

# **Ionosférická pozorování prstencového zatmění Slunce 3.října 2005**

*P. Šauli, Ústav fyziky atmosféry AVČR, Boční II/1401, Prague 4 – Spořilov, 141 31, Czech Republic; pkn @ufa.cas.cz*  
*J. Boška, Ústav fyziky atmosféry AVČR, Boční II/1401, Prague 4 – Spořilov, 141 31, Czech Republic; boska @ufa.cas.cz*  
*J. Chum, Ústav fyziky atmosféry AVČR, Boční II/1401, Prague 4 – Spořilov, 141 31, Czech Republic; jch @ufa.cas.cz*  
*F. Hruška, Ústav fyziky atmosféry AVČR, Boční II/1401, Prague 4 – Spořilov, 141 31, Czech Republic; fhr @ufa.cas.cz*  
*J. Baše, Ústav fyziky atmosféry AVČR, Boční II/1401, Prague 4 – Spořilov, 141 31, Czech Republic; jba @ufa.cas.cz*  
*J. Maděra, Ústav fyziky atmosféry AVČR, Boční II/1401, Prague 4 – Spořilov, 141 31, Czech Republic; jma @ufa.cas.cz*  
*D. Kouba, Ústav fyziky atmosféry AVČR, Boční II/1401, Prague 4 – Spořilov, 141 31, Czech Republic; kouba @ufa.cas.cz*

## **Abstrakt**

**3.října 2005 probíhala speciální měření na dvou ionosférických observatořích Ebro (Španělsko, 40.8N, 0.5E) a Průhonice (Česká republika, 49.9N, 14.5E) za účelem pozorování efektů prstencového zatmění. Centrální oblast prstencového zatmění se nacházela nad Španělskem jižně od stanice Ebro. Efekt zatmění je mnohem výraznější v pozorování ze stanice Ebro. Obě observatoře měřily vertikální profily elektronové koncentrace v 5 a 2 minutových intervalech. Analýza variací elektronové koncentrace v konstantních výškách potvrzuje přítomnost vln gravitačního typu, které pravděpodobně souvisejí s průchodem rázové vlny. Veškeré vlny, nalezené v oscilacích elektronové koncentrace na obou observatořích, se šíří ionosférou šikmo vzhůru pod úhlem  $\sim 10^\circ$  od horizontální roviny. Spolu s vertikálním ionosférickým sondováním pobíhalo ve Španělsku měření Dopplerovského posuvu signálu dvou vysílačů o frekvenci  $\sim 3.59$  MHz, vzájemně posunutých o 12 Hz. Signál z jednoho vysílače se odrazil přibližně uprostřed pásma totality. Na tomto signálu jsme pozorovali v době maxima zatmění rychlé, výrazné Dopplerovské změny kmitočtu (výšky vrstvy odrazu) o periodě necelých 20 min a amplitudě cca 0.4 Hz (změna výšky cca 1km/min).**

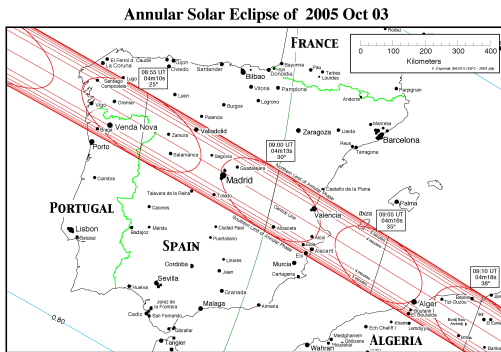
## **1.ÚVOD**

Zatmění Slunce patří k velmi zajímavým jevům, které ovlivňuje stav ionosféry. Během krátké doby klesá intenzita slunečního záření a dochází k ochlazení všech vrstev atmosféry a zeslabení procesu ionizace. Rychlá změna stavu atmosféry vede např. ke vzniku atmosférických vln (Chimonas a Hines, 1970; Muller-Wodarg et al., 1998; Somsikov, 1991), které jsou pozorovatelné jak v neutrální tak i v ionizované atmosféře. Během zakrývání slunečního disku klesá elektronová koncentrace v ionosféře velmi rychle k hodnotám charakteristickým pro noční ionosféru a poté opět roste spolu s nárůstem radiačního toku a návratem k normální denní situaci. Během zatmění

