

Jak reaguje horní atmosféra a ionosféra na globální změnu klimatu?

Jan Laštovička

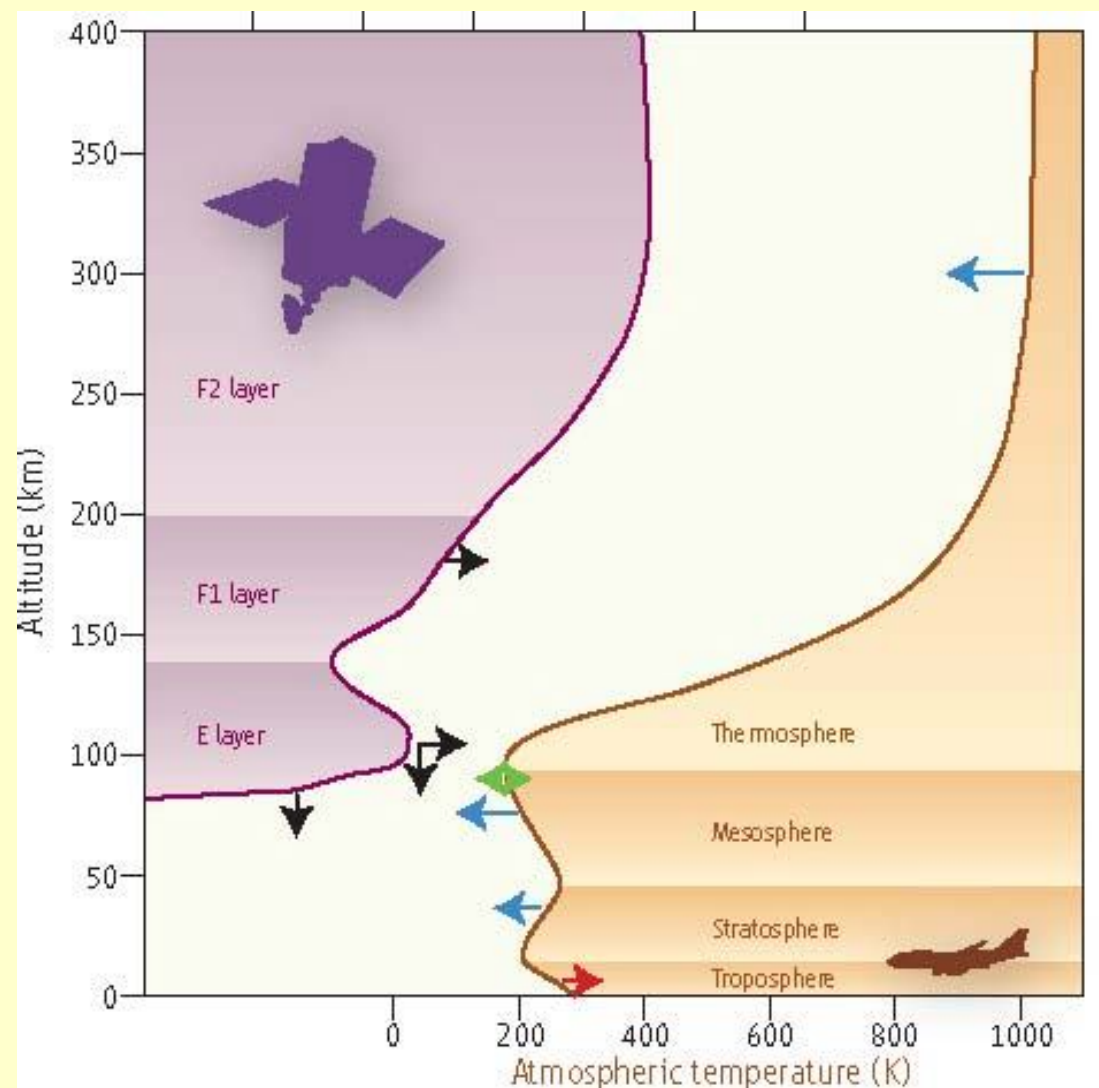
Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Boční II, 141 31 Praha 4; jl@ufa.cas.cz

Horní atmosféra = mezoféra a termosféra, výšky nad 50 km nad zemským povrchem.

