

Vliv dolní atmosféry na ionosféru

Petra Koucká Knížová, Zbyšek Mošna, Kateřina Potužníková, Josef Boška, Daniel Kouba
Ústav fyziky atmosféry AVČR
Boční II/140, 141031, Praha 4 – Spořilov
pkn@ufa.cas.cz

Abstract

Ionosphere represents weakly ionized plasma that reflects solar and geomagnetic activity and processes in the neutral atmosphere. Correlation of long time series of the ionospheric plasma critical frequencies, obtained by mean of vertical sounding from European stations, is analysed with respect to latitudinal and longitudinal difference and surface distance of stations. Time series of critical frequencies are highly correlated reflecting the dominant solar influence. Correlation coefficients are high not only for raw data and subtracted mean courses but for fluctuations around mean as well. At the surface distance exceeding 1000 km and/ or about 10 degrees of latitudinal difference between stations, the correlation coefficients of fluctuations decrease rapidly. Such effect is less visible on the latitudinal dependence, where the correlation coefficients decrease with increasing distance with less pronounced threshold. We explain the existence of the 'break point' at 10 degrees in longitude and/or 1000 km by the 'local' influence of the neutral atmosphere and the wave activity. As a possible source of the common influence on scale 1000 km/10 degree we propose tropospheric systems that are known to be an important source of atmospheric waves in a broad period range. Large tropospheric mesoscale systems have typically up to 2000 km in size.

Abstrakt

Ionosféra představuje slabě ionizované plasma, které je ovlivněné jak slunečními a geomagnetickými procesy tak i jevy probíhajícími v neutrální atmosféře. Korelační koeficienty dlouhých časových řad kritických frekvencí měřených na evropských observatořích vertikálního ionosférického sondování dosahují vysokých hodnot. Odrážejí tak dominantní globální vliv sluneční aktivity. Korelační koeficienty dosahují vysokých hodnot nejen pro původní data a pro střední hodnoty ale i pro fluktuační. Korelace časových řad výrazně klesá pro povrchovou vzdálenost stanic přesahující 1000 km a přibližně 10° geografické šířky. Tento efekt není příliš pozorovatelný pro rozdíl geografických délek stanic, pro který korelační koeficient klesá pomaleji. Zlom na křivce korelačních koeficientů vysvětlujeme „lokálním“ vlivem neutrální atmosféry a vlnové aktivity. Pravděpodobným společným zdrojem vlnové aktivity na škále 1000 km/10° jsou troposférické systémy. Ty jsou známé jako významný zdroj vlnových procesů ve velmi širokém rozsahu period, které se šíří až do výšky ionosféry. Velké troposférické mesoscale systémy typicky dosahují charakteristických horizontálních rozměrů do 2000 km.

Atmosféra

Zemská atmosféra představuje plynný obal Země. Ve srovnání s poloměrem Země se jedná o tenkou vrstvu sahající až do vzdálenosti okolo 100000 km. Její horní hranice je dána schopností částic překonat gravitační pole Země a uniknout do volného prostoru. Zemská atmosféra není homogenní směs plynu, ale její složení se mění se vzdáleností od zemského povrchu. Dopadající sluneční záření ionizuje neutrální částice atmosféry. Pouze část slunečního záření dosáhne do dolních vrstev atmosféry nebo povrchu Země. Velká část záření je pohlcena ve vyšších vrstvách. V horní části atmosféry, kde je dostatečné množství ionizovaného plynu, mluvíme o atmosférickém plazmatu. Tato oblast se nazývá ionosféra. Z hlediska teplotního zvrstvení neutrální atmosféry se ionosféra nachází ve výšce mezoféry a termosféry.