dochází jednak ke změně koncentrace ionizovaných částic, snížení celkového elektronového obsahu ale také ke změně výšky jednotlivých ionosférických vrstev, případně jejich vymizení (E vrstva). Podmínky v ionosféře během slunečního zatmění se níméně velmi liší od pravidelné noční situace, vzhledem k tomu, že se ostře ohraničená zastíněná chladná oblast atmosféry pohybuje nadzvukovou rychlostí. Ionosférické plasma se dostává do nerovnovážného stavu a návrat k rovnováze je provázen vlnovými oscilacemi v plasmatu. Zatmění Slunce představuje velmi významnou událost, při které je možné studovat dynamickou odezvu atmosféry na změnu slunečního záření.

## 2.DATA

Pás anularity slunečního zatmění 3.října 2005 se nacházel na území Španělska v centrální oblasti (viz. obrázek 1). Během zatmění probíhala měření vertikálního profilu elektronové koncentrace na observatoři Ebro (severně v blízkosti pásu anularity) a na observatoři Průhonice.



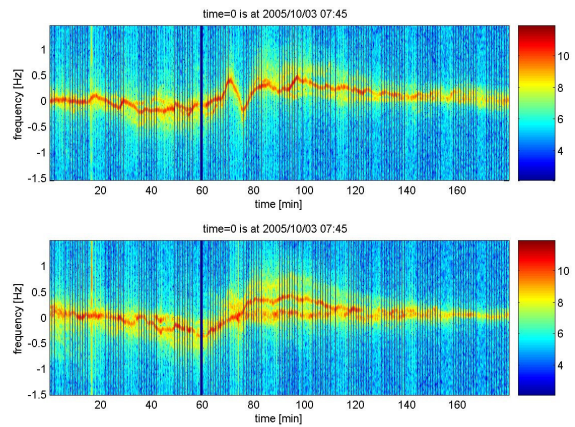
**Obr.1. Poloha pásu anularity prstencového zatmění Slunce 3.října 2005**

Profil elektronové koncentrace byl měřen každých 5 minut na observatoři Ebro a každé 2 minuty v Průhonících. Lokální podmínky pozorování jsou uvedeny v tabulce 1. Sluneční a geomagnetická aktivita byla během zatmění i předcházejících dní nízká, hodnota  $f_{10.7}$  se pohybovala v rozmezí 72-77sfu, hodnota čísla slunečních skvrn SSN byla převážně rovna 0 a index  $K_p$  nepřesáhl hodnotu 3.

Stanice	1.kontakt UT	4.kontakt UT	Maximum UT	Zakrytí disku
Ebro	07 : 42	10 : 29	09 : 04	89%
Průhonice	08 : 01	10 : 32	09 : 15	54%

Tab.1. Podmínky pozorování zatmění Slunce pro Ebro (Španělsko) a Průhonice (Česká republika).

Současně s vertikálním ionosférickým sondováním byl monitorován signál dvou vysílačů o frekvenci ~3.59MHz, vzájemně posunutých o 12 Hz. Signál z jednoho vysílače se odrazil přibližně uprostřed pásu anularity. Záznam měření ukazuje obrázek 2. Vyhodnocování Dopplerovského posuvu kmitočtu signálu, který se odráží od ionosféry umožňuje nepřetržité sledování pohybů odrazné vrstvy, tj. oblasti, ve které koncentrace částic neboli plasmová frekvence odpovídá vysílanému kmitočtu. Konfigurace experimentu a bodů odrazu signálů je znázorněna na obrázku 3.

