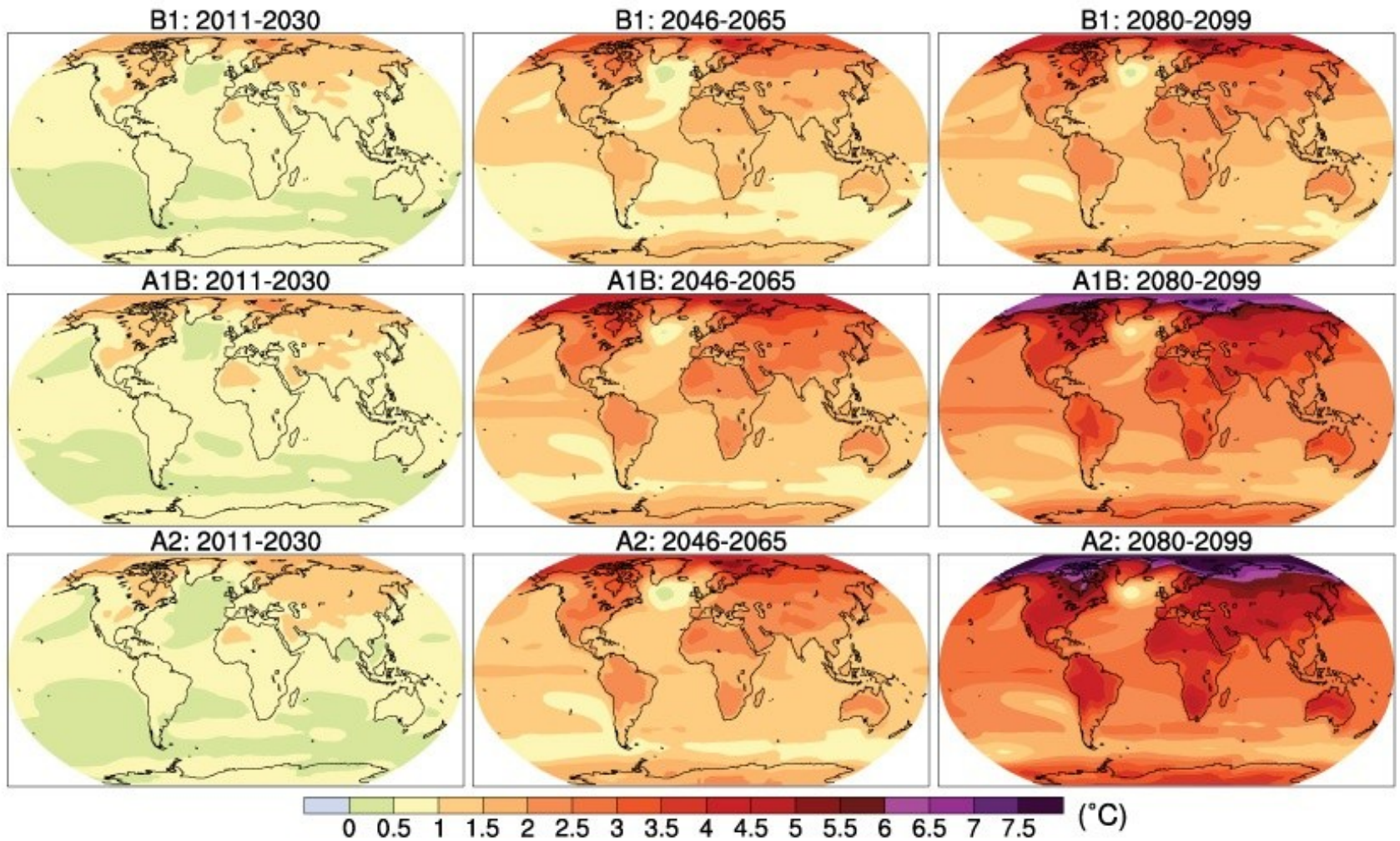


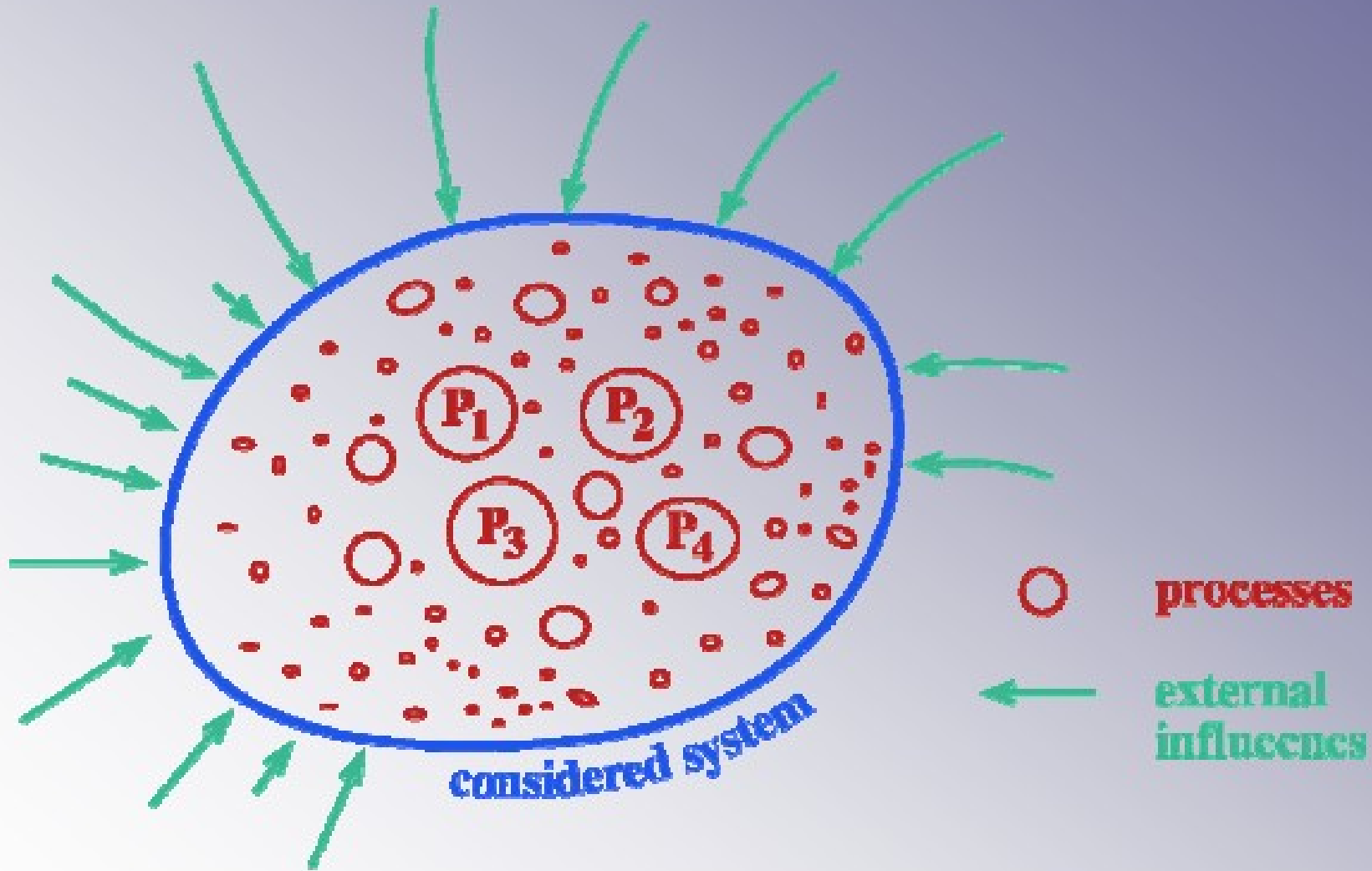
# 9. MODELOVÁNÍ KLIMATU



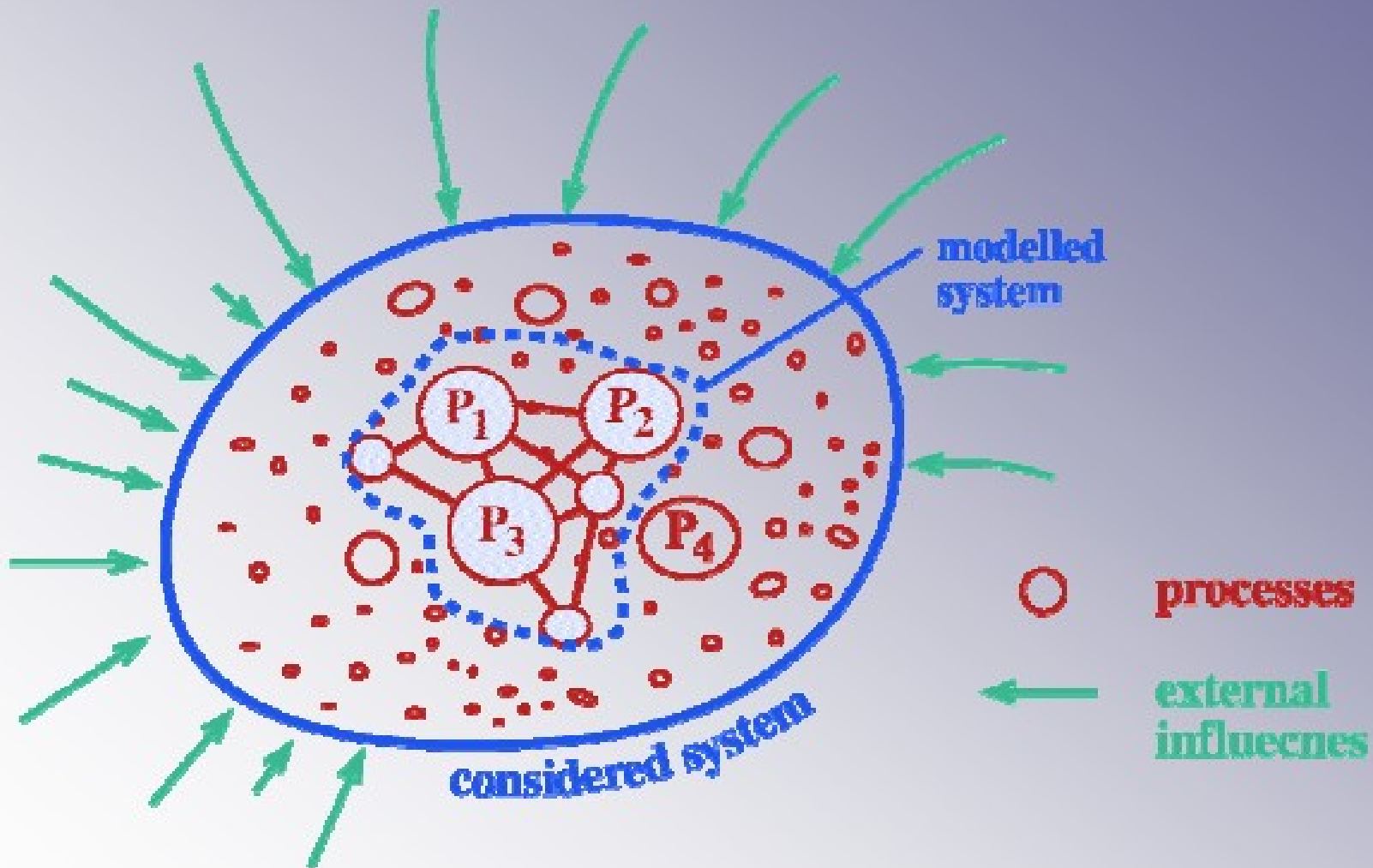
Petr Kolář

Z0076 Meteorologie a klimatologie

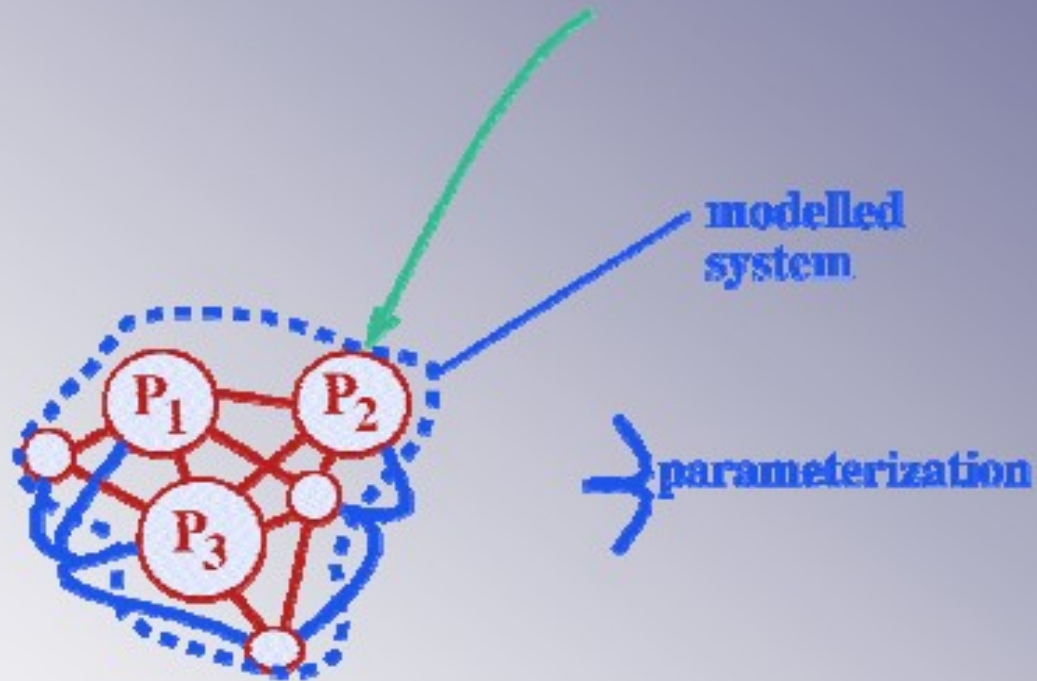
# Models & realism: conceptual



# Models & realism: conceptual



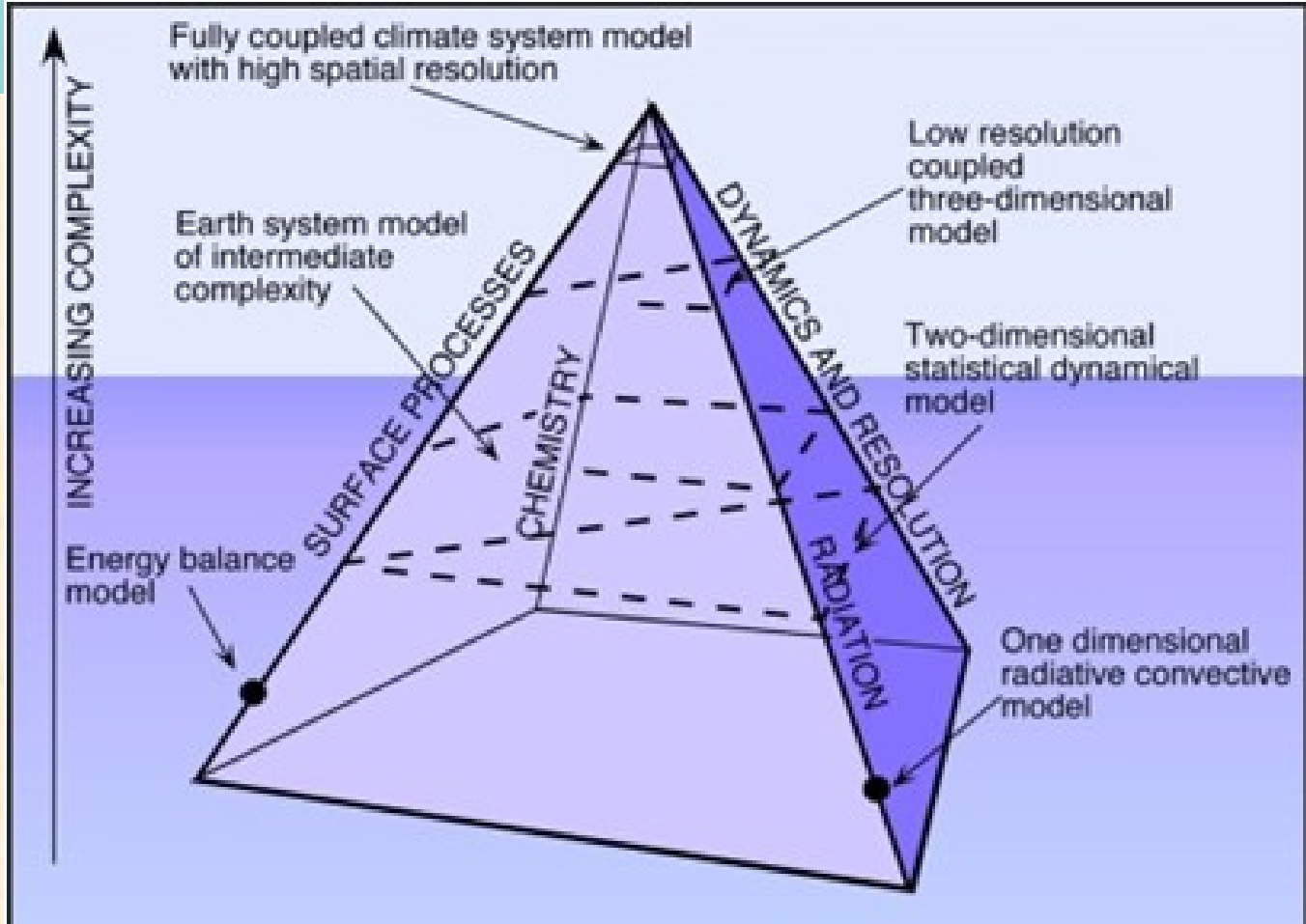
# Models & realism: conceptual



# TYPY KLIMATICKÝCH MODELŮ

**Klimatický model** – simulace stavu, chování a vývoje úplného klimatického systému

- hlavní komponenty, které je třeba brát v úvahu u klimatických modelů:
  - a) záření (pohlcování záření, vyzařování)
  - b) dynamika (horizontální přenos energie, vertikální pohyby – konvekce)
  - c) povrchové procesy (albedo, vyzařování, interakce povrch-atmosféra)
  - d) časové a prostorové rozlišení
- typy modelů podle jejich komplexnosti:
  - a) jednorozměrné modely (záření nebo povrchové procesy)
  - b) dvourozměrné modely (povrchové procesy, dynamika)
  - c) trojrozměrné modely (záření, povrchové procesy, dynamika)



The climate-modelling pyramid. The position of a model on the pyramid indicates the complexity with which the three primary processes interact. The base of the pyramid can be considered hollow since there is essentially no interaction between the primary processes. Progression up the pyramid leads to greater interaction between each primary process. The vertical axis is not intended to be quantitative. (a) The positions of the four basic model types.

# Jednorozměrné (jednoduché) klimatické modely

- uvažuje se několik základních procesů a zpětných vazeb, ve zvýšené míře parametrizace
- přehlednost (studium vazeb mezi několika procesy), poměrně snadná interpretace výsledků
- nižší požadavky na výpočetní čas
- silně potlačena dynamika atmosférických a oceánských procesů

# Modely energetické bilance (EBMs - Energy Balance Models)

- vyjadřují rovnováhu mezi příjmem a výdejem energie ve vertikálním sloupci atmosféry, omezeném horní hranicí atmosféry a aktivním povrchem

$$Q_S (1 - \alpha_S) - I_S = A$$

$Q_S$  – sluneční záření dopadající na horní hranici atmosféry

$\alpha_S$  – albedo systému Země-atmosféra

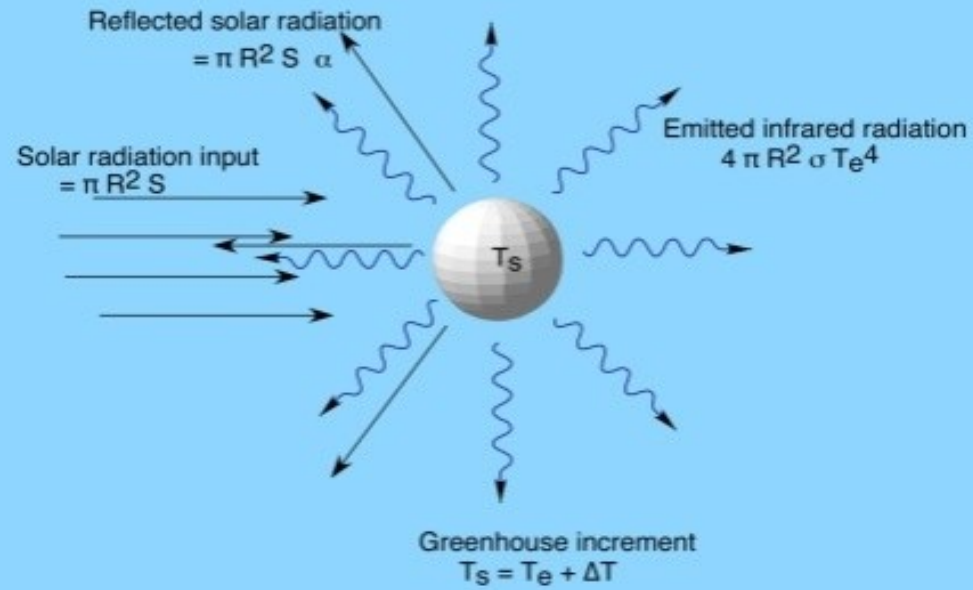
