

Dopad růstu koncentrace skleníkových plynů na horní atmosféru a ionosféru

Impact of increasing concentration of greenhouse gases on the upper atmosphere and ionosphere

Jan Laštovička

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční 1401/II
141 00 Praha 4
✉ jla@ufa.cas.cz

The increasing concentration of greenhouse gases, which heats the troposphere, cools the upper atmosphere (mesosphere, thermosphere, and ionosphere) via the infrared radiation. This has consequences for various upper atmosphere parameters, which are briefly described in this paper. We describe also the important role of the Institute of Atmospheric Physics both in investigations as well as coordination of the international collaboration.

KLÍČOVÁ SLOVA: plyny skleníkové – atmosféra horní – ionosféra

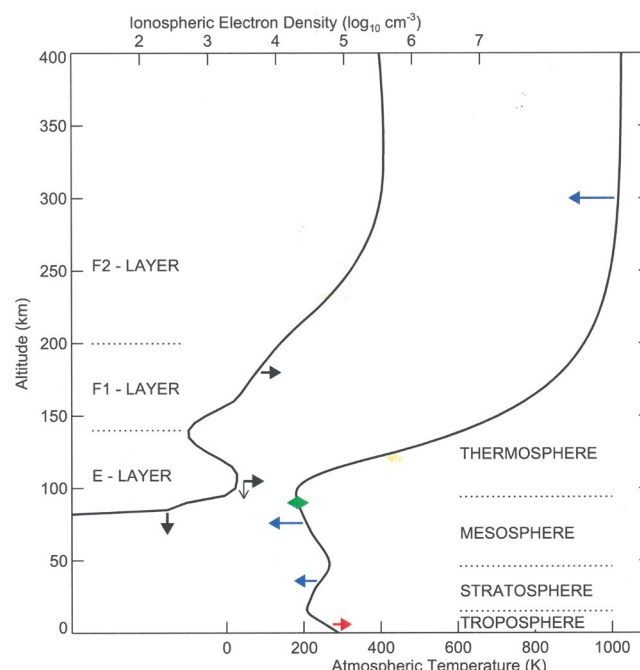
KEYWORDS: greenhouse gases – upper atmosphere – ionosphere

1. Úvod

Antropogenní růst koncentrace skleníkových plynů, zvláště CO_2 , vyvolává ohřev troposféry. Ale s rostoucí výškou klesá hustota atmosféry, a v horní atmosféře (mezosféra, termosféra a ionosféra, výšky 50–500 km) je proto koncentrace CO_2 tak nízká, že nestačí zachycovat odchozí dlouhovlnnou radiaci a zahřívát atmosféru. Naopak dominuje jiná vlastnost CO_2 , radiační ochlazování intenzivním vyzařováním v infračervené oblasti. Družicová pozorování ukazují, že přinejmenším až do výšky 110 km roste koncentrace CO_2 v atmosféře tak jako u povrchu, ~5 % za desetiletí (Rezac et al. 2018). To vede k ochlazení horní atmosféry s jejím následným smršťováním a ke změně rychlostí chemických reakcí s dopadem na malé složky atmosféry a na ionosféru.

Studium dlouhodobých trendů antropogenního původu v horní atmosféře zahájila modelová studie Robleho a Dickinsona (1989), první experimentální studií byla práce Aikina et al. (1991). V r. 1999 byla založena pracovní skupina IAGA/IAMAS „Dlouhodobé trendy v mezosféře, termosféře a ionosféře“. V r. 2006 vznikl první scénář dlouhodobých trendů v horní atmosféře (Laštovička et al. 2006), ukázaný na obr.

1. V teplotě neindikoval změnu v oblasti mezopauzy, ale ukazoval ochlazování různé velikosti v mezosféře a termosféře. V ionosféře pak mírný vzrůst elektronové koncentrace pod ~200 km a mírný pokles výšky. Jeho součástí bylo i chování některých dalších parametrů. Měl ale celou řadu bílých míst a některé vnitřní rozpory. Celkový popis problematiky dlouhodobých trendů v horní atmosféře lze nalézt v práci Laštovičky et al. (2012), přehled pokroku za posledních šest let pak v práci Laštovičky (2023).