V atmosféře trvale narůstá koncentrace skleníkových plynů. Převážně následkem toho globální přízemní teplota vzduchu vzrostla ve 20. století o zhruba 0.6°C . **Skleníkový efekt ve střední a horní atmosféře je ale ochlazování, ne oteplování !!!** Příčinou je pokles hustoty atmosféry s výškou a tím i řidnutí vrstvy CO_2 , která se nakonec v dolní stratosféře stane tak řídkou, že již i přes antropogenní růst koncentrace CO_2 nestačí zadržovat odchozí dlouhovlnné záření, jehož zachycování v troposféře působí ohřev (stejně jako sklo ve skleníku). Druhá vlastnost CO_2 , poměrně silné vyzařování v některých spektrálních čárách v infračervené oblasti ale zůstává nedotčena, a proto je výsledným efektem „skleníkové“ ochlazování.

Trendy v teplotě a v ionosféře - globální scénář

Ionospheric electron density ($\log_{10} \text{ cm}^3$)



Scénář globálních změn

Trendy v teplotě mezoféry a oblasti mezopauzy, v dolní ionosféře, v maximech ionosférických vrstev E, F1 a F2, v hustotě termosféry, v iontové a elektronové teplotě tvoří konsistentní obraz, kvalitativně odpovídající modelovým simulacím efektů růstu koncentrace skleníkových plynů.

Co je nejasné:

1. Trendy v dynamice (větry a hlavně atmosférické vlny) v horní atmosféře – klíčový problém.
2. Trend v celkovém elektronovém obsahu.
3. Pouze kvalitativní ale ne kvantitativní soulad modelů a pozorovaných trendů.
4. Trendy v koncentraci vodní páry v mezosféře.