$I_S$  – dlouhovlnné záření vydávané do meziplanetárního prostoru

$A$  – zisk nebo ztráta tepla v důsledku atmosférické či oceánské cirkulace (včetně redistribuce tepla při fázových změnách vody)

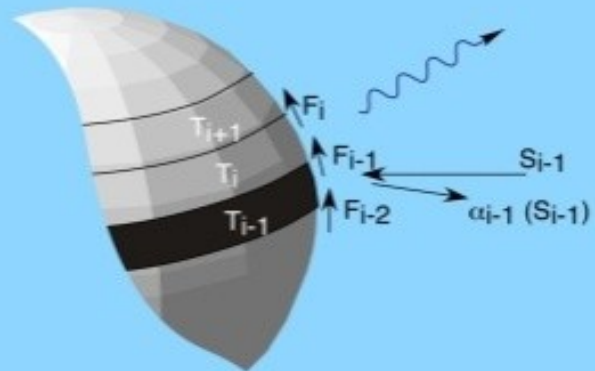
- postup výpočtu: rozdělení povrchu na zonální pásy šířky  $10^\circ$  → aplikace rovnice na vertikální sloupce nad těmito pásy ( $Q_S$  se počítá pomocí solární konstanty, ostatní členy rovnice se parametrizují podle teploty při zemi)
- příklad parametrizace šířkového transportu energie  $A$ :  $A = k (T - T_g)$ 
  - $T$  – teplota daného šířkového pásu
  - $T_g$  – průměrná globální teplota
  - $k$  – empirická konstanta
- role zpětné vazby mezi teplotou a albedem (rozsah sněhové a ledové pokrývky)



### a) Global EBM

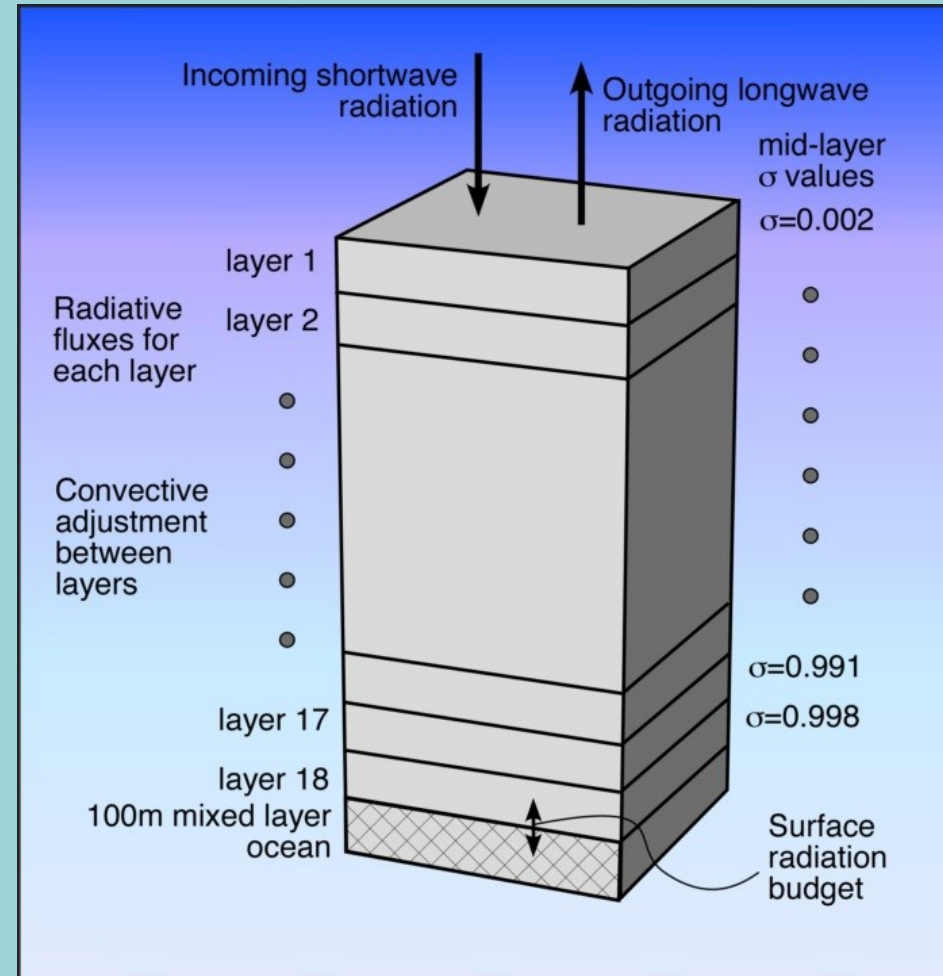


### b) One-dimensional EBM

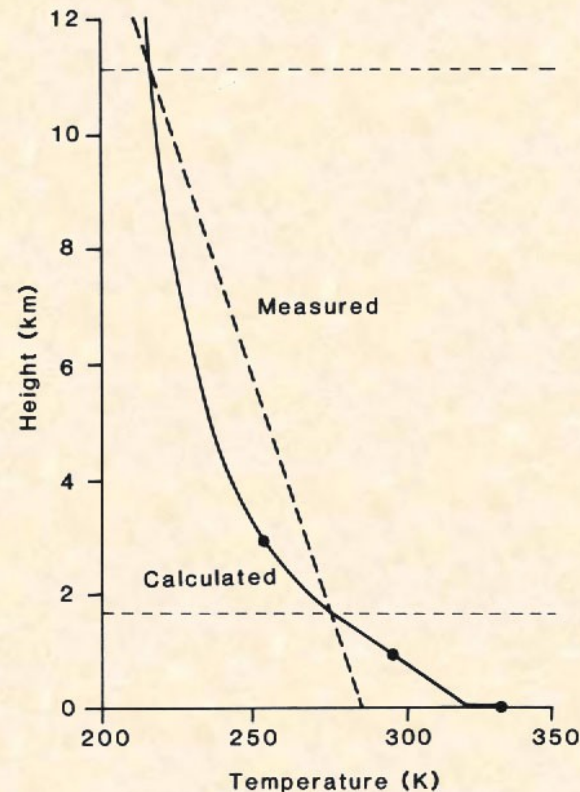


# Radiačně-konvektivní modely (RCMs – Radiative-Convective Models)

- atmosféra rozdělena do několika vrstev a pro každou z nich se počítá rovnovážná teplota z bilance krátkovlnných a dlouhovlnných toků za předpokladu radiační rovnováhy
  - dobré výsledky pro vertikální rozdělení teploty ve stratosféře, ale teplotu v horní troposféře podhodnocuje a u zemského povrchu nadhodnocuje
- modelový vertikální teplotní gradient je vyšší než suchoadiabatický (instabilní zvrstvení)



- **konvektivní přizpůsobení** – přesáhne-li modelový teplotní gradient určitou hodnotu  $\gamma_d$  (zpravidla  $0,65 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ), teplota se při současném zachování energie přizpůsobí tak, aby gradient byl menší nebo roven  $\gamma_d$
- reakce klimatu na změny solární konstanty, změny ve složení atmosféry



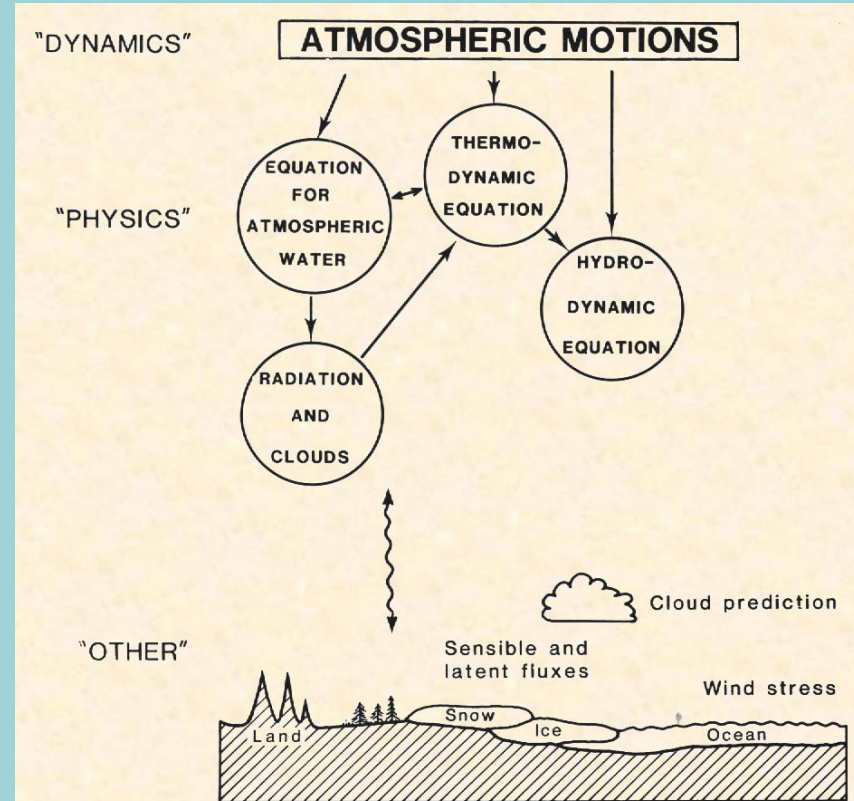
The radiative equilibrium temperature profile calculated using the very simple model described in the text compared with a lapse rate of  $6.5 \text{ K km}^{-1}$ . This lapse rate is achieved by convection since the radiative equilibrium profile is unstable. (Richard M. Goody and James C. G. Walker, *Atmospheres*, ©1972, p. 56. Reprinted by permission of Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey).

