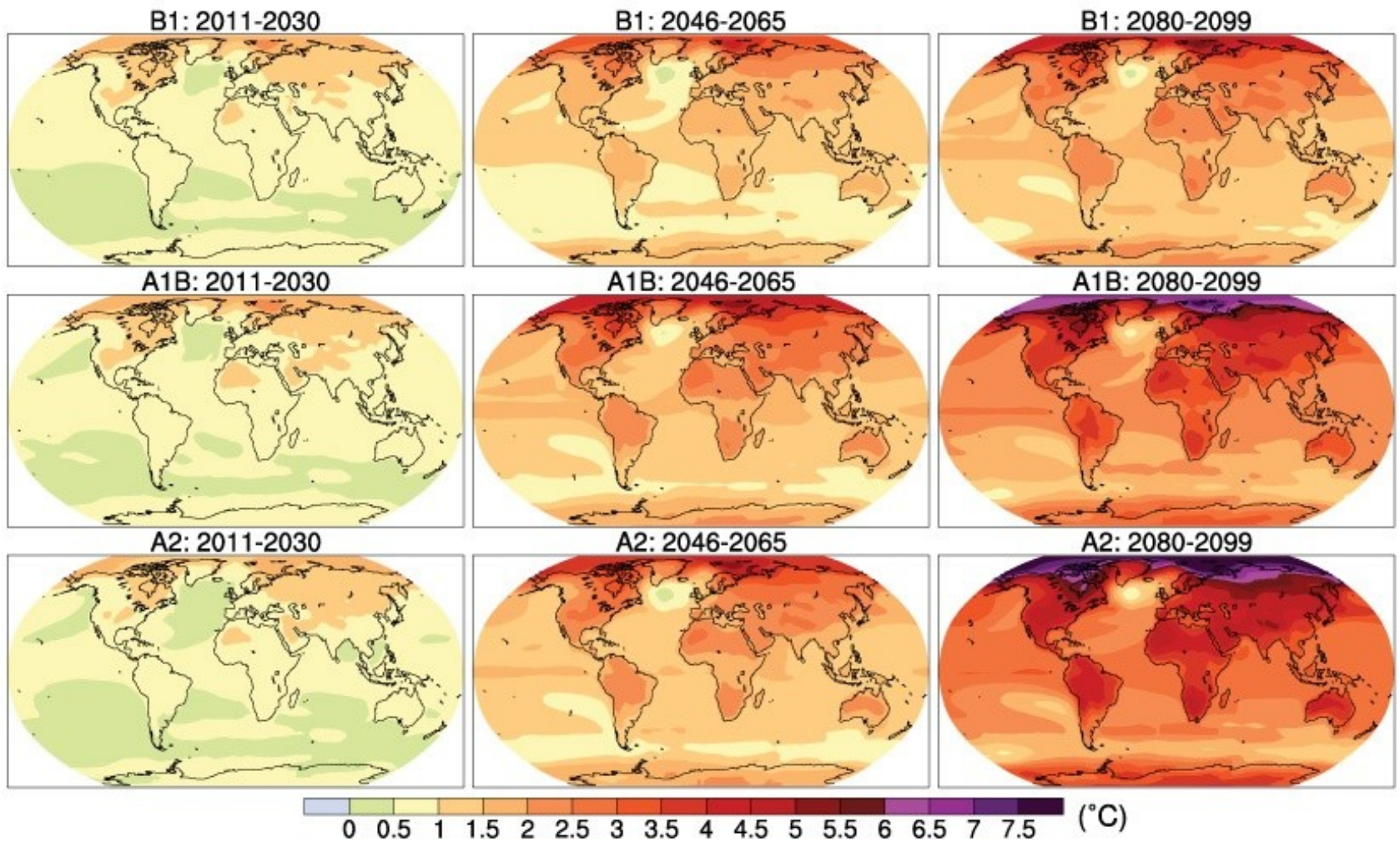


9. MODELOVÁNÍ KLIMATU



Petr Kolář

Z0076 Meteorologie a klimatologie

OBSAH PŘEDNÁŠKY

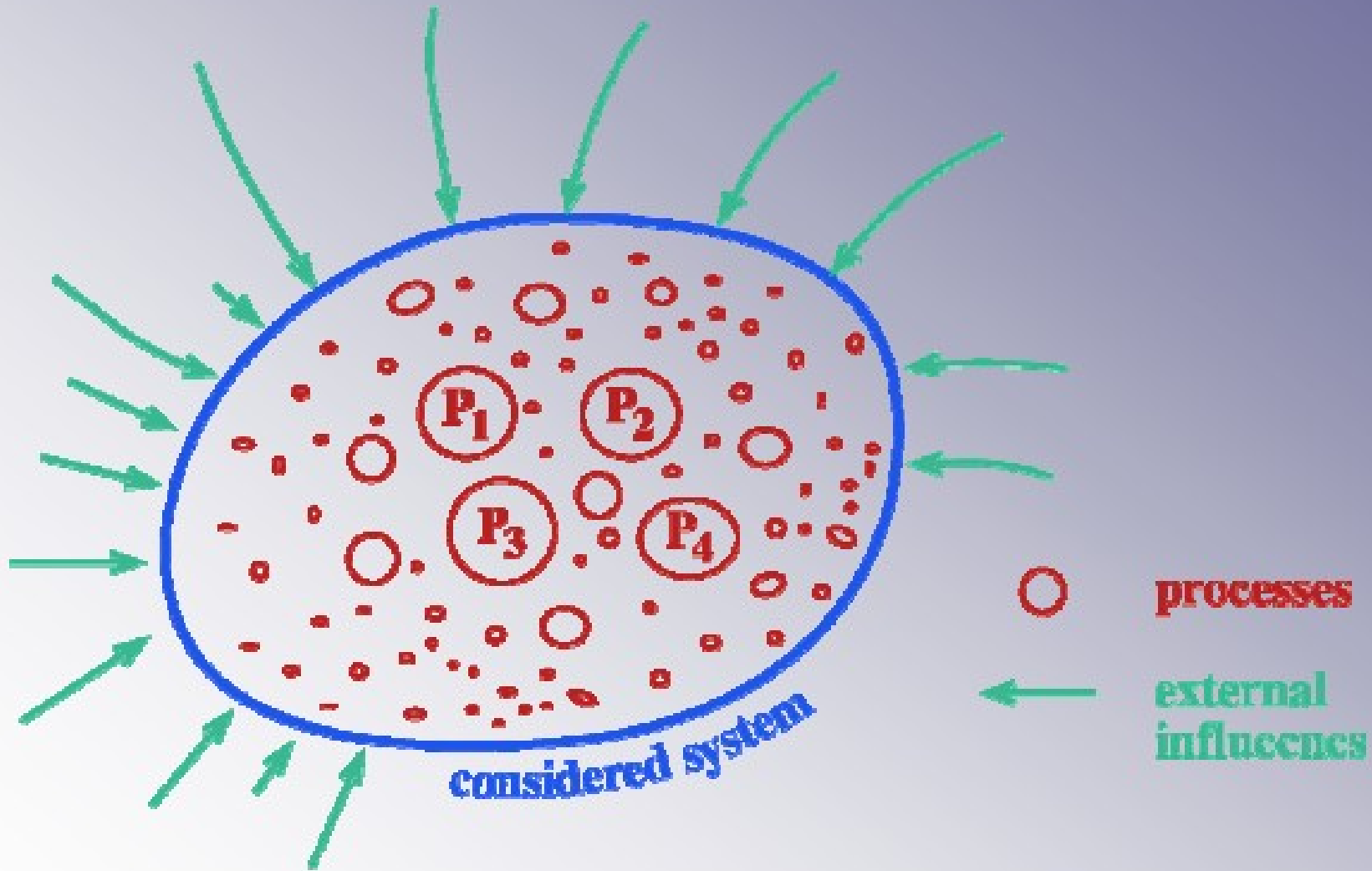
1, NUMERICKÝ MODEL ATMOSFÉRY

2, TYPY KLIMATICKÝCH MODELŮ

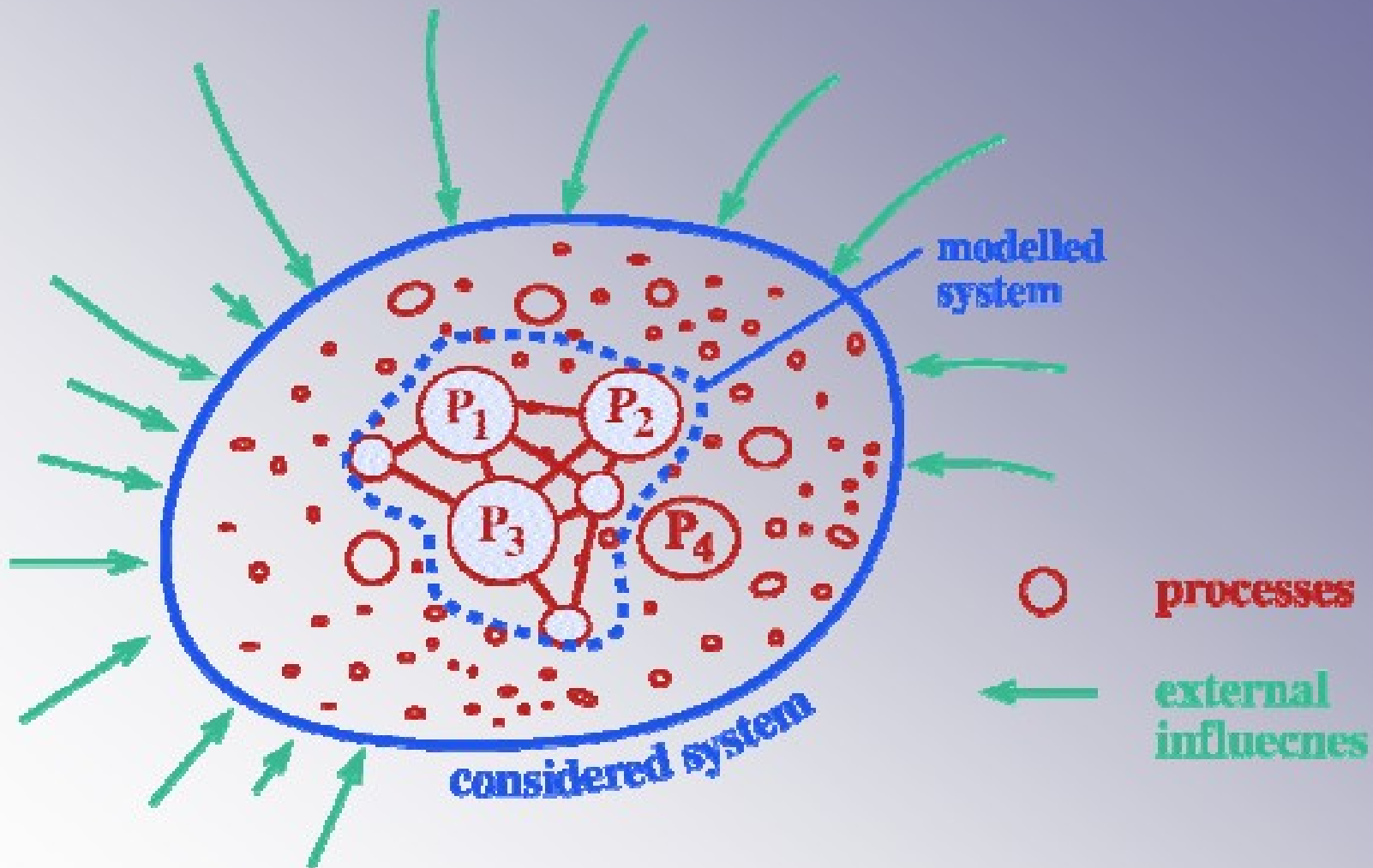
3, KLIMATICKÉ MODELOVÁNÍ – SOUČASNOST

4, DOWNSCALING

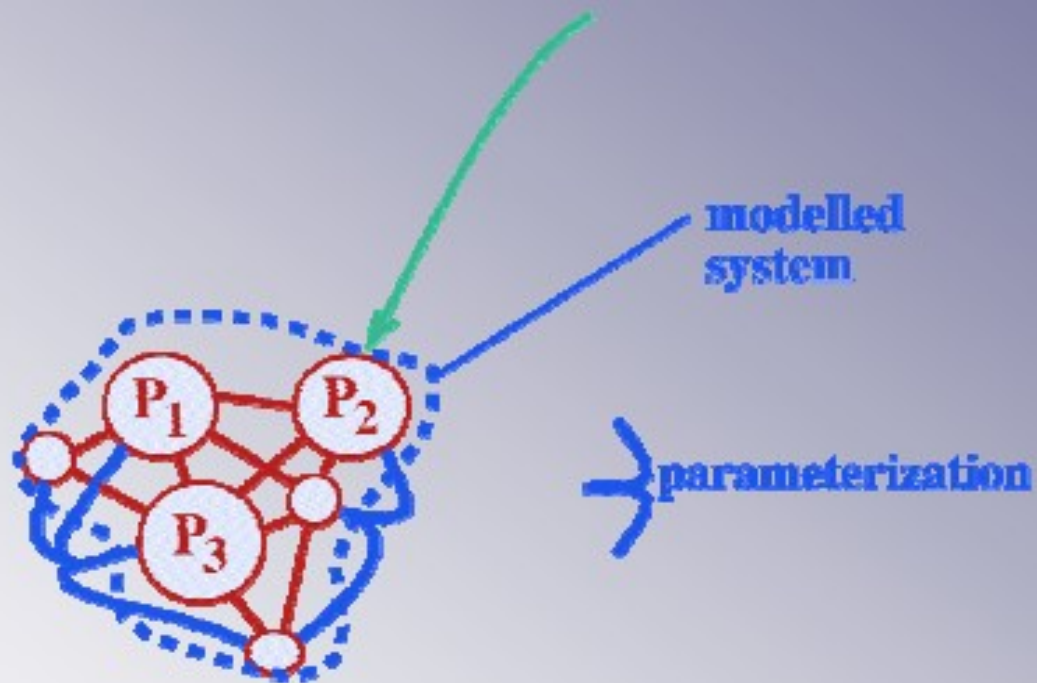
Models & realism: conceptual



Models & realism: conceptual



Models & realism: conceptual



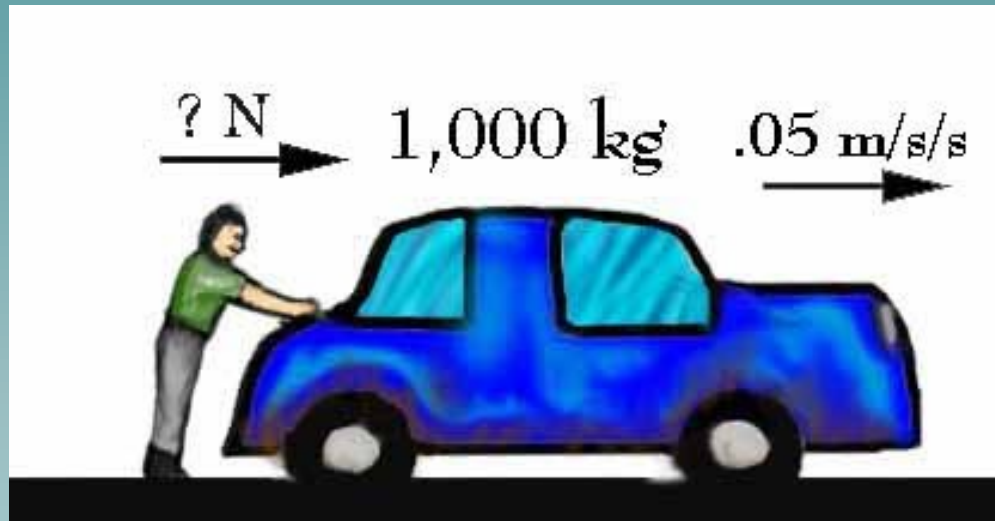
- fig 1.2

NUMERICKÝ MODEL ATMOSFÉRY

- **numerický model atmosféry** – popis základních dynamických a fyzikálních vlastností různých složek atmosféry a jejich interakcí ve vhodné počítačové formě s nutnými přiblíženími (**aproximacemi**)
- **aproximace** usnadňují numerický výpočet (nižší výpočetní náročnost)
- příklady aprox.: hydrostatická, Boussinesqova, anelastická, „shallow-fluid“, atd.
- **parametrizace** - fyzikální proces je popsán nějakým zjednodušeným výpočetním schématem s pomocí jednoduchých parametrů obsažených v rovnicích
- malé měřítko procesů/výpočetní náročnost/neznalost analytického vyjádření

- **dynamické rovnice v modelu:**

- druhý Newtonův pohybový zákon (horizontální zrychlení určitého objemu vzduchu je ovlivněno horizontálním tlakovým gradientem, třením a uchylující silou zemské rotace)



