

Jak reaguje horní atmosféra a ionosféra na globální změnu klimatu?

Jan Laštovička

ÚFA AVČR v.v.i., Boční II, 14131 Praha 4; jla@ufa.cas.cz

Abstrakt: Hlavní příčinou změny klimatu v troposféře je rostoucí koncentrace skleníkových plynů, která vyvolává ohřev troposféry. Na vyšších výškách atmosféry, počínaje stratosférou, ale v efektu skleníkových plynů dominuje radiační ochlazování, čili růst jejich koncentrace ochlazuje, nikoliv ohřívá, horní atmosféru. To vede k změnám v chemii atmosféry, v koncentracích malých složek, ke změnám hustoty horní atmosféry následkem tepelného smršťování, i ke změnám v ionosféře. Nutno rovněž uvést, že v horní atmosféře a ionosféře působí také další (menší) zdroje dlouhodobých změn, jako antropogenní změny koncentrace ozónu, dlouhodobé změny sluneční a geomagnetické aktivity, sekulární změny magnetického pole Země, změny aktivity atmosférických vln nebo změny koncentrace vodní páry v mezoféře. Bude uveden stručný přehled současného stavu poznání dlouhodobých změn v systému horní atmosféra-ionosféra. Některé změny mají i významný praktický dopad, jako třeba pokles hustoty termosféry, který prodlouží životnost „kosmického smetí“ a tím zvýší výskyt katastrofických srážek družic s „kosmickým smetím“.

Abstract: Changes in tropospheric climate are caused mainly by the increasing concentration of greenhouse gases, which heats the troposphere. At higher altitudes, beginning with the stratosphere, the effect of greenhouse gases is dominated by radiative cooling, thus the increase of their concentration cools, not heats, the upper atmosphere. This results in changes of atmospheric chemistry, of concentration of minor constituents, of upper atmospheric density due to thermal shrinking, and of the ionosphere. It should be mentioned that the long-term changes in the upper atmosphere and ionosphere are affected also by other (secondary) drivers like anthropogenic changes of ozone concentration, long-term changes of solar and geomagnetic activity, secular changes of the Earth's magnetic field, changes in activity of atmospheric waves, or changes in concentration of water vapour in the mesosphere. A brief overview will be presented of the contemporary state of knowledge of long-term changes in the upper atmosphere-ionosphere system. Some changes have also significant practical impact like the decrease of thermospheric density, which will prolong lifetime of space debris and, thus, will increase occurrence of catastrophic collisions of satellites with space debris.

1. Úvod

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 vyšších vrstvách atmosféry je ale ochlazování, ne oteplování!* Příčinou je pokles hustoty atmosféry s výškou a tím i řidnutí vrstvy CO₂, která se nakonec v dolní stratosféře stane tak řídkou, že již i přes antropogenní růst koncentrace CO₂ nestačí zadržovat odchozí dlouhovlnné záření, jehož zachycování v troposféře působí ohřev (stejně jako sklo ve skleníku). Druhá vlastnost CO₂, poměrně silné vyzařování v některých spektrálních čárách v infračervené oblasti (tj. radiační ochlazování) ale zůstává nedotčena, a proto je výsledným efektem „skleníkové“ ochlazování. Tyto změny mají též dopad na horní atmosféru nad výškou 50 km – mezoféru a termosféru – i ionosféru, a tím se budeme dále zabývat.

