

Dopady lidské činnosti na horní atmosféru

Jan Laštovička

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

Abstrakt

Trendy v teplotě mezoféry, elektronové koncentraci v dolní ionosféře, elektronové koncentraci a výšce jejího maxima v E vrstvě, elektronové koncentraci v maximu F1 vrstvy, hustotě termosféry a iontové teplotě ve vrstvě F kvalitativně souhlasí s následky zesíleného skleníkového efektu a tvoří konzistentní scénář globálních změn v horní atmosféře. Byly identifikovány tři skupiny parametrů, které nezapadají do tohoto scénáře, F2 vrstva ionosféry, vodní pára v mezoféře a dynamika mezoféry a dolní termosféry. V článku je podána informace o pokroku v globálním scénáři dlouhodobých trendů v horní atmosféře se zaměřením na ty tři otevřené problémy. K dlouhodobým trendům přispívá několik dalších faktorů, jmenovitě antropogenní změny stratosférického ozónu, změny koncentrace vodních par v mezoféře, dlouhodobé změny geomagnetické aktivity a magnetického pole Země.

Abstract

Trends in the mesospheric temperature, electron concentration in the lower ionosphere, electron concentration and height of its maximum in the E region, electron concentration in the F1-region maximum, thermospheric neutral density and F-region ion temperature qualitatively agree with consequences of the enhanced greenhouse effect and form a consistent pattern of global change in the upper atmosphere. Three groups of parameters were identified as not-fitting this global pattern, the F2 region ionosphere, mesospheric water vapour, and the mesosphere/lower thermosphere dynamics. The paper reports progress in development of the global pattern of trends with emphasis to these three open problems. There are several other factors contributing to long-term trends, namely the stratospheric ozone depletion, mesospheric water vapour concentration changes, long-term changes of geomagnetic activity and of the Earth's magnetic field.

1. Úvod

Nejprve si vyjasníme pojmy – co je to horní atmosféra, jakou lidskou činnost máme na mysli. Horní atmosféru tvoří mezoféra, termosféra a ionosféra, výšky nad 50 km nad zemským povrchem. Pod pojmem lidská činnost zde chápeme vypouštění různých chemických látek do atmosféry, kterou tímto znečišťujeme; konkrétně se jedná o skleníkové plyny, hlavně CO₂, dále pak o ozón poškozující látky, z nichž většina je již v současnosti zakázána.

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 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. radiální ochlazování) ale zůstává nedotčena, a proto je výsledným efektem „skleníkové“ ochlazování. Tyto změny musí mít těž dopad na horní atmosféru, a tím se budeme dále zabývat.

Ve druhé kapitole bude stručně uveden scénář globálních změn a vymezeny zbývající s tím spojené nejasnosti a problémy. Ve třetí kapitole pojednáme příčiny pozorovaných dlouhodobých změn horní atmosféry, jimiž jsou nejen skleníkové plyny. Ve čtvrté kapitole se budeme zabývat podrobněji třemi hlavními problémovými oblastmi. Kapitolou pátou je závěr.

2. Scénář globálních změn

Obrázek 1 ukazuje souhrnně trendy v teplotě a v elektronové koncentraci (ionosféra) pro celou oblast výšek 0-400 km. Pokud jde o trendy v horní atmosféře, trendy v teplotě mezoféry (ohřev), 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 konzistentní obraz, kvalitativně odpovídající modelovým simulacím efektů růstu koncentrace skleníkových plynů (Laštovička et al., 2006a, 2008) – ochlazování horní atmosféry, její následné smršťování a teplotně podmíněné změny v chemii malých složek působící mírný růst elektronové koncentrace.

Do tohoto scénáře ale nezapadá nebo je nejasné:

1. Trendy v maximu F2 vrstvy ionosféry.
2. Trendy v dynamice v horní mezoféře a dolní termosféře (MLT oblast).
3. Trendy v koncentraci vodní páry v mezoféře.

Těmito třemi okruhy problémů se budeme zabývat ve 4. kapitole.

3. Příčiny globálních změn

Hlavní příčinou probíhajících dlouhodobých globálních změn je sice Růst koncentrace skleníkových plynů, hlavně CO₂, ale není to příčina jediná, roli hrají i další faktory (Laštovička, 2009). Přehled faktorů ovlivňujících trendy:

1. Růst koncentrace skleníkových plynů, hlavně CO₂.
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.

Při počítání trendů se dělá korekce na sluneční aktivitu pro odstranění slunečního cyklu a kromě toho za dobu kdy je k dispozici nejvíce dat (od let 70-tých) se sluneční aktivita dlouhodobě zase tak moc neměnila, a proto na získané trendy prakticky vliv nemá.