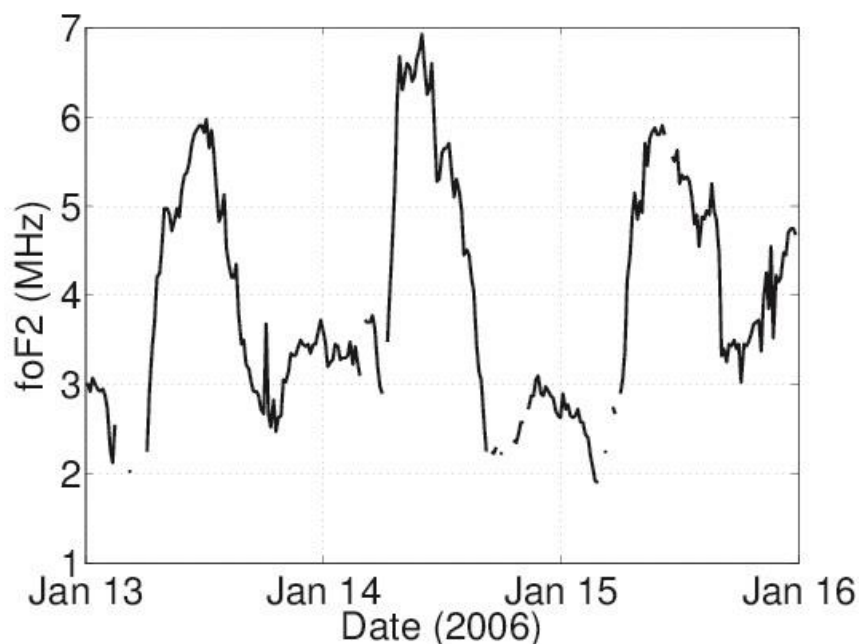
Systém atmosféra-ionosféra představuje velice komplikovaný systém provázaný řadou chemických, dynamických, elektrodynamických a elektromagnetických procesů. Chování tohoto systému je ovlivněno vnějšími procesy, tedy především sluneční a geomagnetickou aktivitou, ale také ději probíhajícími v nižších vrstvách atmosféry. Významnou roli hrají atmosférické vlny generované v dolní atmosféře (Laštovička, 2006). Neutrální částice ovlivňují chování ionizovaných částic a plasma zasahuje do dynamických procesů v neutrální atmosféře. Vzhledem k morfologii atmosféry a geomagnetického pole, závisí vazbové procesy také na geomagnetické šířce. Významnou roli hraje i sluneční a geomagnetická aktivita. Ionosféra je plasma s velmi nízkým stupněm ionizace. Na obrázku 1 je znázorněno členění zemské atmosféry podle teploty, složení,

transportních procesů, gravitační vazby a koncentrace ionizovaných částic. V oblasti maximální koncentrace ionizovaných částic (za normálních podmínek ve vrstvě F) připadá nejvýše jeden iont na sto neutrálních částic. V dolních oblastech ionosféry (vrstva D a E) hrají srážky mezi neutrálními částicemi a ionty zásadní roli. Pohyb ionizovaných částic je řízen pohyby neutrálnů a to i napříč magnetickým polem. S klesající koncentrací neutrálních částic roste vliv magnetického pole na ionosférické plasma.

Zemská atmosféra je prostředí vhodné pro vznik, šíření a rozpad rozsáhlého spektra vln. V reálné atmosféře lze běžně pozorovat vlny (periodické změny) s periodou v řádu sekund (např. na mikrobarografech, nebo sonických anemometrech) až po změny v řádu let. Pro vznik a šíření vln je významná dolní atmosféra. Vlivem zemské rotace dochází k periodickému ohřevu atmosféry a povrchu Země s periodou 24 h a tím vzniku tzv. termálních přílivů. Zemský povrch se zahřívá nerovnoměrně vzhledem k odlišné tepelné kapacitě oceánu a povrchových materiálů pevniny. Vlny v atmosféře s periodami v řádu dnů se nazývají planetární vlny. Planetární vlny jsou dvojího typu 1) migrující vázané na zdánlivý pohyb Slunce a 2) nemigrující vyvolané orografií a odlišným ohřevem oceánu a pevniny. V dolní atmosféře je vznik tzv. gravitačních vln, s periodou od minut do několika hodin vázán na meteorologické systémy a pohyb vzduchových hmot přes orografii. Vlny s kratšími sekundovými až minutovými periodami, tzv. akustické případně infrazvukové, vznikají při zemětřeseních, pohybu lavin, sopečných erupcích, pohybech meteorologických systémů apod. Také jsou často spojeny s lidskou aktivitou.