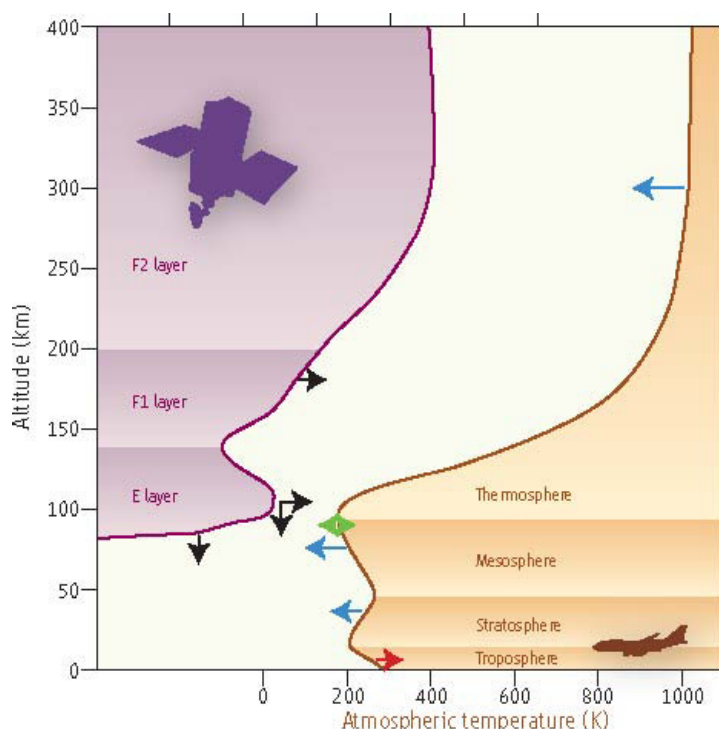
2. Scénář globálních změn

Obrázek 1 ukazuje trendy v teplotě (vpravo) a v elektronové koncentraci (ionosféra - vlevo) pro celou oblast výšek 0-400 km dle situace koncem r. 2006, kdy globální scénář vznikl. Pokud jde o trendy v horní atmosféře, trendy v teplotě mezoféry (ochlazování) a oblasti mezopauzy (bez trendu), v elektronové koncentraci (mírný růst) v maximech ionosférických vrstev E a F1, ve výškách (mírný pokles) dolní ionosféry a maxim E a F1 vrstvy, v hustotě termosféry (pokles) a v iontové teplotě okolo 350 km (výrazný pokles) tvoří konsistentní obraz, kvalitativně odpovídající modelovým simulacím efektů růstu koncentrace skleníkových plynů (Laštovička et al., 2012) – ochlazování horní atmosféry, její následné smršťování a teplotně podmíněné změny v chemii malých složek působící mírný růst elektronové koncentrace. K tomu do scénáře do současné doby přibýly další veličiny: Jasnost stříbřitých oblaků v horní mezoféře (kladný trend), výška maxima elektronové koncentrace F2 vrstvy ionosféry (pokles) a jeho hodnota (téměř žádný trend), iontová teplota (ochlazování) a elektronová teplota (mírný ohřev) v termosféře, jistá změna trendu v teplotě mezoféry a oblasti mezopauzy po r. 1995-1997 kvůli změně trendu stratosférického ozónu.

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 mezoféře.



Obr. 1. První scénář globálních změn v atmosféře a ionosféře (Laštovička et al., 2008). Šipky ukazují směr změny: teplotní profily vlevo ochlazování, vpravo ohřev (žádná změna v teplotě mezopauzy); profil elektronové koncentrace, změny v elektronové koncentraci (horizontálně) a ve výšce ionosférických vrstev (vertikálně).

3. Příčiny globálních změn

Hlavní příčinou probíhajících dlouhodobých globálních změn v horní atmosféře a ionosféře je sice růst koncentrace skleníkových plynů, hlavně CO_2 , ale není to příčina jediná, roli hrají i další faktory (Laštovička et al., 2012). Přehled faktorů ovlivňujících trendy:

1. Růst koncentrace skleníkových plynů, hlavně CO_2 .
2. Změny koncentrace ozónu ve stratosféře.
3. Změny koncentrace vodních par v mezoféře a stratosféře.
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 a kromě toho za dobu od kdy je k dispozici nejvíce dat (od 70-tých let) se sluneční aktivita dlouhodobě systematicky zase tak moc neměnila (kromě posledního slunečního minima), a proto na získané trendy prakticky vliv nemá.

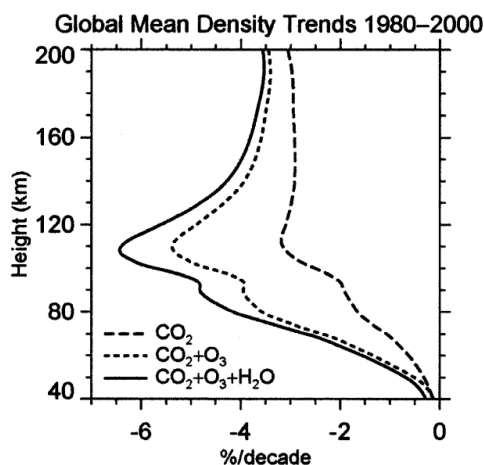
Některé příčiny dlouhodobých trendů se mění s časem (ozón v letech 1995-1997 ze záporného na kladný trend) nebo s místem (sekulární variace magnetického pole Země) podstatně svůj trend. *Proto trendy řady veličin nejsou dlouhodobě stabilní.*