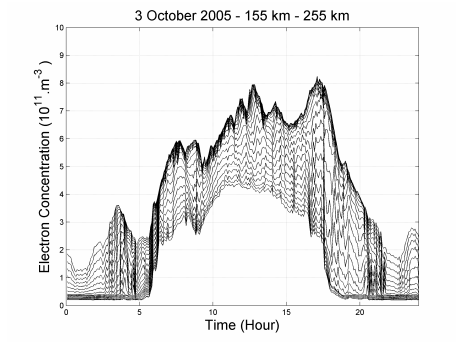


**Obr.2. Záznam měření Dopplerovského posuvu ze dvou přijímačů Teruel (nahore) a Granada (dole). Počátek měření odpovídá času 7:45 h UT.**

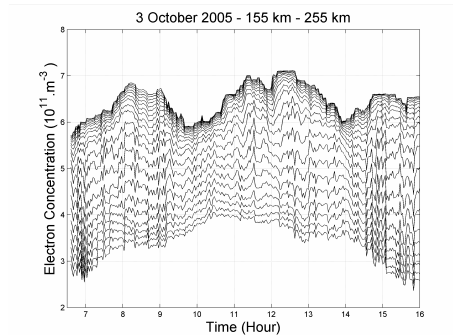


**Obr.3. Geometrie experimentu. Rozmístění vysílačů a přijímačů během prstencového zatmění Slunce 3.října 2005**

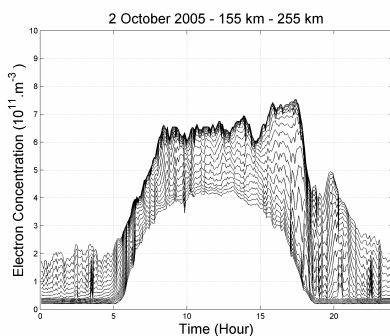
Naměřené ionogramy byly manuálně vyhodnoceny a poté přepočteny na vertikální profily elektronové koncentrace programem NHPC (Huang a Reinisch, 1996). Na obou stanicích byla použita stejná inverzní metoda. Pro vlnovou analýzu jsme použili variace elektronové koncentrace v pevných výškách 155km – 250km s krokem 5km. Na obrázku 4a je vidět zřetelný pokles elektronové koncentrace během zatmění ve srovnání s denním průběhem pro předcházející den (obr.4b) zaznamenané na observatoři Ebro. Ve variaci elektronové koncentrace 3.října jsou zřetelné vlnové oscilace začínající se zakrýváním slunečního disku a přetrvávající ještě několik hodin po skončení zatmění. Obrázek 5 ukazuje průběh elektronové koncentrace naměřený na observatoři Průhonice. Pokles elektronové je ve srovnání s pozorováním na stanici Ebro výrazně nižší.



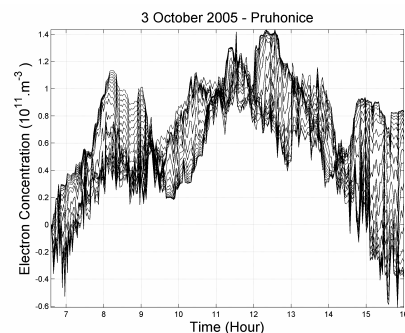
**Obr.4a. Ebro - Průběh elektronové koncentrace (ve výšce 155km-250km s krokem 5km) 3.října 2005. Pokles koncentrace, v dopoledních hodinách 3.října, odpovídá prstencovému zatmění Slunce.**



**Obr.5. Pruhonice - Průběh elektronové koncentrace (ve výšce 155km-250km s krokem 5km) 3.října 2005. Pokles koncentrace v dopoledních hodinách 3.října odpovídá prstencovému zatmění Slunce.**



**Obr. 4b. Ebro – Průběh elektronové koncentrace (ve výšce 155 km-250 km s krokem 5 km) den před zatměním 2. října 2005.**