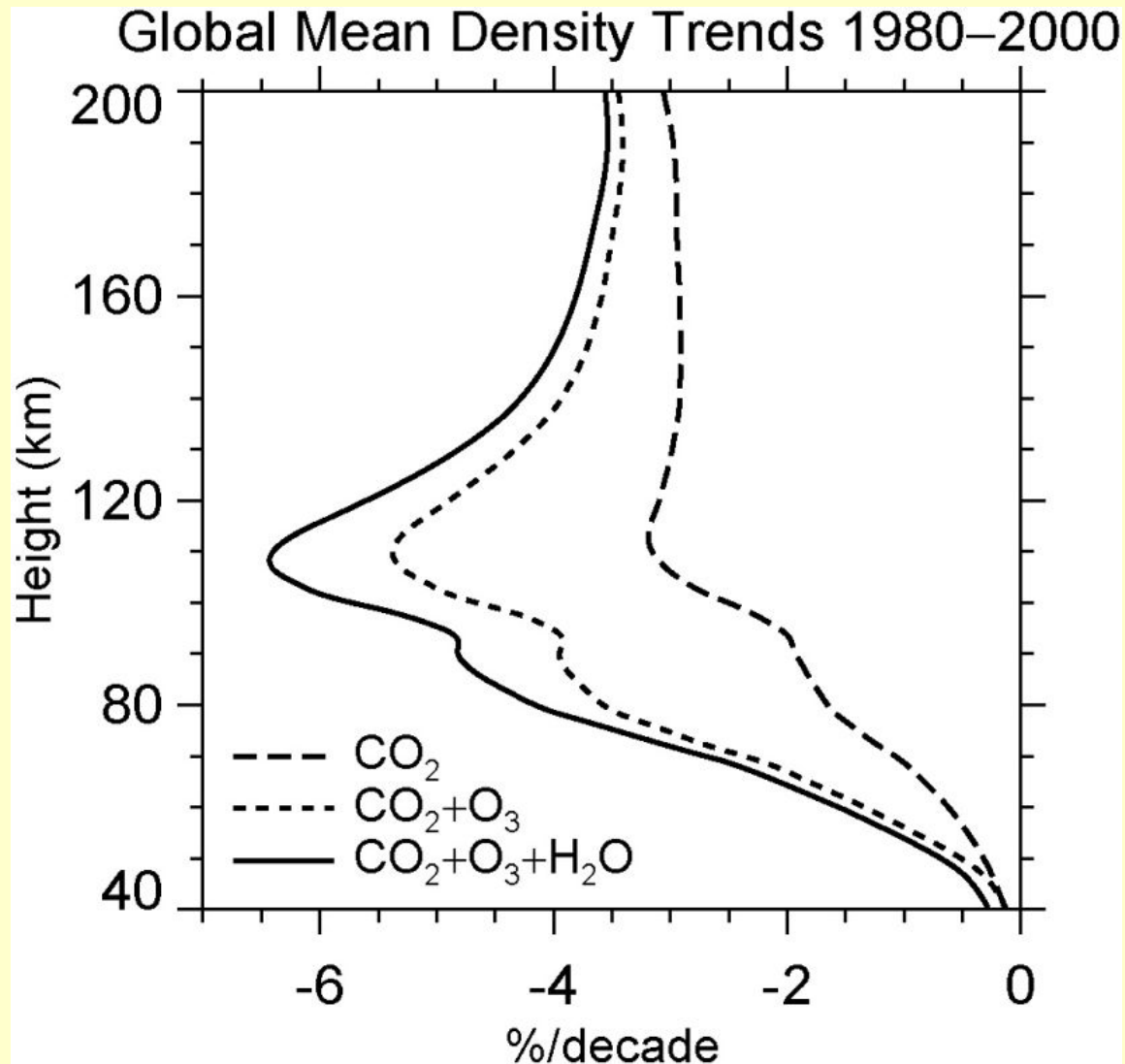
Příčiny dlouhodobých změn

1. Růst koncentrace skleníkových plynů.
2. Změny koncentrace ozónu ve stratosféře.
3. Změny koncentrace vodních par v mezosféře.
4. Dlouhodobé změny geomagnetické aktivity.
5. Sekulární změny magnetického pole Země.
6. Trendy v intenzitě atmosférických vln.

Při počítání trendů se dělá korekce na sluneční aktivitu pro odstranění slunečního cyklu.

Některé příčiny dlouhodobých změn mění s časem (ozón v letech 1995-1997 ze záporného na kladný trend) nebo s místem (magn. pole Země) podstatně svůj trend → **trendy nejsou dlouhodobě stabilní.**

Role ozónu



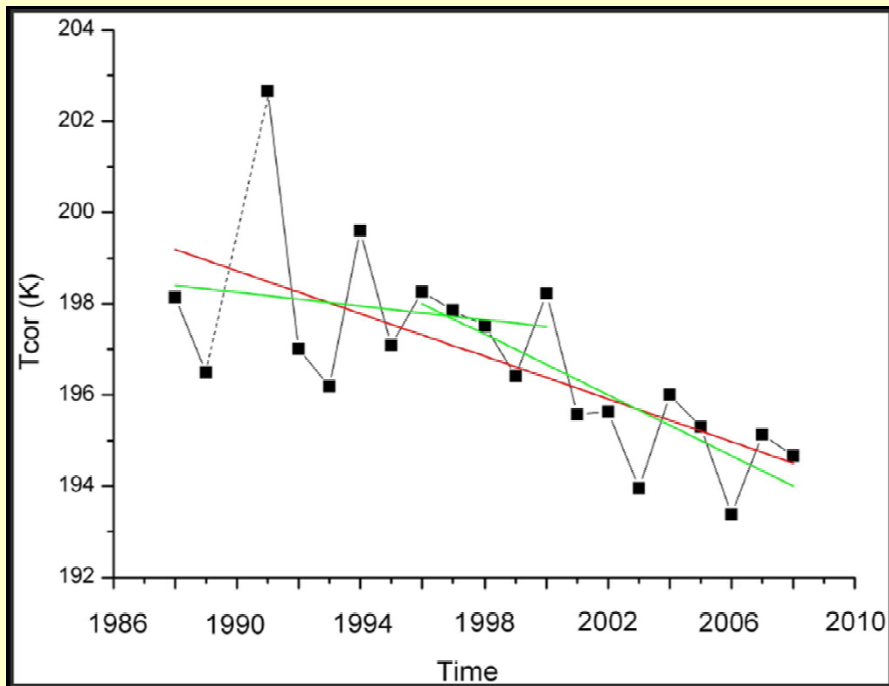
Pokles koncentrace ozónu přispívá i k ochlazování a smršťování mezoféry – obrázek ukazuje, že v hustotě atmosféry se to dle modelových výpočtů projevuje nejvíce v dolní termosféře okolo 110 km a **efekt sahá až hluboko do termosféry**.

Dopad změny trendu ozónu (1995-1997 pro NH) na teploty:

Stratosféra – trend se stal nulovým (Yoden, 2010).