Trendy v ozónu a vodní páře ovlivňují hlavně nižší vrstvy horní atmosféry, ale jejich vliv může zasahovat překvapivě vysoko, jak ukazují modelové výpočty v obr. 2. Největší vliv změn stratosférického ozónu na změny hustoty atmosféry je na výškách okolo 110 km a měl by být stále ještě detekovatelný i okolo 200 km (Akmaev et al., 2006), i když tento model vliv ozónu a vodní páře poněkud přeceňuje. Ionosférická data ukazují, že zatímco v maximu E-vrstvy (okolo 110 km) je vliv ozónu jasně prokazatelný, v maximu F1 vrstvy (okolo 200 km) již vidět není (Bremer, 2008).

Dopad změny trendu ozónu (1995-1997 pro střední šířky severní polokoule) na teploty:

Ve stratosféře se trend stal nulovým (Yoden, 2010). V mezoféře byly trendy z družicových měření HALOE/UARS slabší než starší raketové a lidarové trendy, protože vliv ozónu za období měření HALOE byl blízký k nule (Remsburg, 2009). Raketové sondáže ve Volgogradu vykazují slabší trendy po r. ~1995 (Yushkov, 2011). Měření a modelování v Evropě (Berger a Lubken, 2011) ukazuje, že trend teploty mezoféry se změnil ze záporného na nulový až lehce kladný, protože rychlé změny ozónu převažují nad pomalým nárůstem CO_2 . Čili

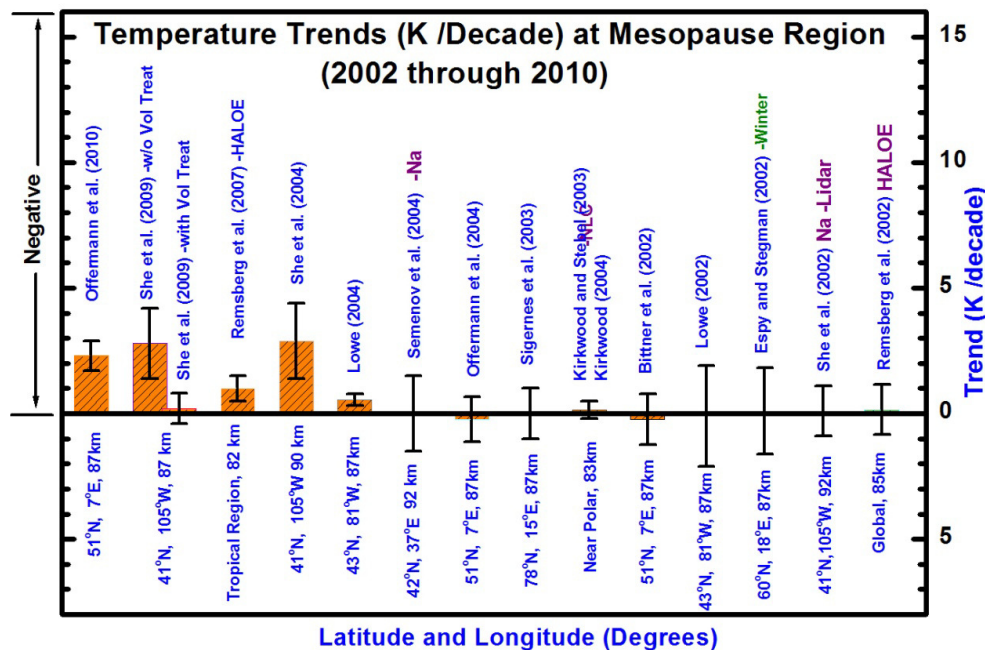
trend teploty mezoféry je nyní velmi slabý, pokud vůbec je. V oblasti mezopauzy naopak se trend změnil z nulového na mírně záporný (Beig, 2011).



Obr. 2. Trendy v globální průměrné hustotě atmosféry na výškách 40-200 km, způsobené změnami koncentrací CO₂, ozonu a vodní páry za období 1980-2000 podle modelových výpočtů Akmaev et al. (2006); %/decade znamená % za deset let.

