

Vertikální vazby v atmosféře-ionosféře

Petra Koucká Knížová

Ústav fyziky atmosféry, Akademie věd České republiky
Boční II/1401, 141 31 Praha 4

Abstrakt:

Zemská atmosféra je velmi komplikovaný systém. S rostoucí výškou (nad ~ 50 km) roste vliv ionizovaných částic. Ionizované částice vznikají především vlivem pronikajícího ultrafialového záření (UV a EUV). Ve výšce mezoféry a termosféry koexistují neutrální a ionizované částice, formují tzv. ionosféru. Stav zemské atmosféry a ionosféry je ovlivňován především činností Slunce a geomagnetickou aktivitou. Vzhledem ke stupni ionizace (< 0.01) je stav neutrální atmosféry v nižších výškách velmi významný. Dolní atmosféra je významným zdrojem širokého spektra vlnových oscilací, které se za určitých podmínek šíří až do termosféry. V systému atmosféra-ionosféra hrají důležitou úlohu, kromě zmíněných dynamických procesů, nelineární chemické, elektrodynamické a radiační procesy.

The Earth atmosphere is a very complicated system. The importance of the ionized particles increases with the increasing height (above ~ 50 km). Increasing amount of ionization, primarily by solar ultraviolet (UV) and extreme ultraviolet (EUV) radiation, forms the partially ionized plasma environment of the atmosphere, the ionosphere, where neutral and ionized particles coexist together. State of the Earth's atmosphere is influenced mainly by the solar and geomagnetic activity. Due to the ionization degree (< 0.01) the impact of the neutral atmosphere cannot be simply neglected. Lower atmosphere is an important source of the broad spectrum of wave-like oscillations that could penetrate up to the height of thermosphere. The atmosphere-ionosphere system includes various atmospheric and ionospheric layers that are governed by a variety of complex nonlinear chemical, dynamical, electrodynamic, and radiative processes.

Zemská atmosféra představuje velice komplikovaný systém vzájemně provázaný i na velmi velké vzdálenosti. Významnou oblast zemské atmosféry představuje ionosféra, kde současně existují jak neutrální částice, atomy a molekuly, tak i ionty. Ionosféru formuje dopadající sluneční záření, které je absorbováno neutrálními částicemi za vzniku kladného a záporného iontu. Ionosféra představuje atmosférické plazma. V oblasti maxima vrstvy F, kde se za normálních podmínek nachází oblast nejvyšší elektronové koncentrace, dosahuje poměr ionizovaných a neutrálních částic maximální hodnoty 1%. Je tedy zřejmé, že chování neutrální složky plazmatu hraje podstatnou roli. Stav ionosféry je ovlivňován jak shora sluneční a magnetickou aktivitou, tak i z nižších vrstev atmosféry. Změny v ionosféře jsou pozorovatelné v širokém spektru period, od velmi krátkých souvisejících především s událostmi slunečního původu a pozorovaných jako bouře až po sekulární variace ve změnách sluneční aktivity. Odezva v zemské atmosféře může být detekovatelná třeba jen v polárních oblastech případně může zasáhnout v celou geosféru (Georgieva et al., 2006).

Sluneční záření je absorbováno částečně během průchodu atmosférou až k povrchu Země. K absorpci záření dochází velmi nerovnoměrně a to jak z hlediska výšky (nebo hloubky průniku) tak i z hlediska spektrálních složek. Velká část spektra slunečního záření je „využita“ k ionizaci horních vrstev atmosféry a tedy formaci ionosférických vrstev. Významnou oblastí absorpce je i stratosféra, kde vzniká ozonová vrstva. Část záření proniká až k zemskému povrchu. Asi 30 procent původního záření je odraženo nazpět. Nerovnoměrná depozice slunečního záření v atmosféře je příčinou pohybu atmosféry. Velká část vlnových oscilací má svůj původ v nerovnoměrném ohřevu dolní vrstvy atmosféry a zemského povrchu.

