

Vliv troposférických situací mezosynoptického měřítka na dynamiku a variabilitu ionosféry

Influence of mesoscale tropospheric situations on ionospheric dynamics and variability

Kateřina Potužníková

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení meteorologie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4
✉ kaca@ufa.cas.cz

Petra Koucká Knížová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení ionosféry a aeronomie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

Jaroslav Chum

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
oddělení ionosféry a aeronomie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4

The connection between distant regions of the atmosphere has been confirmed by many theoretical and experimental studies. In this paper we focus mainly on the influence of the troposphere on the ionospheric plasma in the upper atmosphere. We discuss the possible effects of cold fronts and tropospheric convective storms and their influence on the upper atmosphere down to the ionospheric plasma. The state of the ionosphere is monitored using the DPS 4D digisonde and CDS Doppler sounding instrument. During extreme meteorological events, we have identified various perturbations on ionograms and CDS spectrograms, especially in the ionospheric F-layer.

KLÍČOVÁ SLOVA: fronta atmosférická – bouře konvektivní – vlny akusticko-gravitační – vazby vertikální atmosférické – vrstva F ionosférická

KEYWORDS: atmospheric front – convective storm – acoustic-gravity wave – vertical coupling in the atmosphere – ionospheric F layer

1. Úvod

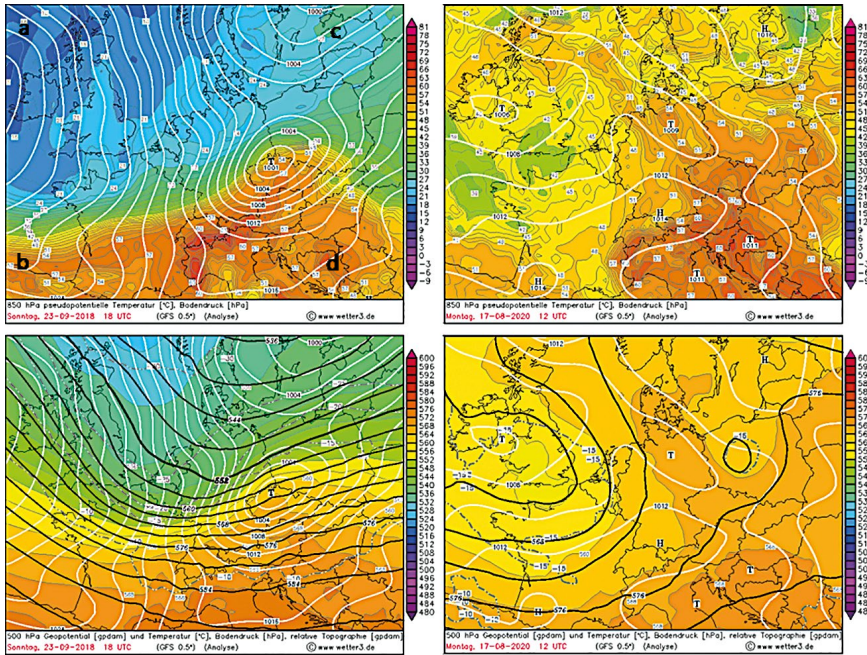
Zemská atmosféra představuje komplikovaný dynamický systém, jehož energetická bilance závisí primárně na slunečním záření. V různých oblastech atmosféry se uplatňují odlišné mechanismy a hrají roli jiné složky slunečního záření. Troposféra získává energii přenosem tepla od zemského povrchu (turbulentním prouděním, vyzařováním zemského povrchu/absorpcí dlouhovlnného záření atmosféry, uvolňováním latentního tepla), ionosféra vzniká pohlčováním krátkovlnné složky vstupujícího slunečního záření. Při analýze vertikálních vztahů mezi

jednotlivými vrstvami atmosféry se ukazuje, že nejdůležitějším zprostředkovatelem vazby jsou atmosférické vlny. Atmosféra podporuje šíření široké škály akusticko-gravitačních vln, které zajišťují přenos hybnosti a energie i na velmi velké vzdálenosti napříč atmosférou (Koucká Knížová et al. 2016).