Trend v ozónu a vodní páře ovlivňují hlavně nižší vrstvy horní atmosféry, ale jejich vliv může zasahovat překvapiv vysoko, jak ukazují model 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 pravděpodobně vliv ozónu a vodní páry poněkud přeceňuje. Ionosférická data ukazují, že zatímco v maximu E-vrstvy (okolo 110 km) je vliv ozónu prokazatelný, v maximu F1 vrstvy (okolo 200 km) již vidět není (Bremer, 2008).

Dlouhodobé změny geomagnetické aktivity a magnetického pole Země ovlivňují hlavně ionosféru, nejvíce její nejvyšší vrstvu F2, což bude pojednáno v kapitole 4.1. Obrázek 3 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.

Některé příčiny dlouhodobých změn mění s časem (ozón) nebo s místem (magnetické pole Země) podstatně svůj trend. To má dva následky. Za prvé se s časem a místem mění relativní role jednotlivých faktorů v celkových trendech. Za druhé trendy nebudou dlouhodobě stabilní a na všech místech stejné. Je jasné, že když dochází ke změně trendu ozónu z poklesu postupně na růst, tak to bude mít dopad na trend řady veličin v horní atmosféře, zvláště v mezoféře a dolní termosféře. Podobně změny geomagnetického pole Země budou vytvářet regionální rozdíly v trendech v ionosféře, jak naznačuje i obr. 3..

4. Problémy

Jak už bylo uvedeno ve 2. kapitoly, existují tři okruhy problémů, charakterizované klíčovými slovy F2 vrstva ionosféry, dynamika v MLT oblasti a vodní pára v mezoféře. Jejich vývojem v posledním období se nyní budeme zabývat podrobněji.

4.1. F2 vrstva ionosféry

Studovanými parametry F2 vrstvy ionosféry jsou maximální elektronová koncentrace vyjádřená pomocí pozorované kritické frekvence foF2 a výška tohoto maxima hmF2. Problémy jsou v podstatě dva:

1. Různí autoři nalézají buď kladný nebo naopak záporný trend pro různé stanice a různá období v foF2 i hmF2.
2. Vede se spor o to, zda hlavní příčinou je skleníkový efekt nebo růst geomagnetické aktivity, v některých oblastech hraje též roli sekulární variace magnetického pole Země.

Příčin rozdílu ve velikosti a i znaménku trendů je více. V některých případech byly problémy s kvalitou dat nebo s použitím příliš krátkého období. Další problém byla nepřesně dělaná korekce na vliv slunečního cyklu (ten je pro foF2 o dva řády silnější než trend). Pro hmF2 máme kvalitní přímá měření jen za posledních 10-15 let, starší data se počítala z M(3000)F2; pro přepočítání existují čtyři poněkud odlišné formule, z nichž každá je vhodná pro jiné podmínky, přičemž řada autorů toto zanedbala a použila nesprávné formule. Laštovička et al. (2006b) na souboru vysoce kvalitních foF2 dat porovnali výsledky získávané různými metodami různých autorů, vyřadili chybné metody a ukázali, že kromě komplikované metody Michajlova ostatní metody dávají srovnatelné výsledky. Vedlejší výsledkem této studie bylo, že oproti F10.7 jak R, tak zvláště R12 jsou podstatně horší pro korekci vlivu slunečního cyklu na foF2. Nejlepší datové soubory analyzované korektními postupy při vhodné volbě studovaného období pro potlačení vlivu slunečního cyklu dávají mírný pokles foF2 a pokles hmF2, což je v souladu s modelovými výpočty (obr. 4). Obrázek 4 (modelový výpočet) ukazuje pro 2xCO₂ pokles hmF2 o 20-25 km, kdežto pokles foF2 je jen malý. Při slabém efektu je jasné, že i různé menší chyby v datech nebo v postupu mohou vést i k trendům s opačným znaménkem, Obrázek 4 rovněž kvalitativně souhlasí s pozorovanými mírnými kladnými trendy elektronové koncentrace okolo 110 km (foE) a 200 km (foF1).