Obr. 1 Trendy v atmosféře Země. Atmosférické vrstvy jsou definovány profilem teploty, ionosférické vrstvy profilem elektronové koncentrace (půlnoc u rovníku). Šipky indikují směr změn. Červená – ohřev; modrá – ochlazování; zelená – teplota beze změny; černá – změny elektronové hustoty (horizontálně) a výšky ionosférických vrstev (vertikálně).

Fig. 1. Trends in Earth's atmosphere. The atmospheric layers are defined by the temperature profile, the ionospheric layers by the electron density profile (midnight at equator). Arrows indicate the direction of change. Red – warming; blue – cooling; green – no change of temperature; black – changes in electron density (horizontal) and heights of ionospheric layers (vertical).

2. Současný stav poznání

Začneme mezosférou a oblastí mezopauzy (výšky ~50–90 km), kde je dlouhodobý trend ovlivňován též antropogenními změnami koncentrace ozonu ve stratosféře. Mezoféra se ochlazuje tempem okolo 1–2 K/desetiletí, trochu více v období poklesu koncentrace ozonu, po zastavení poklesu ozonu v letech 1995–1997 trochu méně. Naopak teplota oblasti mezopauzy (nejstudenější část atmosféry Země) se v období poklesu koncentrace stratosférického ozonu neměnila, kdežto poté se začala mírně ochlazovat okolo 0,75 K/desetiletí. Ochlazování vede k mírnému smršťování mezoféry. Efekt změn koncentrace ozonu na hustotu neutrální atmosféry je dle modelových výpočtů největší až v dolní termosféře u 110 km; okolo 200 km už ale není detekovatelný. Koncentrace vodní páry v různých výškách se chová poněkud odlišně a nevykazuje stabilní trend, ale celkově poněkud roste. Ochlazování a růst koncentrace vodní páry vede k tomu, že v posledních letech i v Česku občas vidíme v létě polární mezoférická oblaka (tzv. stříbřitá oblaka). Oblast mezoféry a mezopauzy je výrazně ovlivňována atmosférickými vlnami a změnami v systému proudění. O jejich trendech víme jen málo, jisté je jen to, že v různých geografických oblastech jsou odlišné až i opačné.

Nad mezosférou se nachází termosféra (výšky okolo 90–500 km). Modelové výpočty ukazují očekávané ochlazování termosféry, dostatečně dlouhá měření neutrální teploty chybí. Měření iontové teploty, která by měla být pod 300 km zhruba stejná jako neutrální teplota, vykazují 2,5–3krát větší trend než neutrální teplota. Naopak ze změn hustot termosféry odvozený trend teploty termosféry obstojně souhlasí s modelovým trendem. Následkem ochlazování dochází k poklesu hustoty termosféry v pevných výškách tempem okolo –2 % za desetiletí, o něco méně níže, o něco více výše. To vede k prodlužování orbitální doby života nebezpečného kosmického „smetí“; srážky s ním již významně poškodily i vyřadily z provozu několik družic, zvláště telekomunikačních.

Ve výškách mezoféry a termosféry je atmosféra částečně ionizována. Tato oblast se nazývá ionosféra a je definována pomocí výškového profilu elektronové hustoty a skládá se z vrstev D (50–90 km), E (90–140 km), F1 (140–210 km) a F2 (210–500 km). V D-vrstvě je dlouhodobý trend elektronové koncentrace v pevných výškách převážně kladný díky vlivu termálního smršťování mezoféry. V E-vrstvě je slabý kladný trend elektronové hustoty v jejím maximu a záporný trend výšky tohoto maxima, podobná situace je i v F1 vrstvě. V elektronové koncentraci je to způsobeno vlivem teploty na chemické reakce, ve výšce tepelným smršťováním horní atmosféry. V F2 vrstvě celkově pozorujeme mírný pokles maximální elektronové koncentrace a pokles výšky maxima F2 vrstvy. Trend v elektronové koncentraci je silnější ve dne a v zimě, v létě v noci může být až lehce opačný. V některých oblastech hraje důležitou roli sekulární změna magnetického pole Země (výrazný posun polohy severního pólu a magnetického rovníku). Ale tento efekt je lokálně kladný i záporný, takže v průměru je zanedbatelný. Trend v celkovém elektronovém obsahu v jednotkovém sloupci má dopad na šíření GNSS/GPS signálů; dle předběžných výsledků je slabě záporný. Ionová teplota, která se měří jen na několika málo observatořích, vykazuje záporný trend, jehož velikost je stále tématem diskuze.