Ionosféra představuje přechodovou zónu mezi plně ionizovanou magnetosférou (nad přibližně 1 000 km) a neutrální atmosférou (dolní hranice je ve dne obvykle pod 70 km, výjimečně až pod 50 km, v noci pod 130 km.) Je tvořena atmosférickým plazmatem, složeným jak z neutrálních částic, tak z iontů a volných elektronů. Za normálních podmínek je možné podle výškového průběhu elektronové koncentrace rozčlenit ionosféru do několika vrstev označovaných jako C, D, E a F. Navíc se může vytvořit i oblast zvýšené koncentrace kovových iontů uvnitř vrstvy E (označovaná jako Es vrstva) a to zejména v létě. Vrstva C se objevuje výjimečně a její měření není jednoduché. Vrstvy D, E během noci zanikají rekombinací (přímou reakcí kladných a záporných iontů). Pouze v nejvyšší vrstvě F složené z lehkých atomárních iontů, dochází k pomalé dvoustupňové rekombinaci, a proto během noci nestihne zcela vyhasnout. Stupeň ionizace v ionosféře je relativně nízký, v oblasti maxima ve vrstvě F ve výšce kolem 300 km dosahuje podíl ionizovaných částic maximální hodnoty 1 %. Je tedy zřejmé, že chování ionosféry je z podstatné části určováno neutrální složkou, kterou například mechanicky ovlivňují vlny přicházející z nižších oblastí atmosféry.

Troposféra je neustálým zdrojem vln se širokým spektrem vlnových délek, z nichž většina má i vertikální složku šíření energie. Podmínky šíření vln v atmosféře se řídí disperzní rovnicí pro akusticko-gravitační vlny (např. Mošna, Koucká Knížová 2012). Podmínky průchodu akusticko-gravitačních vln závisí na lokálních dynamických podmínkách atmosféry a jsou silně ovlivněny prostředím, v kterém se šíří, zejména vertikálním profilem proudění (Koucká Knížová et al. 2023). K filtraci vln (disipaci nebo refrakci) dochází zejména v mezoféře, vzhledem ke značné rychlosti a proměnlivosti horizontálního proudění. I vlny s relativně nízkými amplitudami v troposféře nabývají svého významu ve vyšších vrstvách vzhledem k přibližně exponenciálnímu poklesu hustoty atmosféry s výškou a odpovídajícímu nárůstu jejich amplitudy. Proto jsme relativně často schopni zaznamenat projevy troposférických událostí v ionosférickém plazmatu i přesto, že je část vln filtrována ve střední atmosféře.

V ústavu fyziky atmosféry se věnujeme vlivu troposféry na ionosféru poměrně dlouho (Boška, Šauli 2001; Šauli, Boška 2001; Sindelarova et al. 2009; Koucká Knížová et al. 2015). Přehled dosavadních poznatků vlivu spodní atmosféry na ionosféru středních zeměpisných šířek jsme shrnuli v rešerši