Jak už jsme ukázali v obr. 3, někde hraje významnou roli v trendech hmF2 a foF2 sekulární změna magnetického pole Země, ale pro většinu regionů včetně Evropy je tento efekt zanedbatelný. Odborníci se rozdělují na dvě skupiny, jedna upřednostňuje jako hlavní příčinu pozorovaných trendů růst koncentrace

skleníkových plynů, druhá růst geomagnetické aktivity. Po skoro celé 20. století oba faktory rostly a působily na trendy stejným směrem, čili nebylo možno je rozlišit. V současné době ale již magnetická aktivita neroste. Obrázek 5 ukazuje pro dvě evropské stanice, Slough (Anglie) a Řím, chování foF2, foF1 a foE v závislosti na geomagnetické aktivitě (A_{p132}). V prvním období s růstem geomagnetické aktivity klesají hodnoty ionosférických veličin, což odpovídá chování kontrolovanému geomagnetickou aktivitou. Později se ale charakter chování mění. Pro foE se charakter chování mění okolo r. 1970 (Michajlov a de la Morena (2003) tuto změnu okolo r. 1970 prokázali pro podstatně větší soubor stanic), pro foF1 okolo r. 1997, pro foF2 okolo r. 2000. Čili podle obr. 5 v minulosti byly dlouhodobé změny ionosféry určovány hlavně dlouhodobými změnami geomagnetické aktivity, ale v současnosti již tomu tak není, rozhodujícím faktorem se stal růst koncentrace skleníkových plynů. To souhlasí se závěrem Laštovičky (2005) o rostoucí roli skleníkových plynů a klesající roli sluneční a geomagnetické aktivity v dlouhodobých změnách v systému atmosféra-ionosféra v průběhu 20. století.

4.2. Dynamika v mezoféře a dolní termosféře

Dva hlavní problémy jsou:

1. Změnil se trend větrů okolo r. 1990 a proč?
2. Jaké jsou trendy v aktivitě atmosférických vln?

Obrázek 6 ukazuje trendy ve větru na výškách okolo 90 km pro dvě reprezentativní evropské stanice s nejdelšími řadami měření, Collm a Obninsk za období 1973-2004. Zonální vítr až do r. 1990 slábl, od r. 1990 pak naopak zesiloval. Meridionální vítr do r.1990, poté se stabilizoval. Okolo r. 1990 tedy došlo k jasné změně v trendu větru. Měření na žádné další stanici není s tímto tvrzením v rozporu. Příčina je zatím neznámá, ale vzhledem k podstatné roli, kterou hraje disipace energie gravitačních vln ve větru na výškách okolo 90 km a vzhledem k tomu, že malé ozónové laminy, vytvářené hlavně gravitačními vlnami, vykazují obdobnou změnu trendů okolo r. 1990, jsme toho názoru, že změna aktivity gravitačních vln, způsobená změnou v jejich troposférických zdrojích a ve filtraci vln stratosférou, hraje důležitou ne-li hlavní roli ve změně trendu ve větrech okolo 90 km.

To nás přivádí k druhému problému, a to k otázce, jak se dlouhodobě mění aktivita gravitačních a dalších atmosférických vln v mezoféře a dolní termosféře. Zde ale narážíme na nedostatek informací. Pokud jde o gravitační vlny, existují pouze dvě studie na omezených datových souborech založených na měření větru, z nichž žádná neprokázala existenci trendu, i když modely předpovídají jisté zvýšení jejich aktivity. Aktivita planetárních vln pravděpodobně nepravidelně zesilovala, ale i zde je potřeba více informací. Aktivita přílivových vln v zonálním větru vykazovala obdobnou změnu trendu jako převládající vítr, ale změna nastala o několik let dříve. O trendech aktivity přílivových vln v dalších veličinách pak nemáme spolehlivé informace. Celkově tedy trendy v aktivitě atmosférických vln tvoří slabé místo v tom smyslu, že nemáme dostatek kvalitních informací pro jejich posouzení.

4.3 Koncentrace vodních par v mezoféře

Třetím z problémů jsou nejasné a rozporné výsledky o trendech koncentrace vodních par a s tím spojených stříbřitých oblaků. Stříbřité oblaka (NLC – noctilucent clouds) se pozorují v létě na výškách 82-85 km ve vysokých šířkách; jsou spojena s extrémně nízkými teplotami v letní polární menopauze. Při pozorování shora jsou nazývány polární mezoférická oblaka (PMC). O trendech v NLC/PMC rozhodují koncentrace vodních par a teplota, a jelikož trend teploty na výšce NLC/PMC je nulový, rozhoduje trend v koncentraci vodních par. Konkrétní problémy jsou dva:

1. Propad koncentrace vodních par v r. 2001.
2. Rozpor v trendech stříbřitých oblaků (NLC) a polárních mezoférických oblaků (PMC).