Výška, km	Meziplanetární prostor				
	100 000				
10 000		Geocorona		Exosféra	Plasmapausa
1000	Termosféra		Effusosféra		Plasmasféra Protonosféra
100	Mesopausa	Heterosféra	Diffusosféra	Exobase	F-vrstva
	Mesosféra	Homopausa	Turbopausa		E-vrstva
	Stratopausa				D-vrstva
10	Stratosféra			Barosféra	
	Tropopausa	Homosféra	Turbosféra		
0	Troposféra				
Parametr	Teplota	Složení	Vertikální Transport	Gravitační vazba	Termální plasma

Obrázek 1. Rozdělení zemské atmosféry do oblastí podle teploty, chemického složení, cirkulace, gravitačního působení a přítomnosti ionizovaných částic tvořících atmosférické plasma. (převzato z P. Šauli, Atmosféra pod vlivem sluneční aktivity, Astropis, 17-20, 2007)



Obrázek 2. Průběh kritické frekvence foF2 v době 13. ledna 00UT – 16. ledna 00UT 2006. Ionogramy jsou naměřeny pomocí sondy DPS 4 (Reinisch et al., 2005) na observatoři Průhonice (49.9° s.š., 14.6° v.d.).

Výraznou proměnlivost ionosféry ze dne na den lze pozorovat např. na záznamech z vertikálního ionosférického sondování. Obrázek 2 ukazuje výraznou změnu průběhu kritické frekvence F vrstvy ionosféry. Během měření byla sluneční a geomagnetická aktivita poměrně nízká ($F_{10.7} = 75\text{-}80$ sfu, $\max(K_p) = 2$). Ionogramy jsou naměřeny pomocí sondy DPS 4 (Reinisch et al., 2005) na observatoři Průhonice (49,9° s.š., 14,6° v.d.).

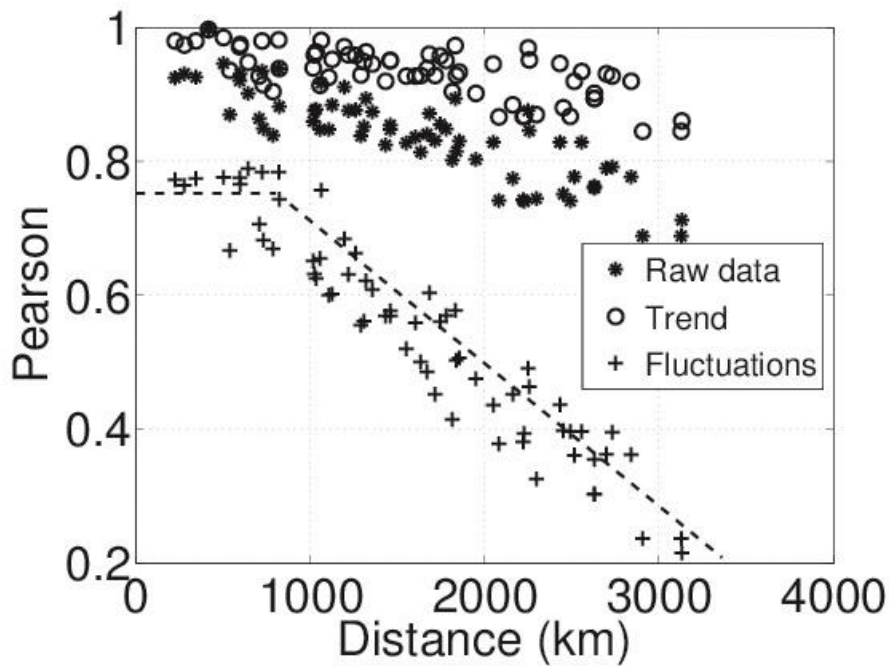
Experimentální práce prokázaly, že atmosférické vlny mohou za vhodných podmínek proniknout až do ionosféry do výšky vrstvy F2 (např. Altadill et al., 2004; Boška and Šauli, 2001; Forbes and Leveroni, 1992; Laštovička and Šauli, 1999; Pancheva et al., 1994; Radicella et al., 2009; Šauli and Boška, 2001; a další). Forbes et al. (2000) předpokládá, že během klidných geomagnetických podmínek je 15-20 % ionosférické variability na škále 2-30 dní způsobeno meteorologickými vlivy. Na kratších škálách 1-2 dnů předpokládá proměnlivost ještě vyšší až 25-35 %. Vysoká proměnlivost ionosféry byla dokumentována v satelitních měřeních během posledního výrazně nízkého slunečního minima mezi 23. a 24. slunečním cyklem (např. Chang et al., 2014; Pancheva and Mukhtarov, 2011; Phanikumar et al., 2014).