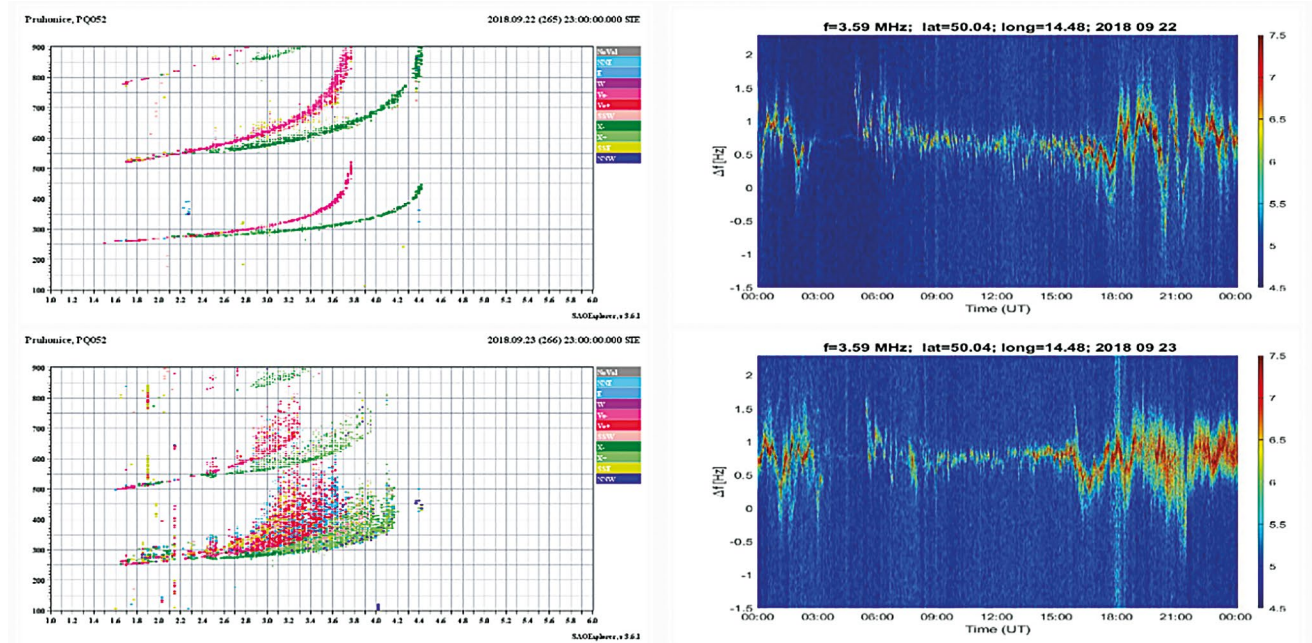


Obr. 1 (a, c) Analýza adiabatické ekvivalentní potenciální teploty v hladině 850 hPa (°C, barevně) a přízemního tlakového pole přepočteného na hladinu moře (hPa, bílé izobary). (b,d) Analýza výšky hladiny 500 hPa (geopotenciální dekametry, černě), teploty v 500 hPa (°C, šedé izotermy), relativní topografie 500/1 000 hPa (geopotenciální dekametry, barevně) a přízemního tlakového pole (hPa, bílé izobary). Dle modelu GFS, zdroj www.wetter3.de. Levé panely odpovídají situaci ze dne 23. 9. 2018 18:00 UTC, pravé panely ze 17. 8. 2020 12:00 UTC.

Fig. 1. (a, c) GSF model analysis of 850 hPa pseudo-equivalent potential temperature in °C, (in colour) and sea level pressure in hPa (white isobars). (b, d) Analysis of 500 hPa level in gpm (black), 500 hPa temperature in °C (gray dashed lines), sea level pressure in hPa (white isobars), and relative topography 500–1 000 hPa (in colour). Left panels are for 23 Sep 2018 18:00 UTC, right panels are for 17 Aug 2020 12:00 UTC, provided by www.wetter3.de.

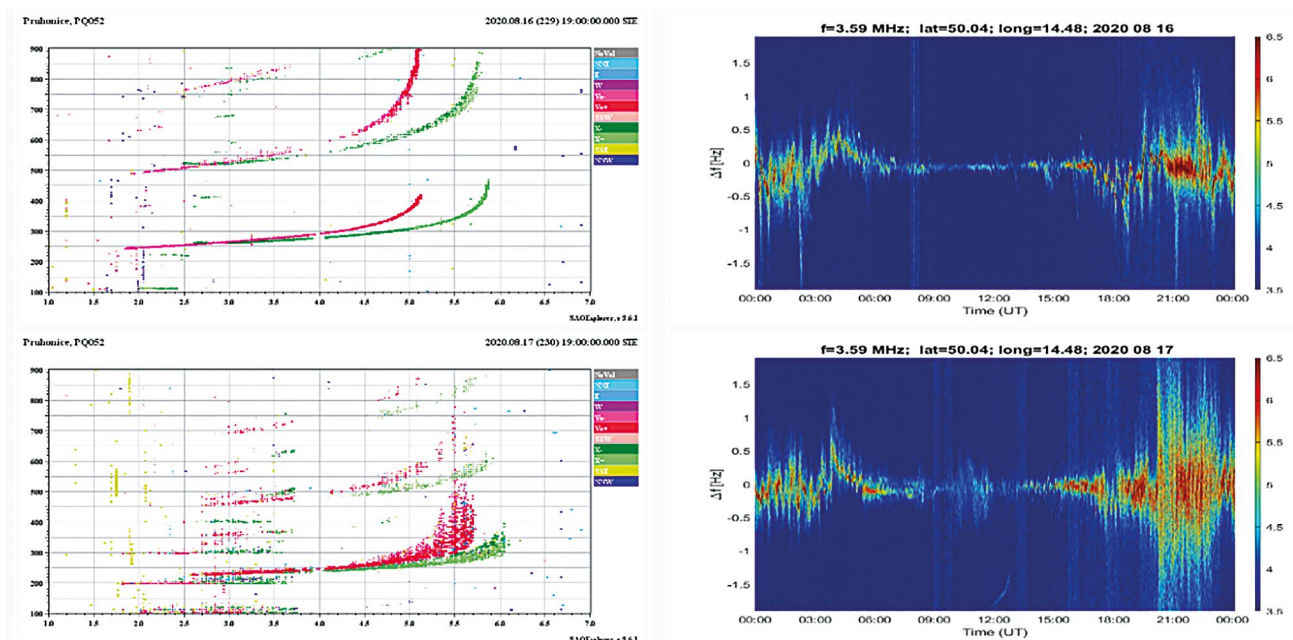
studii (Koucká Knížová et al. 2021). V poslední době se v experimentálním výzkumu zaměřujeme zejména na období teplé poloviny roku spojené se zdrojem troposférických gravitačních vln v podobě silných konvektivních bouří, ale také s podstatně komplikovanější strukturou i dynamikou ionosféry, což je jeden z důvodů, proč jsou vzájemné vazby mezi letní ionosférou a troposférou zatím málo prozkoumané (Koucká Knížová et al. 2020; Koucká Knížová et al. 2023; Potužníková et al. 2023).