Ve stratosféře od 50-tých let minulého století balonová a později i družicová data ukazovala na stálý růst koncentrace vodních par, který byl přerušen náhlým poklesem v r. 2001, zřejmě díky ochlazení tropické tropopauzy. Od té doby ale koncentrace vodních par opět roste a již překročila úroveň r. 2000, takže se zdá, že nešlo o přerušení trendu, pouze o nehomogenitu v časové řadě (nicméně potvrzení dalšími pozorováními je zapotřebí). Tento vývoj se s jistým časovým zpožděním a méně „skokovou“ formou promítl i do koncentrace vodních par v mezoféře. Dalším problémem jsou pak rozdíly v chování koncentrace vodních par podle družicových a pozemních měření.

Obrázek 7 ukazuje, že celkové průměrné albedo PMC (to je dáno počtem a jasností PMC) vykazuje kromě jasné antikorelace se slunečním cyklem také zjevný dlouhodobý růst. Obrázek 8 naopak vede k závěru, že četnost výskytu NLC nevykazuje statisticky významný růst. DeLand et al. (2007) analyzovali 27 let družicových pozorování albeda PMC v šířkových pásmech 50°-64° (šířky kde se pozorují NLC), 64°-74° a 74°-82°; našli srovnatelné trendy na severní a jižní polokouli, vzrůst o 12-20% za 27 let. Ale tento růst byl podstatně slabší na šířkách, kde se pozorují NLC (největší byl okolo 80°N). Na druhé straně Kirkwood et al. (2008) dostali z obr. 8 pro četnost výskytu NLC trend $+0.08 \pm 0.16$ nocí/rok, což je statisticky nulový trend, ale s velkým stupněm nejistoty. Tyto dva výsledky umožňují říci, že možná není skutečný rozdíl mezi trendy v NLC a PMC. Dané pásmo možných trendů NLC zahrnuje i pozorovaný kladný trend v PMC (ale i možnost záporného trendu v NLC).

5. Závěr

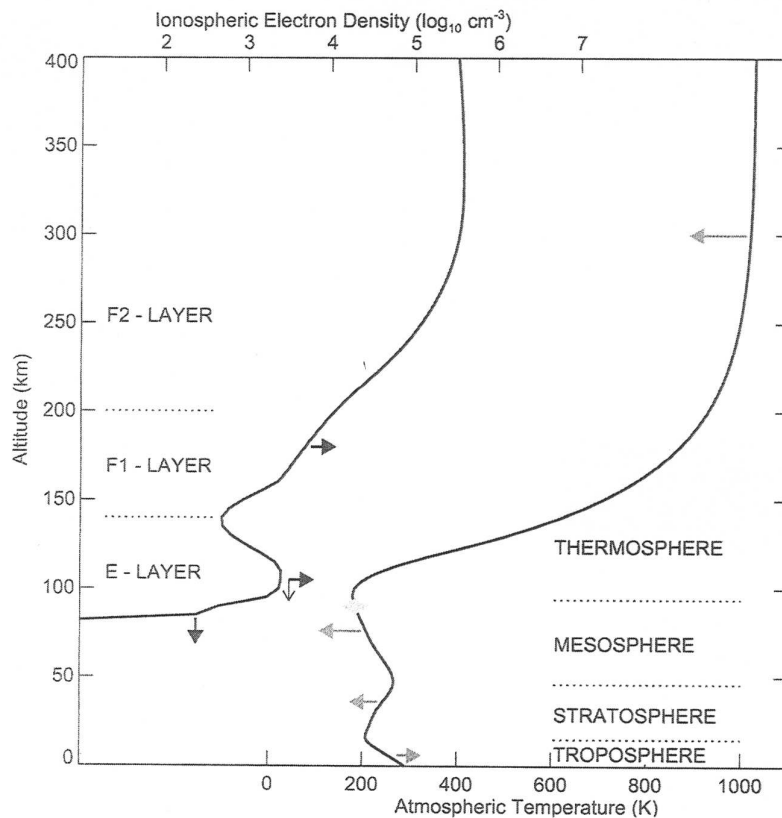
Postupně se vytváří *ucelený obraz/scénář globální změny horní atmosféry*, t.j. mezoféry, termosféry a ionosféry, i když ještě některé otevřené otázky zůstávají. Ze tří problémových oblastí bylo ve dvou, v F2-vrstvě ionosféry a v koncentraci vodních par v mezoféře, dosaženo pokroku a nalezena cesta, která by mohla vést k objasnění problémů a začlenění těchto veličin do celkového obrazu/scénáře globálních změn horní atmosféry. Největším problémem zůstávají dlouhodobé změny v aktivitě atmosférických vln, kde je málo informací a nejasná situace. Hlavní příčinou dlouhodobých změn v horní atmosféře je rostoucí koncentrace skleníkových plynů, jistou roli hrají i změny ozónu, vodní páry, geomagnetické aktivity a magnetického pole Země.