Korelace časových řad kritických frekvencí

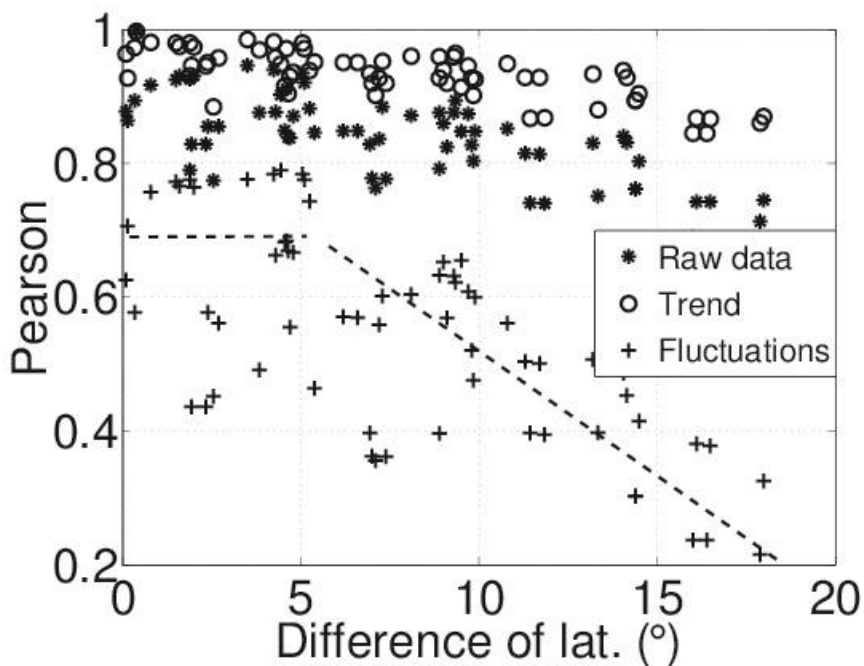
Reprezentativním parametrem stavu ionosféry je kritická frekvence ve vrstvě F2. Kritická frekvence je úměrná elektronové koncentraci v oblasti maxima, udává nejvyšší frekvenci elektromagnetické vlny vertikálně odražené od ionosféry. Jako reprezentativní hodnotu používáme medián hodnot mezi 10-14 UT pro stanice Arkhangels (64,5° s.š., 40,5° v.d.), Dourbes (50,1° s.š., 4,6° v.d.), Kaliningrad (54,7° s.š., 20,6° v.d.), Kiev (50,7° s.š., 30,3° v.d.), Lannion (48,5° s.š., 356,7° v.d.), Leningrad (59,95° s.š., 30,7° v.d.), Lycele (64,6° s.š., 18,8° v.d.), Moscow (55,5° s.š., 37,3° v.d.), Paříž (48,1° s.š., 2,3° v.d.), Poitiers (46,6° s.š., 0,3° v.d.), Průhonice (59,9° s.š., 14,6° v.d.), Řím (41,8° s.š., 12,5° v.d.), Sodankyla (67,3° s.š., 26,6° v.d.), South Uist (57,4° s.š., 7,3° z.d.) a Uppsala (59,8° s.š., 17,6° v.d.).