Tato práce stručně představuje poruchy v ionosférickém plazmatu ve vrstvě F detekované ionosondou a dopplerovským systémem v souvislosti se dvěma různými troposférickými událostmi – s přechodem výrazné studené fronty a s letními bouřkami v tropické vzduchové hmotě.



Obr. 2 Panely v levém sloupci ukazují ionogramy z digisondy DPS 4D v Průhonicích v 23:00 UTC dne 22. 9., resp. 23. 9. 2018 – krátce po přechodu frontální cyklony Fabienne. Červenou a zelenou barvou jsou označeny stopy odrazu řádných a mimořádných módů. Ostatní barvy označují mimo-vertikální echa registrovaná anténním polem. Panely v pravém sloupci ukazují spektra spojitěho dopplerovského sondování naměřená během 22. 9. a 23. 9. 2018.

Fig. 2. The panels in the left column show the ionograms recorded by DPS 4D digisonde in Průhonice. Red colour and green colour denote ordinary and extraordinary reflection traces. The other colours denote off-vertical echoes registered by the antenna field. The panels in the right column show the Continuous Doppler Sounder spectra from 22 and 23 September 2018.



Obr. 3 Jako obr. 2 pro případ konvektivních bouří ve večerních hodinách 17. 8. 2020. Ionogramy odpovídají 19:00 UTC 16. 8. 2020, resp. 17. 8. 2020. Záznam 24hodinového dopplerovského měření je z 16. 8., resp. z 17. 8. 2020.

Fig. 3. Same as Fig. 2 for convective tropospheric storm observed on 17 August 2020. Left panels show the ionograms and the right panels stand for the Continuous Doppler Soundings recorded on 16 and 17 August 2020 at 19:00 UTC.

2. Popis troposférických událostí

Rozbor synoptické situace spojené s rychle se pohybující frontální cyklonou „Fabienne“ a měření z přízemní meteorologické stanice Praha-Spořilov jsou uvedeny v příspěvku (Potužníková et al. 2023), resp. v článku (Koucká Knížová et al. 2020). Extrémní intenzitě studené fronty, která přešla přes území ČR 23. září 2018 ve večerních hodinách, odpovídá gradient adiabatické ekvivalentní potenciální teploty θ_{ep} ve spodní troposféře (obr. 1a). V úzké oblasti frontálního rozhraní mezi dvěma vzduchovými hmotami s velmi rozdílnou teplotou a vlhkostí docházelo k prudké turbulenci a ke vzniku vln, které se šířily do vyšších vrstev atmosféry. Rychlý přesun cyklony v jihozápadním řídícím proudění a následné výrazné ochlazení je patrné i na výškové mapě střední troposféry (obr. 1b).