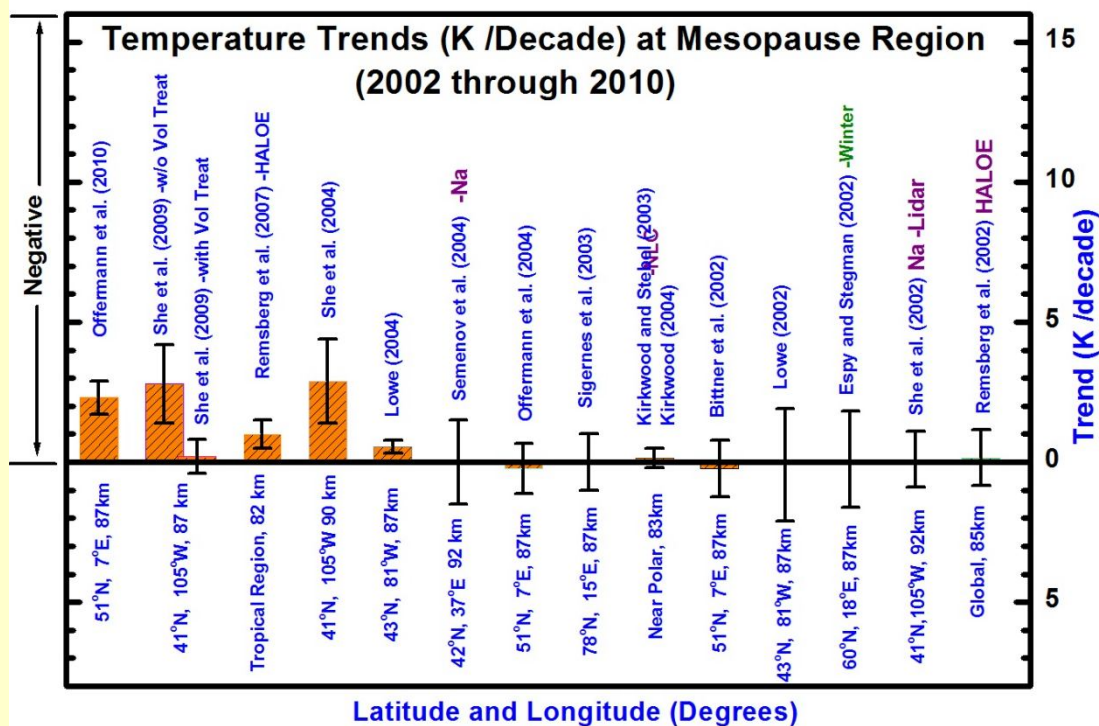
Mezoféra – HALOE trendy jsou slabší než starší raketové a lidarové trendy, protože vliv ozónu za období měření HALOE byl blízký k nule (Remsberg, 2009). Raketové sondáže ve Volgogradu – trendy jsou slabší po r. ~1995 (Yushkov, 2011). Měření a modelování v Evropě (Berger a Lubken, 2011) – trend teploty mezoféry se změnil ze záporného na nulový až lehce kladný, protože rychlé změny ozónu převažují nad pomalým nárůstem CO₂. Čili trend teploty mezoféry je nyní velmi slabý, pokud vůbec je.

Oblast mezopauzy – trend se změnil z nulového na mírně záporný (Beig, 2011). Pro nízké šířky to podporují výsledky Venkat Ratnam et al. (2010).