# Dvourozměrné klimatické modely (SDMs – Statistical Dynamical Models)

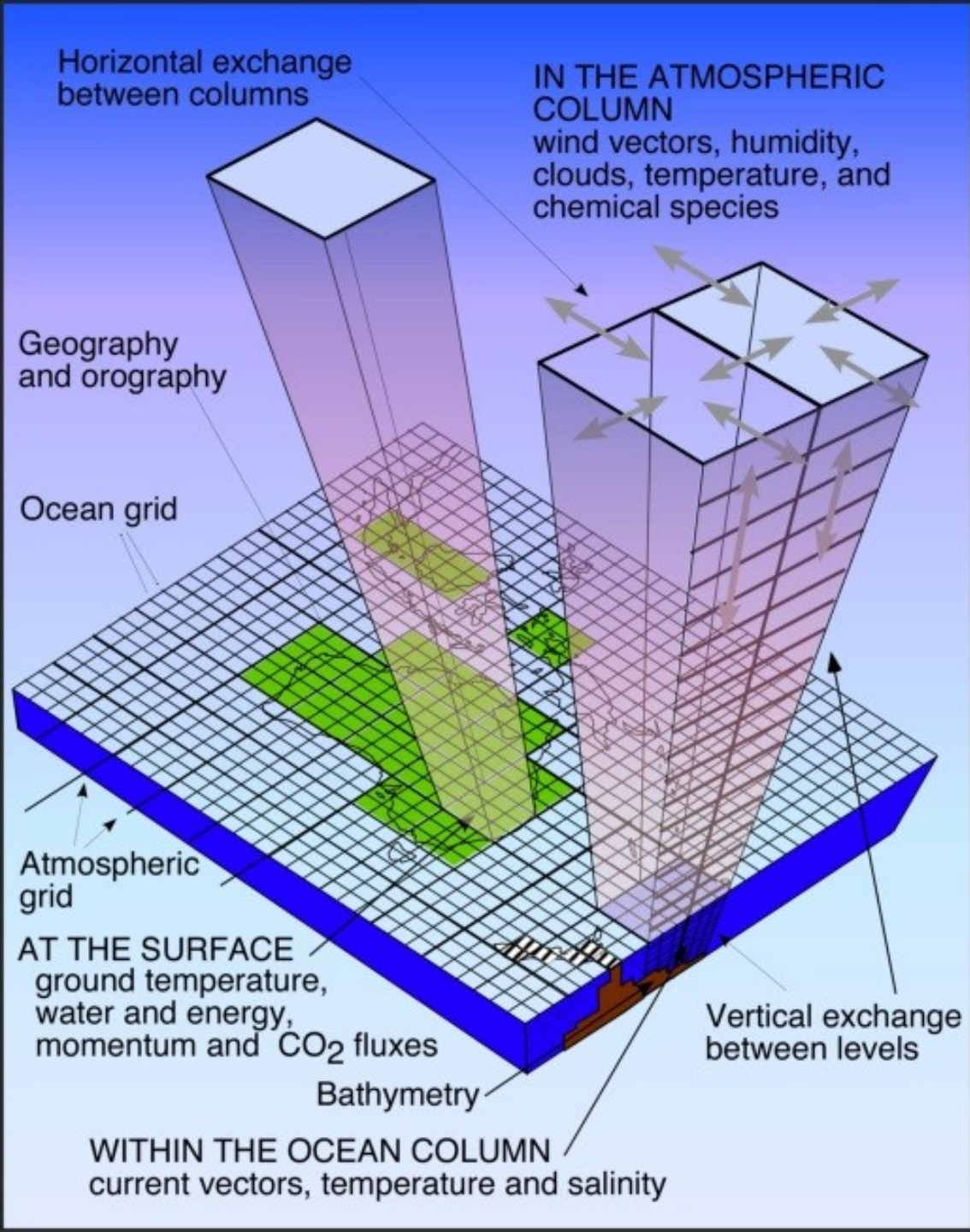
- komplikovanější modely než jednorozměrné
- reprezentují buď dva horizontální nebo jeden vertikální a jeden horizontální rozměr (kombinace šířkové dimenze EBM a vertikální RCM)
- realističtější parametrizace šířkového transportu energie
- statistické vztahy
- spíše limitované pro budoucí projekce klimatu (špatné zonální rozlišení – nahrazeny GCMs)

# Trojrozměrné klimatické modely (GCMs – General Circulation Models)

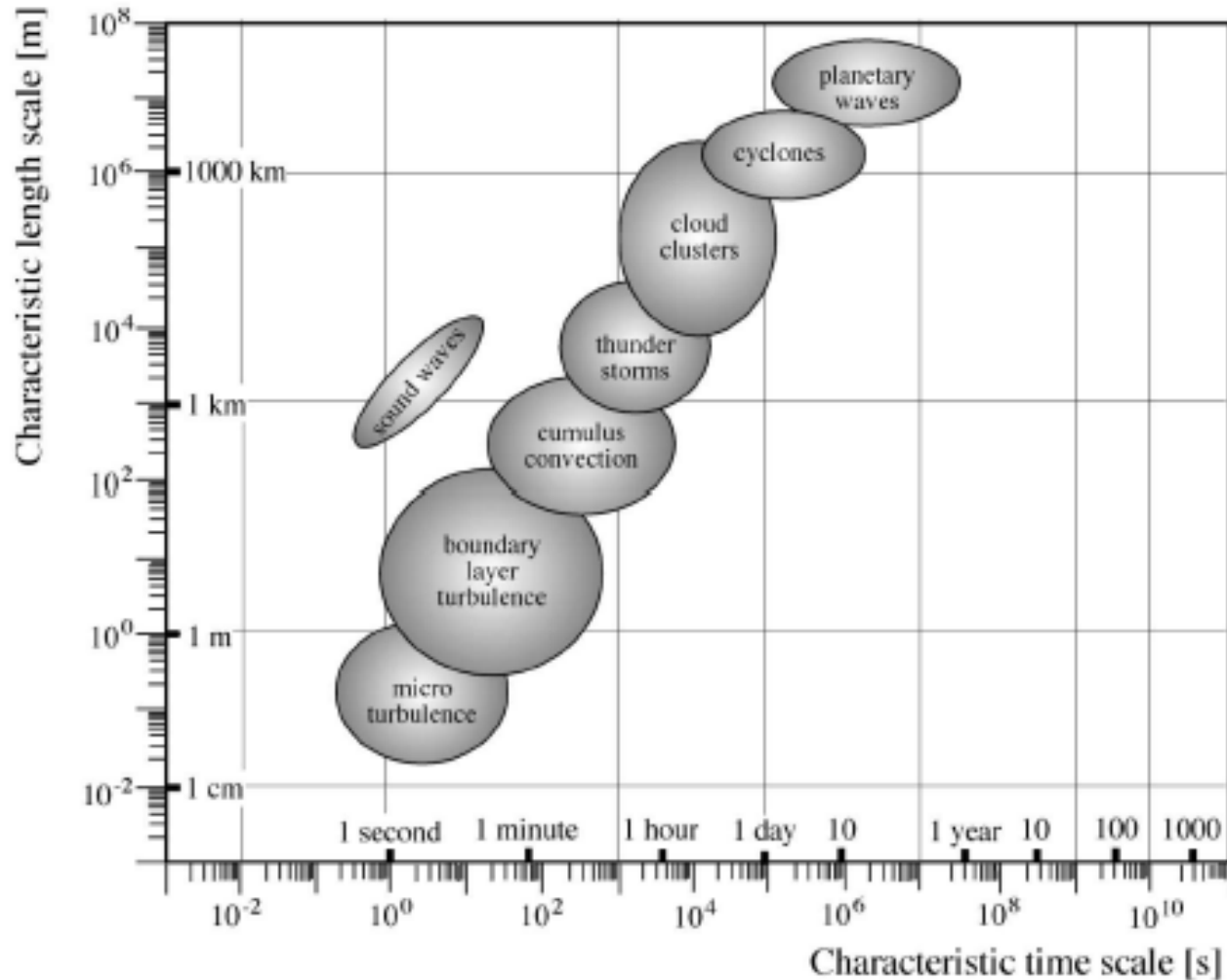
- numerické modely, které explicitně simulují vývoj velkoplošných dějů v atmosféře a obsahují parametrizace důležitých dynamických a fyzikálních procesů malých měřítek
- vycházejí z numerických modelů krátkodobé předpovědi počasí se zvláštním zřetelem na splnění zákonů zachování



The processes incorporated in a GCM. It is generally true that more computational effort is expended on the dynamics and the physics than on the other processes incorporated in GCMs.