Pro jednotlivé časové řady je extrahován střední průběh a fluktuaace. Použitý je 64 denní filtr. Pro každou dvojici stanic je pak počítán odhad Pearsonova korelačního koeficientu (Everitt, 2006) pro původní data, střední průběh a fluktuaace. Obrázek 3 ukazuje závislost jednotlivých korelačních koeficientů na povrchové vzdálenosti stanic měření. Korelační koeficienty jsou vysoké pro původní data a střední průběh (trend). Vysoká korelace v těchto dvou případech odráží fakt, že dominantním faktorem působícím na ionosféru je sluneční aktivita. Na všech stanicích je prakticky stejný. Zajímavým výsledkem jsou vysoké korelační koeficienty i u fluktuaací. Krátkodobé fluktuaace jsou vysoce korelované až do vzdálenosti okolo 1000 km mezi analyzovanými stanicemi. Pokud vzdálenost přesáhne 1000 km, korelační koeficient rychle klesá. Obdobným způsobem lze znázornit i závislost korelačního koeficientu na rozdílu geografické šířky a délky. V případě závislosti korelací na rozdílu geografických šířek stanic dostaneme obdobný průběh jako na obrázku 3 s méně výrazným předělem

v okolí 10° (obrázek 4). Charakter závislosti korelačního koeficientu na rozdílu geografických délek stanic je obdobný jako v předchozím případě. Pokles za zlomovým bodem okolo 10° je výrazně pomalejší.



Obrázek 3. Průběh Pearsonova korelačního koeficientu pro časové řady foF2 v závislosti na povrchové vzdálenosti stanic pro původní data, střední průběh a fluktuace.



Obrázek 4. Průběh Pearsonova korelačního koeficientu pro časové řady foF2 v závislosti na rozdílu geografických šířek stanic pro původní data, střední průběh a fluktuace.

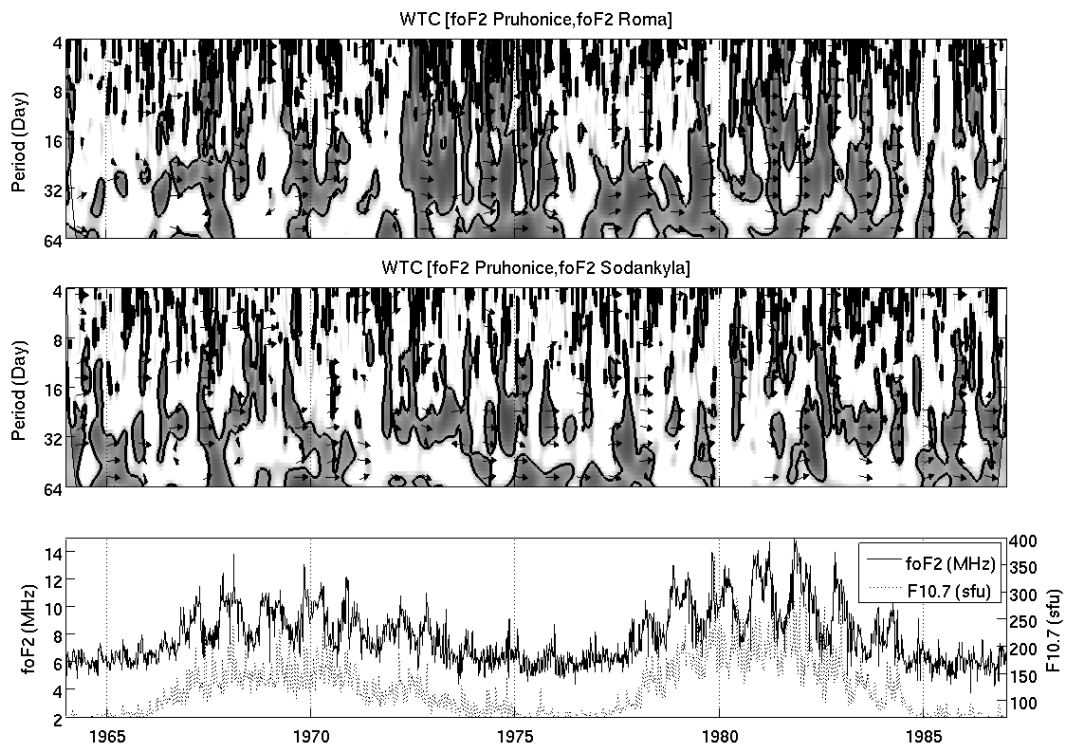
Waveletová koherence časových řad kritických frekvence