- hydrostatická rovnice (tlak v určitém bodě je dán hmotností atmosféry nad ním, vertikální zrychlení se neberou v úvahu)
- rovnice kontinuity (zajišťuje zachování hmoty)

- **fyzika modelu:**

- a) stavová rovnice plynů

- b) termodynamická rovnice (zákon zachování energie)

- c) parametrizace vlhkostních procesů (např. výpar, kondenzace, - mikrofyzika oblak), fig 4.2

- d) parametrizace radiačních procesů (absorpce a emise různých druhů záření), fig 4.21

- e) parametrizace konvektivních procesů

- f) parametrizace turbulence, mezní vrstva

- g) parametrizace stochastických procesů

- h) parametrizace oblačnosti, oblačného pokrytí

- parametrizace výměny hybnosti, tepla a vodní páry na rozhraní atmosféry a vodních povrchů
- rovnice v modelu jsou **diferenciální**, tj. popisují procesy, ve kterých se veličiny (např. tlak, teplota) mění s časem a místem
- je-li známa velikost změny určité veličiny, lze počítat její velikost v následujícím časovém kroku – opakování tohoto postupu je integrace
- **integrace rovnic** – vypočítávají se nové hodnoty všech nezbytných veličin pro následné časové kroky – to vyjadřuje předpovědní schopnost modelu

- Fig 3.2
- **vstupní a okrajové podmínky** inicializují numerické výpočty

Numerická kostra modelu:

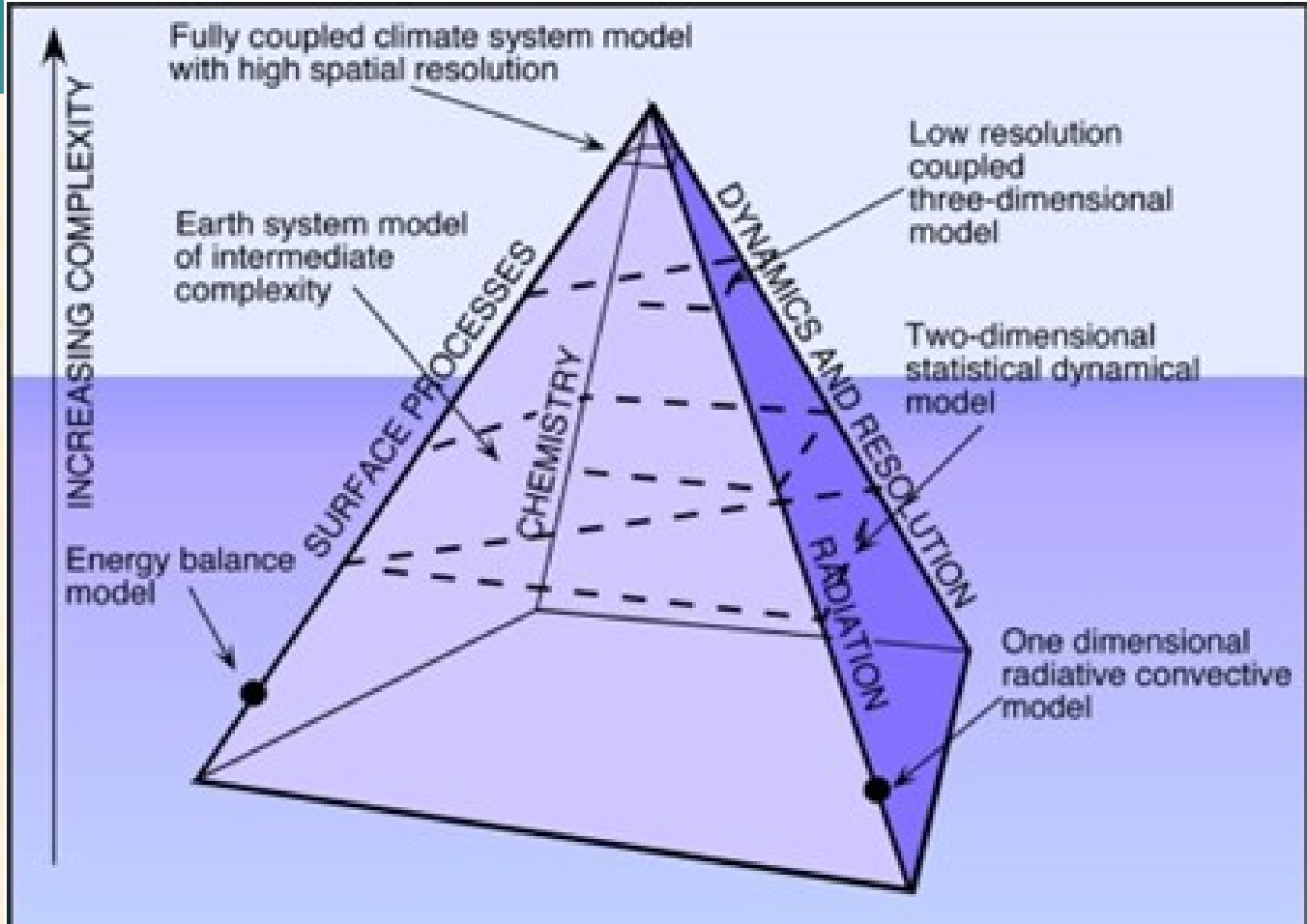
1, model reprezentuje realitu pomocí gridu fig 3.13