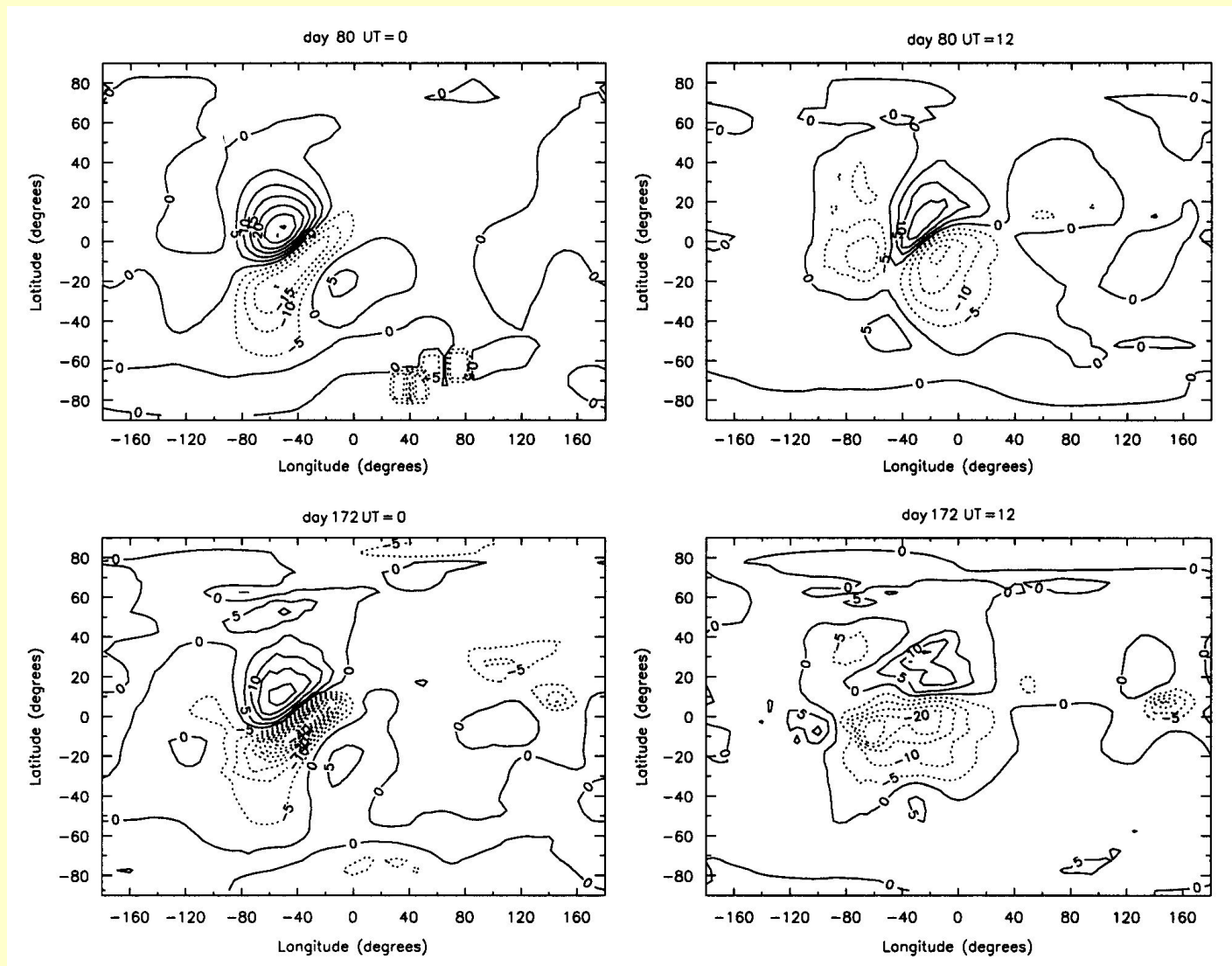


V oblasti mezopauzy od r. ~1997 nastartovalo ochlazování, způsobené tím, že ochlazování od skleníkových plynů již nebylo brzděno až kompenzováno vlivem klesající koncentrace stratosférického ozónu.

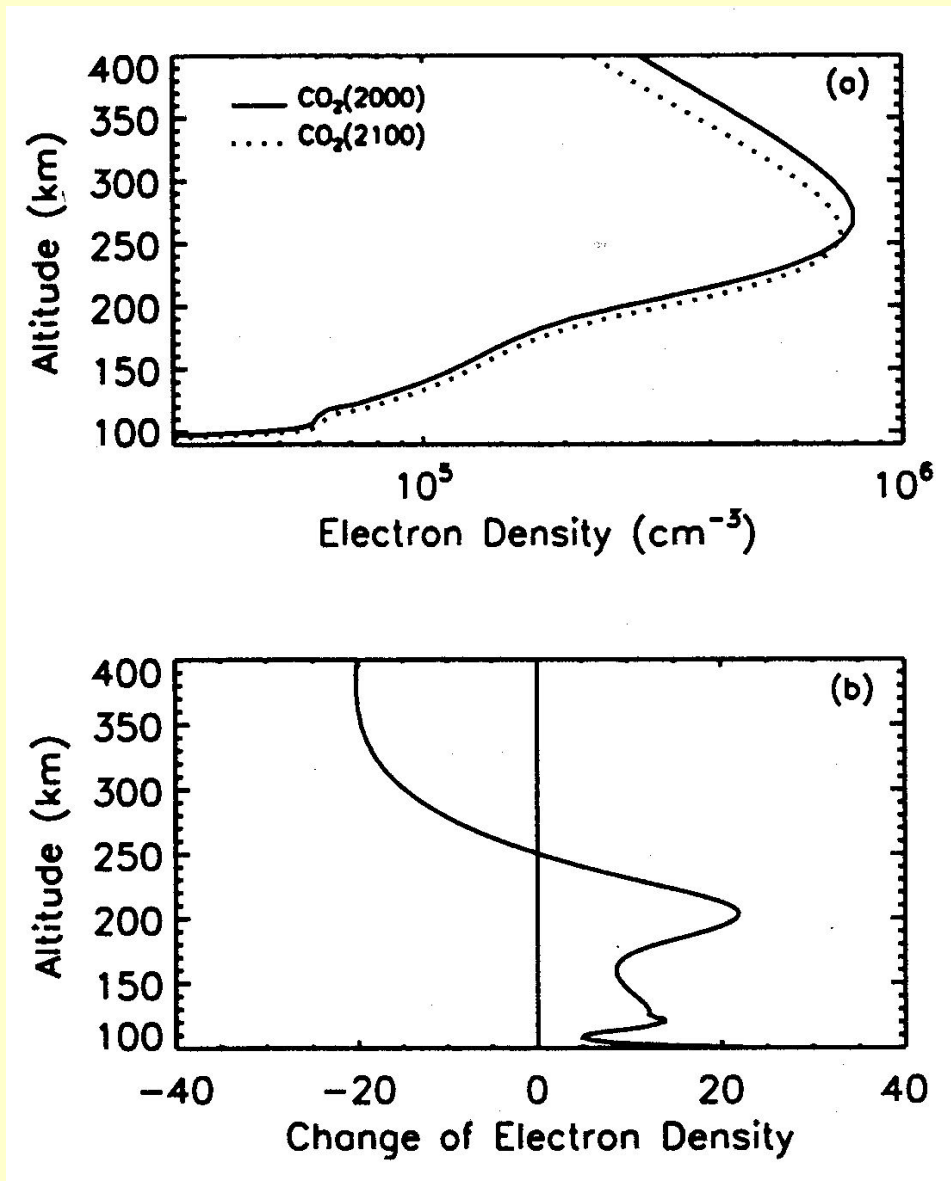
Podle Beig (JGR, 2011)



