



Vlny v okolí Země

Jaroslav Chum

Ústav fyziky atmosféry AVČR v.v.i.

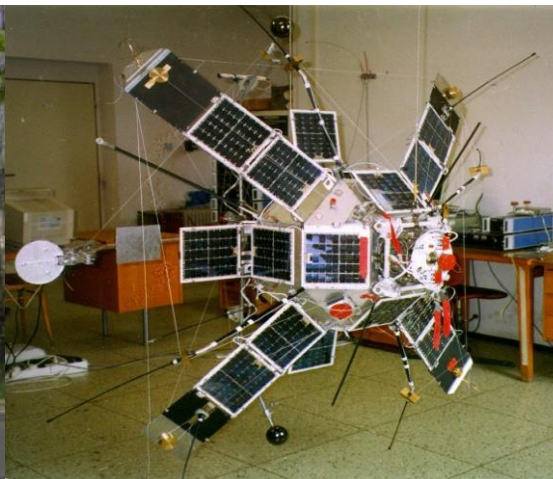
<http://www.ufa.cas.cz/>

Ionosféra

Elektromagnetické vlny v plazmovém okolí Země
(*nástroj i předmět zloumání*)

Vlny šířící se v neutrální atmosféře

subjektivní výběr, daný mojí činností



Proč studovat ionosféru

Ionosféra je vodivá vrstva obsahující volné elektrony a ionty (plazma) ve výškách od ~80 do 800 km (nahore plynule přechází v plasmasféru a magnetosféru). Výrazně ovlivňuje šíření radiových vln. Je velmi proměnlivá.

Dříve: vliv na radiové, telekomunikační a televizní spoje (nižší kmitočty)

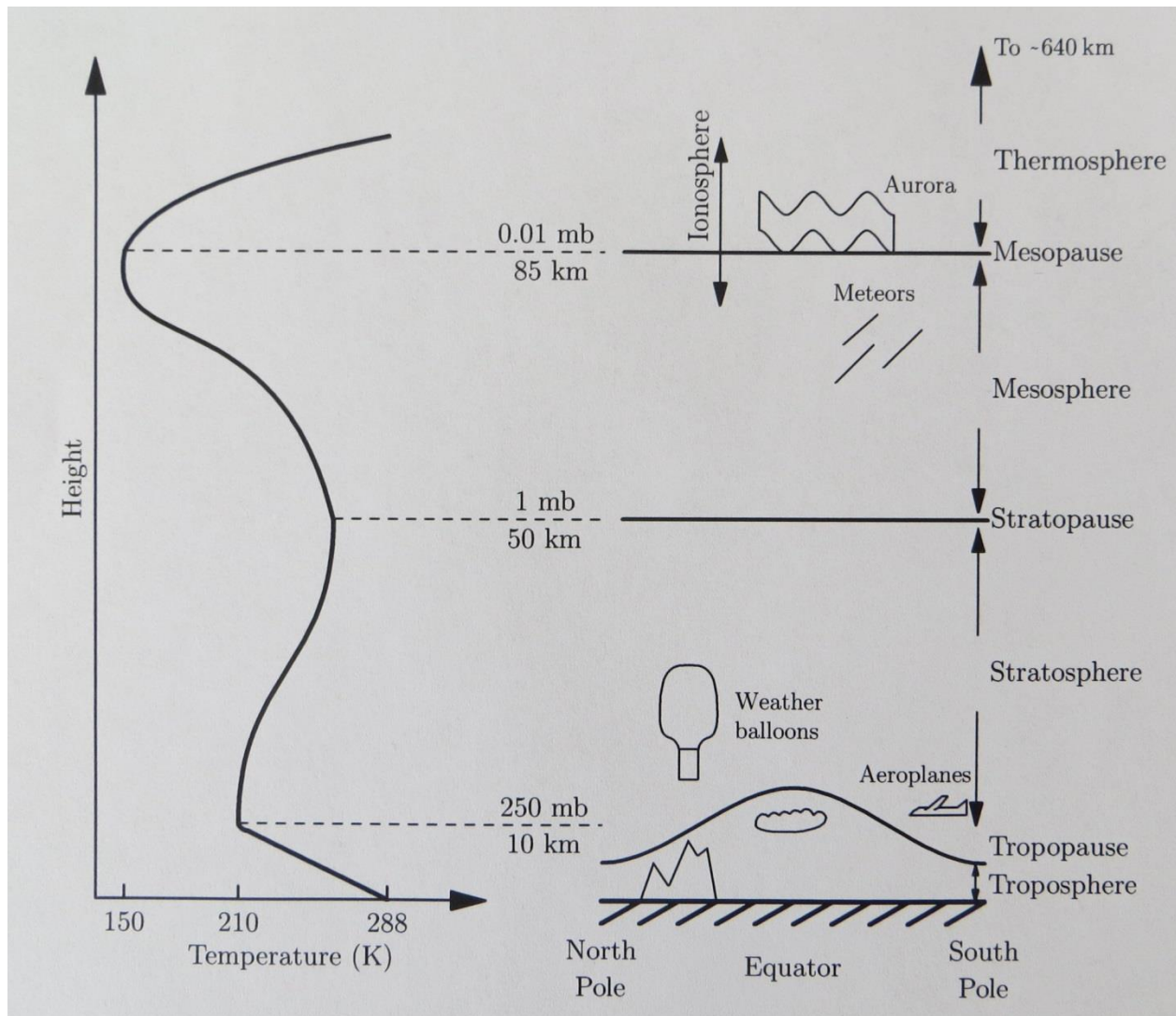
Dnes: vliv na přesnost GPS (zejména plazmové bubliny nad rovníkem)