Veškeré dostatečně spolehlivé dlouhodobé trendy souhlasí přinejmenším kvalitativně s očekávaným efektem růstu koncentrace skleníkových plynů, zvláště CO₂. Pod ~150 km je trend

do jisté míry modifikován antropogenními změnami koncentrace stratosférického ozonu, nad ~150 km, zvláště v ionosféře a lokálně, pak sekulárními změnami magnetického pole Země. Dlouhodobě variuje i sluneční aktivita, tu ale při počítání trendů (zvláště v ionosféře) vylučujeme předem z dat.

3. Role ÚFA AVČR

Role Ústavu fyziky atmosféry (ÚFA) AVČR ve výzkumu dlouhodobých trendů v horní atmosféře je významná. Od založení pracovní skupiny IAGA/IAMAS „Dlouhodobé trendy v mezoféře, termosféře a ionosféře“ v r. 1999 byl J. Laštovička jejím předsedou a do r. 2023 místopředsedou. Tato pracovní skupina uspořádala 12 seminářů; J. Laštovička byl vždy předseda nebo místopředseda programového výboru. V r. 2006 mezinárodní tým (Laštovička et al. 2006) vytvořil první scénář dlouhodobých trendů v horní atmosféře. J. Laštovička byl rovněž autorem většiny přehledových článků z této problematiky. Tým ÚFA se podílel na studiu dlouhodobých změn vlnové aktivity v dolní ionosféře a mezoféře. Rovněž se zabýval dlouhodobými trendy ve všech oblastech ionosféry. Z nedávno dosažených výsledků lze uvést nalezení mírně záporného trendu v celkovém obsahu elektronů v jednotkovém sloupci. Ukázali jsme dále, že trend v maximu elektronové koncentrace závisí na použitém indexu sluneční aktivity a že pro střední šířky je správným indexem F30, ne převážně používané indexy F10.7 a relativní číslo slunečních skvrn (Laštovička 2024). To vysvětluje rozporné výsledky autorů některých dřívějších studií. Další naše výsledky lze nalézt v přehledových pracích Laštovičky et al. (2012) a Laštovičky (2023).

Literatura:

- AIKIN, A. C., CHANIN, M. L., NASH, J., KENDIG, D. J., 1991. Temperature trends in the lower mesosphere. *Geophysical Research Letters*, roč. **18**, s. 416–419.
- LAŠTOVIČKA, J., 2023. Progress in investigating long-term trends in the mesosphere, thermosphere, and ionosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **23**, s. 5783–5800. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-23-5783-2023>.
- LAŠTOVIČKA, J., 2024. Dependence of long-term trends in foF2 at middle latitudes on different solar activity proxies. *Advances in Space Research*, roč. **73**, s. 685–689. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.047>.
- LAŠTOVIČKA, J., AKMAEV, R. A., BEIG, G., BREMER, J., EMMERT, J. T., 2006. Global change in the upper atmosphere. *Science*, roč. **314**, 5803, s. 1253–1254.
- LAŠTOVIČKA, J., SOLOMON, S. C., QIAN, L., 2012. Trends in the neutral and ionized upper atmosphere. *Space Science Reviews*, roč. **168**, s. 113–145. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9799-3>.
- REZAC, L., YUE, J., YONGXIAO, J., RUSSELL, J. M., III, GARCIA, R., LOPEZ-PUERTAS, M., MLYNCZAK, M. G., 2018. On long-term SABER CO₂ trends and effects due to non-uniform space and time sampling. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, roč. **123**, s. 7958–1967. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2018JA025892>.
- ROBLE, R. G., DICKINSON, R. E., 1989. How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and lower thermosphere? *Geophysical Research Letters*, roč. **16**, s. 1441–1444.

Recenzenti (Reviewers):

Ing. Eva Krtková, Ph.D., Ing. Jitka Slámová, Ph.D.,
Ing. Zuzana Rošková