Waveletová analýza je vhodná ke studiu nelineárních signálů s mnoha překrývajícími se periodicitami a s dlouhou pamětí (Mallat, 1998). Díky ní je možné signál rozložit na nezávislé komponenty. Waveletová

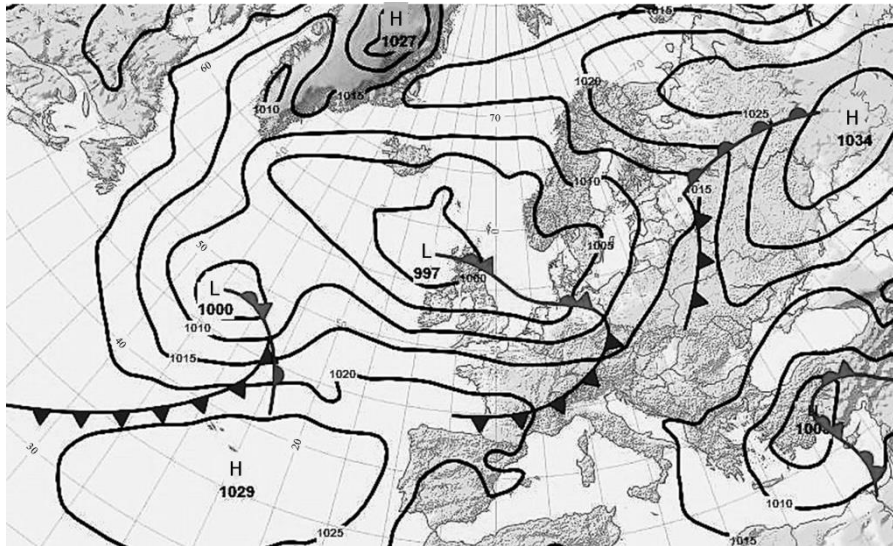
koherence ukazuje, do jaké míry jsou dva signály koherentní na dané časové a frekvenční/periodické škále. Pro velikost waveletové koherence nejsou zásadní výkonová spektra signálů, ale jejich vzájemná souvislost na dané časové škále v daném období. Waveletová koherence může dosáhnout vysokých hodnot i pro nízké hodnoty výkonových spekter původních signálů (Torrence, and Compo, 1998; <http://paos.colorado.edu/research/wavelets>; Grinsted et al, 2004, <http://www.glaciology.net/>).