Úkoly pro budoucí výzkum:

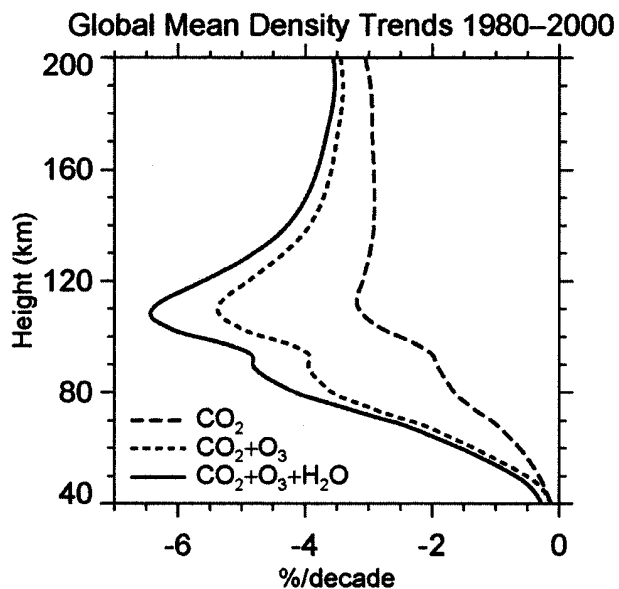
1. Dořešit stávající „bílé místa“ v globálním scénáři.
2. Propojit trendy v horní atmosféře a ve stratosféře.

Literatura

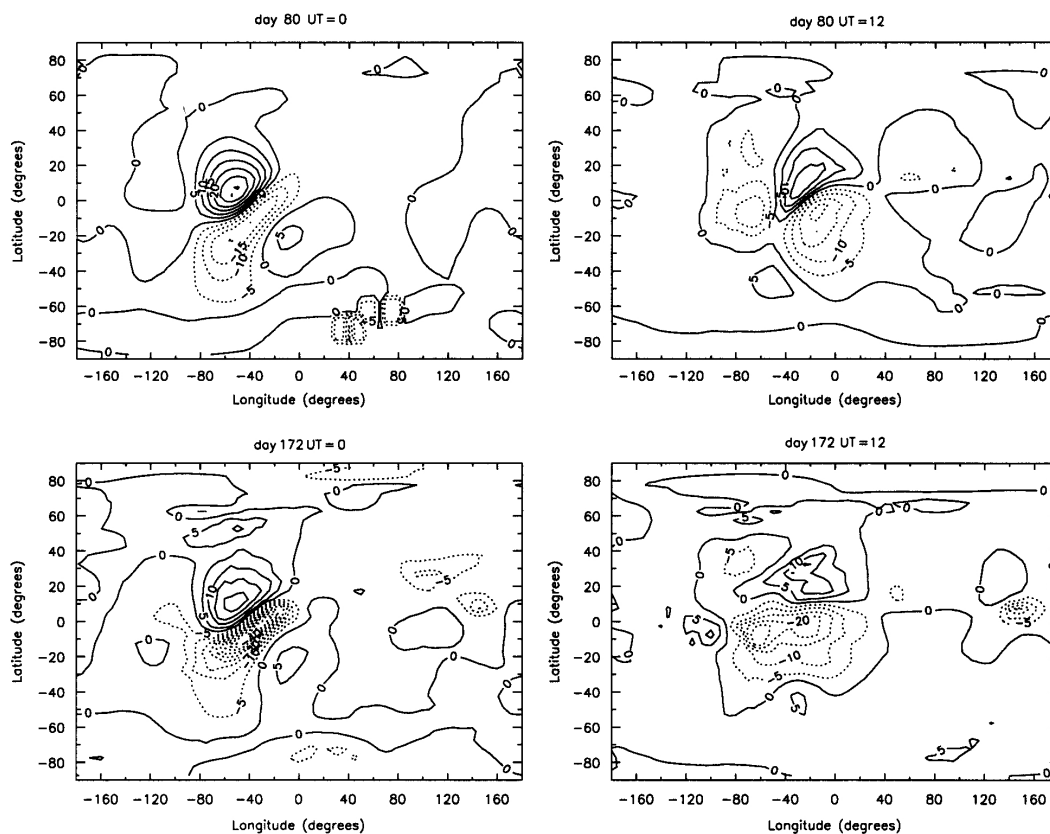
- Akmaev, R.A., Fomichev, V.I., Zhu, X., 2006. Impact of middle-atmospheric composition changes on greenhouse cooling in the upper atmosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68, 1879-1889.
- Bremer, J., 2008. Long-term trends in the ionospheric E and F1 regions. *Annales Geophysicae* 26, 1189-1197.
- Bremer, J., Laštovička, J., Mikhailov, A.V., Altadill, D., Bencze, P., Burešová, D., DeFranceschi, G., Jacobi, C., Kouris, S., Perrone, L., Turunen, E., 2009. Climate of the upper atmosphere. *Annals of Geophysics* (v tisku).
- 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.
- DeLand, M.T., Shettle, E.P., Thomas, G.E., Olivero, J.J., 2006. A quarter-century of satellite polar mesospheric cloud observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68, 9-29.
- DeLand, M.T., Shettle, E.P., Thomas, G.E., Olivero, J.J., 2007. Latitude-dependent long-term variations in polar mesospheric clouds from SBUV version 3 PMC data. *Journal of Geophysical Research* 112, D10315, doi:10.1029/2006JD007857.
- Kirkwood, S., Dalin, P., Réchou, A., 2008. Noctilucent clouds observed from the UK and Denmark – trends and variations over 43 years. *Annales Geophysicae* 26, 1243-1254.
- Laštovička, J., 2005. On the role of solar and geomagnetic activity in long-term trends in the atmosphere-ionosphere system. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67 (1-2), 83-92.
- Laštovička, J., 2009. Global pattern of trends in the upper atmosphere and ionosphere: recent progress. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 71, doi: 10.1016/j.jastp.2009.01.010.
- Laštovička, J., Akmaev, R.A., Beig, G., Bremer, J., Emmert, J.T., 2006a. 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., Mikhailov, A.V., Ulich, Th., Bremer, J., Elias, A.G., Ortiz de Adler, N., Jara, V., Abarca del Rio, R., Foppiano, A.J., Ovalle, E., Danilov, A.D., 2006b. Long-term trends in foF2: A comparison of various methods. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68 (17), 1854-1870.
- Mikhailov, A.V., de la Morena, B.A., 2003. Long-term trends of foE and geomagnetic activity variations. *Annales Geophysicae* 21, 751-760.
- Qian, L., Solomon, S.C., Roble, R.G., Kane, T. J., 2008. Model simulations of global change in the ionosphere. *Geophysical Research Letters* 35, L07811, doi:10.1029/2007GL033156.