**Obr. 6. Pruhonice – Průběh reziduí po odstranění period delších než 90 minut.**

### 3. VLNOVÉ STRUKTURY

Předpokládáme, že některé z oscilací v elektronové koncentraci jsou vyvolány průchodem akusticko-gravitačních vln. Spektrum akusticko-gravitačních vln je rozděleno periodou akustického ořezání a vztakovou periodou na akustický mód s periodou kratší než je perioda akustického ořezání a na gravitační mód s periodou přesahující vztakovou periodu. Chování akusticko-gravitačních vln popisuje disperzní rovnice (Hines, 1960):

$$\omega^4 - \omega^2 \omega_a^2 - k_x^2 C^2 (\omega^2 - \omega_g^2) - C^2 \omega^2 k_z^2 = 0 \text{ kd}$$

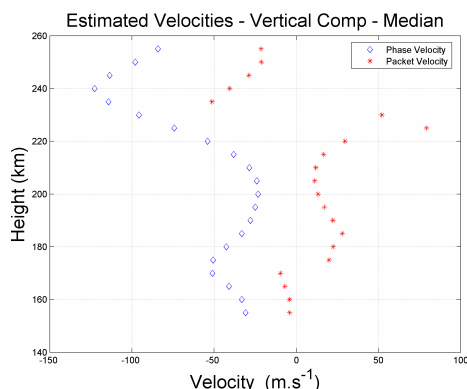
e  $\omega_a$  je úhlová akustická frekvence ořezání,  $\omega_g$  úhlová vztaková frekvence a C rychlost zvuku. Při výpočtu rychlosti zvuku vycházíme z modelu Extended Australian Standard Atmosphere 2000 (Pietrobon, 2000). K detekci vlnových oscilací vyskytujících se v časových řadách elektronových oscilací používáme jednodimenzionální spojitou waveletovou transformaci, která umožňuje jak stanovit periodu  $\omega$  oscilace, fázi  $\Phi$ , tak i její časovou lokalizaci. Pro naši analýzu jsme zvolili dva typy komplexních waveletů: Morlet a Paul (Torrence a Compo, 1998). Nalezené vlnové struktury jsme dále parametrizovali metodou popsanou v práci Šauli et al. (2006). Obrázek 6 ukazuje průběh reziduí (2 minutové hodnoty) po odfiltrování period delších než 90 minut.

Z nalezených struktur jsme vybrali pouze takové, které vyhovují disperzní rovnici v dostatečně velkém výškovém rozsahu a nemění výrazně svůj tvar.

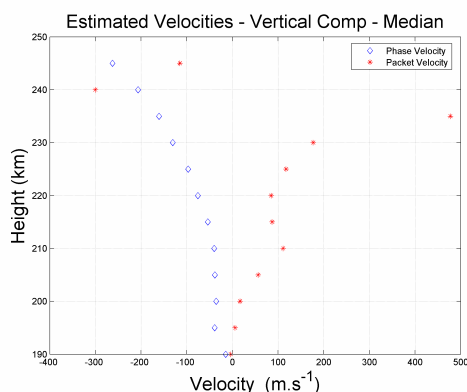
### 4. VÝSLEDKY

#### 4.1. VERTIKÁLNÍ IONOSFÉRICKÉ SONDOVÁNÍ

V oscilacích elektronové koncentrace jsme našli struktury, které svými charakteristikami (perioda, vlnový vektor, fázová a balíková rychlost) odpovídají gravitačním vlnám. Veškeré vlny, nalezené v oscilacích elektronové koncentrace na obou observatořích, se šíří ionosférou šikmo vzhůru pod úhlem  $\sim 10^\circ$  od horizontální roviny. Na obrázku 7 je znázorněna fázová a balíková rychlost vlny (perioda  $\sim 73$  minut) detekované během zatmění na stanici Ebro a na následujícím obrázku 8 rychlosti vlny (perioda  $\sim 65$  minut) přítomné v oscilacích po zatmění na stanici Pruhonice (obrázek 8). Všechny zaznamenané vlny se šíří ionosférou vzhůru, jejich balíková rychlost je kladná. Velmi malý úhel mezi horizontální rovinou a vlnovým vektorem ukazuje na vzdálený zdroj vlnové poruchy. Za možný zdroj zaznamenaných vln považujeme jednak rázovou vlnu a jednak vlnovou poruchu šířící se z dolních vrstev atmosféry vyvolanou náhlou změnou ohřevu atmosféry.