V oblasti mezopauzy od r. ~2007 nastartovalo ochlazování, způsobené tím, že ochlazování od skleníkových plynů již nebylo bržděno až kompenzováno vlivem klesající koncentrace stratosférického ozónu. To ilustruje obr. 3 – starší práce opírající se převážně nebo zcela o data před r. 1997 nevykazují žádný trend, kdežto novější práce, zahrnující i data z poslední doby nebo se o ně převážně opírající vykazují již jistý záporný trend.

Sekulární (dlouhodobé) změny hlavního magnetického pole Země ovlivňují ionosféru, nejvíce její nejvyšší vrstvu pole F2. Obrázek 4 ilustruje, že změny magnetického pole Země mají na trendy ve výšce maxima vrstvy F2, hmF2, velice regionálně odlišný vliv; zdaleka nejsilnější dopady mají v oblasti nízkých šířek Jižní Ameriky, u nás naopak prakticky žádný.



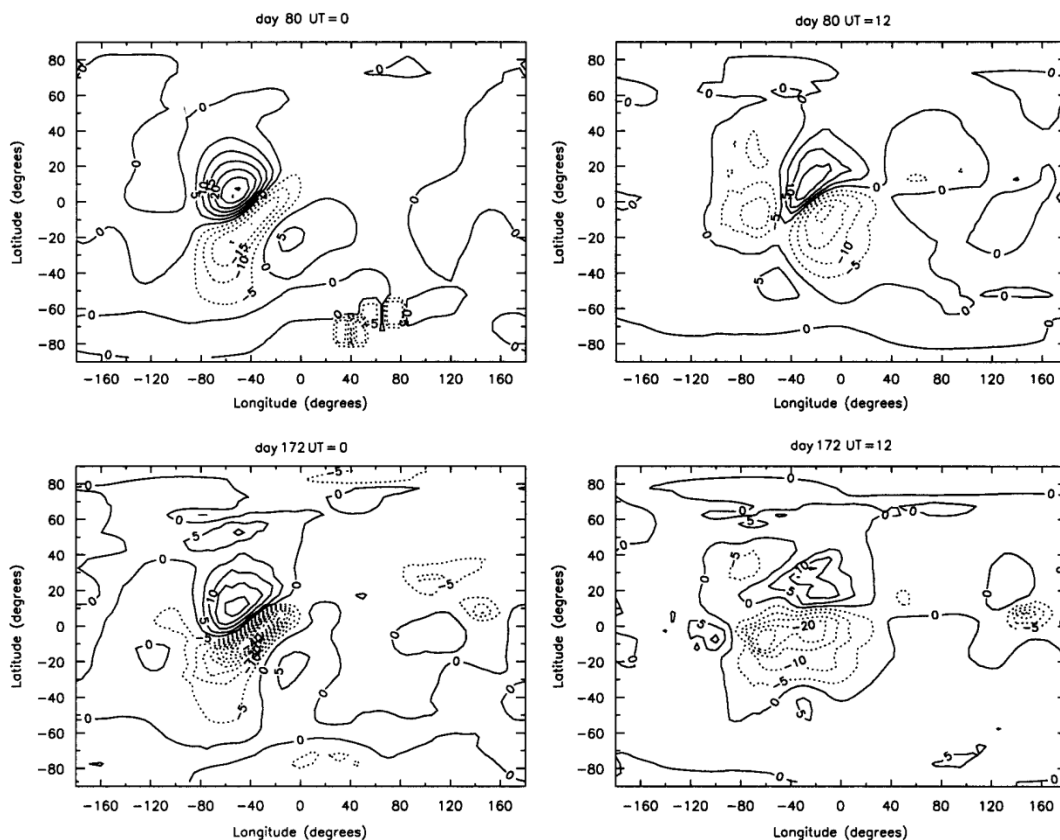
Obr. 3. Přehled publikovaných trendů teploty z oblasti mezopauzy dle Beig (2011).