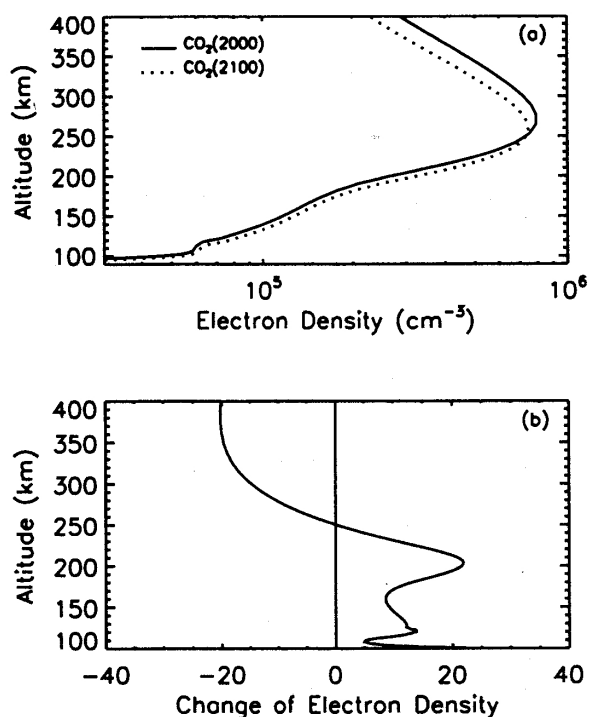
Obr. 1. Prvý scénář globálních změn v atmosféře a ionosféře (dle Laštovička et al., 2008). Šipky ukazují směr změny: teplotní profily vlevo ochlazení, vpravo ohřev (žádná změna v teplotě menopauzy); profil elektronové koncentrace, změny v elektronové koncentraci (horizontálně) a ve výšce ionosférických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