Model TIE-GCM – **vliv změn magnetického pole Země** na hmF2 (1997-1957 v km) ve dnech 80 (nahore) a 172 (dole), 00 UT (vlevo) a 12 UT (vpravo).



Trendy v maximu F2 vrstvy ionosféry foF2, hmF2



Model. Profily elektronové koncentrace pro r. 2000 (plná čára) a $2\times\text{CO}_2$ v r. 2100 (čárkovaná čára) při $F_{10.7} = 150$, horní panel. Změna elektronové koncentrace v % jako následek $2\times\text{CO}_2$, dolní panel.

Trendy v dynamice v horní mezosféře a dolní termosféře (MLT)

Problémy:

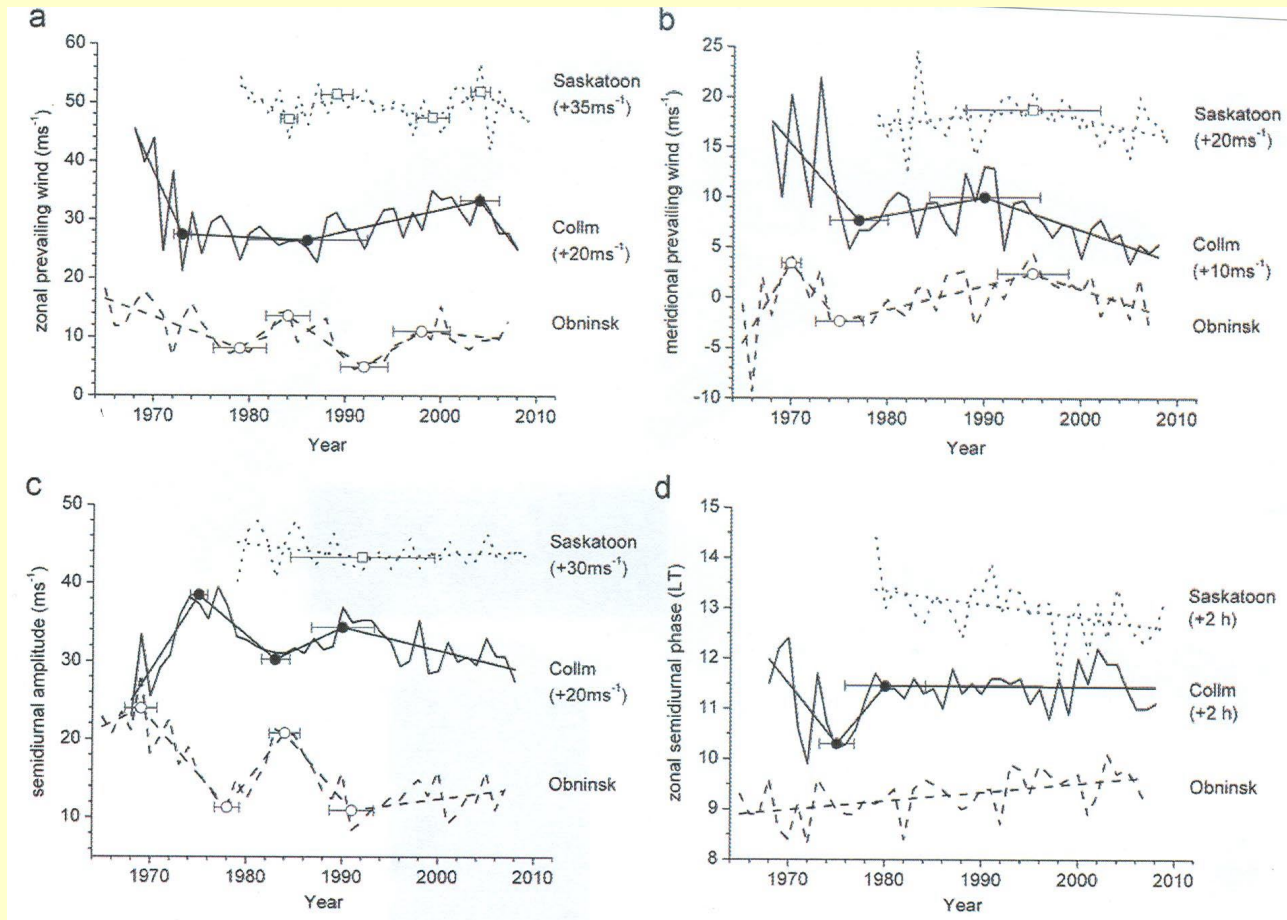
1. Trendy ve větru se regionálně značně liší – viz následující obrázek.
2. Jaké jsou trendy v aktivitě atmosférických vln (málo dat)?