Při analýze vertikálních vztahů mezi jednotlivými oblastmi atmosféry se ukazuje, že nejdůležitějším zprostředkovatelem vazby mezi jednotlivými oblastmi jsou šířící se atmosférické vlny. Atmosférické vlny s amplitudami, které lze sotva detekovat v troposféře, nabývají svého významu ve vyšších vrstvách díky přibližně exponenciálnímu poklesu koncentrace částic, které vede v nárůstu amplitudy vlny. Významnou skupinou atmosférických vln jsou solární přílivy a planetární vlny vznikají vlivem pravidelného ohřevu a ochlazování jednotlivých složek atmosféry a zemského povrchu vlivem 24h rotace. Kromě atmosférických vln slunečního původu, se v dolní atmosféře formují vlny vznikající při erupcích, přírodních nebo vyvolaných lidskou aktivitou, proudění přes povrchové struktury, při pohybu velkých meteorologických systému apod., které lze pozorovat v širokém spektru period od infrazvuků přes gravitační, přílivové, planetární a delší. Troposféra představuje nejdůležitější oblast, ze které se vlnové oscilace šíří do vyšších vrstev atmosféry. Za nejdůležitější zdroje atmosférických vln, hlavně gravitačních, je považována konvekce a stříh větru (Fritts and Nastrom, 1992) a vzestupné proudění „jet stream“ (Fritts and Luo, 1992). Atmosférické vlny mohou výrazně ovlivňovat stav

ionosféry, pokud jí dosáhnou. Podmínky šíření atmosférických vln závisí na sluneční aktivitě a mění se se změnou intenzity slunečního záření. (Forbes, et al., 2000; Laštovička, 2006; Yigit et al., 2016). Neutrální atmosférické vlny v zemské atmosféře hrají významnou roli v celkové energetické bilanci atmosféry.

Výsledná proměnlivost ionosféry-neutrální atmosféry je tedy dána jako výsledek vzájemného působení vstupujícího slunečního záření, poruch magnetického pole, elektrických polí a také atmosférických vln šířících se ze vzdálených oblastí atmosféry. V dolní části ionosféry je pozorovaný vliv atmosférických vln výraznější než ve vyšších výškách. Důvodem je vyšší hustota neutrálních částic a tedy i vyšší četnost srážek. Díky tomu jsou ionizované částice nuceny neutrálními částicemi, respektujícími pohyby neutrálního větru, i k pohybu napříč magnetickým polem. Mluvíme tedy o srážkami řízeném plazmatu. Významným jevem, který vzniká v důsledku pohybu nabitých částic napříč magnetickým polem a zároveň výrazným stříhem neutrálního větru je formace tzv. sporadické vrstvy Es. Jedná se o velmi specifickou tenkou vrstvu, většinou ve výšce 100 km – 120 km, s vysokou koncentrací iontů. Koncentrace iontů v některých případech převyšuje koncentraci ve vyšší vrstvě F. Sporadická vrstva Es je významným způsobem ovlivňována přílivovými vlnami (24h, 12h a 8h) jak v kritické frekvenci, tak i ve výšce formace vrstvy (Haldoupis et al., 2004; Haldoupis et al., 2006). Chování Es vrstvy je dále modulováno planetárními vlnami (Mošna et al., 2015; Šauli and Bourdillon, 2007).

S rostoucí výškou klesá četnost srážek částic a roste význam magnetického pole na chování atmosférického plazmatu. Vliv atmosférických vln zůstává i ve vyšších výškách nezanedbatelný. Působením neutrálních vln lze např. vysvětlit podstatné změny v denním chodu maximálních koncentrací v jednotlivých vrstvách za stejných geomagnetických podmínek během po sobě následujících dní. Nárůst aktivity gravitačních vln v ionosféře byl pozorován po přechodu rozsáhlých meteorologických systémů (např. Boška and Šauli, 2001; Dhaka et al., 2003; Vadas and Fritts, 2006). Důležitou roli hrají nejen primárně generované vlny na rozhraních meteorologických hmot, ale také sekundární vlny buzené ve vyšších výškách rozpadem atmosférických vln v blízkosti jejich kritické vrstvy dané okamžitými podmínkami v atmosféře. Atmosférické vlny se významně uplatňují také při formaci náhlého stratosférického ohřevu (Pogoreltsev et al., 2015) ve střední atmosféře. Následné vlnové oscilace se dále šíří do ionosféry (Pancheva and Mukhtarov, 2011; Shpynev et al., 2015).