Představuje rozhraní mezi „kosmickým“ meziplanetárním prostředím a zemskou atmosférou, zachycuje sluneční rentgenové záření, její hustota a variabilita je silně ovlivněna zejména sluneční aktivitou, ale i ději na zemi.

Lze v ní monitorovat i zemětřesení. Lze její monitorování využít pro varování před šířícími se tsunami?

Nejprve trochu „nauky (teorie)“, pak ukázky měření.

Atmosférické vrstvy



Nad ~600-700 km je prostředí již tak řídké, že srážek mezi částicemi je tak málo, že se nechová jako klasický plyn. Navíc jsou částice většinou již ionizované.

Tlak (hustota) s výškou klesá exponenciálně

$$n(z) = n(z_0) \cdot e^{\frac{-mg(z-z_0)}{kT}} = n(z_0) \cdot e^{\frac{-(z-z_0)}{H_z}}$$

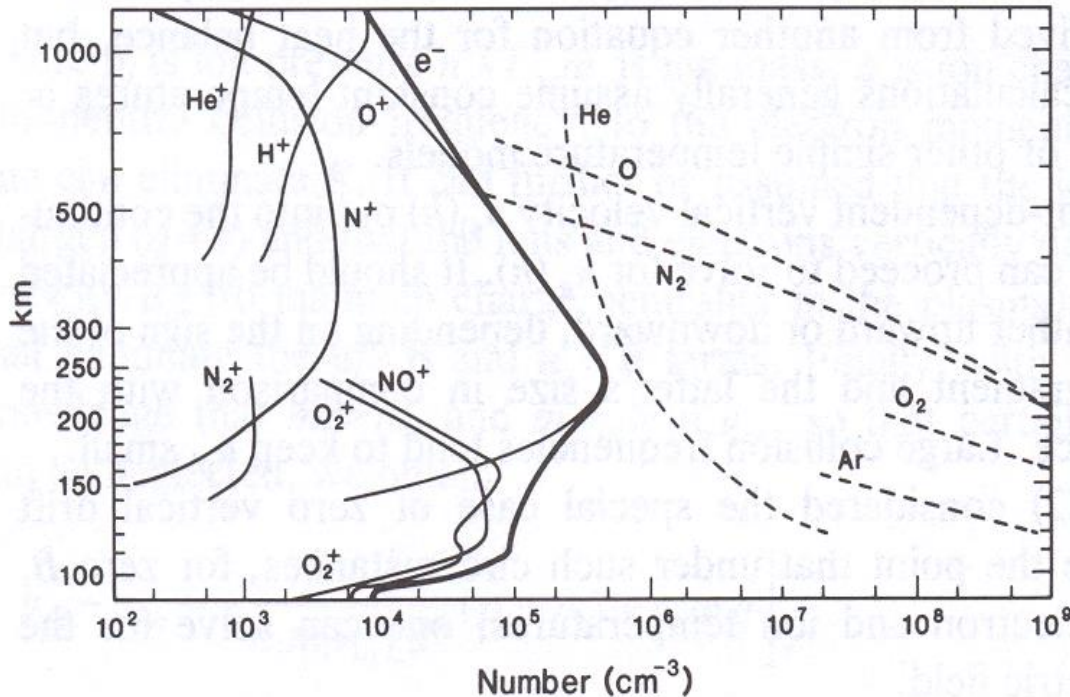
Ozónová vrstva je ve spodní části stratosféry (cca 0.0002%-0.0008%)

Ionosféra

K ionizaci dochází zejména působením EUV a X záření ze Slunce, částečně též proudem nabitým částic, zejména ve vyšších šířkách.

