

9. KLIMATICKÉ MODELÝ

9.1 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)
- **parametrizace** - fyzikální proces je popsán nějakým zjednodušeným výpočetním schématem s pomocí jednoduchých parametrů obsažených v rovnicích
- **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, tvorba a rozložení oblaků)
 - d) parametrizace radiačních procesů (absorpce a emise různých druhů záření)
 - e) parametrizace konvektivních procesů
- 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

9.2 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)

9.2.1 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

9.2.1.1 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° → 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)

9.2.1.2 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

9.2.2 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)

9.2.3 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)
 - 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)
 - spřažené modely atmosférické a oceánské cirkulace (AOGCMs)

9.3 POUŽITÍ GCMs K MODELOVÁNÍ ODEZVY NA RŮST KONCENTRACÍ CO₂

- použití GCMs – zjištění odezvy klimatického systému na růst koncentrací skleníkových plynů
- **kontrolní klima**: na základě počátečních a okrajových podmínek odpovídajících současnému klimatu (tj. současné koncentrace CO₂ nebo ekvivalentního CO₂, tj. koncentrace CO₂ odpovídající radiačnímu působení všech skleníkových plynů dohromady) se výpočet provádí pro několik modelových let až desetiletí, až se modelová cirkulace dostane do kvazistacionárního stavu → z hodnot proměnných odpovídajících

tomuto rovnovážnému stavu se počítá „kontrolní klima“, též $1xCO_2$ (mělo by co nejlépe odpovídat skutečnosti)

- **experimentální klima:** výpočet se opakuje pro změněné vstupní hodnoty CO_2 (např. $2xCO_2$) až se dosáhne rovnováhy modelové cirkulace → z odpovídajících hodnot proměnných se počítá „experimentální klima“, též $2xCO_2$
- rozdíl obou simulovaných stavů klimatu ($2xCO_2$ minus $1xCO_2$) 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 $4,5\text{ °C}$ a kolem 80 % při citlivosti $1,5\text{ °C}$