4. Trendy ve větru a v intenzitě atmosférických vln v horní mezoféře a dolní termosféře (MLT)

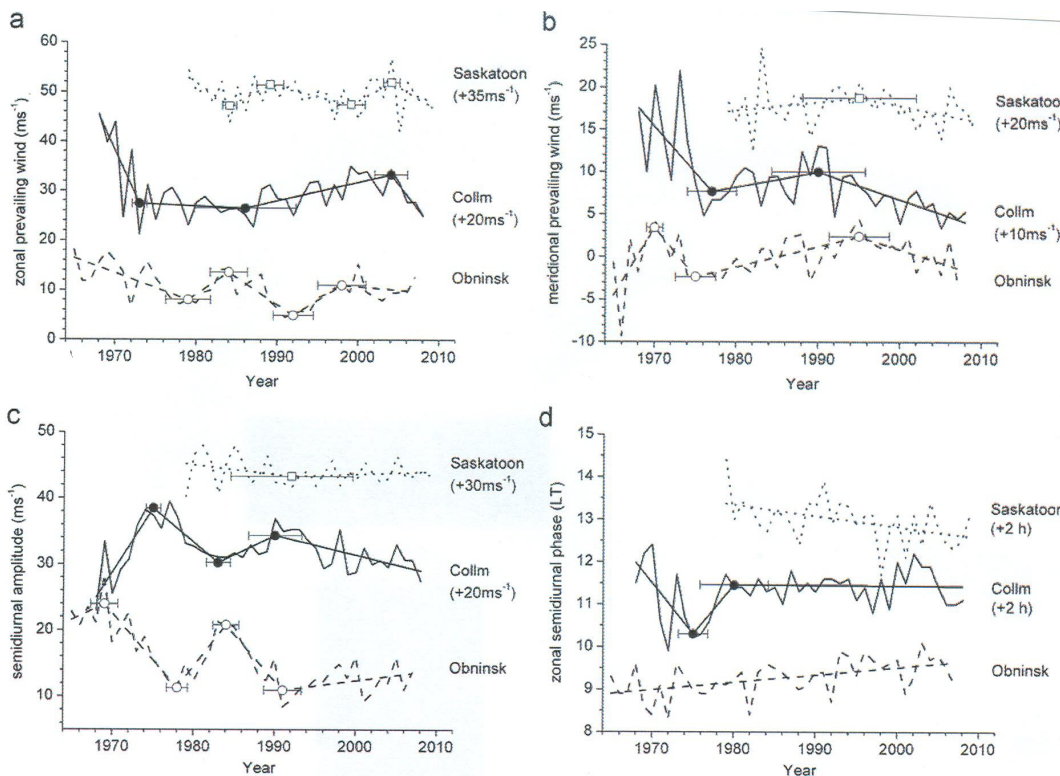
Tyto trendy tvoří klíčový problém ve studiu trendů v horní atmosféře a ionosféře. Pokud jde o trendy ve větru, ty jsou regionálně značně odlišné, jak ukazuje následující obr. 5 pro stanice Obninsk u Moskvy, Collm u Lipska a Saskatoon v Kanadě, šířky 52-55°N.

V zonálním větru (a) je dlouhodobý vývoj na každé stanici úplně jiný. V meridionálním větru je odlišnost o něco menší, nicméně vývoj na různých stanicích se opět o něco liší. Toto je překvapivý výsledek a mohli bychom předpokládat problémy s kvalitou a stabilitou dat, ale analýza jiných efektů dává dobrou shodu výsledků ze všech tří stanic a tato měření jsou obecně považována za kvalitní. Jasně do situace vnesly až modelové simulace (obr. 6), které ukazují, že i v modelech jsou trendy větru regionálně a délkově velmi odlišné, a to co i do znaménka.

Nyní přejdeme k aktivitě planetárních vln, které do horní atmosféry a ionosféry převážně přicházejí zdola, z troposféry a částečně ze stratosféry. Obrázek 5 ukazuje pro 12-hod přílivovou vlnu, že jak její amplituda (c), tak její fáze (d) se chovají v dlouhodobých změnách na každé ze tří stanic evidentně odlišně až i opačně.