2, výpočetní metody (metoda konečných diferencí, spektrální metody, metody konečného objemu)

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

α_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 $10^\circ \rightarrow$ 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 mezišířkového transportu energie A:

$$A = k (T - T_g)$$

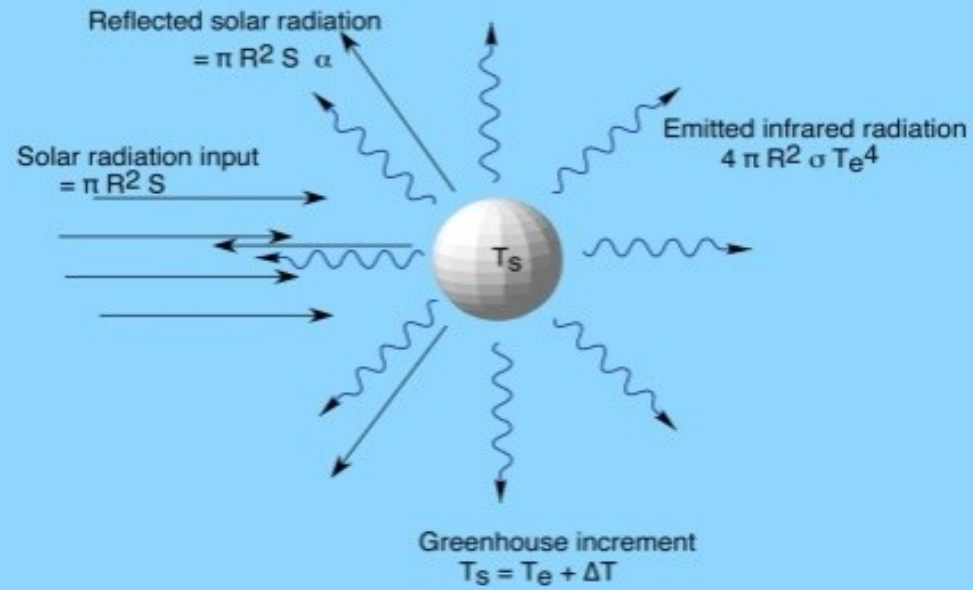
T – teplota daného šířkového pásu

T_g – průměrná globální teplota

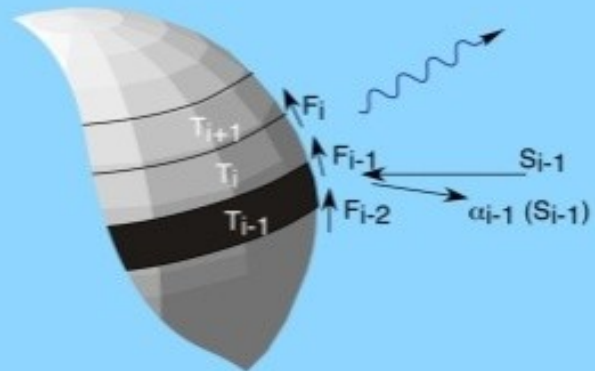
k – empirická konstanta

- role zpětné vazby mezi teplotou a albedem (rozsah sněhové a ledové pokrývky)

a) Global EBM

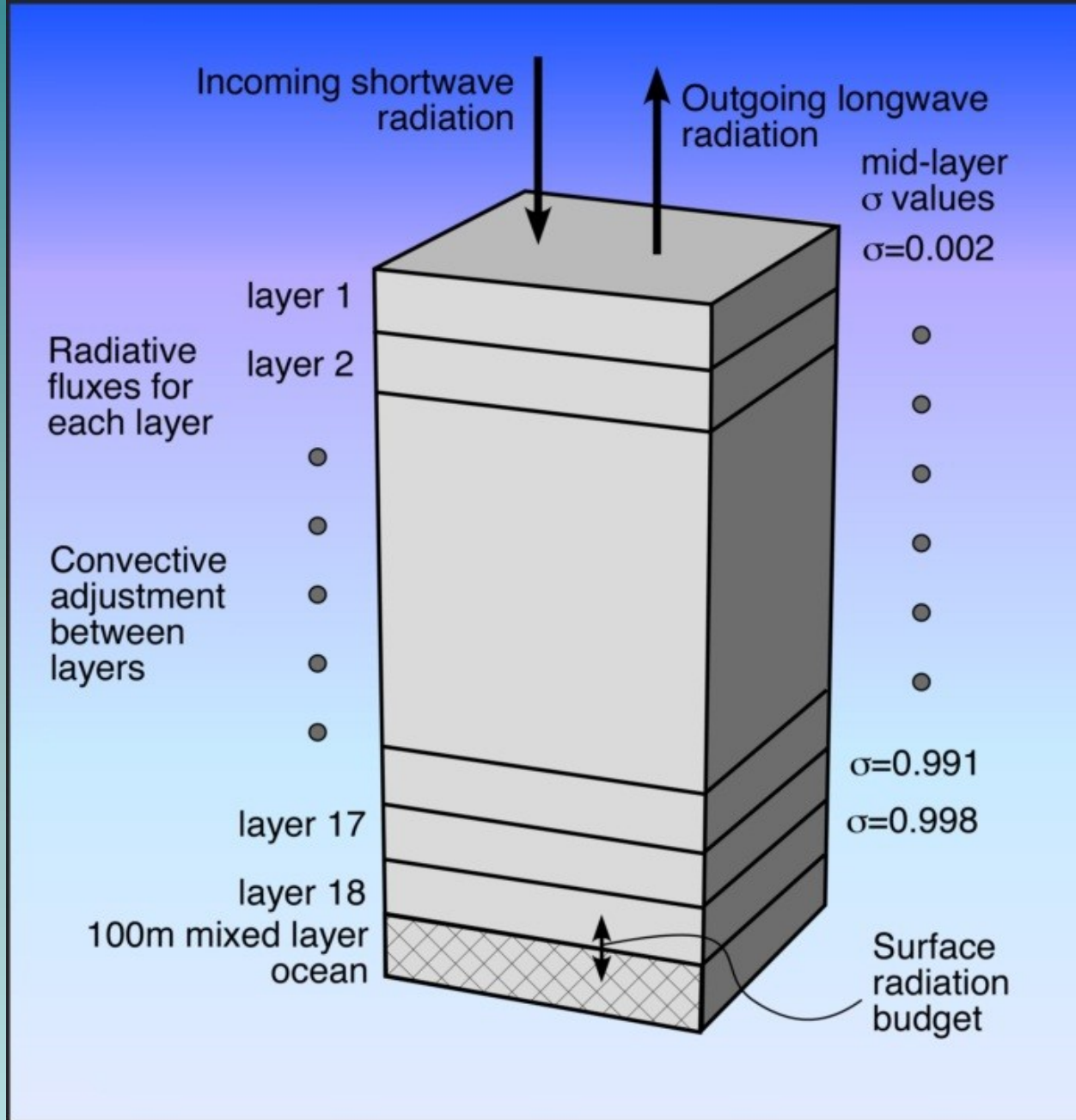


b) One-dimensional EBM

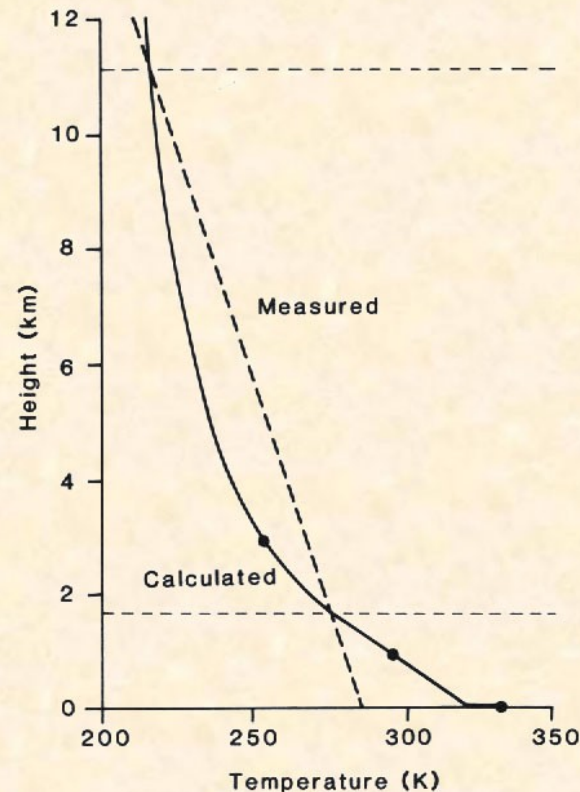


Radiačně-konvektivní modely (RCMs – Radiative-Convective Models)

