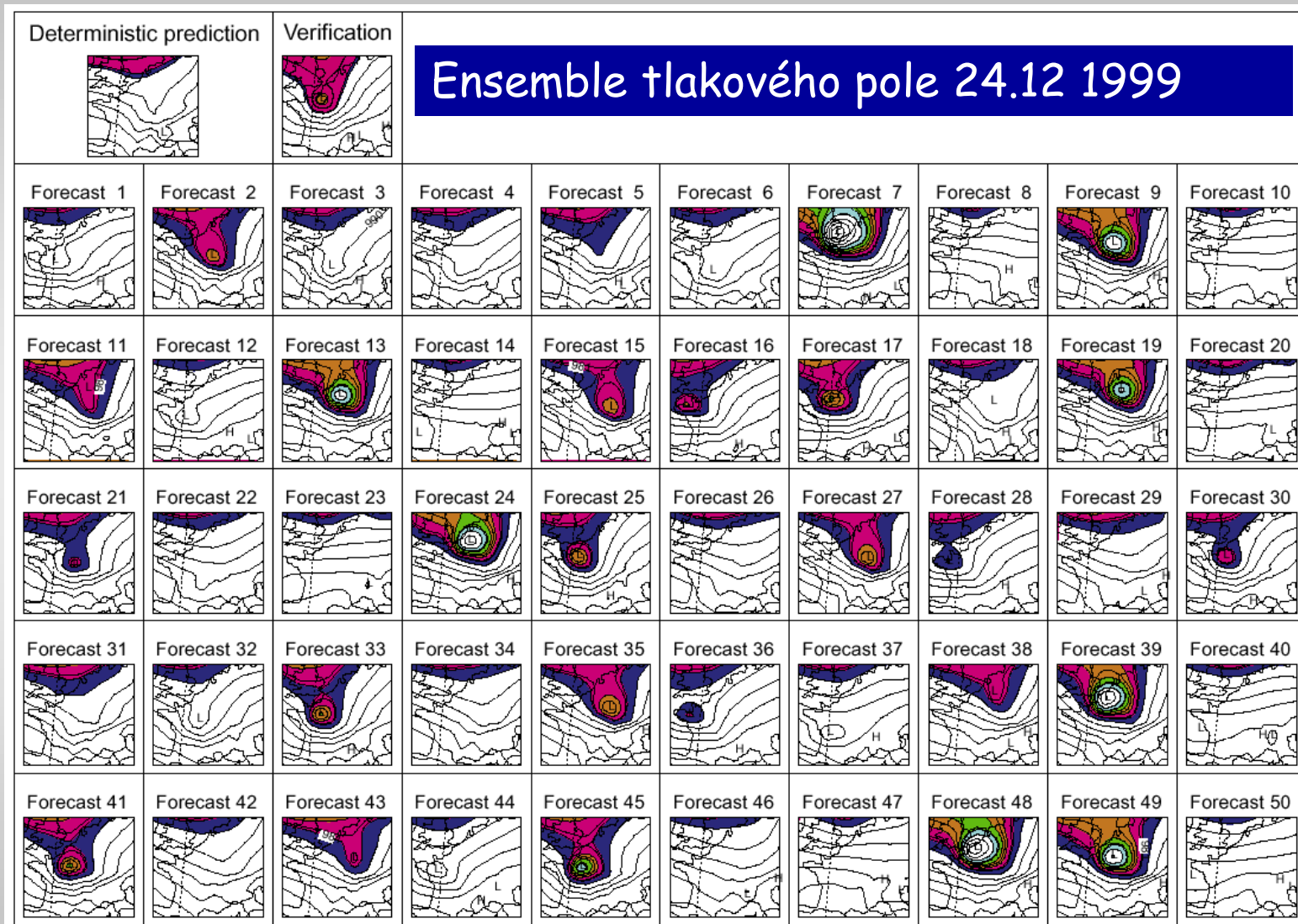


Analysis 50



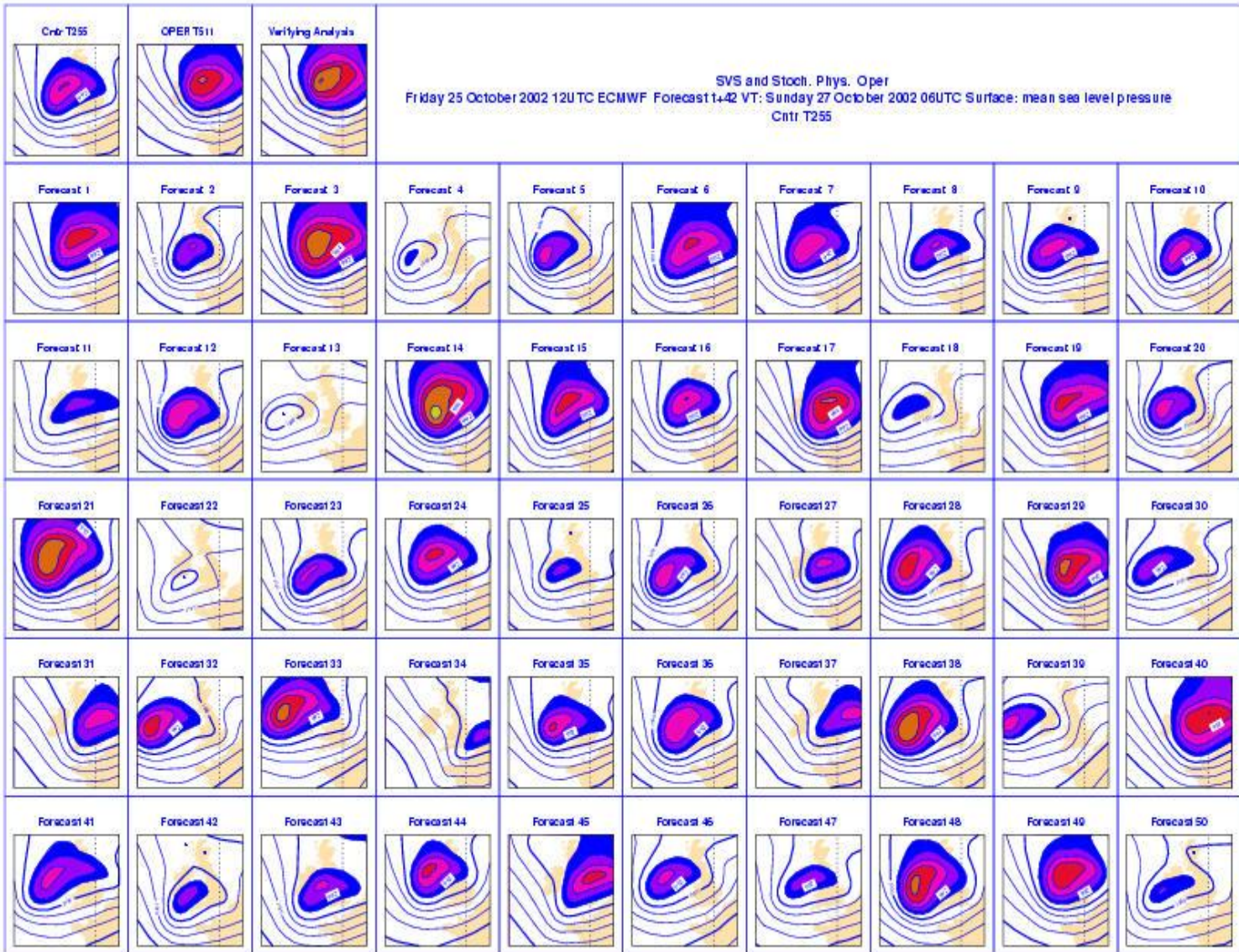


# Lothar (T+42 hodin)











# Numerická předpověď počasí v ČR





# Regionální numerický