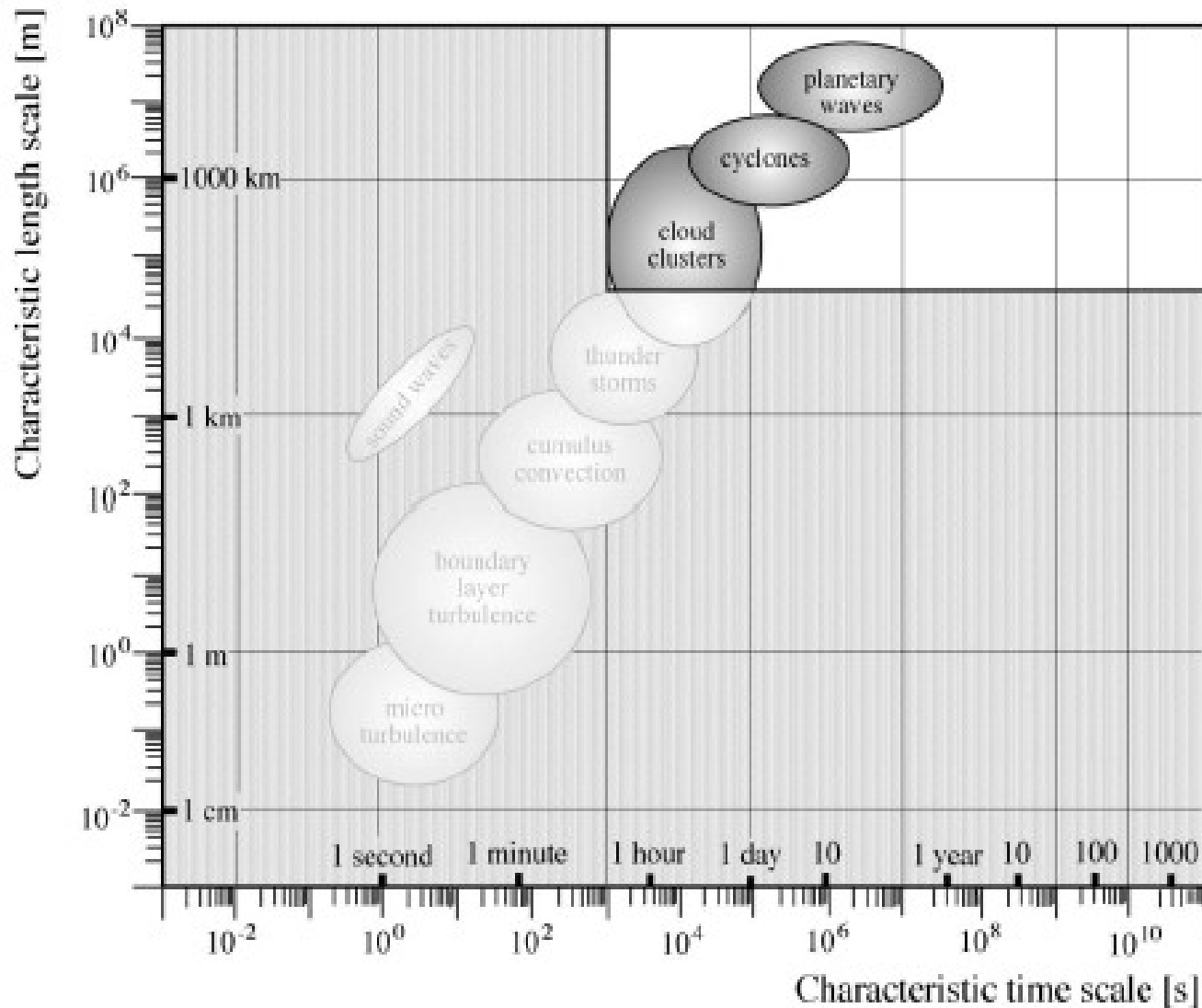


## Impacts of limited grid resolution ~ 200-300 km



**Dynamical processes in the atmosphere**

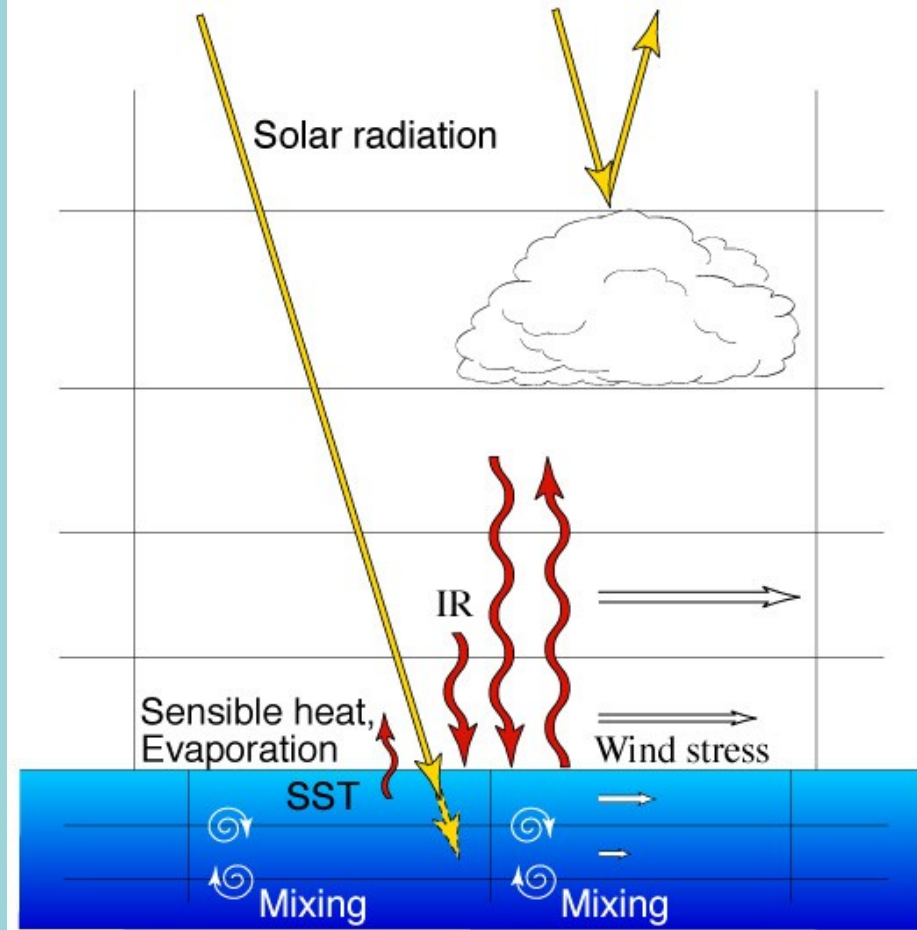
## Impacts of limited grid resolution ~ 200-300 km





- problém **propojení GCM s oceánskou cirkulací:**

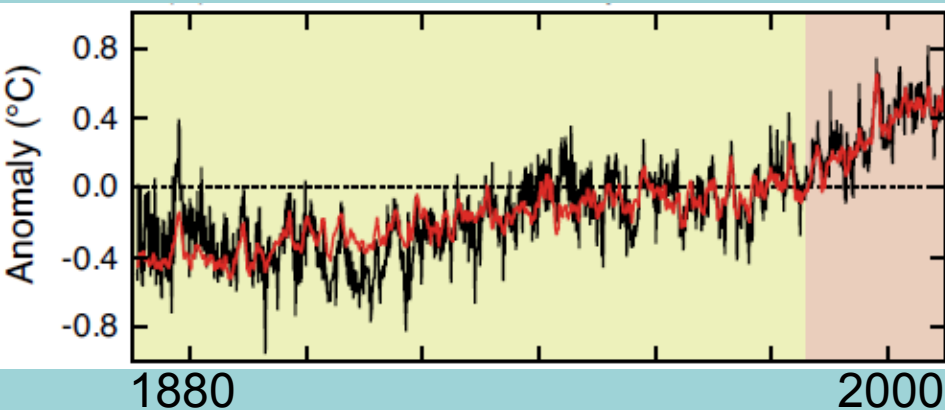
- a) „swamp“ modely (modely s bažinou) – oceán jako pevný zemský povrch s neomezenou zásobou vody pro výpar
- b) zadání teploty povrchu oceánu z klimatických pozorování
- c) modely se směšovací vrstvou – uvažuje se tepelná kapacita a procesy ve vrstvě 30-70 m
- d) modely oceánské cirkulace (OGCMs) – reakce hlubinných oceánských vod (problém odlišného časového měřítka procesů)



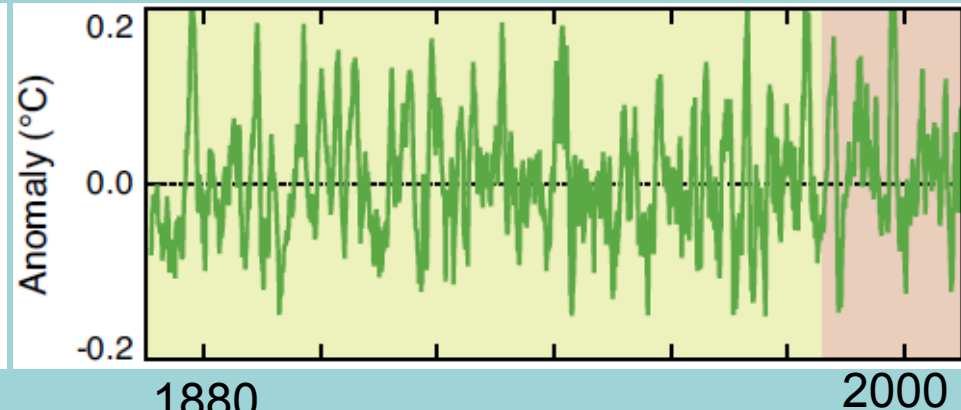
- spojené modely atmosférické a oceánské cirkulace (AOGCMs)

# VYUŽITÍ AOGCM

- 1, předpovědi klimatu na základě scénářů radiačního působení (forcings) – antropogenní, přirozené (obr. vlevo dole)
- 2, simulace tzv. vnitřní variability klimatického systému v sezónním/ročním časovém měřítku (kontrolní běhy – obr. vpravo dole)
- 3, tvorba modelových analýz současného klimatu
- 4, modelové experimenty – např. odezva systému na změny v krajině (urbanizace, dezertifikace, ...)



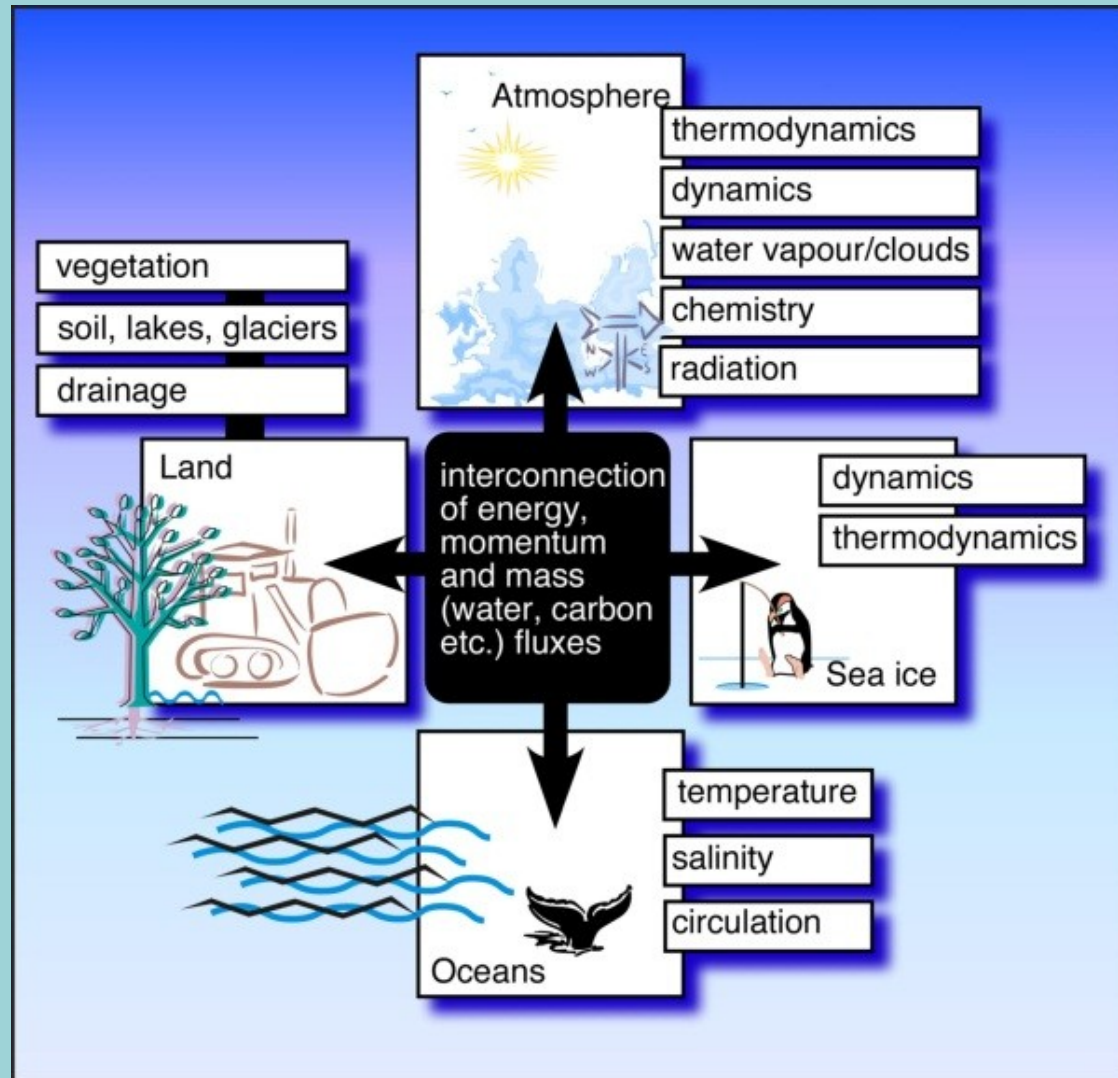
25.11.2013



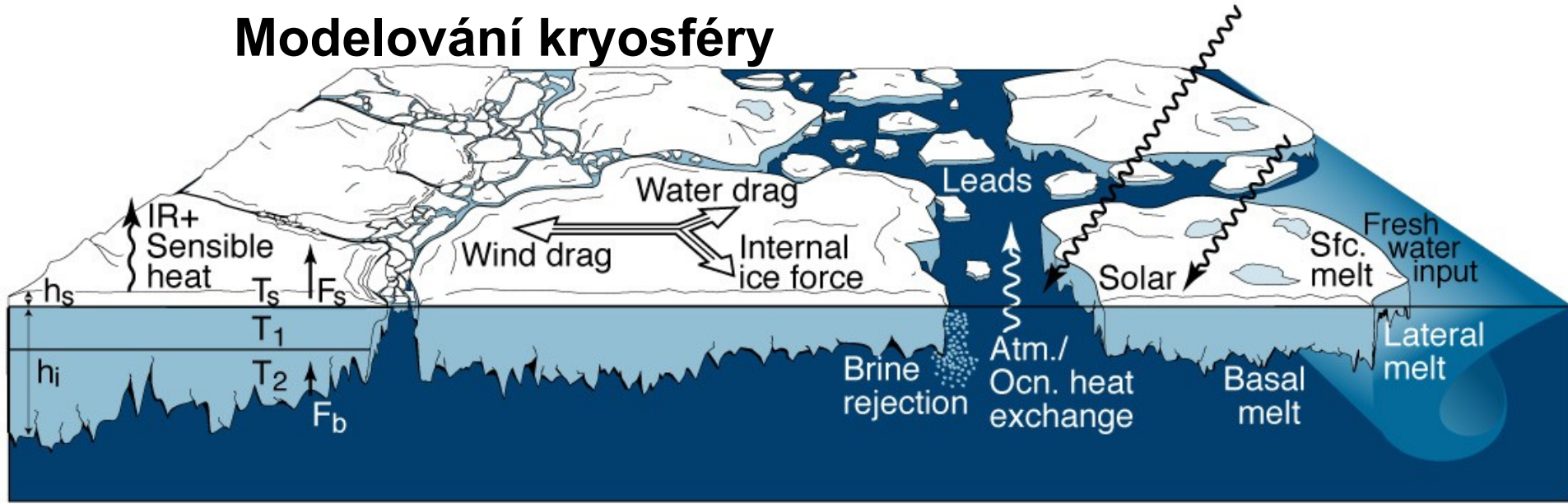
18

# Modely zemského systému (ESMs – Earth System Models)

- v současnosti nejpropracovanější typ modelů
- zahrnutí biogeochemických cyklů (N, C, S, O<sub>3</sub>)
- zpětné vazby, toky a ukládání látek (terestrisko – biosférické modely)
- značná výpočetní náročnost