- 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 γ_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 γ_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 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)

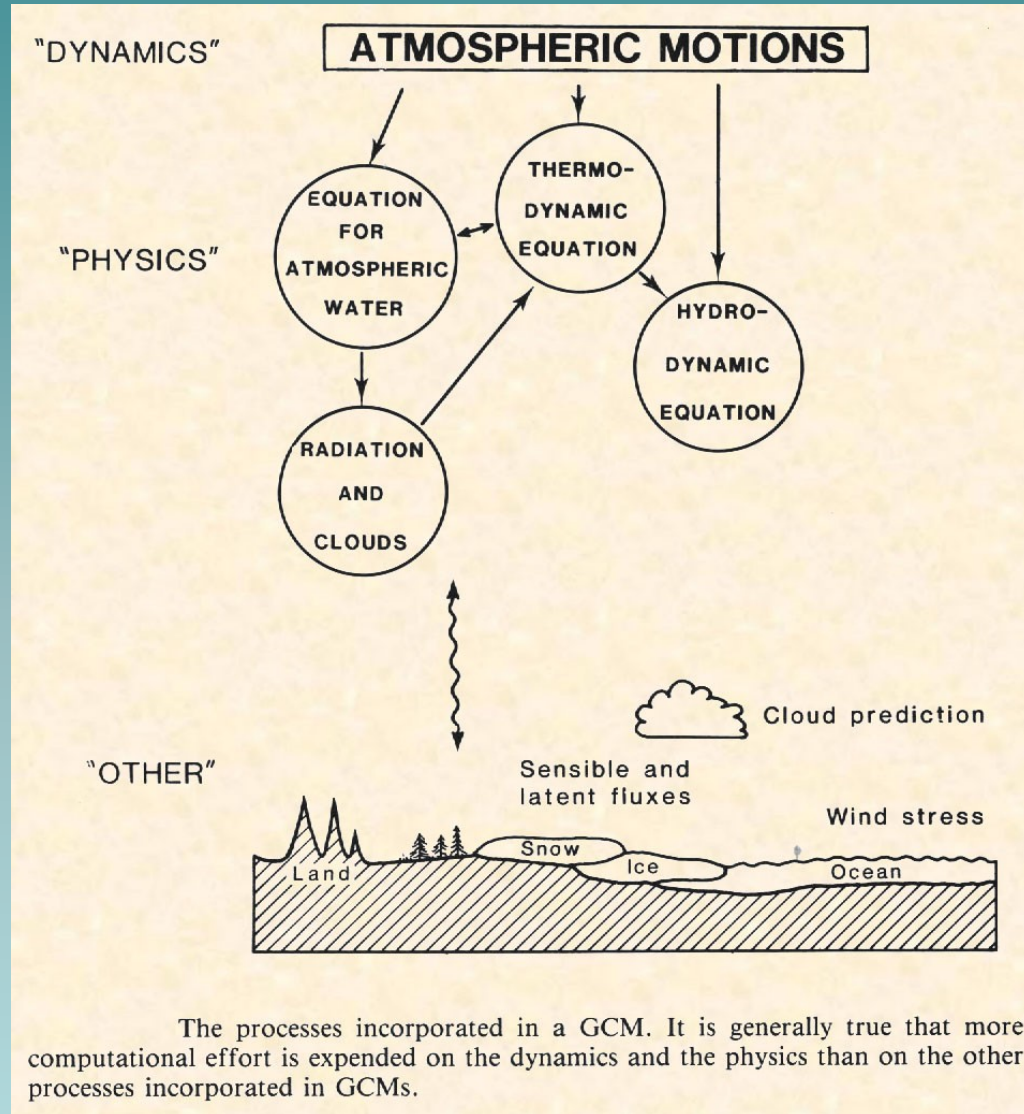
- výrazně komplikovanější modely než jednorozměrné
- reprezentují buď dva horizontální nebo jeden vertikální a jeden horizontální rozměr (kombinace šířkové dimenze EBM a vertikální RCM)
- realističtější parametrizace šířkového transportu energie
- spíše limitované pro budoucí projekce klimatu (špatné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

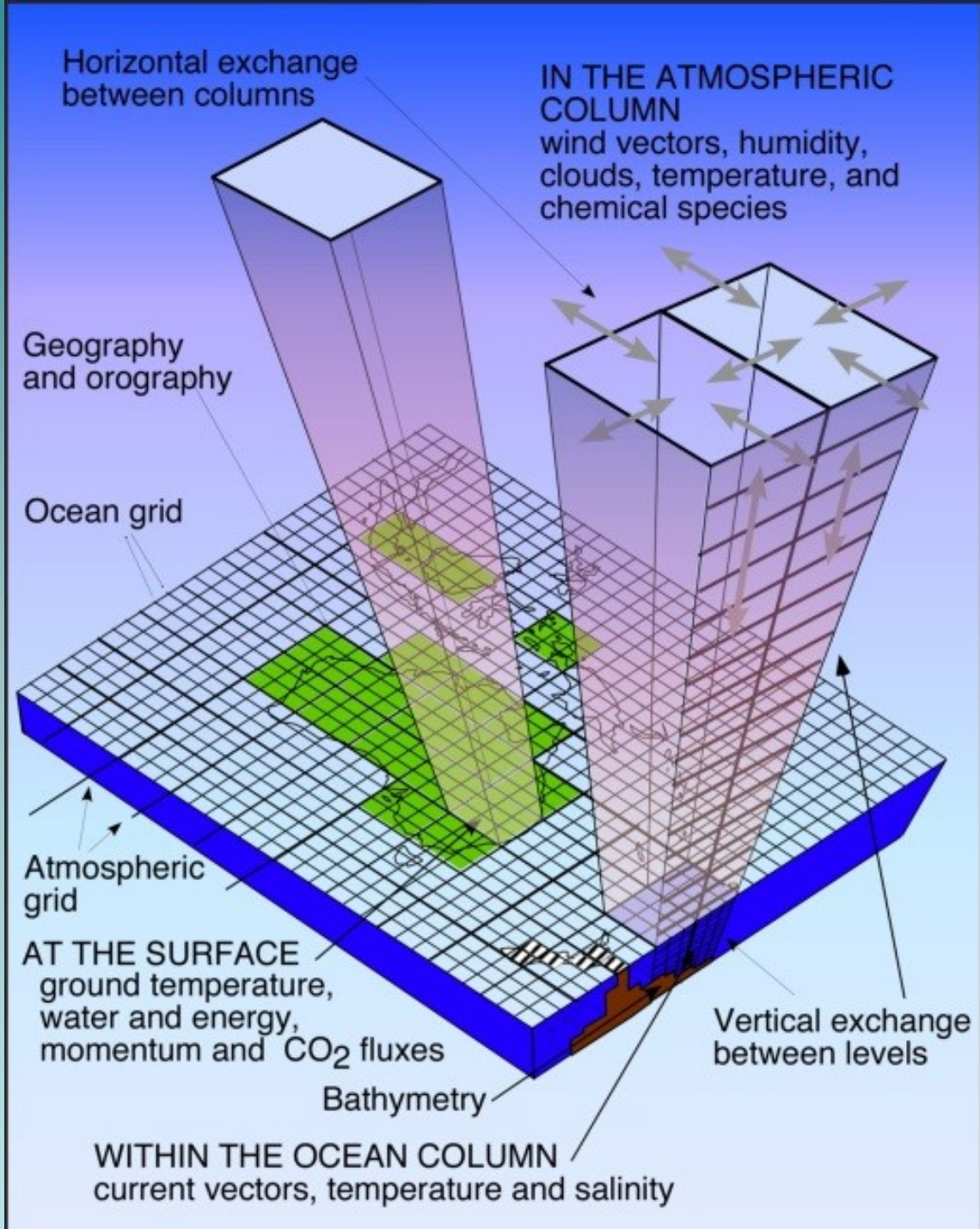
základní rovnice:

- a) první věta termodynamická (zachování energie): vstup energie = zvýšení vnitřní energie + vykonaná práce
- b) druhý Newtonův pohybový zákon (zachování hybnosti): síla = hmotnost x zrychlení
- c) rovnice kontinuity (zachování hmotnosti při proudění kapaliny): suma gradientů součinu hustoty a rychlosti větru ve třech ortogonálních směrech je nulová
- d) stavová rovnice plynů (zákon ideálního plynu): tlak x objem = plynová konstanta x absolutní teplota