model ALADIN

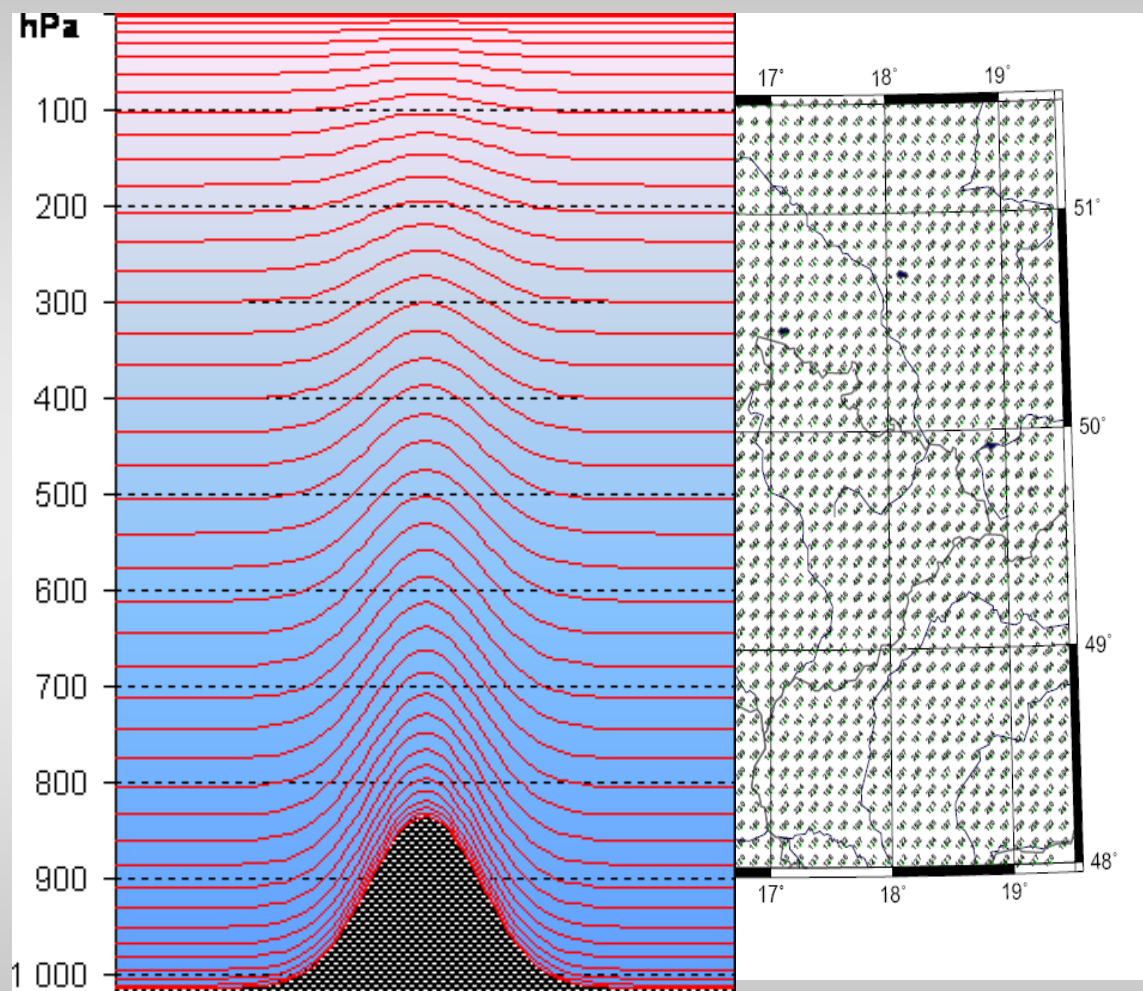
320×288 uzlových bodů

43 hladin

délka časového kroku 360 s  
produkční předpověď 4x denně

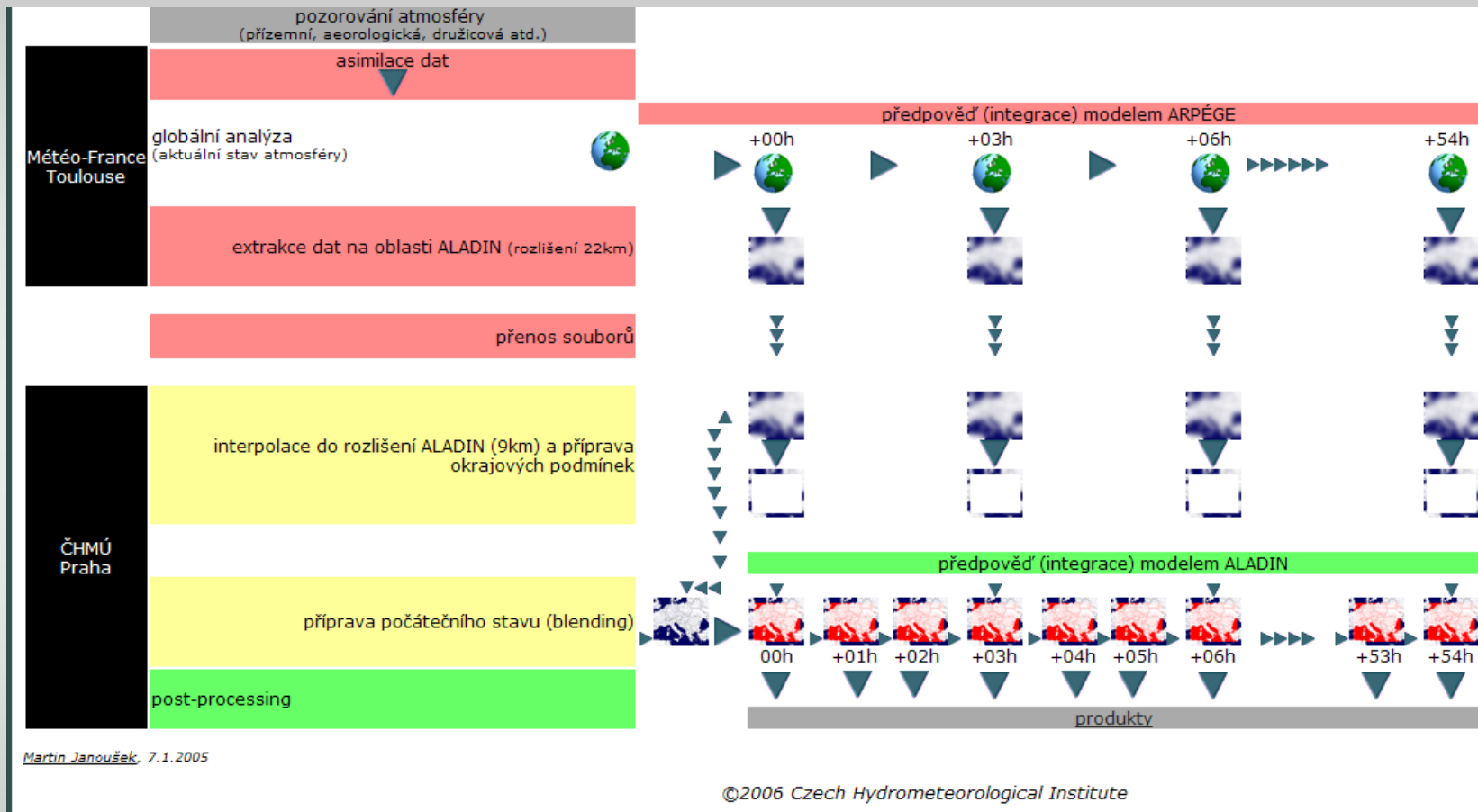