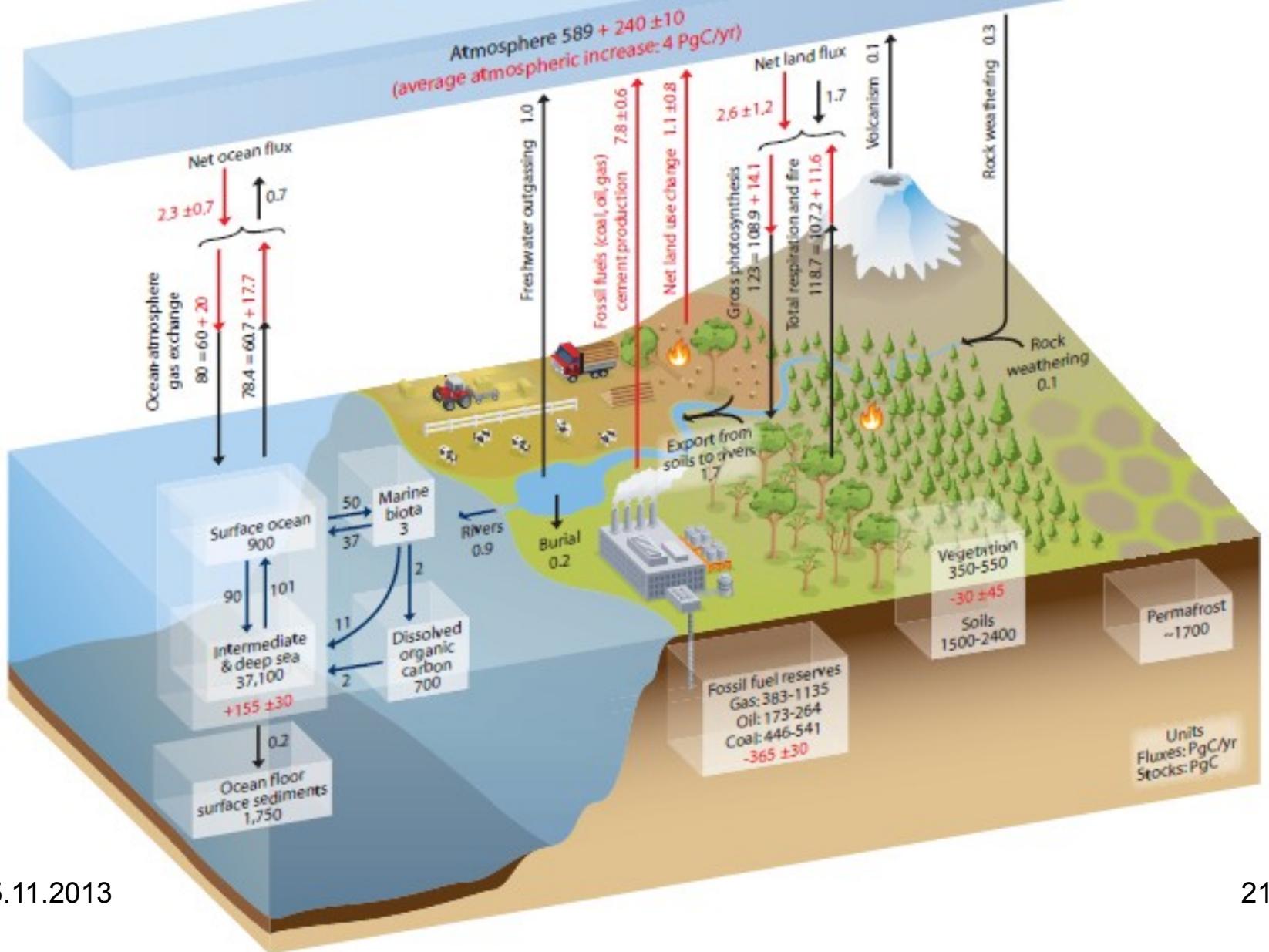


# Modelování kryosféry



- subsystém mořský led – sněhová pokrývka
- energetické toky s atmosférou i oceánem
- sezónní vs. víceletý led
- salinita je důležitým faktorem zámrazu hladiny

# Globální uhlíkový cyklus a jeho změny (1750 vs. 2010)



# Modely zemského systému střední komplexity (EMICs – Earth System Models of Intermediate Complexity)

- obsahují podstatné části zemského systému, ale v nižším rozlišení nebo se zjednodušenými procesy
- řešení specifických otázek (zpětné vazby, klimatická citlivost, apod.) v měřítcích 1000 a více let

## Regionální klimatické modely (RCMs)

- omezené území (kontinenty či jejich části)
- dynamický downscaling globálního modelu

# Průběh klimatického modelování

- 1) Inicializace modelu (nastavení počátečních podmínek)
- 2) Dynamické jádro modelu + parametrizace fyzikálních procesů
- 3) Stanovení okrajových podmínek
- 4) Předpověď – výstup modelu
- 5) Verifikace
- 6) Post processing
- 7) Analýzy výstupů
- 8) Napojení na další modely (ESM)

# Komponenty klimatického modelu

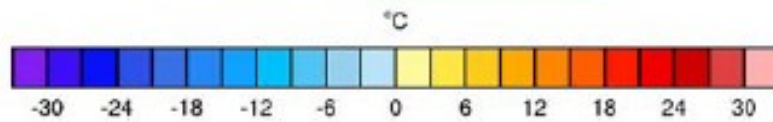
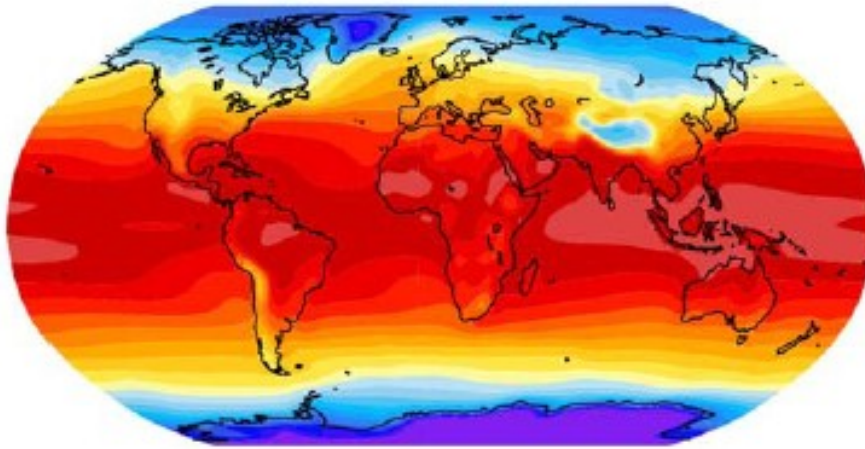
- uhlíkový cyklus (CMIP5) – okyselení oceánů (pokles kalcifikace)
- dusíkový cyklus
- aerosolové částice – cyklus síry a jejích sloučenin
- cyklus methanu, změny permafrostu
- dynamické vegetační modely (DGVMs)
- ekosystémové požáry
- změny LU/LC (land-use/land cover)
- interakce klima-chemické sloučeniny (halogenované uhlovodíky, ozon)
- pevninské ledovce



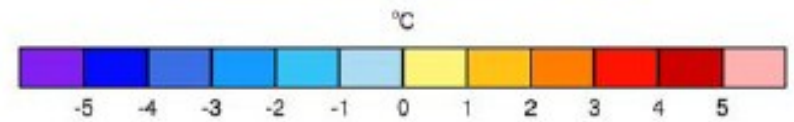
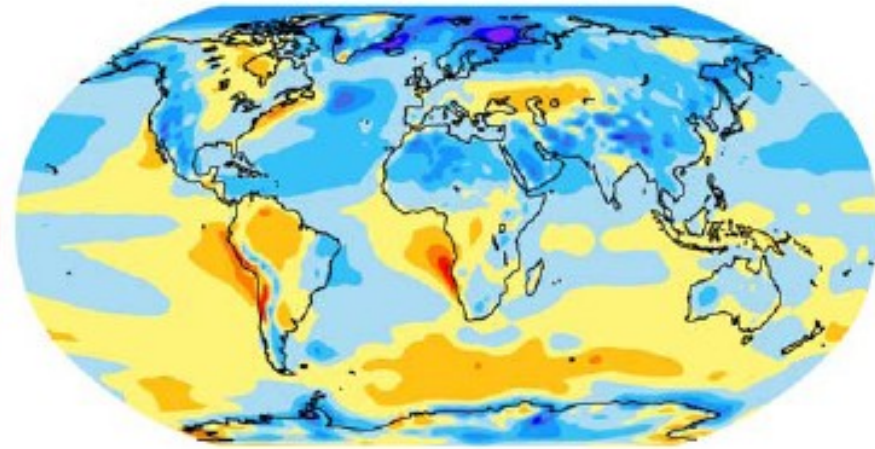
# Výstupy klimatických modelů

- horizontální, vertikální rozlišení
- věrohodnost a spolehlivost modelů se hodnotí pomocí tzv. „performance metric“
- ansámblové zpracování výstupů (více modelů)
- vizuální srovnání → ansámblové průměry

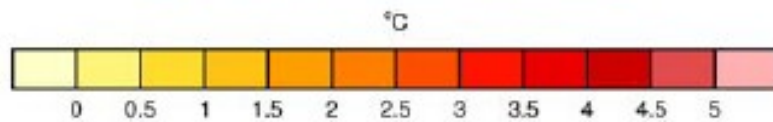
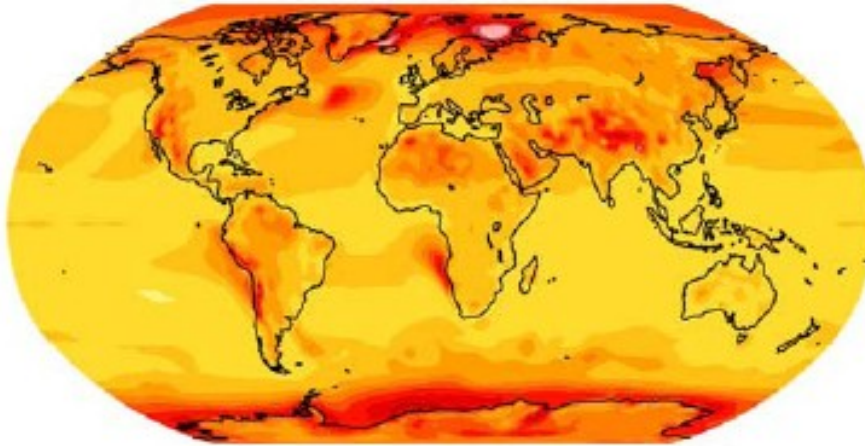
(a) Multi Model Mean Surface Temperature



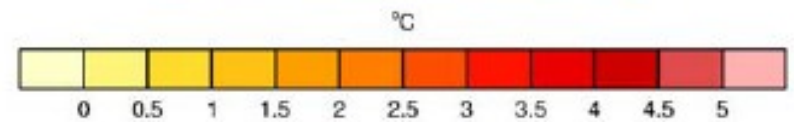
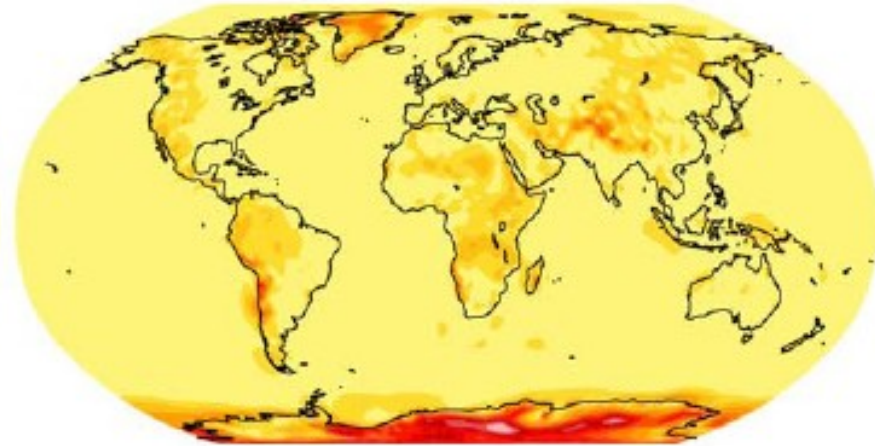
(b) Multi Model Mean Bias



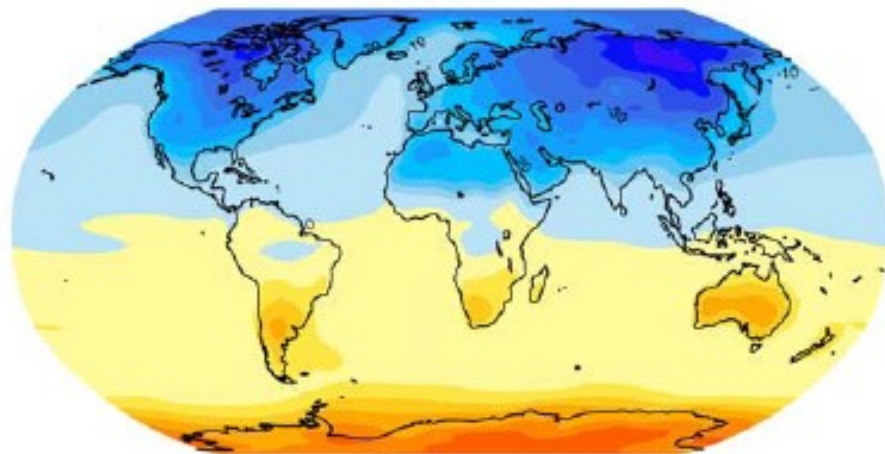
(c) Multi Model Mean of Absolute Error



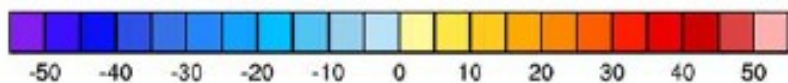
(d) Mean Reanalysis Inconsistency



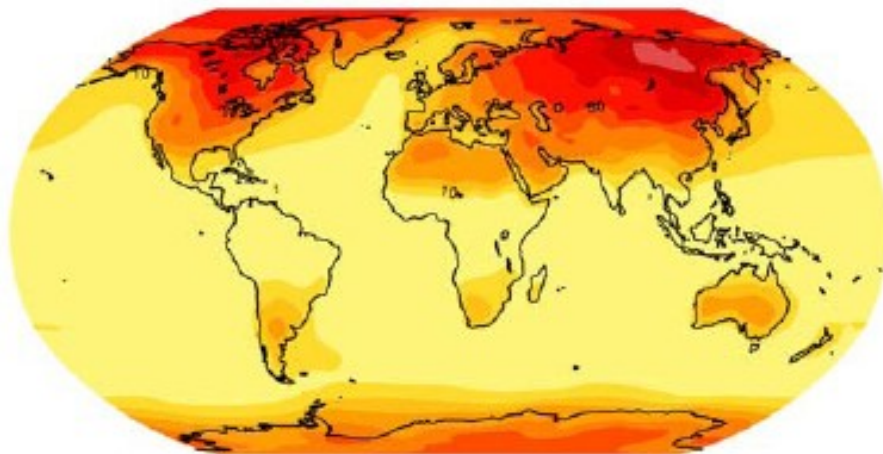
(a) Multi Model Mean Surface Temperature Seasonality