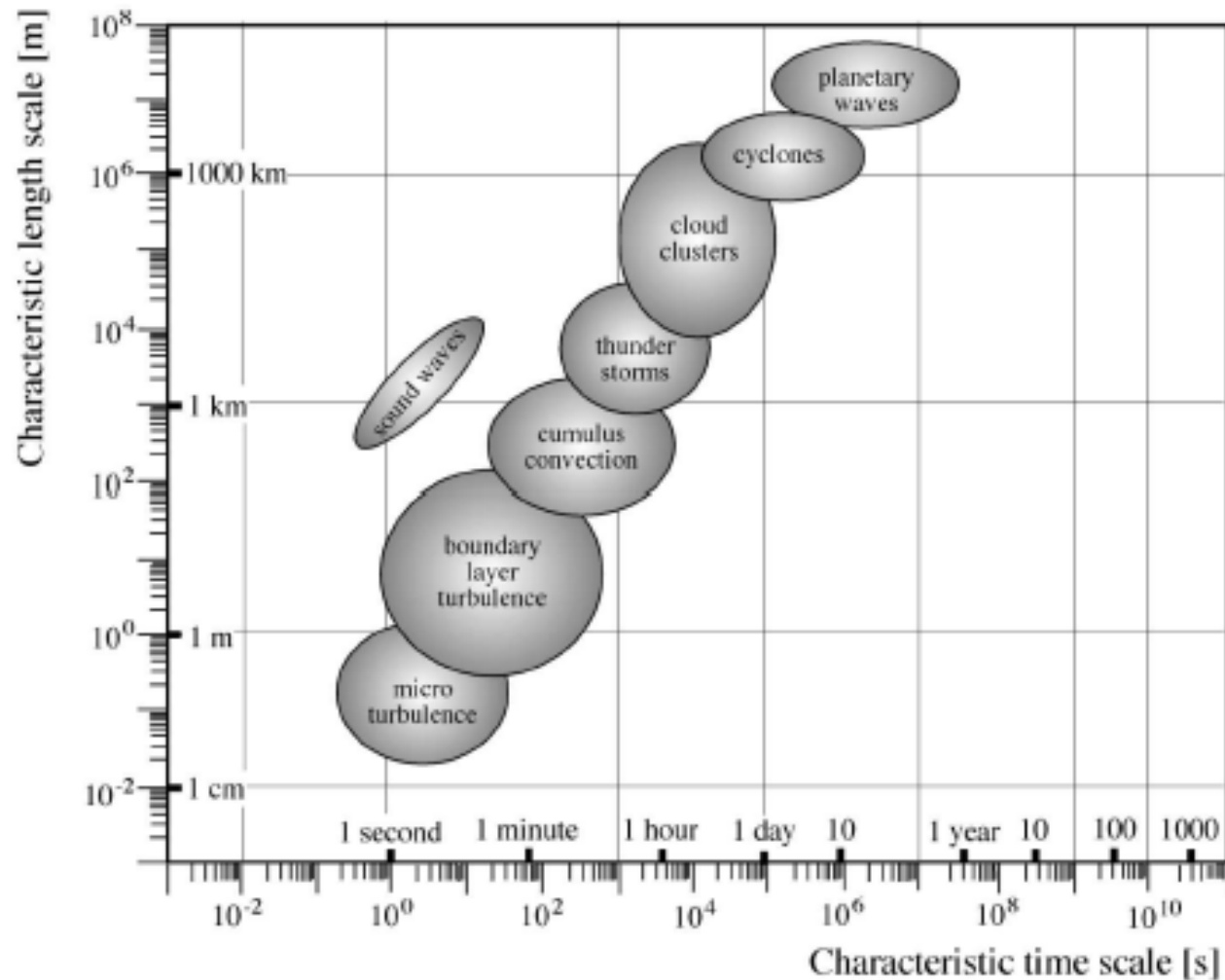


- výpočet pro tzv. gridové body s různým krokem sítě a pro několik vrstev (hladin) v atmosféře
- některé fyzikální procesy nejsou popsány uvedenými rovnicemi – měřítko těchto jevů je menší než krok sítě (např. konvektivní procesy, vznik srážek) → do modelů se vkládá pouze jejich výsledný účinek (parametrizace)

29.11.2012

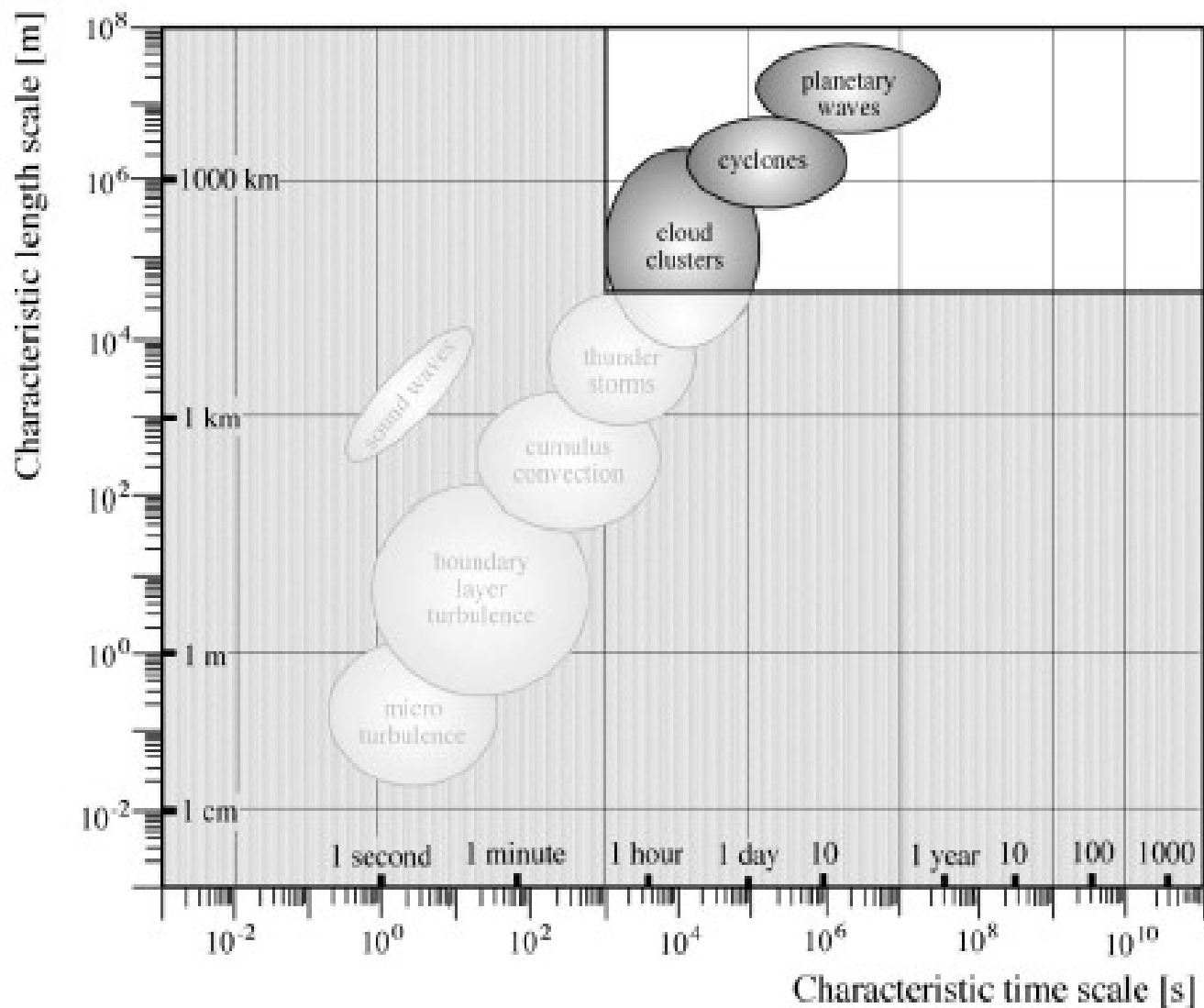


Impacts of limited grid resolution ~ 200-300 km



Dynamical processes in the atmosphere

Impacts of limited grid resolution ~ 200-300 km



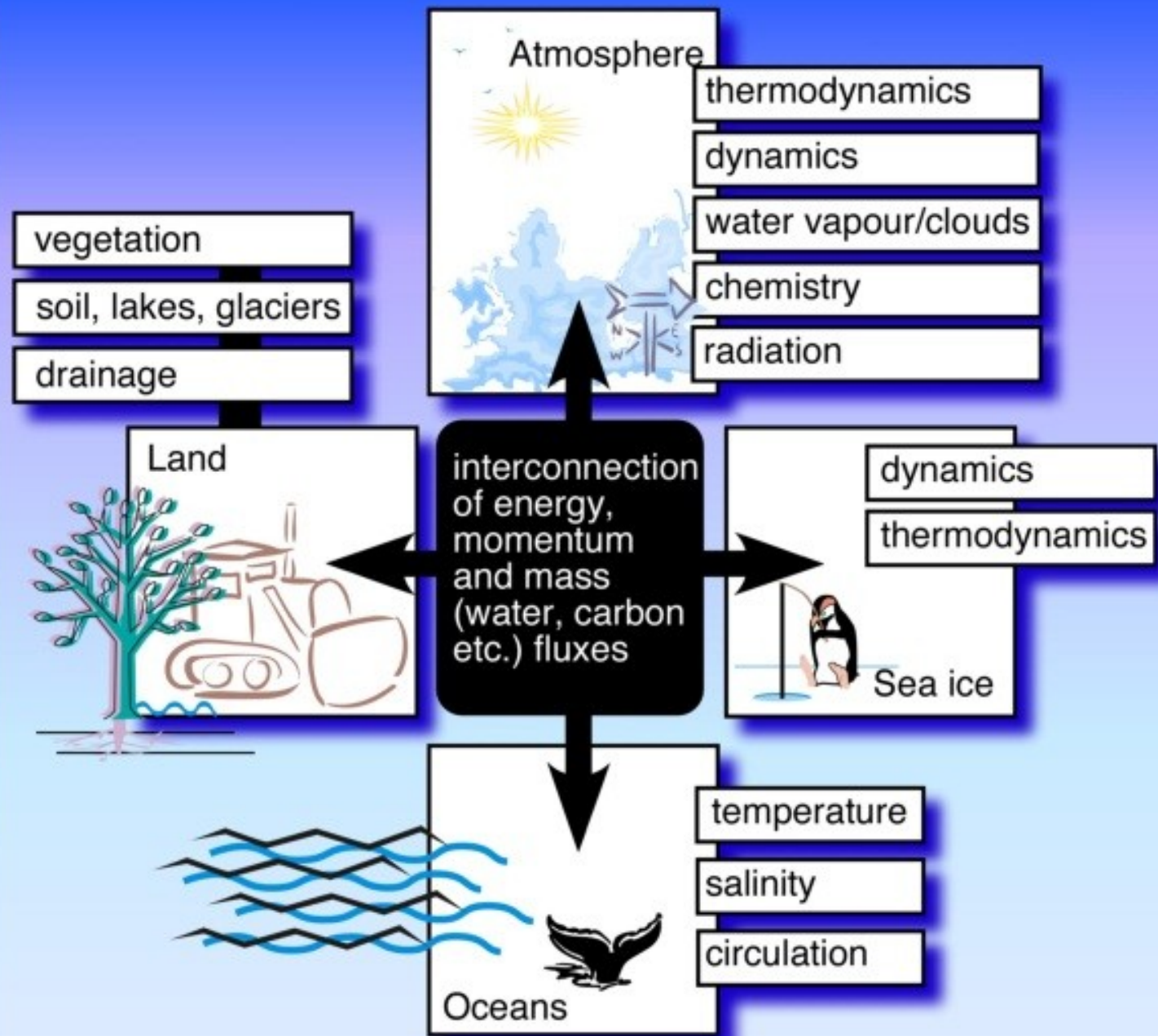
KLIMATICKÉ MODELOVÁNÍ - SOUČASNOST

- v dnešní době jsou nejvíce rozvíjeny a vyvíjeny trojrozměrné klimatické modely (GCM) - AOGCM pro účely:
 - 1, předpovědi klimatu na základě scénářů radiačního působení (forcings) – antropogenní, přirozené
 - 2, simulace tzv. vnitřní variability klimatického systému v sezónním/ročním časovém měřítku (kontrolní běhy)
 - 3, tvorby modelových analýz současného klimatu
 - 4, modelových experimentů – např. odezva systému na změny v krajině (urbanizace, dezertifikace, ...)