délka předpovědi 54 h

boční okrajové podmínky z  
ARPEGE s periodou 3 h

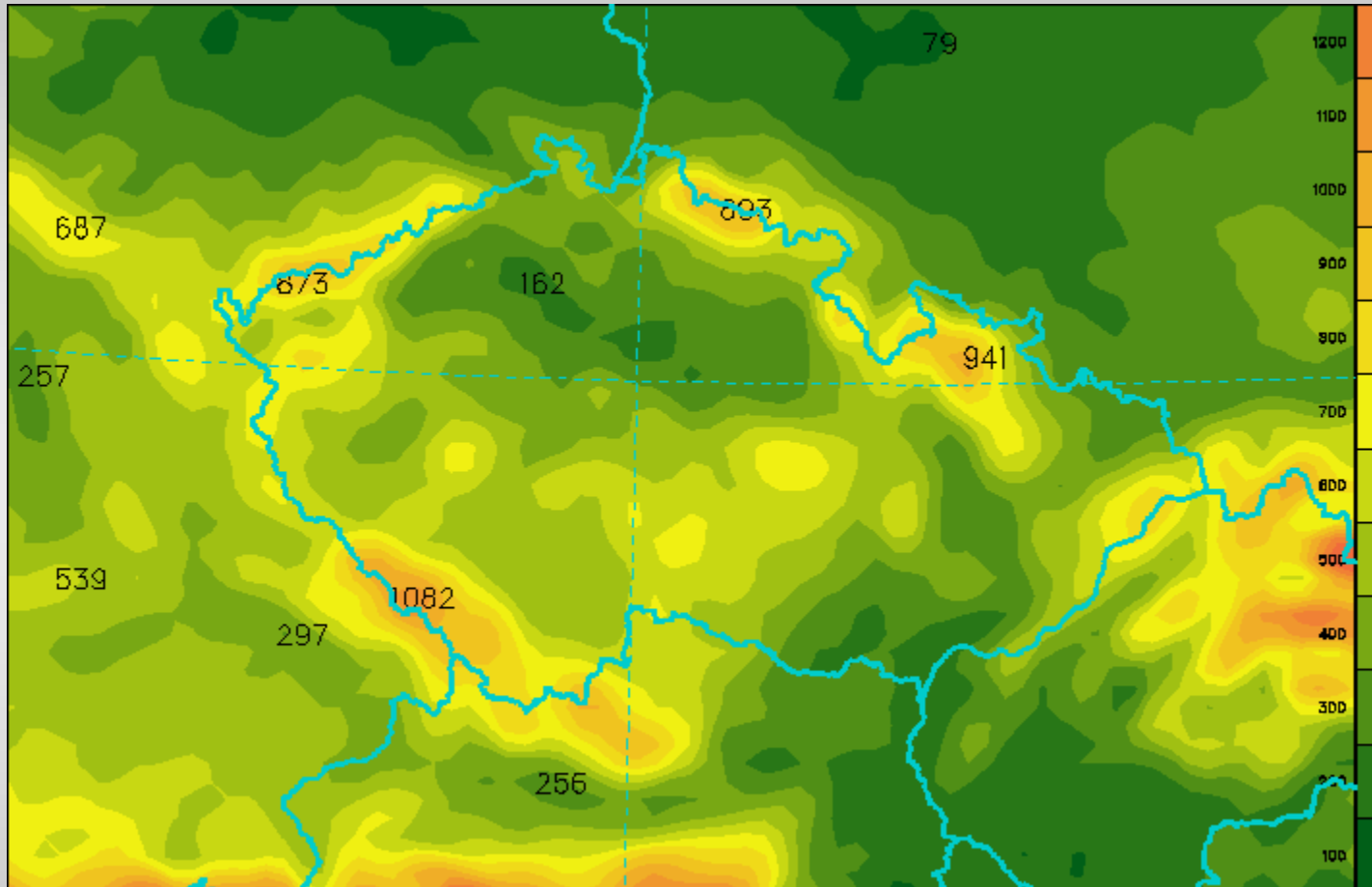




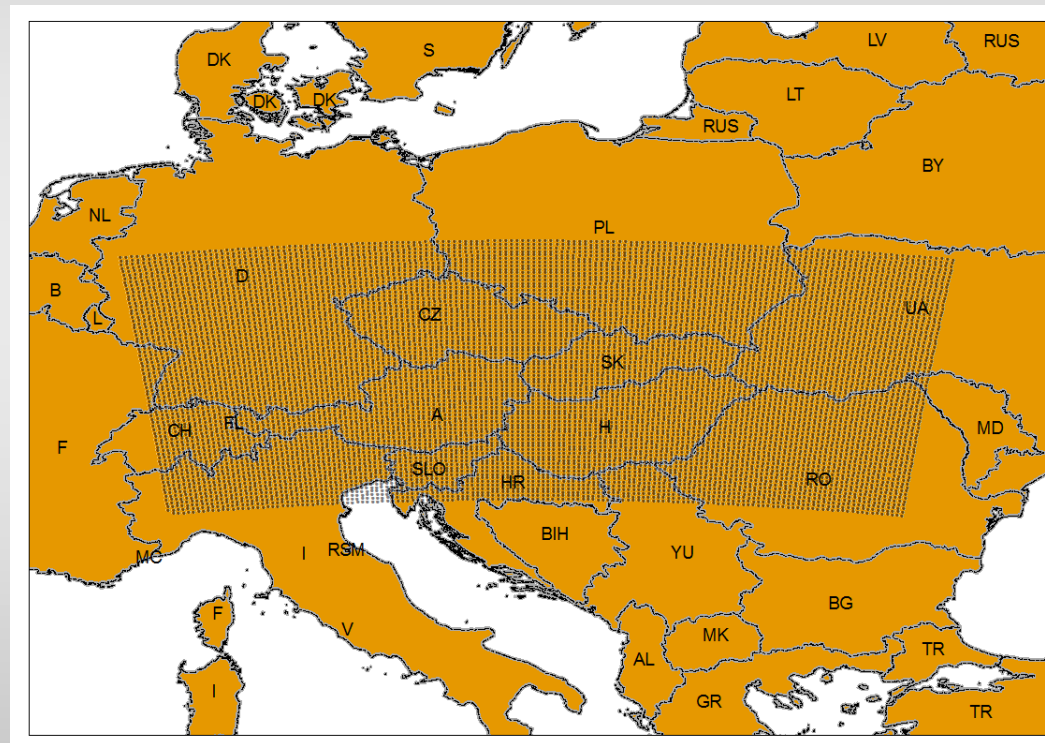
# Regionální numerický model ALADIN