°C



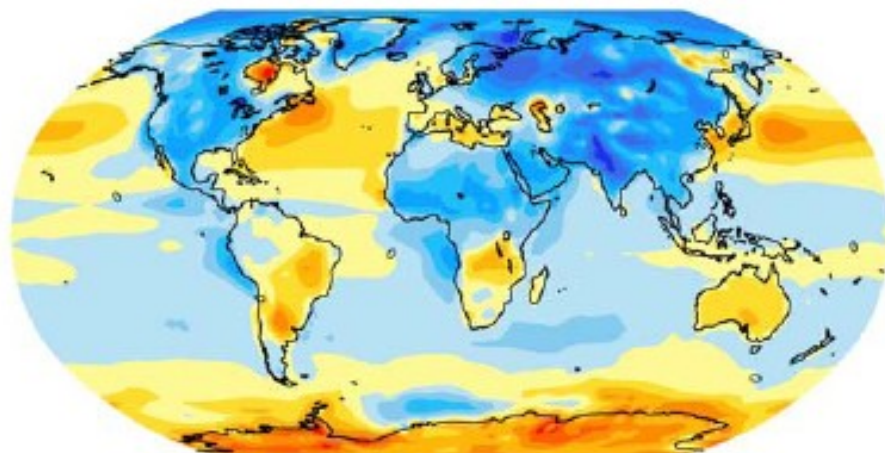
(b) Multi Model Mean of Absolute Seasonality



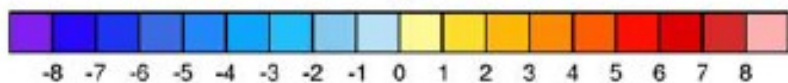
°C



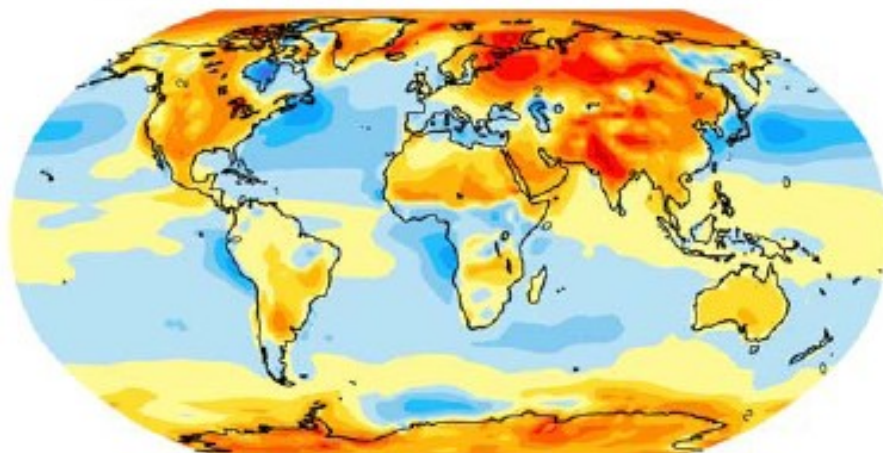
(c) Multi Model Mean Bias in Seasonality



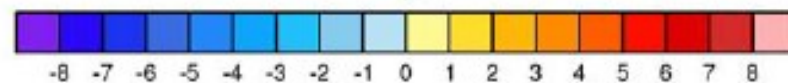
°C



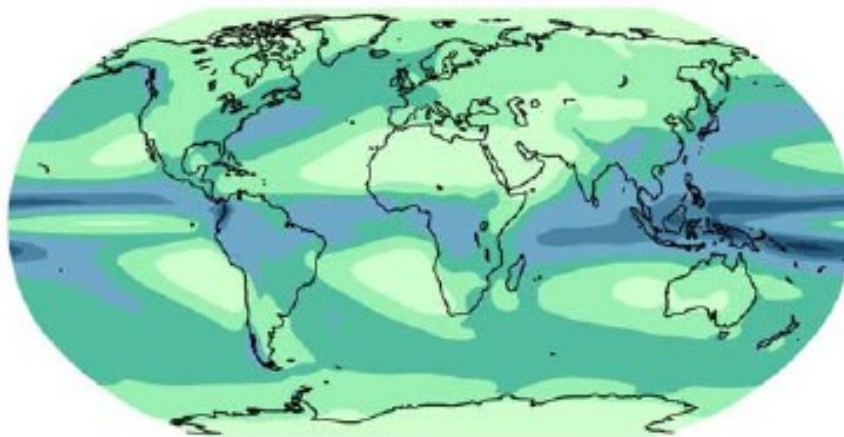
(d) Multi Model Mean Bias in Absolute Seasonality