Modelovací centra

- zpráva IPCC 2007 – ansámblové zpracování 23 AOGCM
- Beijing Climate Center
- Bjerknes Centre for Climate Research
- National Center for Atmospheric Research
- Canadian Centre for Climate Modelling and Analyses
- Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
- Max Planck Institute for Meteorology
- University of Bonn
- ...

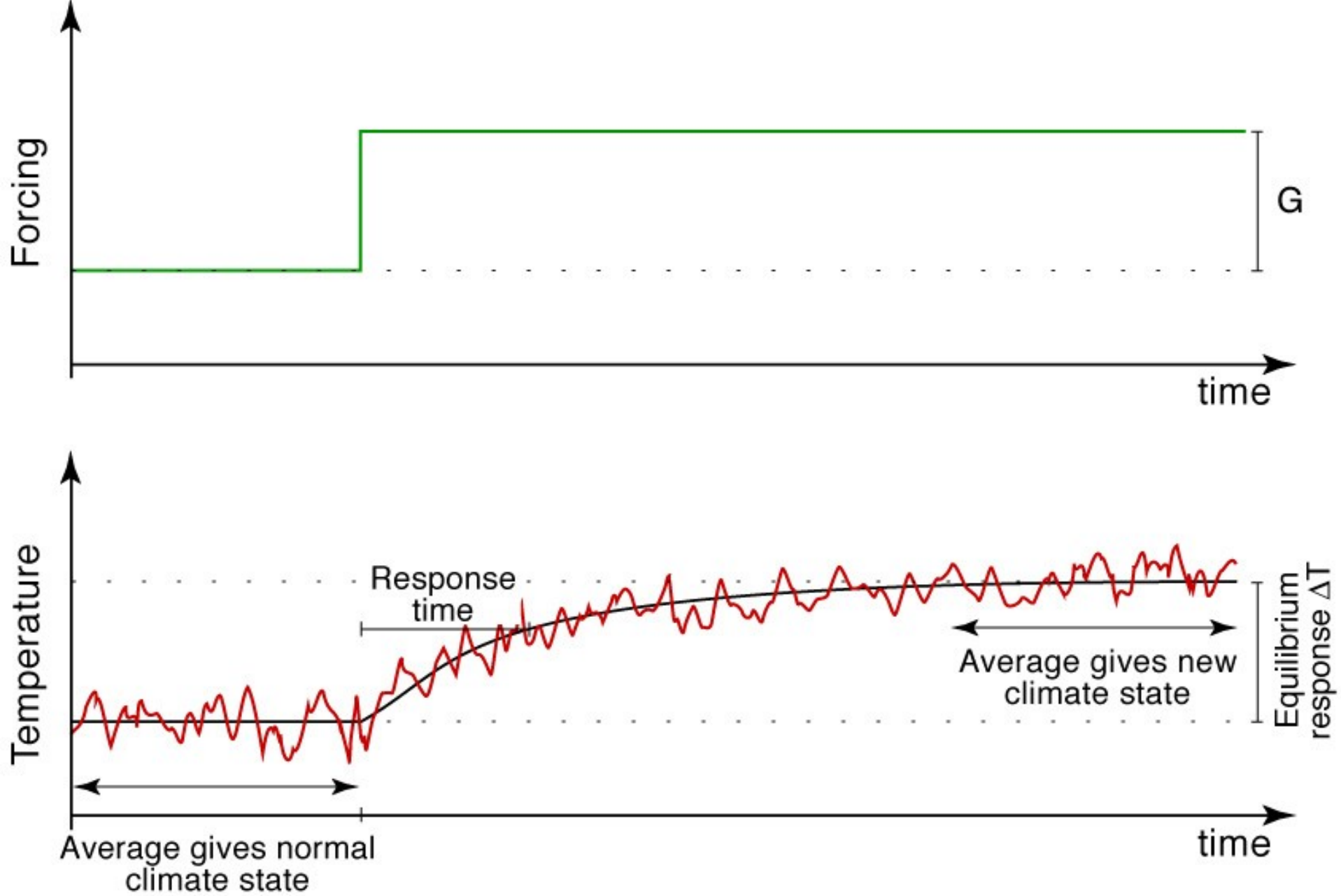
- globální klimatické předpovědi nevystačí s pouhým převzetím numerických předpovědních modelů
- jiná časová měřítká, specifické otázky k řešení:
 - HYDROSFÉRA (oceánská cirkulace)
 - KRYOSFÉRA (pozemní a mořský led)
 - LITOSFÉRA (zemský povrch)
 - BIOSFÉRA (vegetace, uhlíkový cyklus)
- vnitřní variabilita klimatického systému x externí vlivy (různá časová měřítká!!)

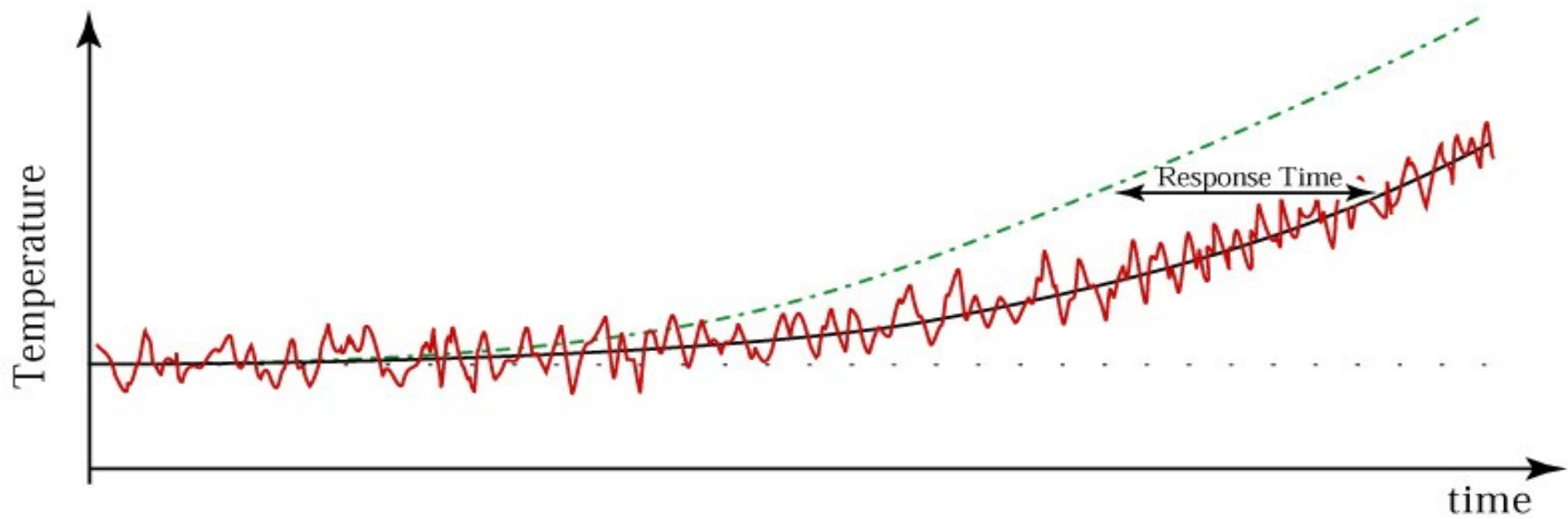
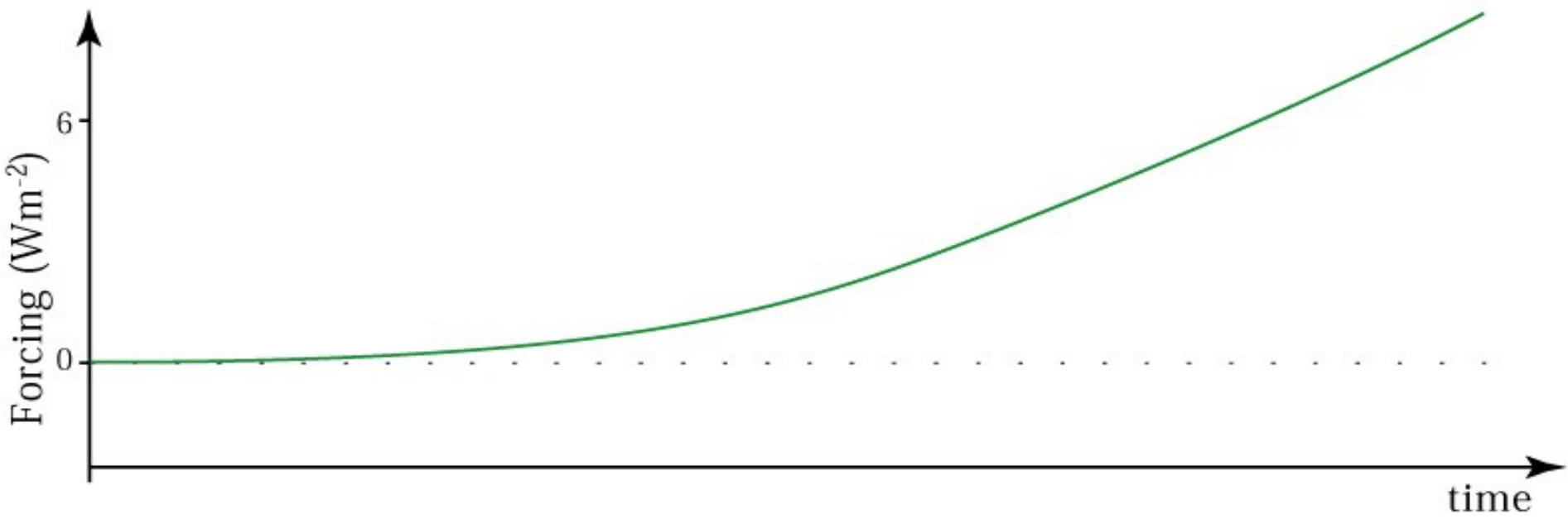