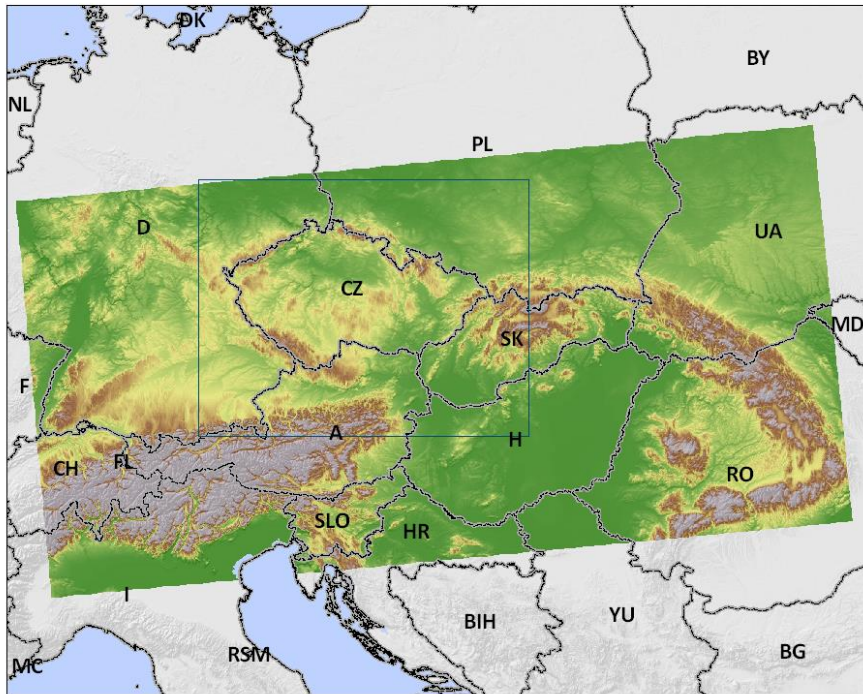
# ALADIN - digitální model terénu



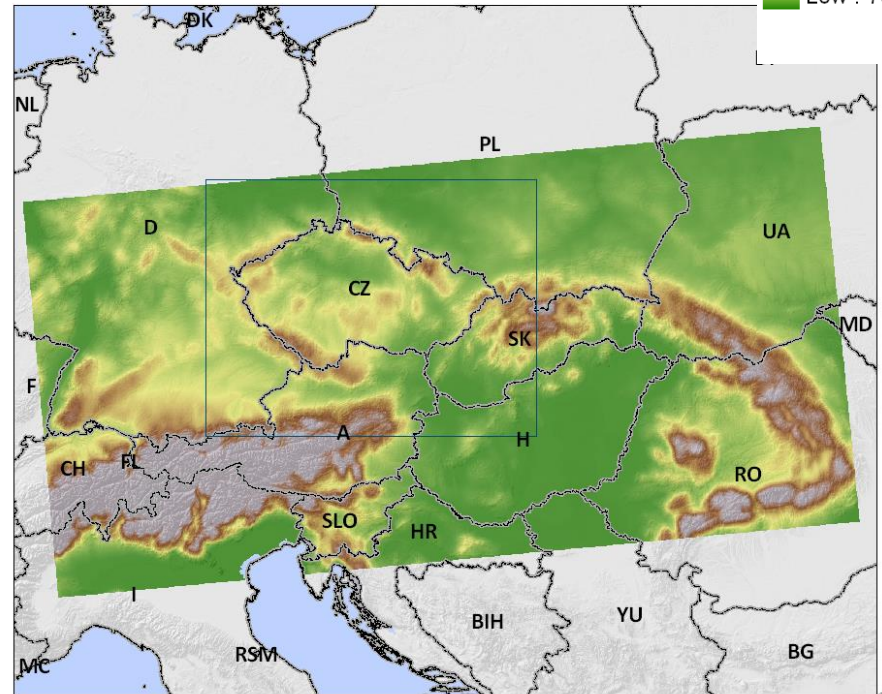
# ALADIN domain



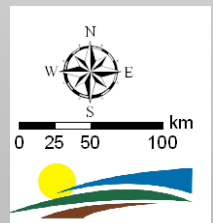
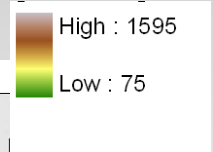