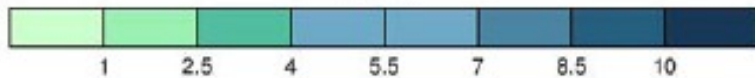
°C



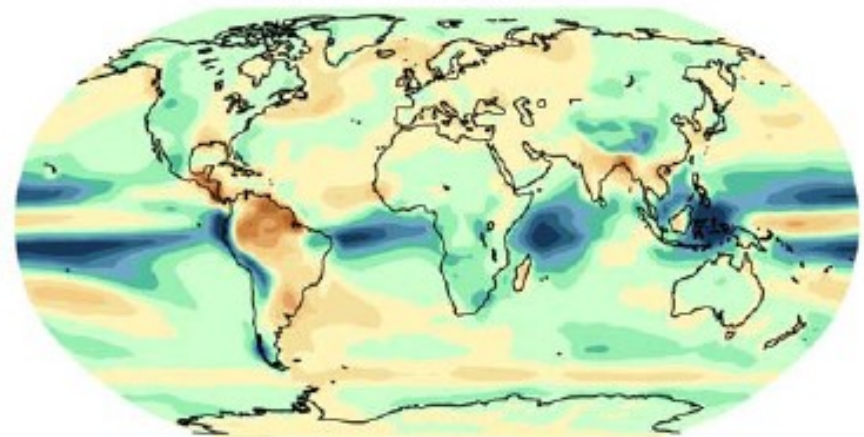
(a) Multi Model Mean Precipitation



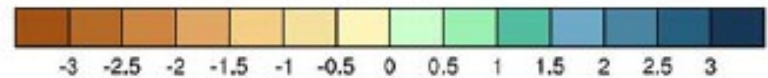
mm day<sup>-1</sup>



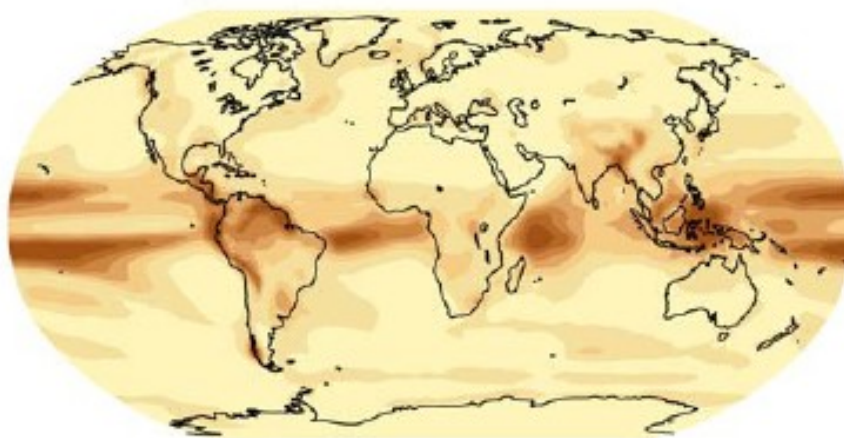
(b) Multi Model Mean Bias



mm day<sup>-1</sup>



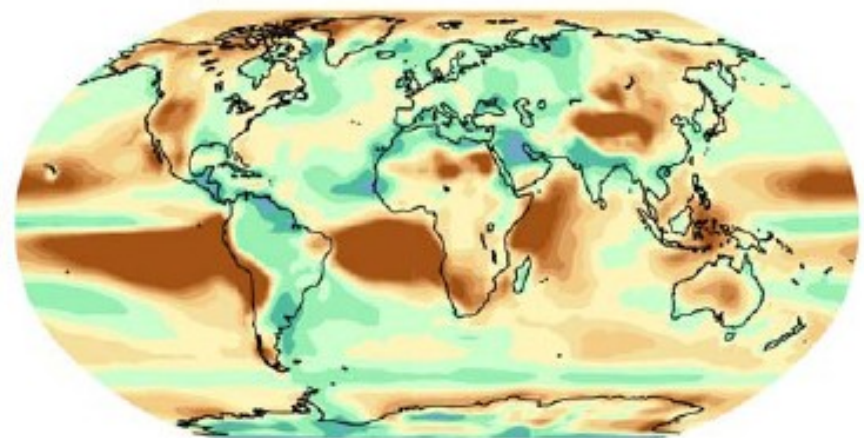
(c) Multi Model Mean of Absolute Error



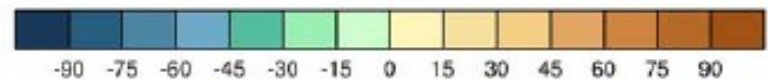
mm day<sup>-1</sup>



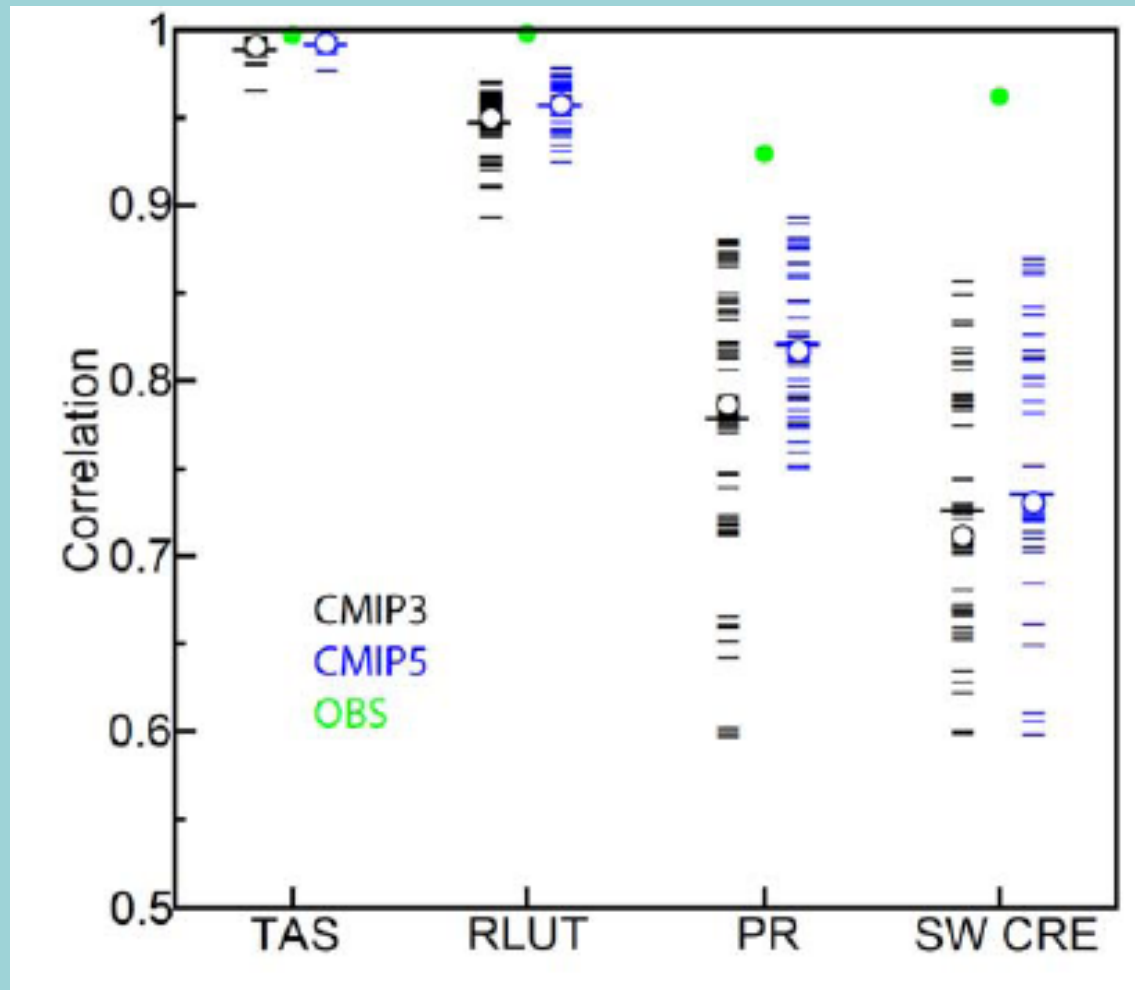
(d) Multi Model Mean of Relative Error



%



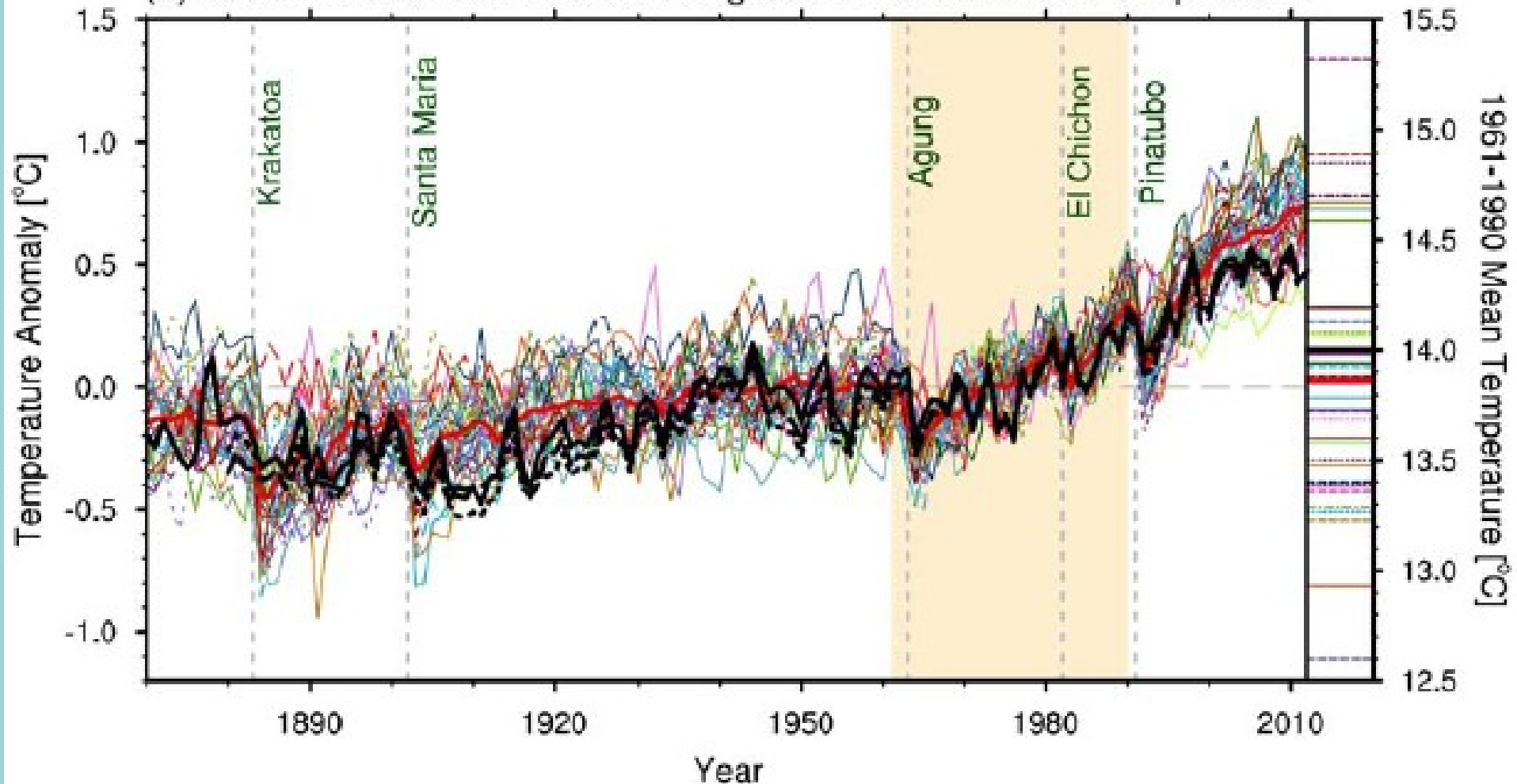
# Kvantifikace výkonnosti modelů





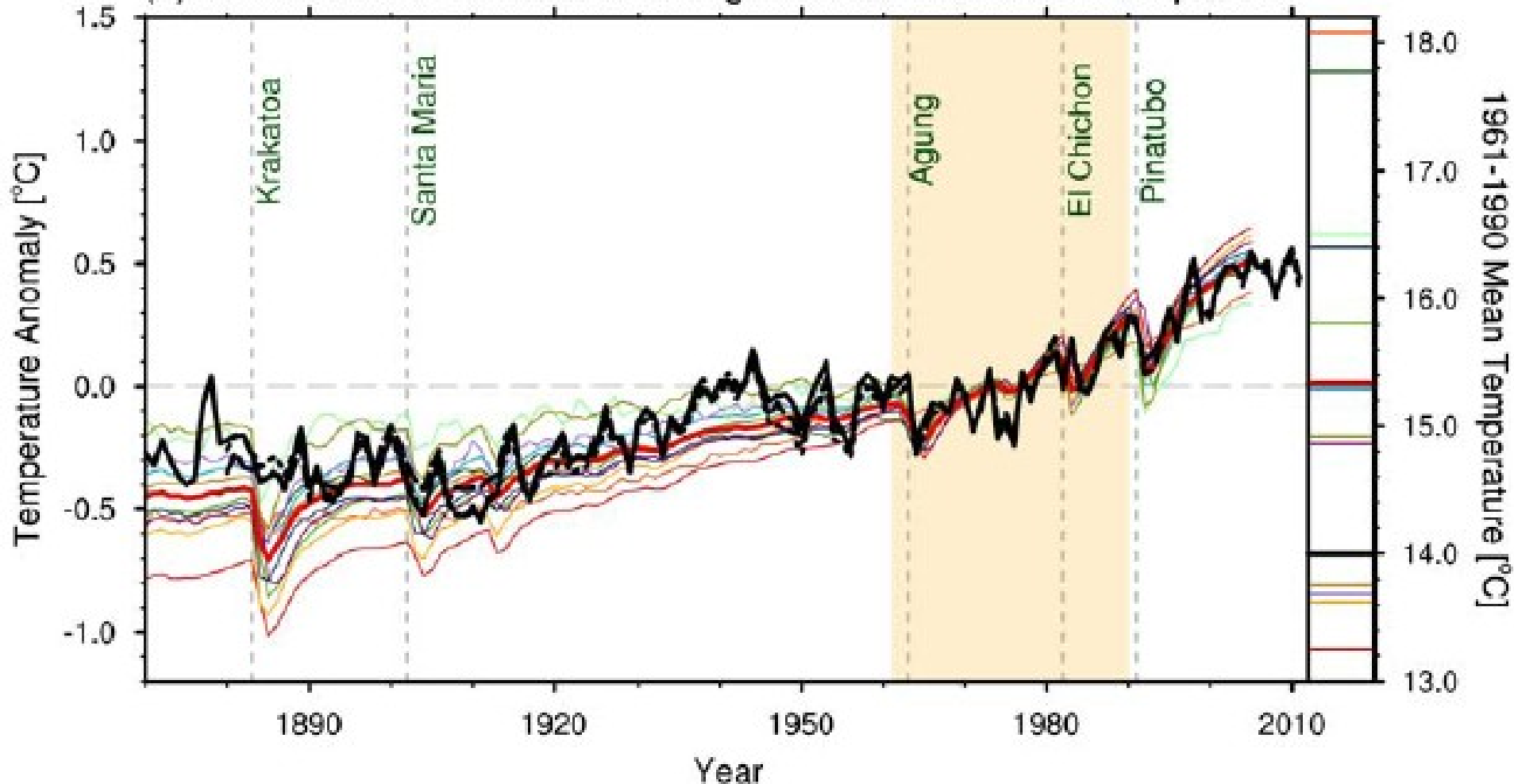
# Globální povrchová teplota - ESMs

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



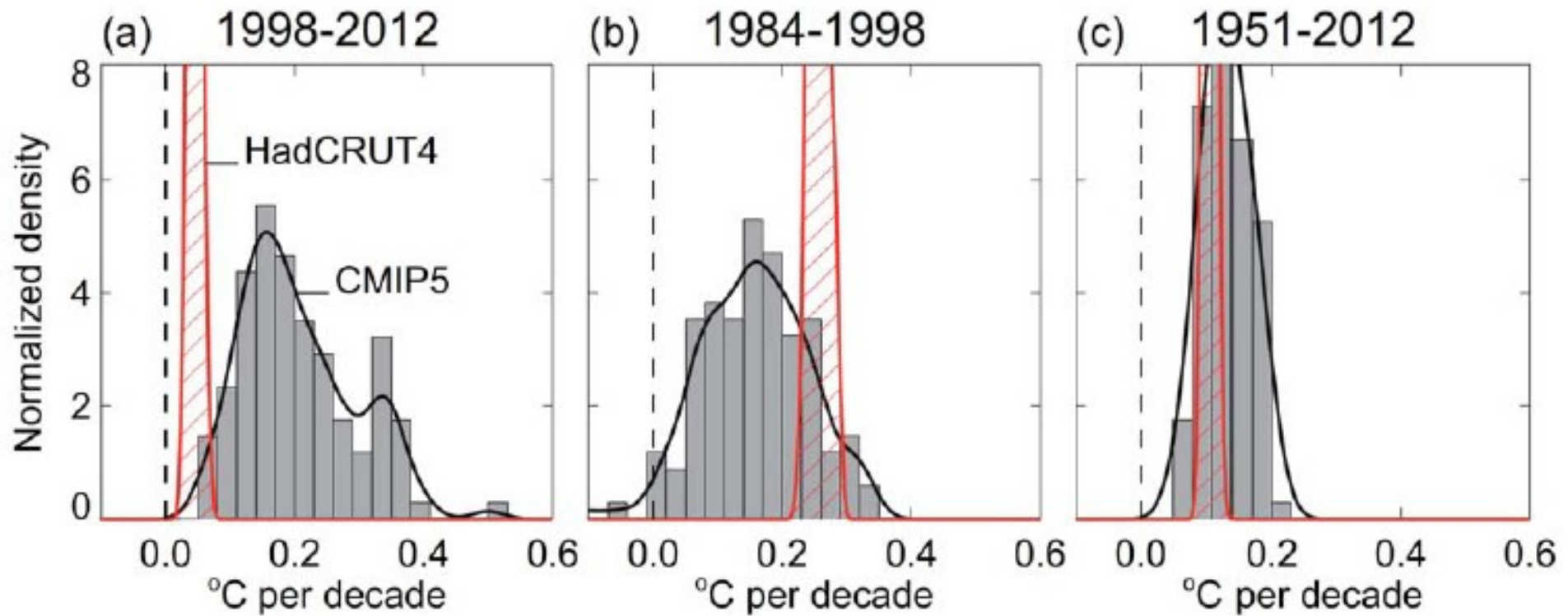
# Globální povrchová teplota - EMICs

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



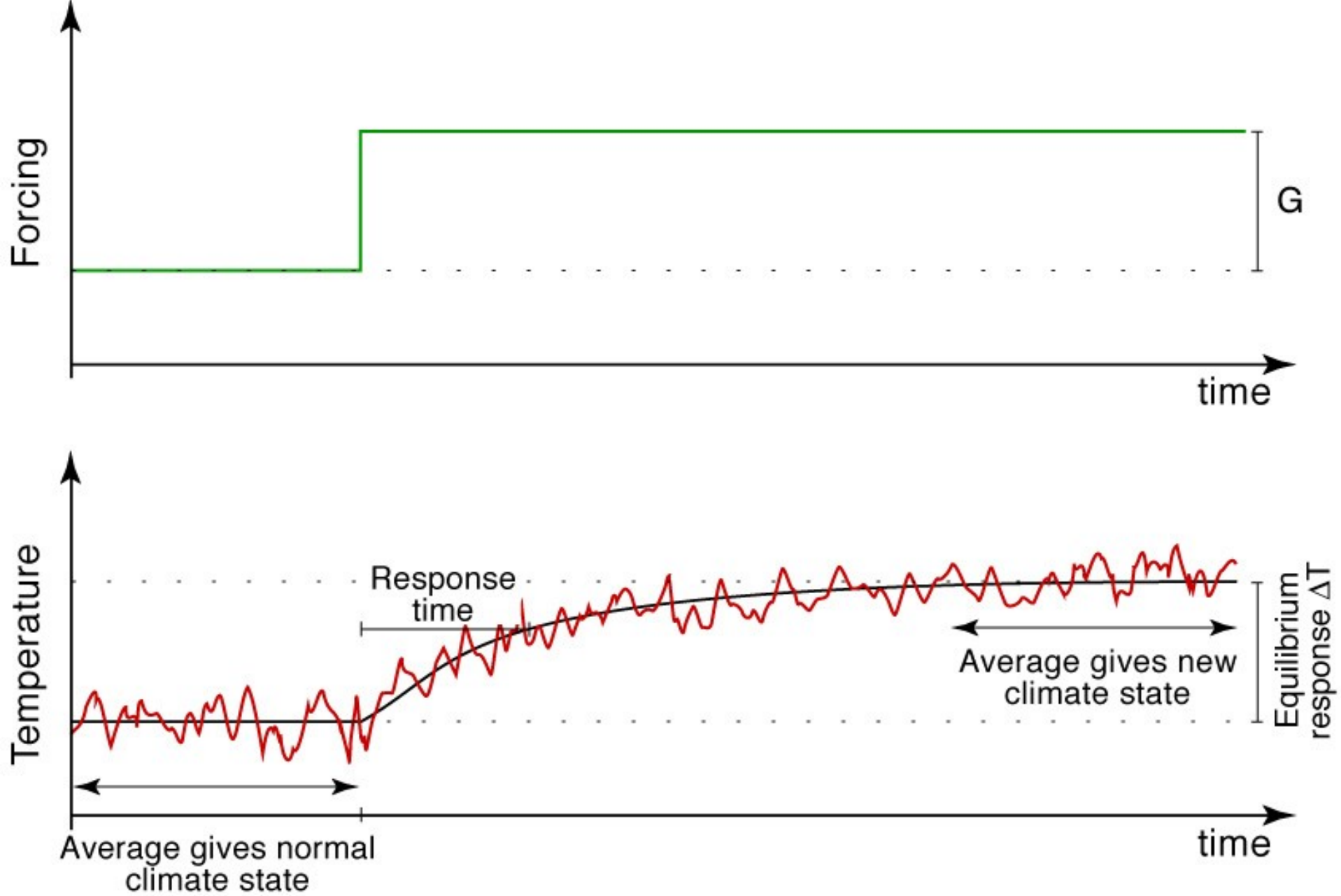


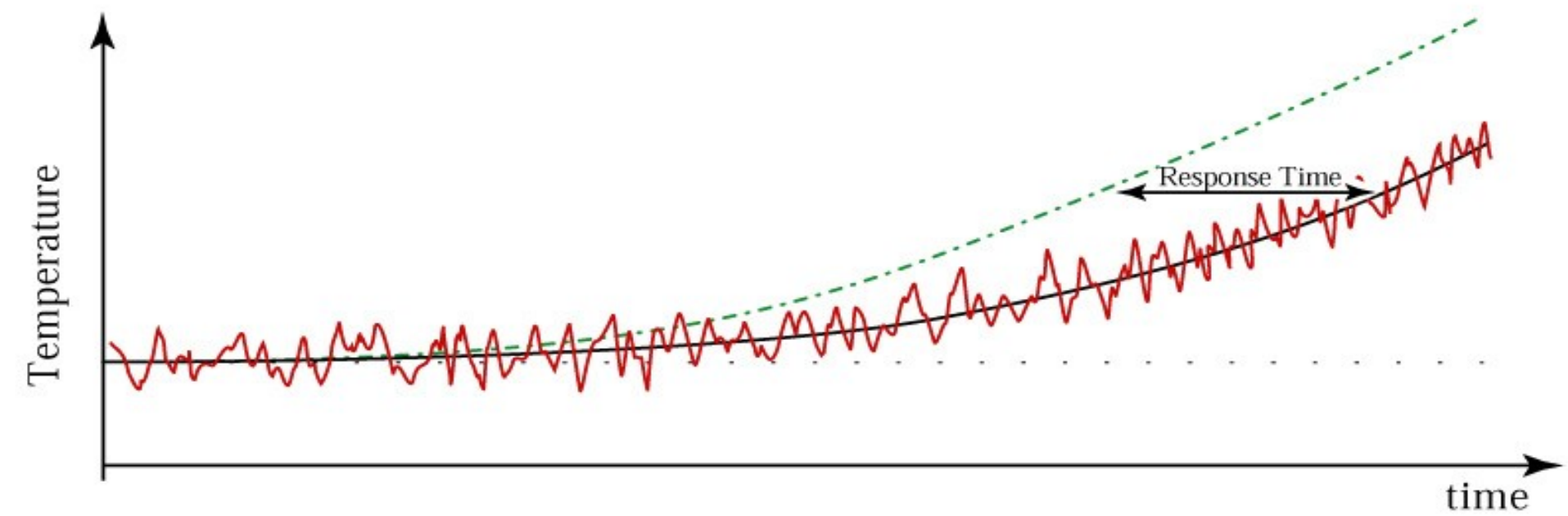
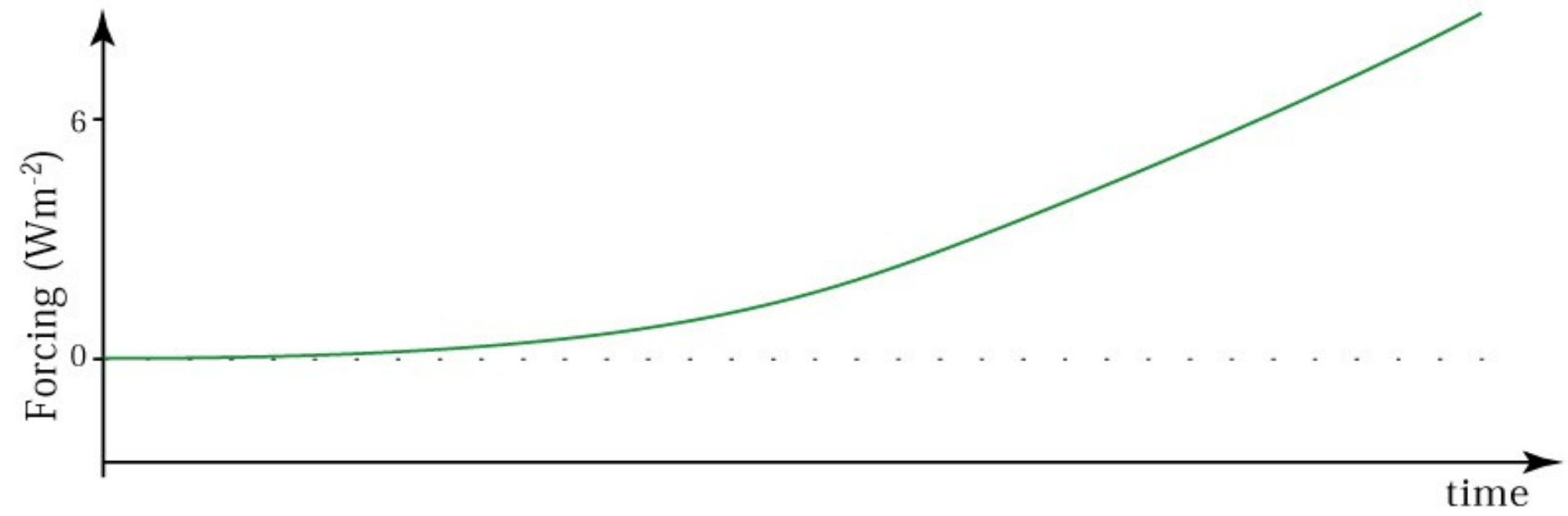
# 1998 – 2013: Konec globálního oteplování?

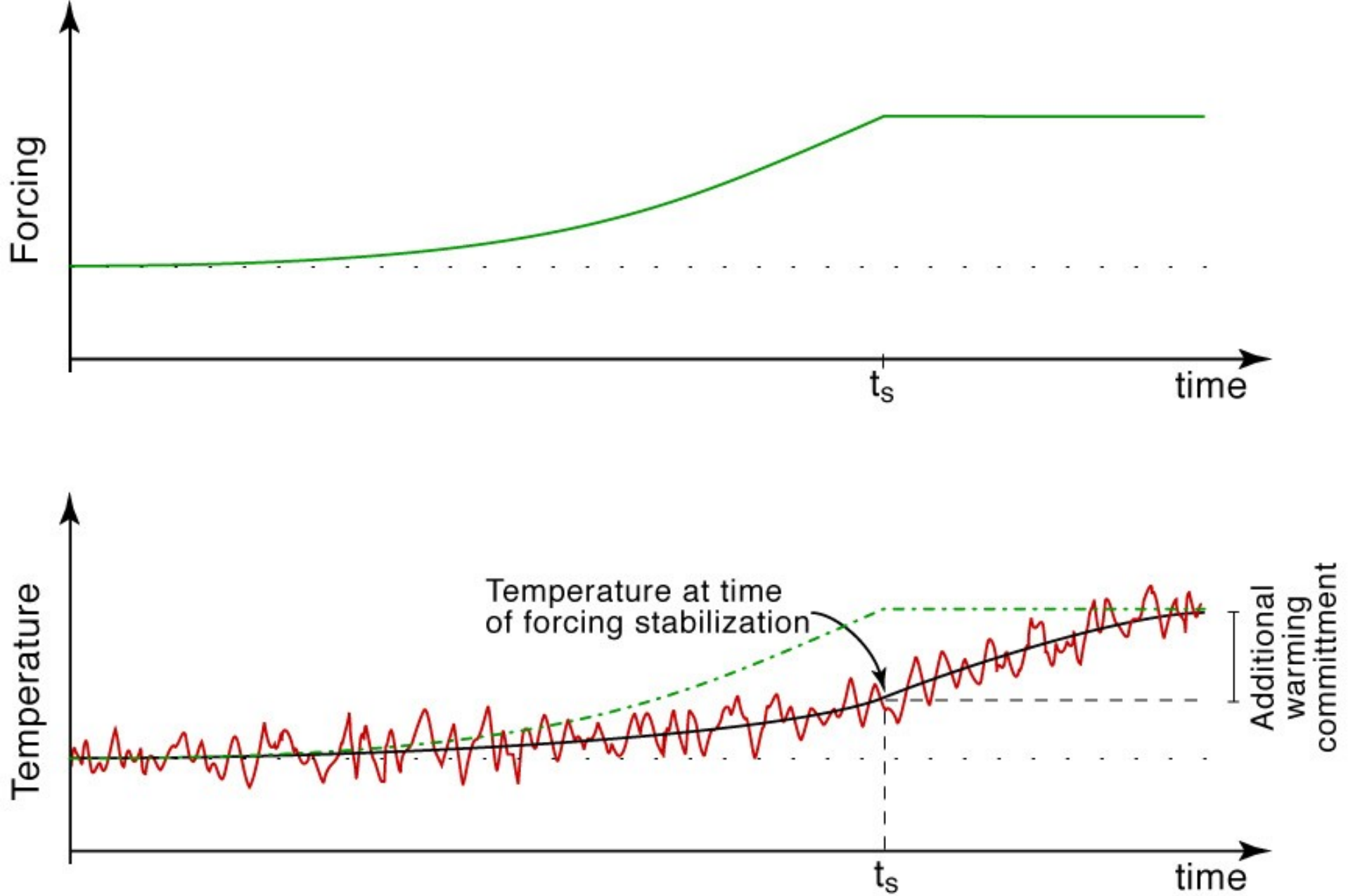


# Odezva klimatického systému

- rovnovážné studie
- transientní (přechodové) studie







# KLIMATICKÁ CITLIVOST

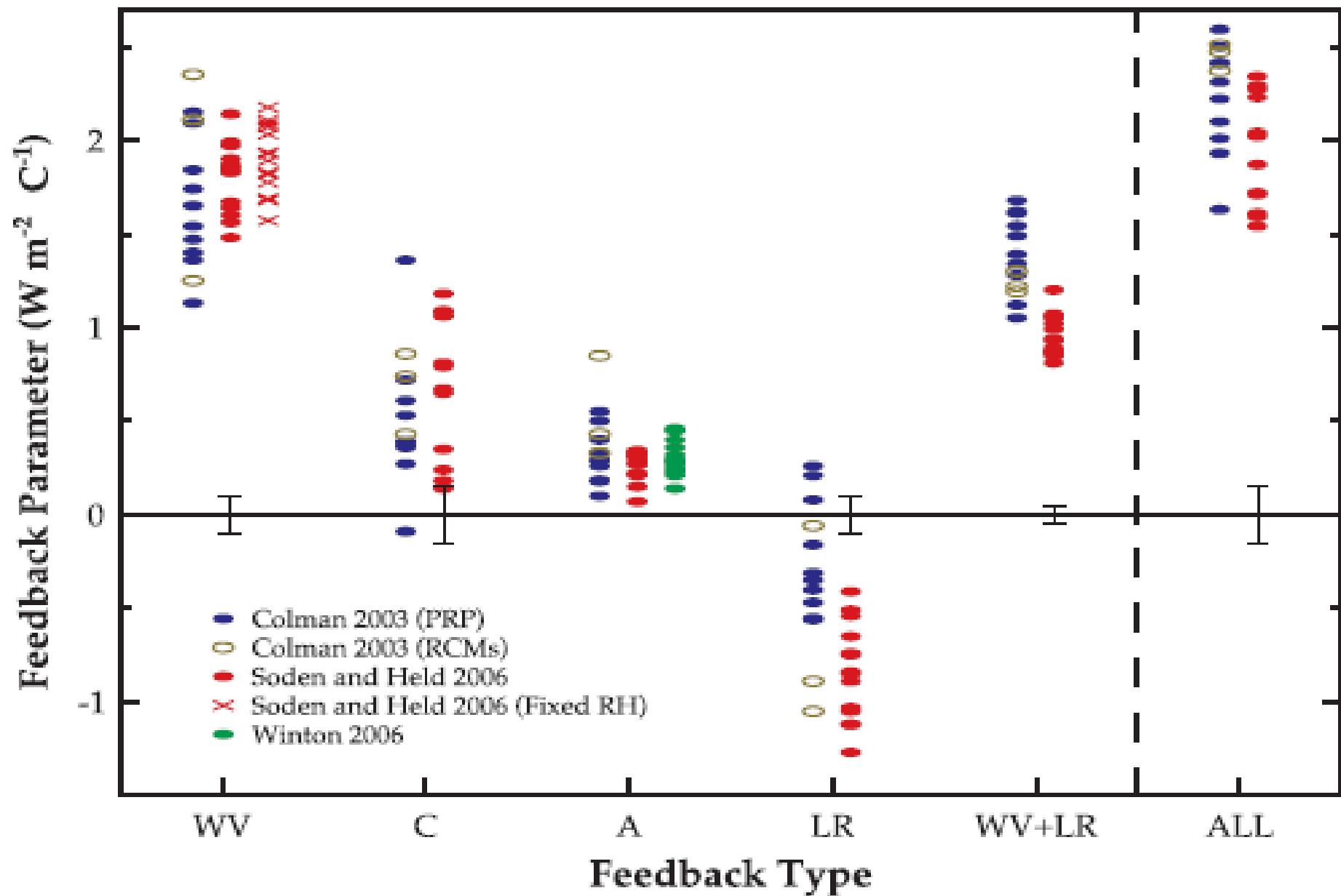
- použití GCMs – zjištění odezvy klimatického systému na růst koncentrací skleníkových plynů
- **kontrolní klima:** na základě počátečních a okrajových podmínek odpovídajících současnému klimatu (tj. ekvivalentního CO<sub>2</sub>) se výpočet provádí pro několik modelových let až desetiletí, až se modelová cirkulace dostane do kvazistacionárního stavu → „kontrolní klima“, též 1xCO<sub>2</sub> (mělo by co nejlépe odpovídat skutečnosti)
- **experimentální klima:** výpočet se opakuje pro změněné vstupní hodnoty CO<sub>2</sub> (např. 2xCO<sub>2</sub>) až se dosáhne rovnováhy modelové cirkulace → z odpovídajících hodnot proměnných se počítá „experimentální klima“, též 2xCO<sub>2</sub>

- rozdíl obou simulovaných stavů klimatu ( $2\times\text{CO}_2$  minus  $1\times\text{CO}_2$ ) představuje modelovou odezvu klimatického systému na radiační poruchu způsobenou růstem  $\text{CO}_2$  v atmosféře