Planetární vlny – v Evropě dle ionosférických i větrových dat asi jistý mírný i když nespojitý růst aktivity, jiná data dávají spíše žádný růst nebo i mírný pokles, modelové výpočty předpovídají mírný růst.

Přílivy – amplituda i fáze 24-hodinové i 12-hodinové přílivové složky mohou mít na různých stanicích trend až opačný – viz následující obrázek .

Gravitační vlny – někde kladný mírný trend, jinde žádný není; možnost lokálních příčin trendu (např. posun dráhy tlakových níží).

Časová řada průměrných větrů za prosinec-únor, výšky ~90-95, severní šířky 52-55°N (Collm, Obninsk, Saskatoon): (a) zonální převládající vítr, (b) meridionální převládající vítr, (c) amplituda 12-hod přílivu, (d) jeho zonální fáze. Podle Jacobi et al. (2012).

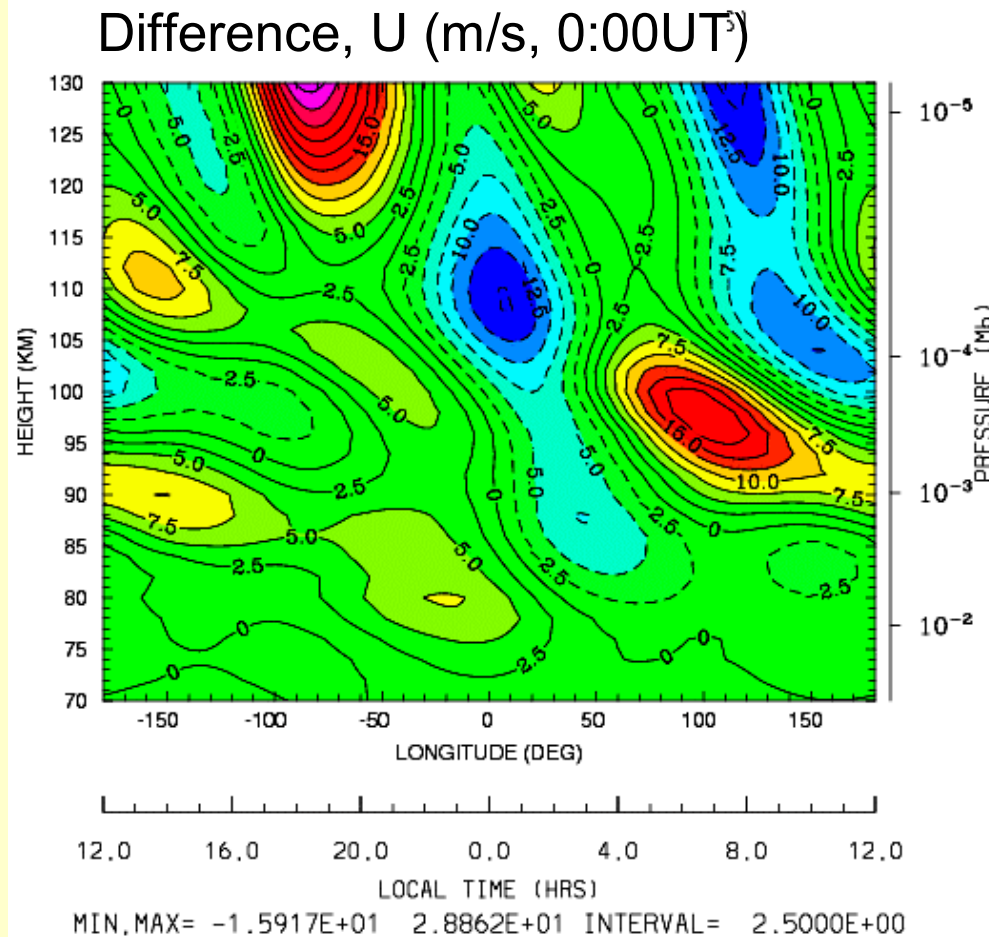


Dlouhodobé chování větru na různých stanicích se liší, zvláště pro 12-hod příliv.