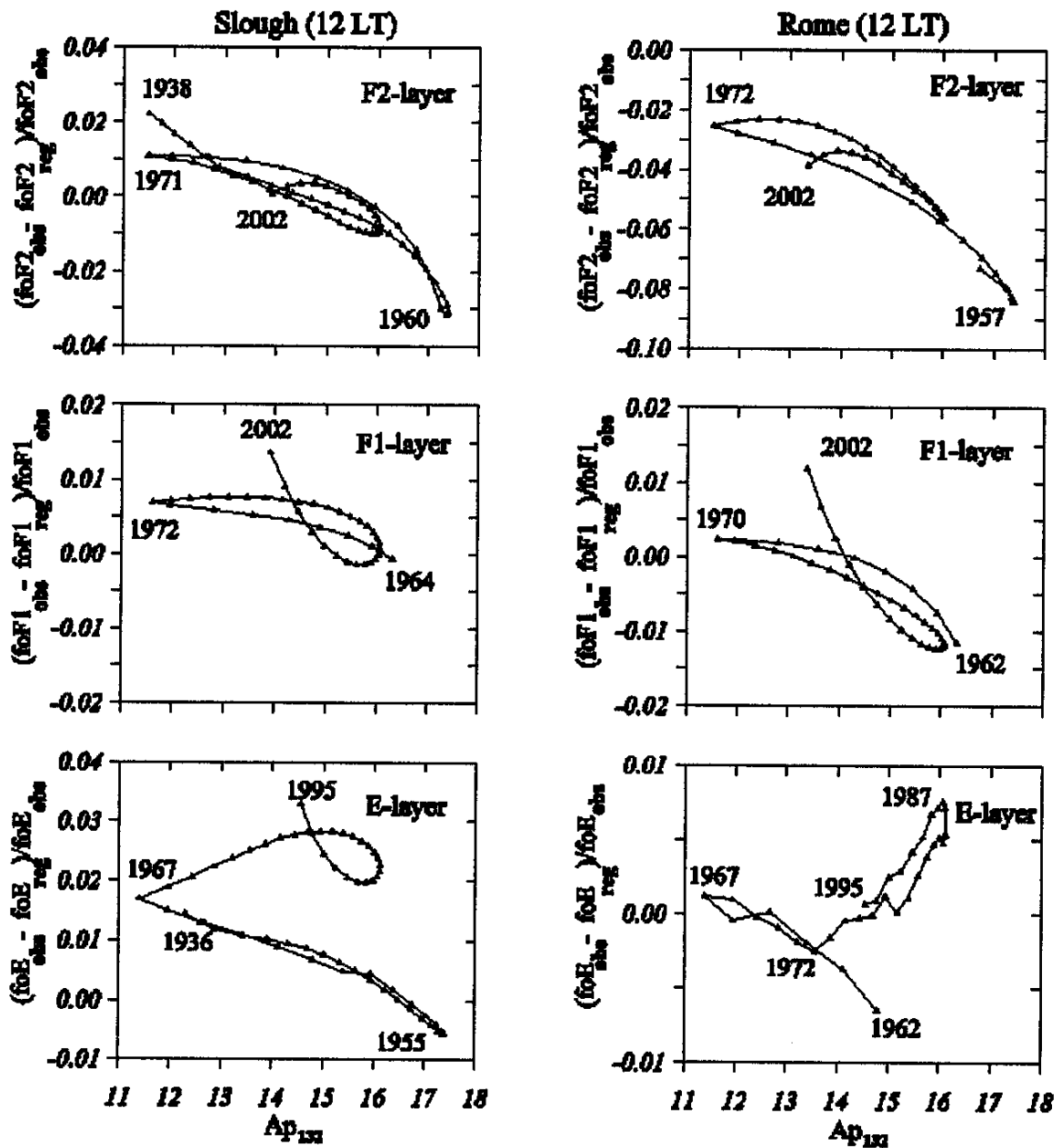
Obr. 2. Trendy v globální průměrné hustotě atmosféry na výškách 40-200 km, způsobené změnami koncentrací CO_2 , ozonu a vodní páry za období 1980-2000 podle modelových výpočtů Akmaev et al. (2006); %/decade znamená % za deset let.