Obrázek 5 ukazuje waveletovou koherenci počítanou pro stanice Průhonice-Řím (horní panel) a stanice Průhonice-Sodankyla (střední panel) v průběhu let 1964-1985. Stejně jako v předchozím případě jsou použity časové řady kritických frekvencí s jednodenním rozlišením. Dolní panel ukazuje průběh kritické frekvence na stanici Průhonice společně se slunečním tokem F10.7 během dvou slunečních cyklů. Z tohoto panelu je zřejmá podobnost průběhu slunečního toku a kritické frekvence v F2 vrstvě. S rostoucím tokem v obdobích slunečního maxima roste i kritická frekvence F2 v ionosféře.

Waveletová koherence signálů foF2 je velmi proměnlivá jak z hlediska období tak i dané škály/periody procesu. Spektra waveletové koherence pro různé dvojice stanic se vzájemně liší. Povrchová vzdálenost stanic Průhonice a Řím je 920 km, vzdálenost stanic Průhonice a Sodankyla je 2050 km. Koherence signálů je vyšší pro stanice Průhonice a Řím v průběhu obou slunečních cyklů. Zejména v období slunečního minima v letech 1974-1978 je vzájemná koherence signálů výrazně vyšší na všech škálách period. Vlnové oscilace ve spektru odpovídají spektru planetárních vln. V obou případech je vidět nárůst koherence na škále přibližně 27 dní, která odpovídá sluneční periodě. Zřetelněji je vidět pro dvojici stanic Průhonice a Řím.



Obrázek 5. Spektra waveletové koherence pro stanice Průhonice-Řím (horní panel) a stanice Průhonice-Sodankyla (střední panel) počítané pro 2 sluneční cykly v letech 1964-1985. Průběhy kritické frekvence pro Průhonice a slunečního toku F10.7 jsou uvedeny na dolním panelu.



Obrázek 6. Západní cyklonální situace – jeden z nejfrekventovanějších typů atmosférické cirkulace nad střední Evropou. Mezi tlakovou níží nad severním Atlantikem a subtropickou tlakovou výší nad Azory postupují v západním proudění frontální systémy přinášející do střední Evropy vlhký studený vzduch.

Závěr

Analýza korelačních koeficientů dlouhých časových řad kritických frekvencí měřených na evropských observatořích vertikálního ionosférického sondování ukazuje velmi vysokou korelaci jednotlivých řad. Vysoké hodnoty korelace potvrzují dominantní globální vliv sluneční aktivity na stav ionosféry na všech analyzovaných stanicích. Korelační koeficienty dosahují vysokých hodnot nejen pro původní naměřená data a pro střední hodnoty ale i pro časové řady fluktuace. Korelace časových řad fluktuací klesá pro povrchovou vzdálenost stanic přesahující 1000 km a přibližně 10° geografické šířky. Tento efekt je méně pozorovatelný pro rozdíl geografických délek stanic, pro který korelační koeficient klesá pomaleji. Zlomový bod na grafu korelačních koeficientů vysvětlujeme „lokálním“ vlivem neutrální atmosféry a její vlnové aktivity. Pravděpodobným společným zdrojem vlnové aktivity na škále 1000 km/ 10° jsou troposférické systémy (např. Eckermann, and Vincent, 1993). Rozsáhlé meteorologické systémy jsou známy jako významný zdroj vlnových procesů ve velmi širokém rozsahu period, které se šíří až do výšky ionosféry. Velké troposférické mesoscale systémy typicky dosahují 2000 km (Orlanski, 1975). Typická synoptická situace ve střední Evropě je znázorněna na obrázku 6. Charakteristickým rysem dynamiky troposféry nad Evropou je její vysoká proměnlivost (Bluestein, 1993; Hidore, et al., 2009) s mnoha frontálními systémy.

V době slunečního minima je vliv neutrální atmosféry výraznější. Projevy vlnových jevů s původem v neutrální atmosféře nejsou překryty výraznými slunečními a geomagnetickými procesy. Zesílení koherence je zřetelné na všech délkách period. Hodnota koherence se nicméně mění jak v průběhu slunečního cyklu, tak i vůči předchozímu či následujícímu cyklu.