# ALADIN DOMAIN – Altitude DEM



Institute of Agrosyst

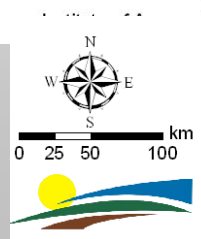
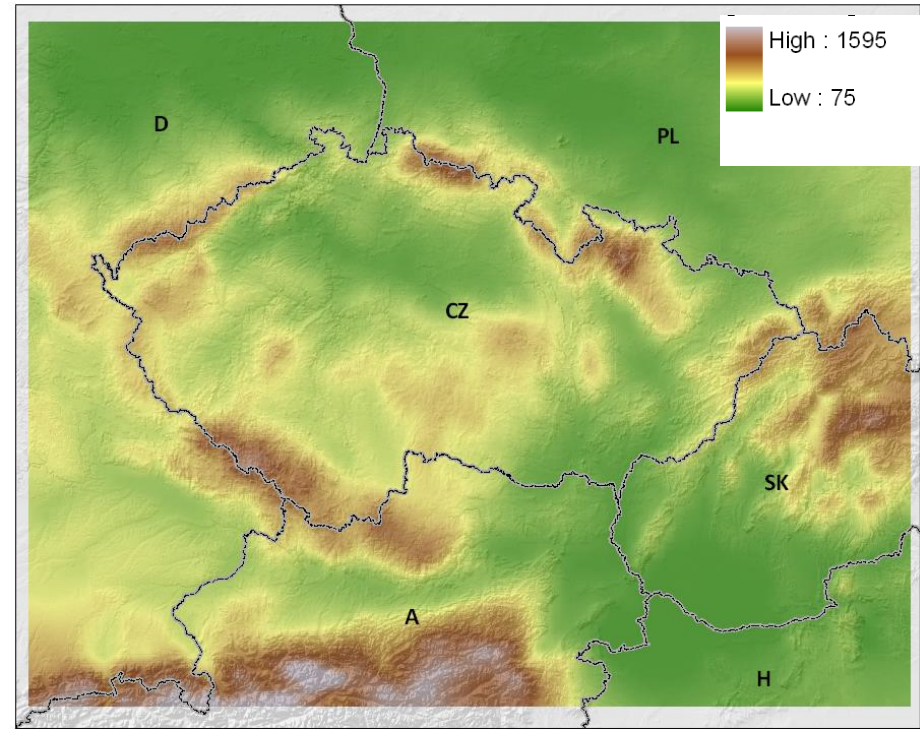
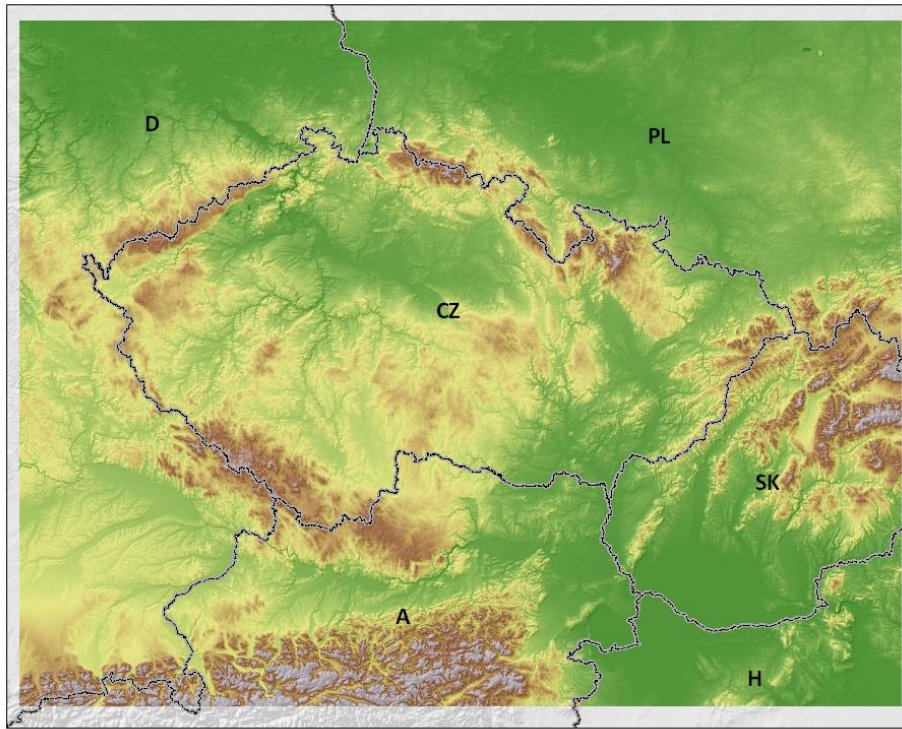