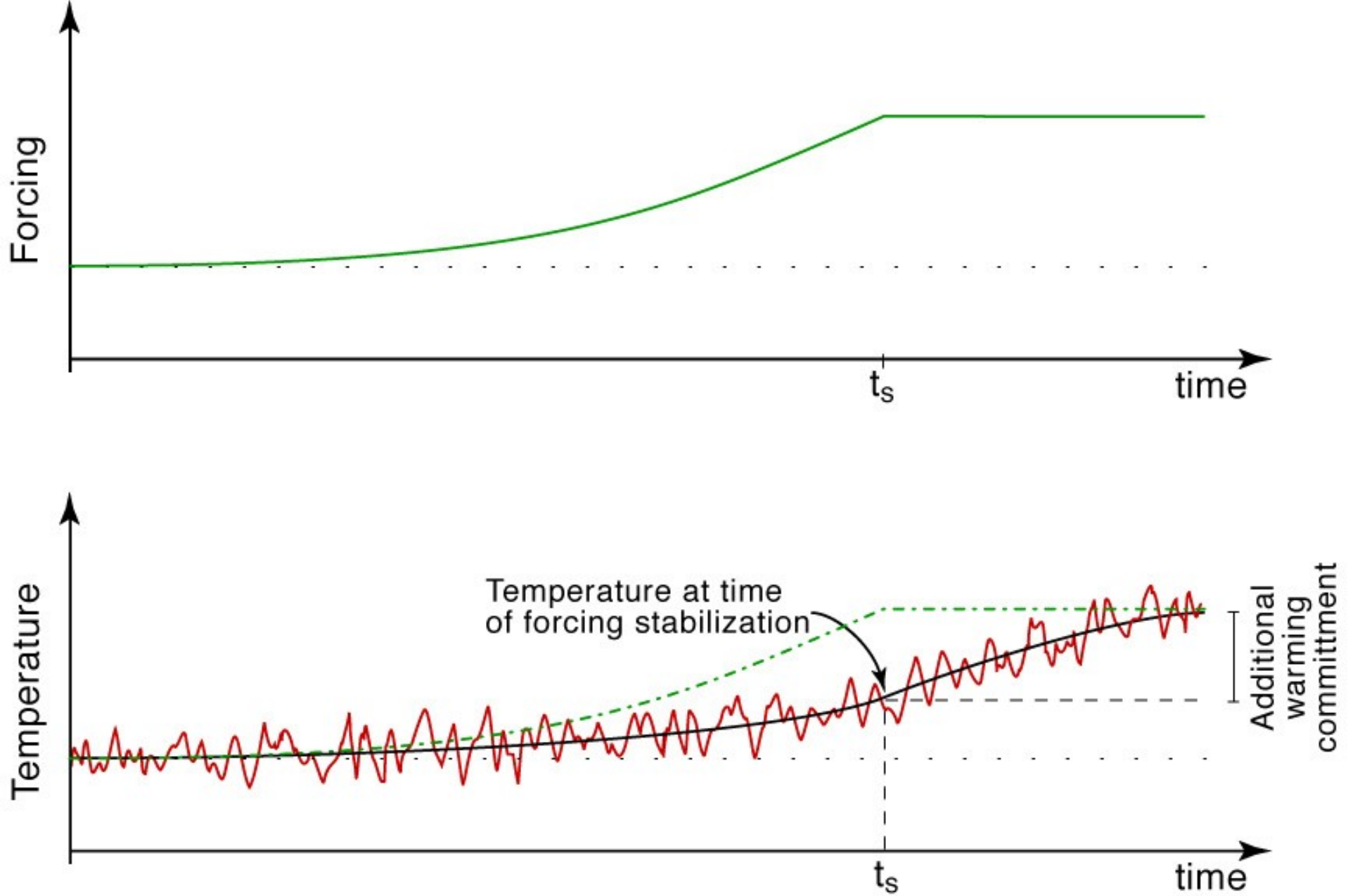
KLIMATICKÁ CITLIVOST

- 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_2) se výpočet provádí pro několik modelových let až desetiletí, až se modelová cirkulace dostane do kvazistacionárního stavu → „kontrolní klima“, též $1\times\text{CO}_2$ (mělo by co nejlépe odpovídat skutečnosti)
- **experimentální klima:** výpočet se opakuje pro změněné vstupní hodnoty CO_2 (např. $2\times\text{CO}_2$) až se dosáhne rovnováhy modelové cirkulace → z odpovídajících hodnot proměnných se počítá „experimentální klima“, též $2\times\text{CO}_2$

- 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 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 CO_2) dosahuje realizovaný vzestup teploty kolem 50 % rovnovážného vzestupu při citlivosti $4,5\text{ }^\circ\text{C}$ a kolem 80 % při citlivosti $1,5\text{ }^\circ\text{C}$