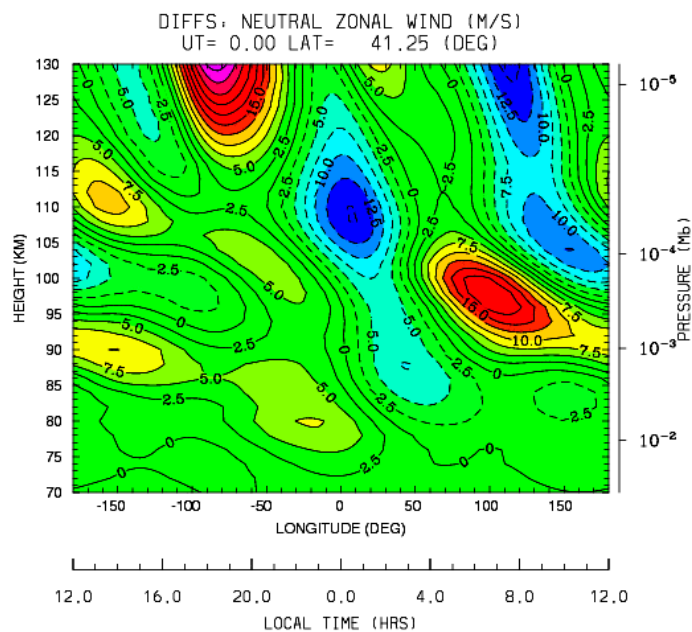


Obr. 4. Výpočet vlivu změn magnetického pole Země na výšku maxima F2 vrstvy ionosféry, hmF2 (rozdíl mezi roky 1997 a 1957 v km), modelem TIE-GCM pro den 80 (horní panely) a den 172 (dolní panely), 00 UT (vlevo) a 12 UT (vpravo). Podle Clossen a Richmond (2008).



Obr. 5. Časová řada průměrných větrů za prosinec-únor, výšky ~90-95, 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).

Podobně se chová i 24-hod přílivová vlna. Rovněž gravitační vlny vykazují někde mírný kladný trend, jinde nevykazují žádný trend. Kromě toho trendy v intenzitě gravitačních vln mohou být ovlivněny regionálními změnami jejich zdrojů (např. posunem typických drah tlakových níží).



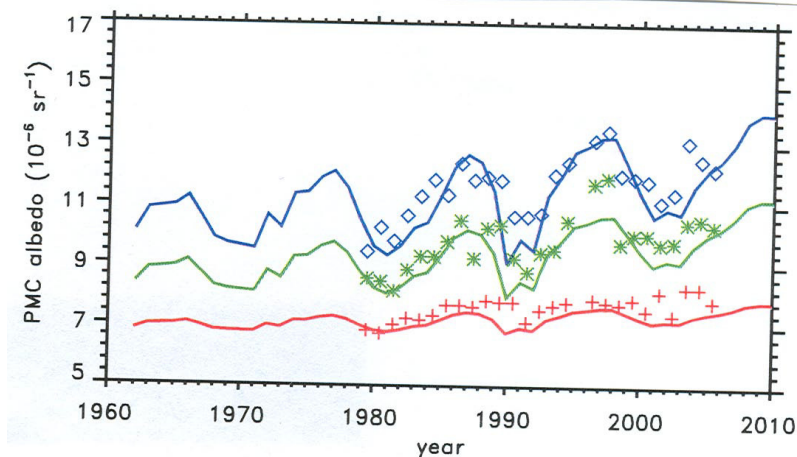
Obr. 6. Rozdíl mezi zonálním větrem u 41,5°N pro 2xCO₂ a CO₂ scénář – modelové simulace Qian et al. (2011).

Planetární vlny v Evropě dle ionosférických i větrových dat vykazují jistý mírný, i když nespojitý růst aktivity, jiná data dávají spíše žádný růst nebo i mírný pokles, modelové výpočty předpovídají mírný růst. Obecně lze tedy říci, že v trendech v aktivitě atmosférických vln je zatím situace nejasná, různé výsledky spolu navzájem nesouhlasí, je nedostatek observačních dat a jejich analýz. Jediné co je jasné je to, že trendy intenzity atmosférických vln jsou regionálně značně odlišné, což velmi ztěžuje jejich studium.

5. Kvantitativní nesoulad trendů z modelů a z pozorování

Toto je další důležitý problém uvedený v kap. 2. Nicméně situace se postupně zlepšuje. Jak ilustruje obr. 7, LIMA/ICE je první 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, která byla způsobena změnou v trendu stratosférického ozónu.

Problémem zatím zůstávají trendy v termosféře a ionosféře nad výškou 100 km, kde pozorované trendy jsou výrazně silnější než modelové trendy. Ale i zde se ale „objevuje světlo na konci tunelu“. Prvá analýza družicových měření koncentrace CO₂ v dolní termosféře (Emmert et al., 2012) ukázala, že trend CO₂ v dolní termosféře je daleko silnější než trend používaný v modelových simulacích. To by mohlo vyřešit nebo značně zredukovat nesoulad mezi experimentálními a modelovými trendy.