Institute of Agrosyst





# STUDY DOMAIN – Altitude DEM – 2555 grids

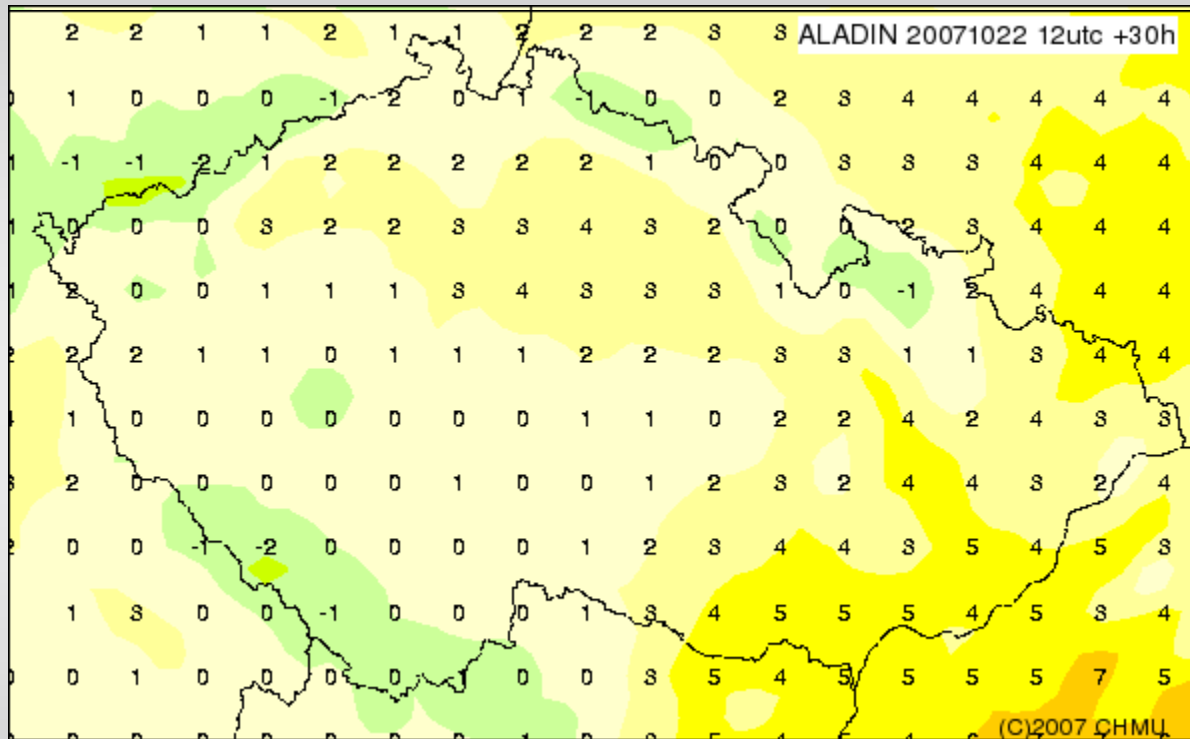
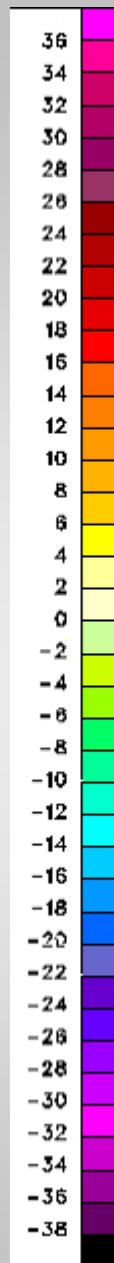