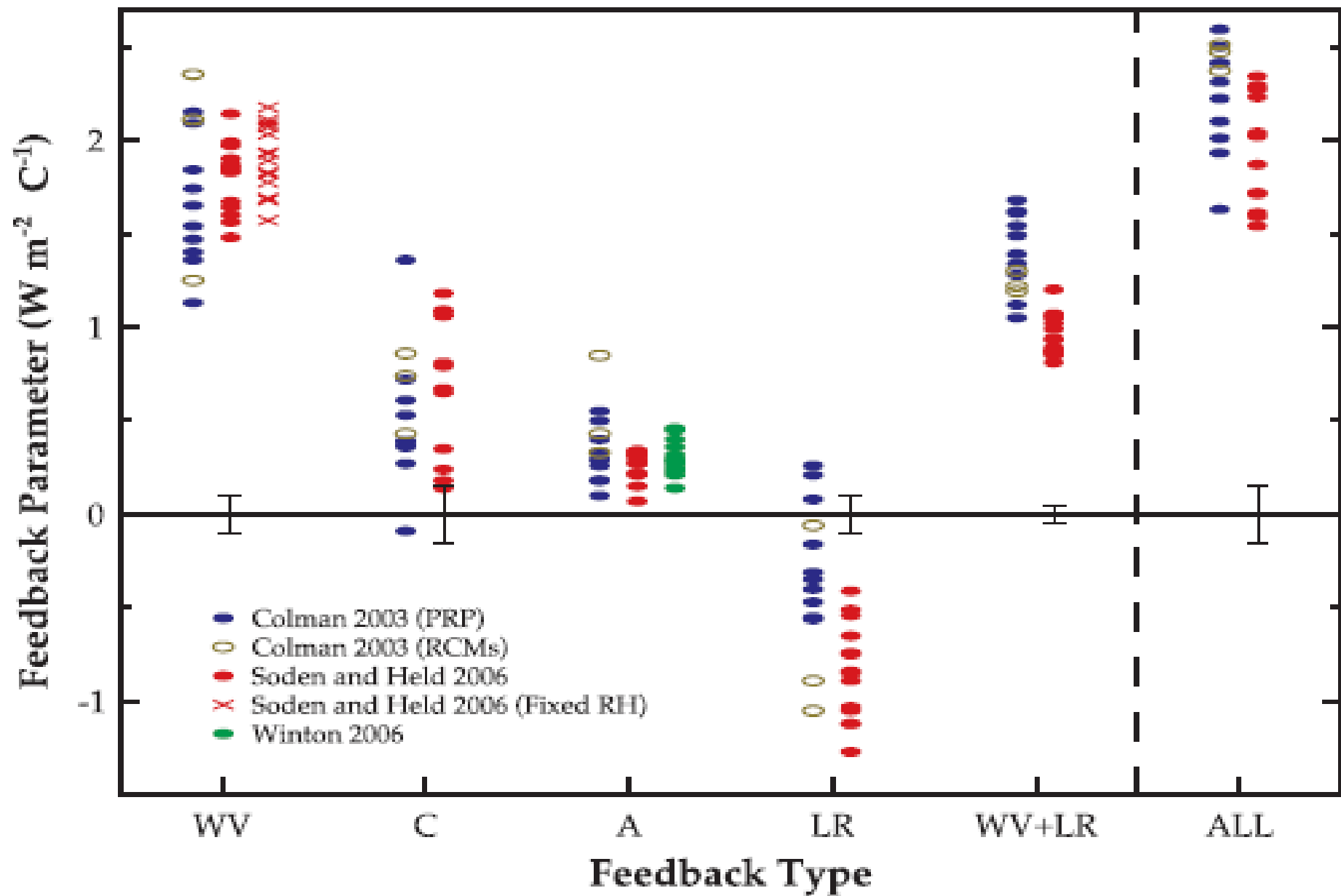






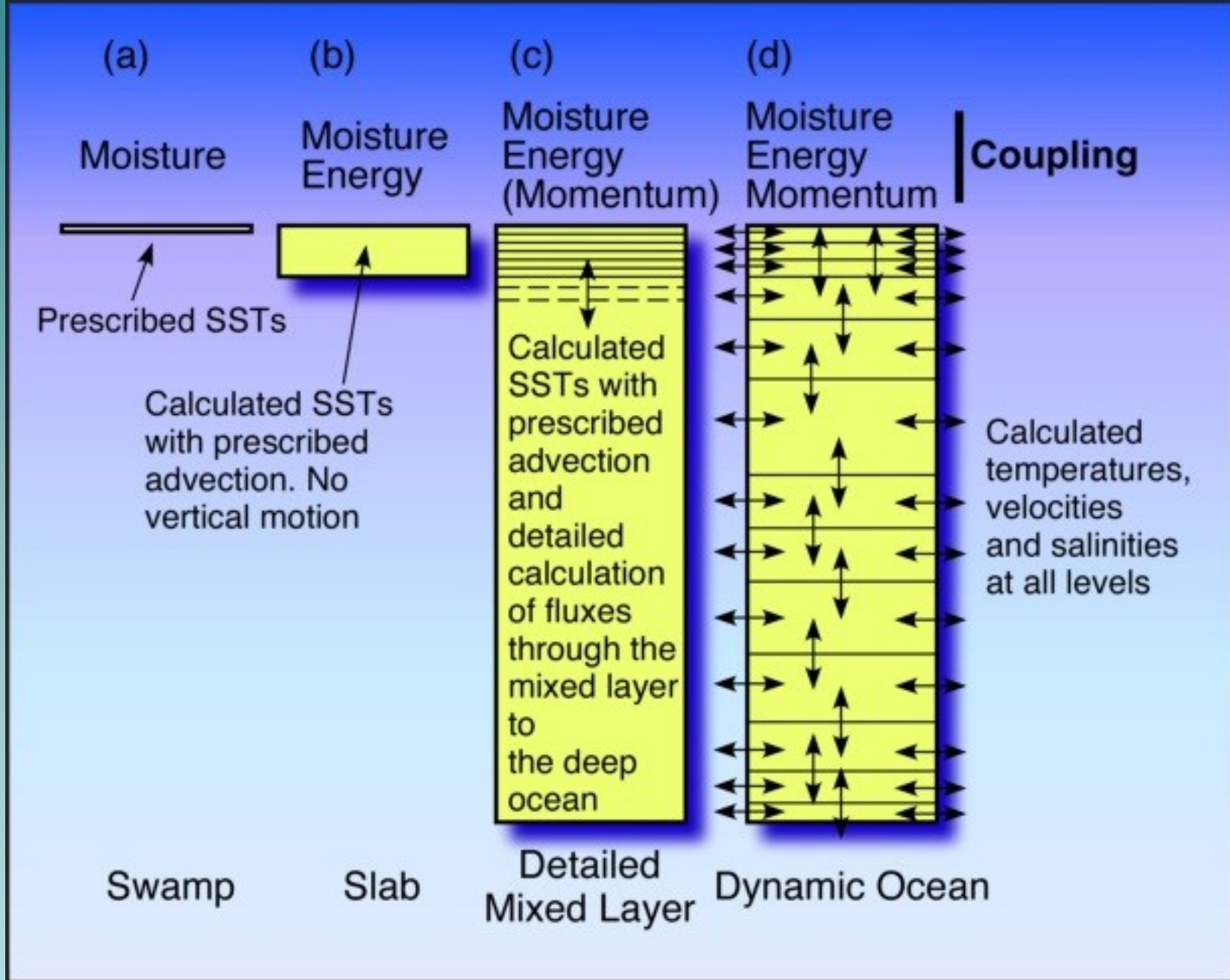
AOGCM	Equilibrium climate sensitivity (°C)	Transient climate response (°C)
1: BCC-CM1	n.a.	n.a.
2: BCCR-BCM2.0	n.a.	n.a.
3: CCSM3	2.7	1.5
4: CGCM3.1(T47)	3.4	1.9
5: CGCM3.1(T63)	3.4	n.a.
6: CNRM-CM3	n.a.	1.6
7: CSIRO-MK3.0	3.1	1.4
8: ECHAM5/MPI-OM	3.4	2.2
9: ECHO-G	3.2	1.7
10: FGOALS-g1.0	2.3	1.2
11: 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

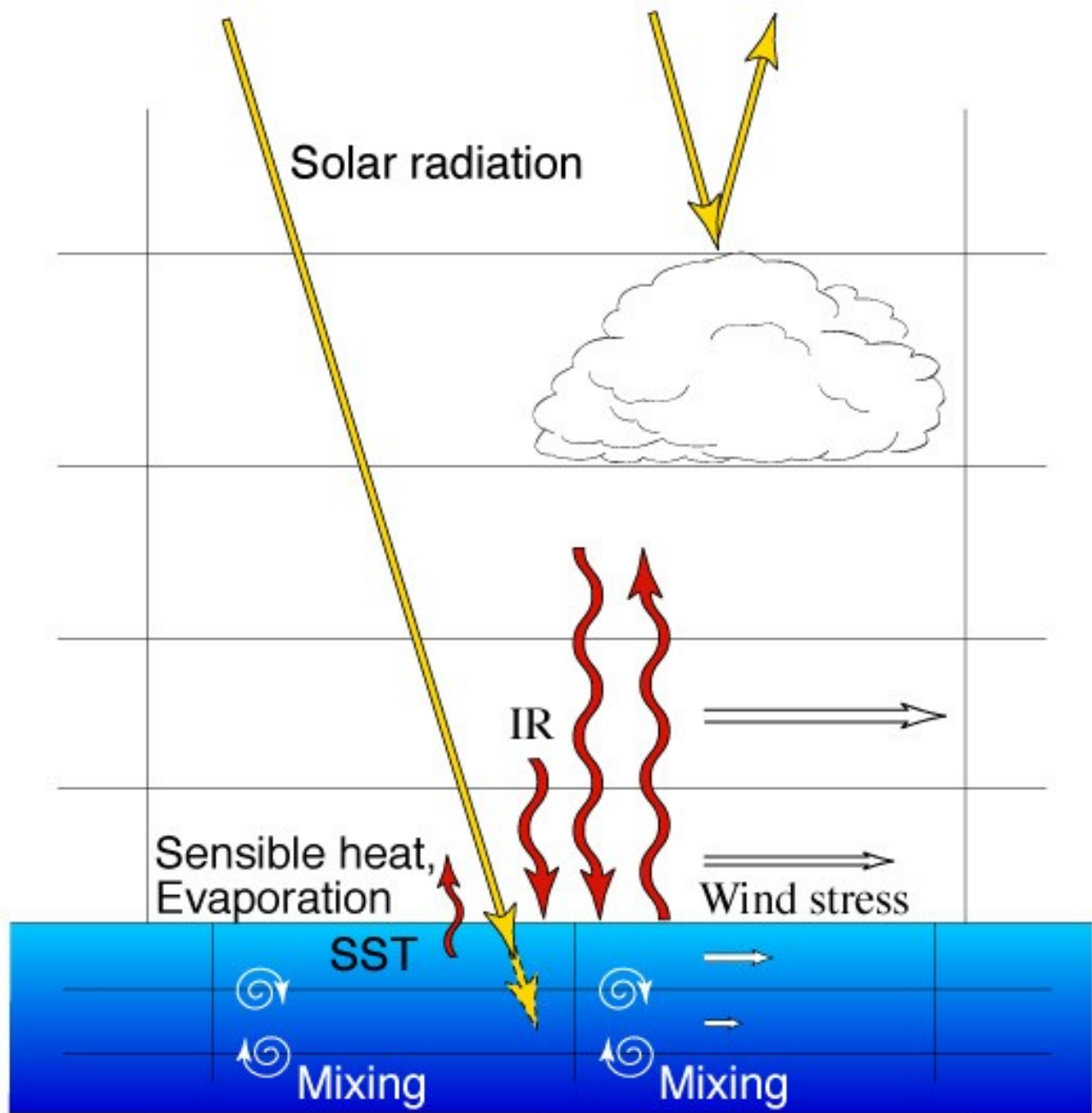
- citlivost modelu se u rovnovážných a transientních studií výrazně liší, shoda napříč modely
- silný vliv tzv. klimatických zpětných vazeb



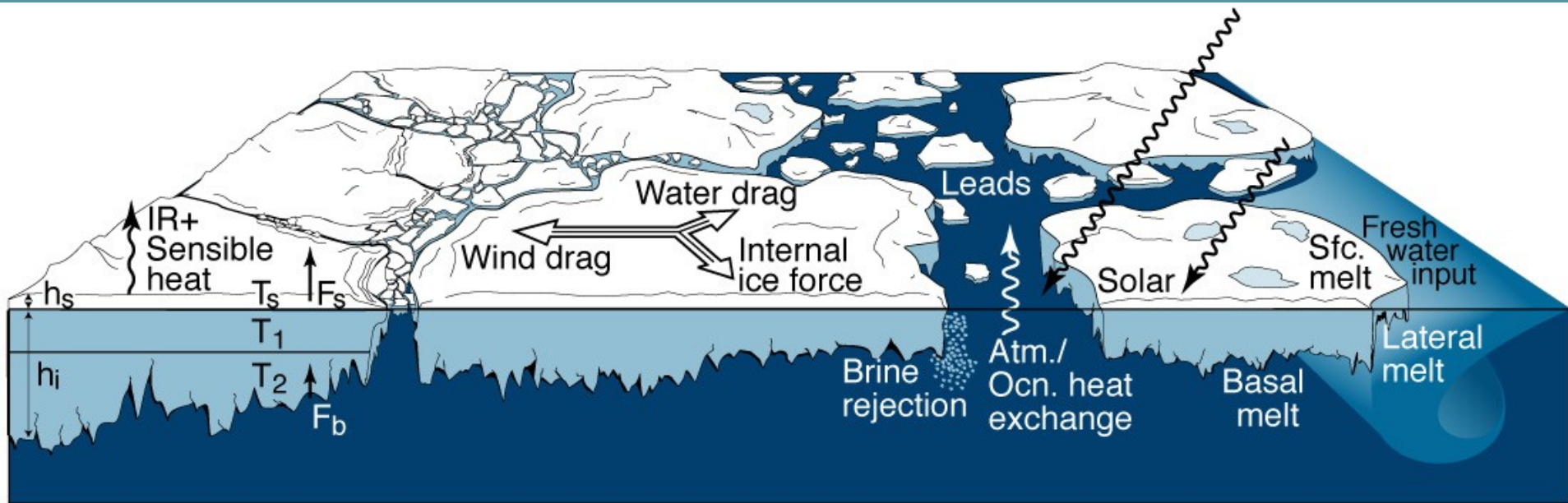
Modelování hydrosféry

- **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 měřítká procesů)
- **spřažené modely atmosférické a oceánské cirkulace (AOGCMs)**





Modelování kryosféry



Modelování zemského povrchu (land – surface mod.)

- terestricko-biosférické modely – zdroje a propady uhlíku
- uhlíkový cyklus (zdroje v půdě, vegetaci), sezonalita
- vývoj a zdravotní stav vegetace (DPZ monitoring)

LITERATURA

- 1) WARNER, T. W.: *Numerical weather and climate prediction*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. 526 p.
- 2) RANDALL, D. A., WOOD, R. A., BONY, S. et al.: Climate models and their evaluation. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, eds. SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., et al. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007. 589–662.
- 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.