Práce vznikla za podpory Grantové agentury České republiky (projekt 15-24688S).

Reference

- Altadill, D., Apostolov, E.M., Boska, J., et al. Lastovicka, J., Sauli, P., 2004. Planetary and gravity wave signatures in the F-region ionosphere with impact on radio propagation predictions and variability. *Annals of Geophysics*, 47, 2-3, S, 1109-1119.
- Bluestein, H. B., 1993. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes: Volume II: Observations and Theory of Weather Systems*. ISBN-13: 978-0195062687 ISBN-10: 019506268X
- Boška, J., Šauli, P., 2001. Observations of gravity waves of meteorological origin in the F-region ionosphere. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C – Solar-Terrestrial and Planetary Science*, 26, 6, 425-428.
- Chang, L., Yue, J., Wang, W., Wu, Q., and Meier, R.R., 2014. Quasi two day wave-related variability in the background dynamics and composition of the mesosphere/thermosphere and the ionosphere. *Journal of Geophysical Research – Space Physics*, 119, 6, 4786-4804. 10.1002/2014JA019936
- Eckermann, D.S., and Vincent, R.A., 1993. VHF Radar Observations of Gravity-Wave Production by Cold Fronts over Southern Australia. *Journal of Atmospheric Science*, 50, 785–806. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469>
- Everitt, B.S., 2006. *The Cambridge Dictionary of Statistics*. Cambridge University Press.

- Forbes, J.M., Palo, S.E., Zhang, X., 2000. Variability of the ionosphere. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 685–693.
- Forbes, J.M., and Leveroni, S., 1992. Quasi 16-day oscillation in the ionosphere. *Geophysical Research Letters*, 19, 10, 981-984.
- Grinsted, A., Moore, J. C., Jevrejeva, S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561–566. <http://www.glaciology.net/>
- Hidore, J. J., Oliver, J.E., Snow, M., Snow, R., 2009. *Climatology: An Atmospheric Science* (3rd Edition), ISBN-13: 978-0321602053 ISBN-10: 0321602056
- Laštovička, J., and Šauli, P., 1999. Are planetary wave type oscillations in the F2 region caused by planetary wave modulation of upward propagating tides? *Advances in Space Research*, 24, I I, 1473-1476.
- Laštovička, J., 2006. Forcing of the ionosphere by waves from below. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68, 3–5, 479–497.
- Mallat, S., 1998. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, San Diego.
- Orlanski, I., 1975. A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. *Bulletin American Meteorological Society*, 56, 5, 527-530.
- Pancheva, D., and Mukhtarov, P., 2011. Stratospheric warmings: The atmosphere–ionosphere coupling paradigm. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73, 1697–1702.
- Pancheva, D., Alberca, L.F. , de la Morena, B.A., 1994. Simultaneous observation of the quasi-two day variations in the lower and upper ionosphere. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 56, 43–50.
- Panikumar, D.V., Kumar, K.N., Kumar, S., 2014. Signatures of ultra fast Kelvin waves in low latitude ionospheric TEC during January 2009 stratospheric warming event. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 117, 48-53.
- Radicella, S.M., Sauli, P., Jakowski, N., Kouba, D, Portillo, A., Herraiz, M., Strangeways, H.J., Zernov, N., Gherm, V., 2009. Space Plasma Effects. *Annals of Geophysics*, 52, 3-4, 359-372.
- Reinisch, B. W., X. Huang, I. A. Galkin, V. Paznukhov, and A. Kozlov, 2005. Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes, *J. Atmos. Solar-Terr. Physics*, 67, 1054-1062.
- Šauli, P., 2007. Atmosféra pod vlivem sluneční aktivity. *Astropis*, 17-20.
- Šauli, P., Boška, J. 2001. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *Journal of atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 63, 9, 945-950.
- Torrence, C. and Compo, G. P.: A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61–78, 1998. <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>