Modelové výpočty potvrzují velkou prostorovou variabilitu trendů ve větrech v MLT.

Výsledky modelových simulací – dynamika MLT

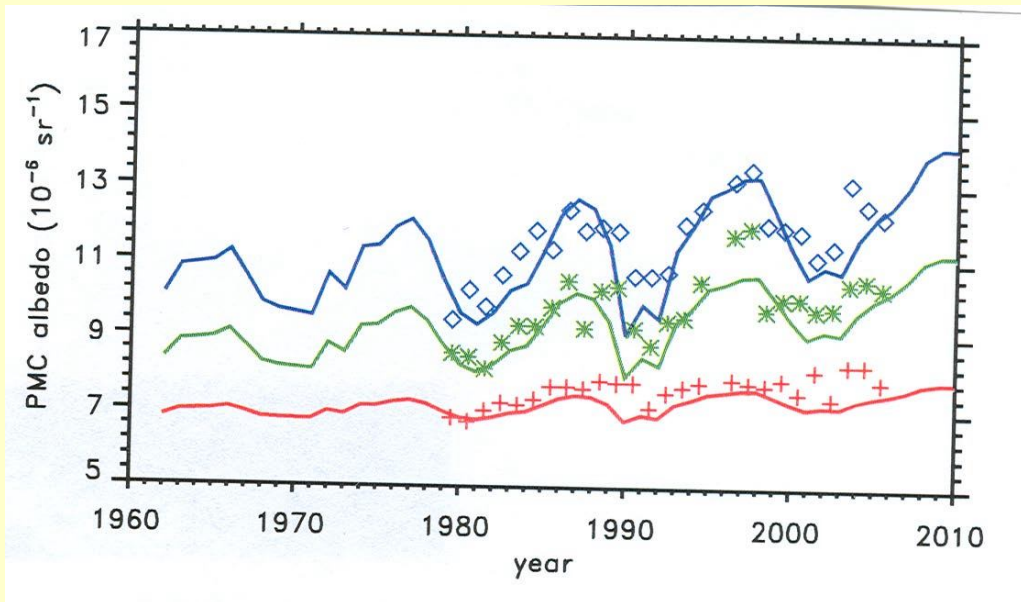
Qian et al. (2010)



Zonální vítr u 41.25°N –
rozdíl mezi simulacemi
2xCO₂ a CO₂.

**Trendy v zonálním větru
jsou regionálně velmi
odlišné i v modelových
simulacích, nejen v
pozorováních.**

Kvantitativní nesoulad trendů z pozorování a z modelů se zmenšuje



LIMA/ICE je prvý model který už docela rozumně kvantitativně reprodukuje dlouhodobou variaci (trend a sluneční cyklus) jasnosti stříbřitých oblaků v horní mezoféře. Model LIMA též poprvé rozumně kvantitativně nasimuloval trend mezoférické teploty včetně jeho změny v polovině 90-tých let.

V termosféře a ionosféře je stále kvantitativní nesoulad, pozorované trendy jsou silnější než modelové trendy. Prvá analýza družicových měření koncentrace CO_2 v dolní termosféře (Emmert et al., Nature Geosciences, prosinec 2012) ale ukázala, že trend CO_2 v dolní termosféře je daleko silnější než trend používaný v modelových simulacích – to by mohlo vyřešit nebo značně zredukovat nesoulad.

Závěr

Postupně se vytváří **ucelený obraz/scénář globální změny horní atmosféry**, t.j. mezoféry, termosféry a ionosféry, i když ještě některé otevřené otázky zůstávají. Hlavní příčinou je rostoucí koncentrace skleníkových plynů, jistou roli hrají i změny ozónu, vodní páry, aktivity atmosférických vln, geomagnetické aktivity a magnetického pole Země.

Úkoly pro budoucí výzkum:

1. Dořešit stávající „bílá místa“ v globálním scénáři.
2. Propojit trendy v horní atmosféře a ve stratosféře.