**Obr.7. Ebro – Fázová a balíková rychlost vlny detekovaná během maxima slunečního zatmění - perioda ~ 73 minut.**



**Obr.8. Průhonice - Fázová a balíková rychlost vlny detekovaná po slunečním zatmění - perioda ~ 65 minut.**

## 4.2. DOPPLEROVSKÝ POSUV

Na signálu, který se odrazil v pásu anularity jsme pozorovali v době maxima zatmění rychlé, výrazné Dopplerovské změny kmitočtu (výšky odrazné vrstvy) o periodě necelých 20 min a amplitudě cca 0.4 Hz (změna výšky cca 1km/min). Naproti tomu, na signálu druhého vysílače, jehož odrazný bod ležel mimo pásmo totality (cca 200 km od středu pásma) jsme žádné podobné rychlé změny nezaznamenali. Nejbližší ionosondové měření ze stanice Ebro indikuje v době zatmění odraznou výšku signálu necelých 200km.

## 5. ZÁVĚR

Vertikální ionosférické sondování i měření Dopplerovského posuvu ukazuje, že během zatmění výrazně roste aktivita vlnových oscilací gravitačního typu v oblasti period 15-80 minut. S přihlédnutím k jejich časové lokalizaci je zřejmé, že se jedná o vlny vybuzené prstencovým zatměním Slunce. Možným zdrojem detekovaných vln je rázová vlna vyvolaná pohybem zastíněné oblasti atmosféry nadzvukovou rychlostí. Vlny se od svého zdroje šíří plasmatem

šikmo vzhůru blízko horizontální roviny. I přes vysokou kvalitu dat z observatoře Průhonice (2minutové měření) jsme proti předpokladu v oscilacích elektronové koncentrace nezaznamenali žádnou akustickou vlnu.

To, že na Dopplerovském signálu s odrazným bodem mimo pásmo zatmění nebyly pozorovány rychlé výrazné změny kmitočtu je odlišný výsledek od měření, které byl získán v roce 1999 v Anglii, kde tyto rychlé změny kmitočtu – průchod rázové vlny pozorovali na signálech několika vysílačů odrážejících se v různých vzdálenostech od pásma totality.

## Poděkování

Práce vznikla za podpory projektu č. 205/06/1619 Grantové agentury České republiky, grantu č. IAA300420504 Grantové agentury AVČR.

## LITERATURA

- Chimonas G. a Hines C.O.: 1970, Atmospheric Gravity Waves Induced by a Solar Eclipse, *Journal of Geophysical Research*, 75, 4, 875-875.
- Hines C.O.:1960, Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, *Canadian Journal of Physics*, 38, 1441-1481.
- Huang X. a Reinish B.W.: 1996, Vertical electron density profiles from the igisonde network. *Advances in Space Research*, 18(6), 121-129.
- Muller-Wodarg I.C.F, A.D. Aylward, M. Lockwood: 1998, Effects of a Mid-Latitude Solar Eclipse on the Thermosphere and Ionosphere - A Modelling Study, *Geophysical Research Letters*, 25 (20), 3787-3790.
- Šauli P., Abry P., Boska J., Duchayne L: 2006, Wavelet Characterisation of Ionospheric Acoustic and Gravity Waves occurring during the Solar Eclipse of August 11, 1999, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68, 586-598.
- Somsikov V.M.: 1991, Waves in the atmosphere excited by the Solar Terminator, *Geomagnetism and Aeronomy*, 31, 1. (in russian)
- Pietrobon S.S., <http://www.sworld.com.au/steven/space/atmosphere/>
- Torrence C. and Compo G.P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bull. Am. Met. Soc.*, 79, 1, 61-78.