Přestože je chování atmosférického plazmatu řízeno především sluneční a geomagnetickou aktivitou, nelze zanedbat vliv vzdálených částí zemské atmosféry. Vazbu mezi vzdálenými oblastmi zprostředkovávají především atmosférické vlny. Velmi významnou roli ve stavu ionosféry hrají vlny troposférického původu.

Poděkování: Tato práce byla podpořena projektem č. 15-24688S Grantové agentury České republiky.

Literatura:

- Boska, J., Šauli, P., 2001. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere. *Phys. Chem. EarthC – Sol.-Terr.Planet. Sci.* 26(6), 425–428.
- Dhaka, S.K., Takahashi, M., Shibagaki, Y., Yamanaka, M.D., Fukao, S., 2003. Gravity wave generation in the lower stratosphere due to passage of the typhoon 9426 (Orchid) observed by the MU radar at Shigaraki (34.85_N,136.10_E). *J.Geophys. Res.* 108(D19), 4595. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JD003489>.
- Forbes, J.M., Palo, S.E., Zhang, X., 2000. Variability of the ionosphere. *J.Atmos.Sol.- Terr.Phys.* 62, 685–693.
- Fritts, D.C., Luo, Z., 1992. Gravity wave excitation by geostrophic adjustment of the jet stream. Part I: Two-dimensional forcing. *J. Atmos. Sci.* 49, 681–697.
- Fritts, D.C., Nastrom, G.D., 1992. Sources of mesoscale variability of gravity waves, II, frontal, convective and jet stream excitation. *J. Atmos. Sci.* 49, 111–127.
- Georgieva, K., Kirov, B., Gavruseva, E., 2006. Geoeffectiveness of different solar drivers, and long term variations of the correlation between sunspot and geomagnetic activity. *Physics and Chemistry of the Earth* 31 (1–3), 81–87.
- Haldoupis, C., Pancheva, D., Michell, N.J., 2004. A study of tidal and planetary wave periodicities present in midlatitude sporadic E layers. *Journal of Geophysical Research* 109 Art. No. A02302.
- Haldoupis, C., Meek, C., Christakis, N., Pancheva, Bourdillon, A., 2006. Ionogram height-time-intensity observations of descending sporadic E layers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68, 539–557.
- Laštovička, J., 2006. Forcing of the ionosphere by waves from below. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68, 479–497.
- Mošna, Z., Koucká Knížová, P., Potužníková, K., 2015. Coherent structures in the Es layer and neutral middle atmosphere. *Journal of Atm. and Solar-Terrestrial Phys.*, 136 B, 155-162 ISSN 1364-6826.
- Pancheva, D., Mukhtarov, P., 2011. Stratospheric warmings: the atmosphere–ionosphere coupling paradigm. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 73, 1697–1702.
- Pancheva, D., Mukhtarov, P., 2012. Global response of the ionosphere to atmospheric tides forced from below: recent progress based on satellite measurements. *Space Sci. Rev.* 168, 175–209. <http://dx.doi.org/10.1007/s11207-012-0000-0>
- Pogoreltsev, A., Savenkova, E., Aniskina, O., Ermakova, T., Chen, W., Wei, K., 2015. Interannual and intraseasonal variability of stratospheric dynamics and stratosphere–troposphere coupling during northern winter. *J.Atmos.Sol.-Terr. Phys.* 136 (PartB), 187–200. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.008>.

Shpynev, B., Churilov, S., Chernigovskaya, M., 2015. Generation of waves by jet- stream instabilities in winter polar stratosphere/mesosphere. *Journal of Atm. and Solar-Terrestrial Phys.*, 136(PartB), 201–215.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.005>.

Šauli, Bourdillon, 2008. Height and critical frequency variations of the sporadic-E layer at midlatitudes. *Journal of Atm. and Solar-Terrestrial Phys.*, 70 (15), 1904-1910, doi:10.1016/j.jastp.2008.03.016, 2008.

Yiğit, E., Koucká Knížová, P., Georgieva, K., Ward, W., 2016. A review of vertical coupling in the Atmosphere–Ionosphere system: Effects of waves, sudden stratospheric warmings, space weather, and of solar activity., *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 141, 1-12.