Druhým příkladem meteorologické situace, jejíž odezvu jsme zaznamenali v ionosféře, byl mezoměřítkový konvektivní systém uvnitř tropické vzduchové hmoty před studenou frontou. Dne 17. 8. 2020 se první silné bouře objevily na západě Čech v 16:00 UTC, nad Prahu se silné bouře s příchodovými dešti přesunuly okolo 18:00 UTC. Tato letní bouřková situace byla charakteristická nevýrazným přízemním tlakovým polem a extrémní hodnotou θ_{ep} v hladině 850 hPa vypovídající o vysoké labilitě vzduchové hmoty (obr. 1c). Ve střední troposféře se během předcházejícího dne přes ČR přesouvala od jihozápadu výšková tlaková níže s uzavřenou oblastí studeného vzduchu. Výšková brázda s ní spojená podporovala výstupné pohyby vzduchu (obr. 1d). Gravitační vlny generované přestřelujícími vrcholky konvektivních bouří jsou pravděpodobnou příčinou poruch, které jsme se zpožděním několika minut až několika desítek minut zaznamenali v ionosférické F vrstvě.

3. Měření v ionosféře

Ke studiu chování ionosféry využíváme radarové techniky založené na odrazu rádiové vlny od plazmatu. V levé části obr. 2 je záznam z měření digisondu, což je vertikálně orientovaný radar s proměnnou sondovací frekvencí, který je umístěn na observatoři ÚFA v Průhonicích. Na horním panelu je odraz od neporušené/klidné vrstvy F před průchodem frontální cyklony Fabienne. Zdanlivá výška (výška při průchodu sondovací vlny vakuem) je pomocí programu Artist/NHPC invertována na reálnou výšku odrazu. Odraz nastává při frekvencích nižších, než je vlastní frekvence plazmatu v daném místě. Na spodním panelu je ukázka tzv. spread-F echa, který se vytvořil odrazem od zvlněné či jinak porušené vrstvy. Deformaci pravděpodobně způsobují procházející gravitační vlny s různou vlnovou délkou. V pravé části obr. 2 je záznam kontinuálního Dopplerova měření na frekvenci 3,5 MHz. Na horním panelu je večer 22. 9. před příchodem studené fronty v troposféře vidět úzké spektrum s oscilacemi v pásmu gravitačních vln. Na spodním panelu je 23. 9. kolem 18:00 UTC širokofrekvenční šum způsobený bleskovými výboji v blízkosti přijímače. Se zpožděním přibližně dvou hodin až do půlnoci je vidět široká stopa vypovídající o rozbití/zvlnění odrazové vrstvy plazmatu průchodem vln přicházejících zdola.

Změny v ionosféře vyvolané mohutnou konvekci jsou viditelné jak na ionogramech, tak i na záznamu spekter Dopplerova měření. V horní části obr. 3 vidíme záznam klidné regulárně stratifikované ionosféry jeden den před událostí, kdy docházelo k odrazu sondovacích rádiových vln od ploch se stejnou hustotou plazmatu. V souvislosti s výskytem mezoměřítkového systému konvektivních bouří se na spodním ionogramu objevuje spread-F echo, z něhož nelze s jistotou určit vlastní frekvenci plazmatu ani přesnou výšku v místě odrazu sondovací rádiové vlny. „Viditelnost“ F vrstvy je zároveň snížena

přítomností sporadické vrstvy Es zhruba ve výšce 100 km, jejíž odraz je rovněž slabě rozostřen. Mimořádně silný šum se objevuje na dopplerovském signálu (pravý spodní panel) zhruba od 20:00 UTC.

Oba případy jsou detailněji diskutovány ve výše zmíněných pracích a zde jsou uvedeny dva ilustrativní příklady pozorování odezvy v ionosférickém plazmatu. Vzhledem ke klidným geomagnetickým a slunečním podmínkám přičítáme pozorované poruchy ionosféry v obou případech průchodu gravitačních vln troposférického původu.