# ALADIN - výpočetní technika

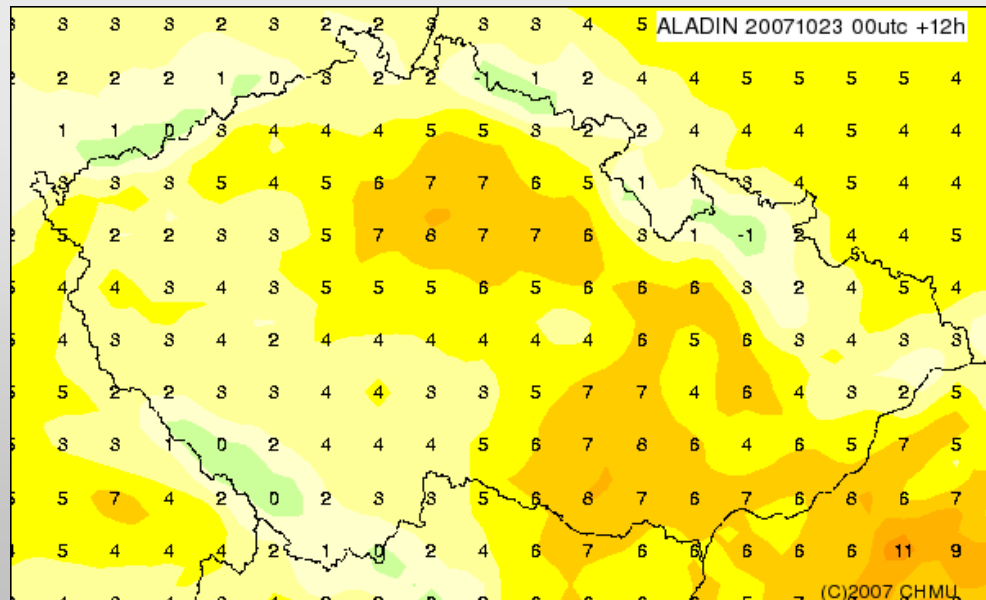
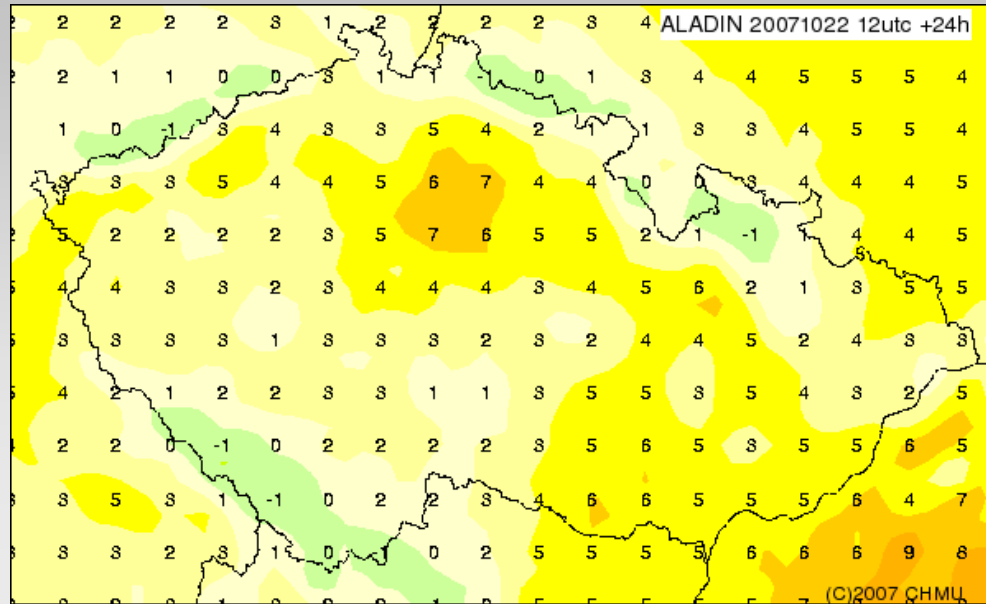
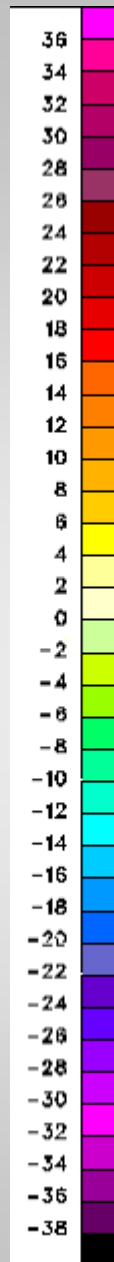
- server NEC - 8 procesorů cca 8 miliard operací /s