- **rovnovážné studie** – předpokládá se skoková změna koncentrace GHG (neodpovídá realitě)
- **přechodové (transientní) studie** – počítá se s kontinuálním nárůstem GHG, kdy modelové klima postupně prochází sérií rovnovážných stavů (menší realizovaná změna teploty oproti očekávané rovnovážné změně)
- v závislosti na **citlivosti modelu** (tj. reakce modelu na zdvojnásobení  $\text{CO}_2$ ) dosahuje realizovaný vzestup teploty kolem 50 % rovnovážného vzestupu při citlivosti  $4,5\text{ }^\circ\text{C}$  a kolem 80 % při citlivosti  $1,5\text{ }^\circ\text{C}$

AOGCM	Equilibrium climate sensitivity (°C)	Transient climate response (°C)
1: BCC-CM1	n.a.	n.a.
2: BCCR-BCM2.0	n.a.	n.a.
3: CCSM3	2.7	1.5
4: CGCM3.1(T47)	3.4	1.9
5: CGCM3.1(T63)	3.4	n.a.
6: CNRM-CM3	n.a.	1.6
7: CSIRO-MK3.0	3.1	1.4
8: ECHAM5/MPI-OM	3.4	2.2
9: ECHO-G	3.2	1.7
10: FGOALS-g1.0	2.3	1.2
11: GFDL-CM2.0	2.9	1.6
12: GFDL-CM2.1	3.4	1.5
13: GISS-AOM	n.a.	n.a.
14: GISS-EH	2.7	1.6
15: GISS-ER	2.7	1.5
16: INM-CM3.0	2.1	1.6
17: IPSL-CM4	4.4	2.1
18: MIROC3.2(hires)	4.3	2.6
19: MIROC3.2(medres)	4.0	2.1
20: MRI-CGCM2.3.2	3.2	2.2
21: PCM	2.1	1.3
22: UKMO-HadCM3	3.3	2.0
23: UKMO-HadGEM1	4.4	1.9

- citlivost modelu se u rovnovážných a transientních studií výrazně liší, shoda napříč modely
- silný vliv tzv. klimatických zpětných vazeb





# ZROJE

- 1) **WARNER, T. W.:** *Numerical weather and climate prediction*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. 526 p.
- 2) **FLATO, G., MAROTZKE, J., ABIODUN, B. et al.:** Evaluation of climate models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fifth Assessment Report (AR5)*, Final draft. Available online at: [http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5\\_WGI12Doc2b\\_FinalDraft\\_All.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI12Doc2b_FinalDraft_All.pdf)
- 3) **MCGUFFIE, K.:** *A climate modelling primer*. West Sussex, UK: Wiley, 2011. 280 p.
- 4) **NEELIN, D.:** *Climate change and climate modeling*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. 282 p.
- 5) **GONZALES-ROUCO, J. F.:** *Personal commentary*, 2012.