4. Závěr

Přestože je chování atmosférického plazmatu řízeno především sluneční a geomagnetickou aktivitou, nelze zanedbat vliv vzdálených oblastí atmosféry, a to jak ve vertikálním, tak i horizontálním smyslu. Vzájemné vazby mezi vzdálenými oblastmi zprostředkovávají zejména atmosférické vlny. Velmi významnou roli ve stavu ionosféry hrají vlny troposférického původu, jejichž studiem se v Ústavu fyziky atmosféry dlouhodobě zabýváme. V poslední době se zaměřujeme především na vliv gravitačních vln generovaných silnou konvekcí. Dvě popsání troposférické situace vyvolaly kvalitativně podobnou odezvu v ionosféře. Došlo k porušení profilu elektronové koncentrace vlivem vzhůru postupujících vln. Zaznamenali jsme výrazný nárůst pohybu odrazných ploch se stejnou hustotou plazmatu (Doppler shifts) a zvlnění ploch odrazu sondovacích frekvencí (spread-F echo) – viz obr. 2 a 3, to znamená významnou změnu tvaru a pohybu profilu elektronové koncentrace a dále střih horizontálních pohybů plazmatu a odchylky ve stratifikaci profilu (např. vznik cusp) – viz (Koucká et al. 2020). Ionosféra je velmi komplikovaný systém a její odezva na troposférické události závisí na její historii jak v krátkodobých škálách (např. hodinových v případech předcházející geomagnetické poruchy), tak v dlouhodobých souvisejících s fází slunečního cyklu. Podmínky šíření gravitačních vln závisí na okamžitém stavu atmosféry podél celé dráhy paprsku. Pro přesnější kvalitativní i kvantitativní vyhodnocení troposféricko-ionosférických vazeb se proto snažíme zapojit měření z více vrstev atmosféry. Z našeho pohledu je zajímavé, že se i meteorologické události relativně malých časových i prostorových rozměrů mohou na řádově delší dobu (až několik dní) otisknout ve stovky kilometrů vzdáleném ionosférickém plazmatu.

Literatura:

- BOŠKA, J., ŠAULI, P., 2001. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-Region. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C*, Vol. **26**, s. 425–428. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(01\)00024-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(01)00024-1).
- KOUČKÁ KNÍŽOVÁ, P., MOŠNA, Z., KOUBA, D., POTUŽNÍKOVÁ, K., BOŠKA, J., 2015. Influence of meteorological systems on the ionosphere over Europe. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **136**, s. 244–250. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.07.017>.
- KOUČKÁ KNÍŽOVÁ, P., PODOLSKÁ, K., POTUŽNÍKOVÁ, K., KOUBA, D., MOŠNA, Z., BOŠKA, J. et al., 2020. Evidence of vertical coupling: meteorological storm Fabienne on 23 September 2018 and its related effects observed up to the ionosphere. *Annales Geophysicae*, Vol. **38**, s. 73–93. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/angeo-38-73-2020>.
- KOUČKÁ KNÍŽOVÁ, P., LAŠTOVIČKA, J., KOUBA, D., MOŠNA, Z., PODOLSKÁ, K., POTUŽNÍKOVÁ, K. et al., 2021. Ionosphere influenced from lower-lying atmospheric regions. *Frontiers in Astronomy*

and Space Sciences, Vol. **8**, s. 1–29. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.651445>.

- KOUČKÁ KNÍŽOVÁ, P., MOŠNA, Z., POTUŽNÍKOVÁ, K., MOŠNA, Z., BOŠKA, J., KOUBA, D., 2016. Vliv dolní atmosféry na ionosféru. Bulletin „Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí“ příspěvky přednesené na konferenci v Úpici ve dnech 19.–21. 5. 2015, s. 69–75, ISBN 978-80-86303-44-4.
- KOUČKÁ KNÍŽOVÁ, P., POTUŽNÍKOVÁ, K., PODOLSKÁ, K., HANNA-WALD, P., MOŠNA, Z. et al., 2023. Multi-instrumental observation of mesoscale tropospheric systems in July 2021 with a potential impact on ionospheric variability in midlatitudes. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, Vol. **10**, No. 1197157. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1197157>.
- MOŠNA, Z., KOUČKÁ KNÍŽOVÁ, P., 2012. Analysis of wave-like oscillations in parameters of sporadic E layer and neutral atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **90–91**, s. 172–178. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.04.007>.
- POTUŽNÍKOVÁ, K., KOUČKÁ KNÍŽOVÁ, P., CHUM, J., PODOLSKÁ, K., KOUBA, D. et al., 2023. Summer tropospheric mesoscale situations with impact on the ionospheric plasma. Proceedings of the Fifteenth Workshop „Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere“, s. 80–89, ISSN 2367-7570.
- ŠAULI, P., BOŠKA, J., 2001. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. **63**, s. 945–950. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00205-4).
- SINDELAROVA, T., BURESOVA, D., CHUM, J., HRUSKA, F., 2009. Doppler observations of infrasonic waves of meteorological origin at ionospheric heights. *Advances in Space Research*, Vol. **43**, s. 1644–1651, Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.08.022>.

Lektoři (Reviewers):

prof. RNDr. Petr Pišoft, Ph.D., doc. Mgr. Michal Žák, Ph.D.