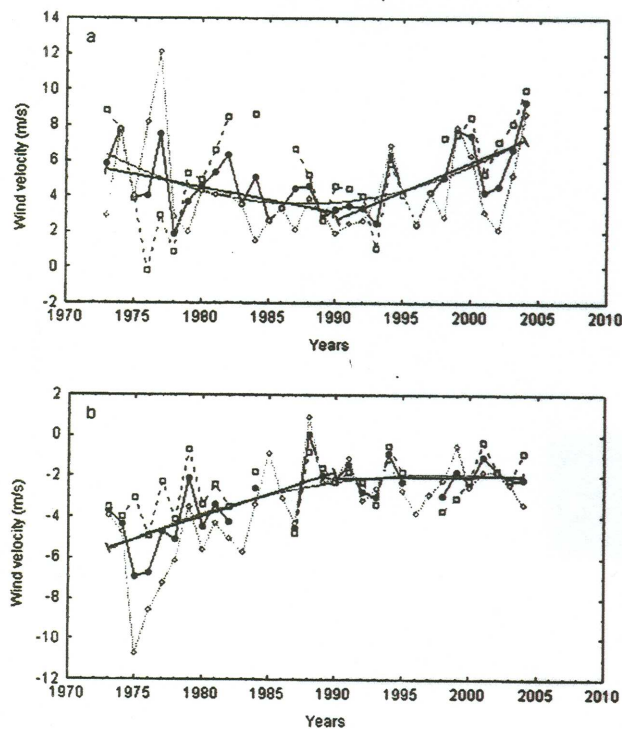
Obr. 3. Výpočet vlivu změn magnetického pole Země na výšku maxima F2 vrstvy ionosféry, hmF2 (rozdíl mezi roky 1997 a 1957 v km), modelem TIE-GCM pro den 80 (horní panely) a den 172 (dolní panely), 00 UT (vlevo) a 12 UT (vpravo). Podle Crossen a Richmond (2008).



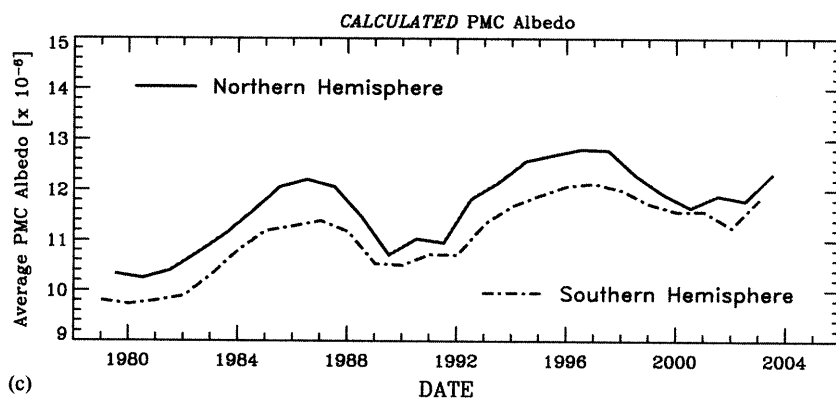
Obr. 4. Profily elektronové koncentrace pro r. 2000 (plná čára) a pro $2xCO_2$ v r. 2100 (čárkovaná čára) při střední úrovni sluneční aktivity ($F_{10.7} = 150$) – horní panel. Změna elektronové koncentrace v procentech jako následek zdvojnásobení koncentrace CO_2 - dolní panel. Podle Qian et al. (2008).



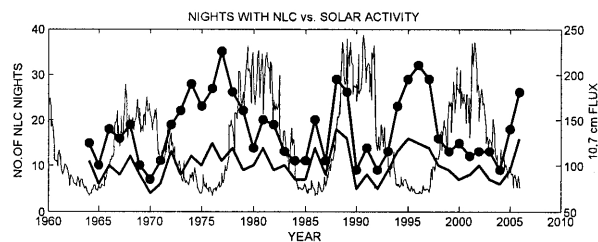
Obr. 5. Chování foF2, foF1 a foE na stanicích Slough (Anglie) a Řím v závislosti na geomagnetické aktivitě (A_{p132} – vyhlazená geomagnetická aktivita), období ~1960-2002. Podle Bremer et al. (2009). Pro foE se charakter chování mění okolo r. 1970, pro foF1 okolo r. 1997, pro foF2 okolo r. 2000.



Obr. 6. Roční průměrný převládající vítr na výškách okolo 90 km pro stanice Obninsk (55°N, 37°E) a Collm (52°N, 15°E). Čárkovaná čára - Obninsk, tečkovaná čára - Collm, plná čára – průměr Obninsk + Collm; rovné plné čáry – lineární trend; horní panel – zonální složka, dolní panel – meridionální složka (Laštovička et al., 2008).



Obr. 7. Průměrné albedo polárních mezoférických oblaků (PMC) počítané z kombinace SBUV a SBUV/2 dat: Plná čára – severní polokoule, čerchovaná čára – jižní polokoule. Podle DeLand et al. (2006).



Obr. 8. Vývoj četnosti nocí se stříbřitými oblaky (NLC) podle pozorování ve Velké Británii a v Dánsku, 1964-2006 (Kirkwood et al., 2008). Tlustá plná čára – celá NLC sezóna; plná čára – 20.6.-20.7.; tenká čára – F10.7.