Obr. 7. Dlouhodobý vývoj jasnosti stříbřitých oblaků v horní mezoféře ve třech zónách: 54-64°N (červená), 64-74°N (zelená) a 74-82°N (modrá) pro družicová SBUV měření (symboly) a pro model LIMA/ICE (spojité čáry) (Lübken et al., 2012).

6. 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 „bílé místa“ v globálním scénáři.
2. Sledovat změny způsobené měnící se rolí některých příčin trendu jako ozón.
3. Propojit trendy v horní atmosféře a ve stratosféře.

Literatura:

- Akmaev, R.A., Fomichev, V.I., Zhu, X., 2006. Impact of middle-atmospheric composition changes on greenhouse cooling in the upper atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68, 1879-1889.
- Beig, G., 2011. Long-term trends in the temperature of the mesosphere/lower thermosphere region: 1. Anthropogenic influences. *J. Geophys. Res.*, 116, A00H11, doi: 10.1029/2011JA016646.
- Berger, U., Lübken, F.-J., 2011. Mesospheric temperature trends in mid-latitudes in summer. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L22804, doi: 10.1029/2011GL049528.
- Bremer, J., 2008. Long-term trends in the ionospheric E and F1 regions. *Annales Geophysicae* 26, 1189-1197.
- Cnossen, I., Richmond, A.D., 2008. Modelling the effect of changes in the Earth's magnetic field from 1957 to 1997 on the ionospheric hmF2 and foF2 parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70 (11-12), 1512-1524.
- Emmert, J.T., Stevens, M.H., Bernath, P.F., Drob, D.P., Boone, C.D., 2012: Observations of increasing carbon dioxide concentration in Earth's thermosphere. *Nature Geosci.*, 5 (12), 868-871, doi : 10.1038/NGEO1626.
- Jacobi, Ch., Hoffmann, P., Liu, R.Q., Merzlyakov, E.G., Portnyagin, Yu.I., Manson, A.H., Meek, C.E., 2012. Long-term trends, their changes, and interannual variability of Northern Hemisphere midlatitude MLT winds. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 75, 81-91, doi: 10.1016/j.jastp.2011.03.016.
- Laštovička, J., Akmaev, R.A., Beig, G., Bremer, J., Emmert, J.T., 2006. Global change in the upper atmosphere. *Science* 314 (5803), 1253-1254.
- Laštovička, J., Akmaev, R.A., Beig, G., Bremer, J., Emmert, J.T., Jacobi, C., Jarvis, M.J., Nedoluha, G., Portnyagin, Yu.I., Ulich, T., 2008. Emerging pattern of global change in the upper atmosphere and ionosphere. *Annales Geophysicae* 26 (5), 1255-1268.
- Laštovička, J., Solomon, S.C., Qian, L., 2012. Trends in the neutral and ionized upper atmosphere. *Space Sci. Rev.*, 168 (1-4), 113-145, doi: 10.1007/s11-214-011-9799-3.
- Lübken, F.-J., Berger, U., Kiliani, J., Baumgarten, G., Fiedler, J., 2012. Solar variability and trend effects in mesospheric ice layers. In: *Climate And Weather of the Sun-Earth System (CAWSES)*, Chapter 18, ed. F.-J. Lübken, Springer, Dordrecht, The Netherlands, doi: 10.1007/978-94-007-4348-9.
- Qian, L., Laštovička, J., Solomon, S.C., Roble, R.G., 2011. Progress in observations and simulations of global change in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 116, A00H03, doi: 10.1029/2010JA016317.
- Remsberg, E.E., 2009. Trends and solar cycle effects in temperatures versus altitude from the Halogen Occultation Experiment for the mesosphere and upper stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 114, D12303, doi: 10.1029/2009JD011897.
- Yoden, S., 2010. Long-term trends in stratospheric temperature and their detectability in future simulations under the situation of large natural variability. 6th IAGA/ICMA/CAWSES workshop “Long-Term Changes & Trends in the Atmosphere”, HAO-NCAR, Boulder, 2010.
- Yushkov, V., 2011. Russian meteorological rocket sounding related to the mesosphere. 4th NDMC workshop, Oberpfaffenhofen (Germany).

Prezentace: [Trend.ppt](#)