# Jak předpověděl Aladin včera - dnešní teplotu?

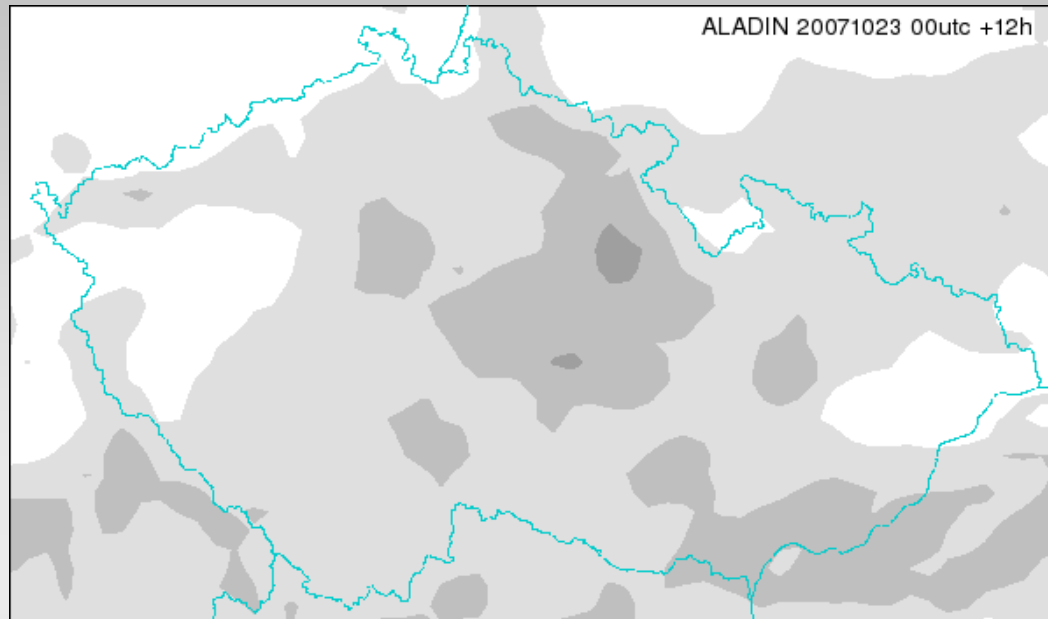


# Jak předpověděl Aladin včera - dnešní teplotu?

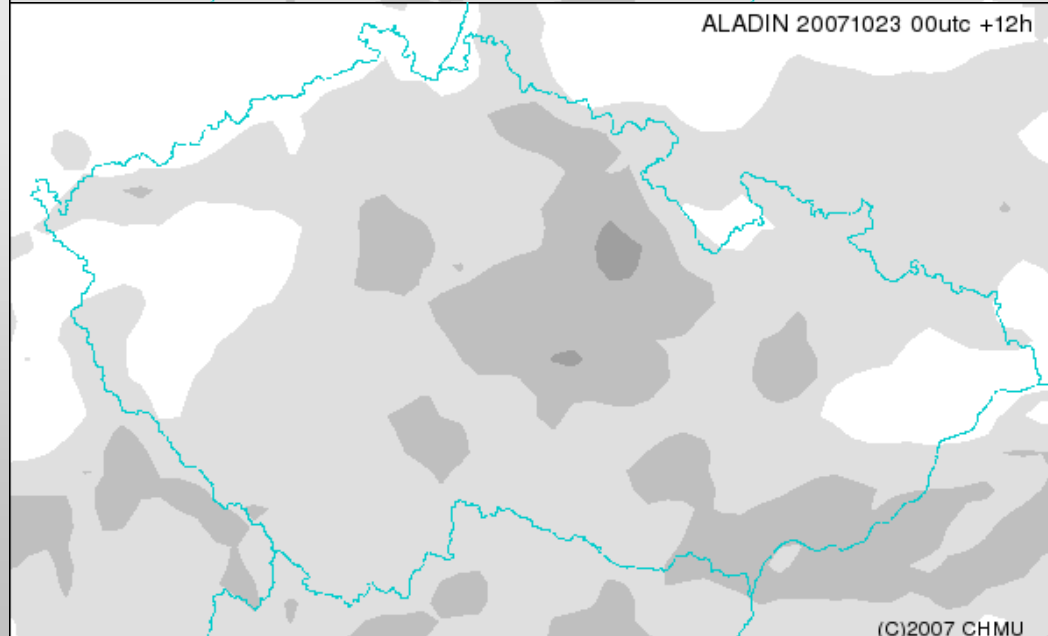




# Jak předpověděl Aladin včera - dnešní oblačnost?

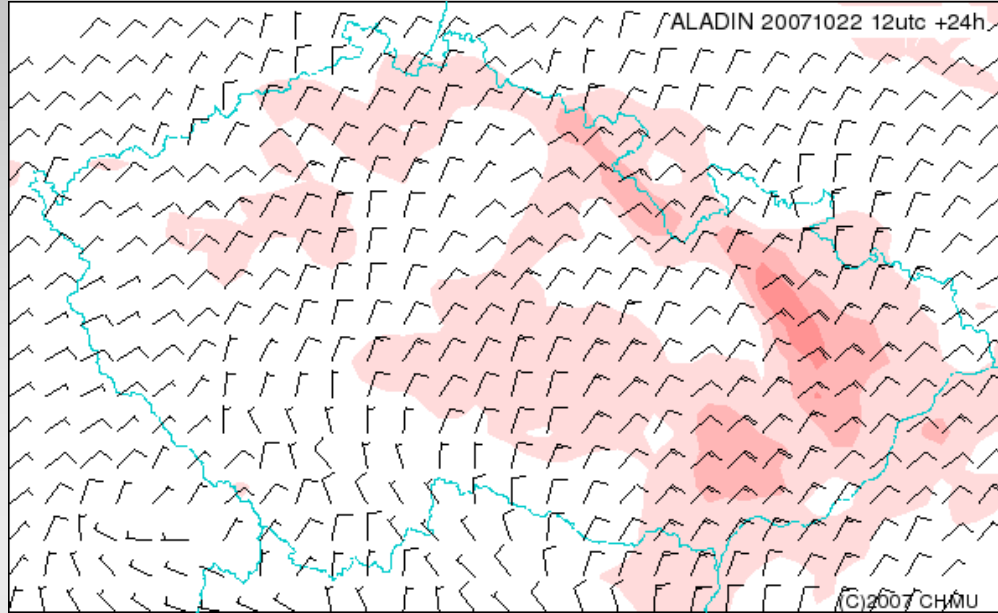


22.3. 12:00

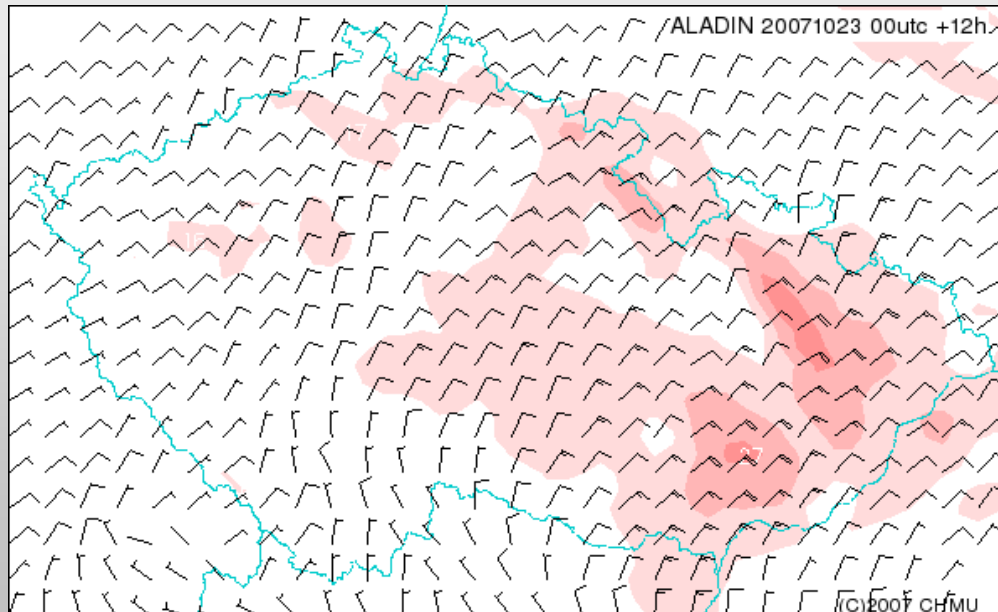


23.3. 12:00

# Jak předpověděl Aladin včera - dnešní vítr?



22.3. 12:00



23.3. 12:00

# Důvěřuj ale prověřuj

<http://www.chmi.cz/meteo/opss/pocasi/>

<http://www.chmi.cz/meteo/rad/index.html>

# Díky za pozornost....