Znalost vlastností a složení ionizované složky v oblasti vnější atmosféry Země je důležitým podkladem ke studiu řady jevů. Např. pro šíření elektromagnetických signálů (GPS, vlny hvizdového typu atd.), pro pochopení vlivu sluneční aktivity na Zemi atd.

Nad maximem ionosféry nutná měření z družic (případně incoherent scatter radar)



Typická závislost celkové koncentrace iontů na výšce.

Koncentrace závisí na denní, roční době, sluneční aktivitě, šířce, atd...

Logaritmická stupnice

Elektromagnetické vlny v nemagnetizovaném plazmatu

Uvažujeme šíření **harmonických vln** (neharmonické průběhy jako součet harmonických)

$$\vec{E}(\vec{x}, t) = \vec{E}_0 \cos(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega \cdot t + \varphi) = \text{Re}\{\vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t + \varphi)}\}$$

$$\text{vlnový vektor } \vec{k} = \frac{\omega}{\vec{v}_f}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -i\omega \vec{E}; \quad \nabla \cdot \vec{E} = i\vec{k} \cdot \vec{E}; \quad \nabla \times \vec{E} = i\vec{k} \times \vec{E}$$

Pro analytické řešení,
rovnice diferenciální $\rightarrow$ algebraické

Zanedbáme srážky, tepelný tlak a pohyb iontů (pro dostatečně vysoké frekvence)

Bez magnetického pole je plazma izotropní, můžeme uvažovat šíření v 1D a

$\vec{E}$ je kolmý na $\vec{k}$. (B_1 je kolmý na $\vec{k}$ vždy, plyne např. z Faradayova zákona)

$$n = n_0 + n_1(x, t); \quad E = 0 + E_1(x, t); \quad v = 0 + v_1(x, t); \quad B = 0 + B_1(x, t);$$

Perturbace jsou malé, tj., $n_0 \gg n_1$; **nelineární členy zanedbáme** $v_1 v_1 = 0, v_1 \times B_1 = 0, \dots$

Dále platí, $c^2 = 1/\mu_0 \epsilon_0$, $j = -en v$

Maxwellovy rovnice:	$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$		$k \times E = \omega B$
<i>Faradayův zákon,</i>			
<i>Ampérův zákon</i>	$\nabla \times B = \mu_0(j + \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t})$		$ik \times B = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} (-en_0 v - i\epsilon_0 \omega E)$

Pohybová rovnice:	$m_e n_0 \frac{dv}{dt} = -en_0 E$		$im_e \omega v = eE$
-------------------	-----------------------------------	-------	----------------------

Výsledek:

$$\omega^2 = \frac{e^2 n_0}{\epsilon_0 m_e} + k^2 c^2; \quad \text{index lomu } (N = \frac{kc}{\omega}),$$

Disperzní relace

$$N^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$$

$N^2 > 0$, aby existovala šířící se vlna (reálné řešení) $\omega > \omega_{pe}$

Elektromagnetické vlny v magnetizovaném plazmatu

Stejné předpoklady jako v případě nemagnetizovaného plazmatu, ale

Nyní: $B = B_0 + B_1(x, t)$; $B_0 \gg B_1$; $B_0 = \text{const}$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \dots\dots\dots k \times E = \omega B_1$$

$$\nabla \times B = \mu_0(j + \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}) \dots\dots\dots ik \times B_1 = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2} (-en_0 v - i\varepsilon_0 \omega E)$$

$$m_e n_0 \frac{dv}{dt} = -en_0(E + v \times B) \dots\dots\dots im_e \omega v = eE + ev \times B_0$$

Magnetické pole vnáší anizotropii –závisí na směru šíření vzhledem k B_0 ,

Částice již nekmitají pouze ve směru E , nutno řešit vektorově v 3D,

E není obecně kolmé na k
elektrická permitivita již není skalár, ale matice (tenzor 2. řádu).

Řešení je algebraicky složitější

Disperzní rovnice má obecně tvar

$$A \cdot N^4 + B \cdot N^2 + C = 0$$

kde $A = A(\omega_p, \omega_c, \theta)$, $B = B(\omega_p, \omega_c, \theta)$, $C = C(\omega_p, \omega_c)$
 θ je úhel mezi B_0 a k , $\omega_c = q_s B / m_s$

Kvadratická rovnice pro N^2

Pro každou frekvenci existují maximálně 2 mody šíření

Často se používají zjednodušené disperzní relace platné v určitém pásmu kmitočtů a úhlů θ .

Např. pro malé úhly θ a $\omega \gg \omega_{ci}$

$$N^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega \mp \omega_{ce} \cos \theta)}$$

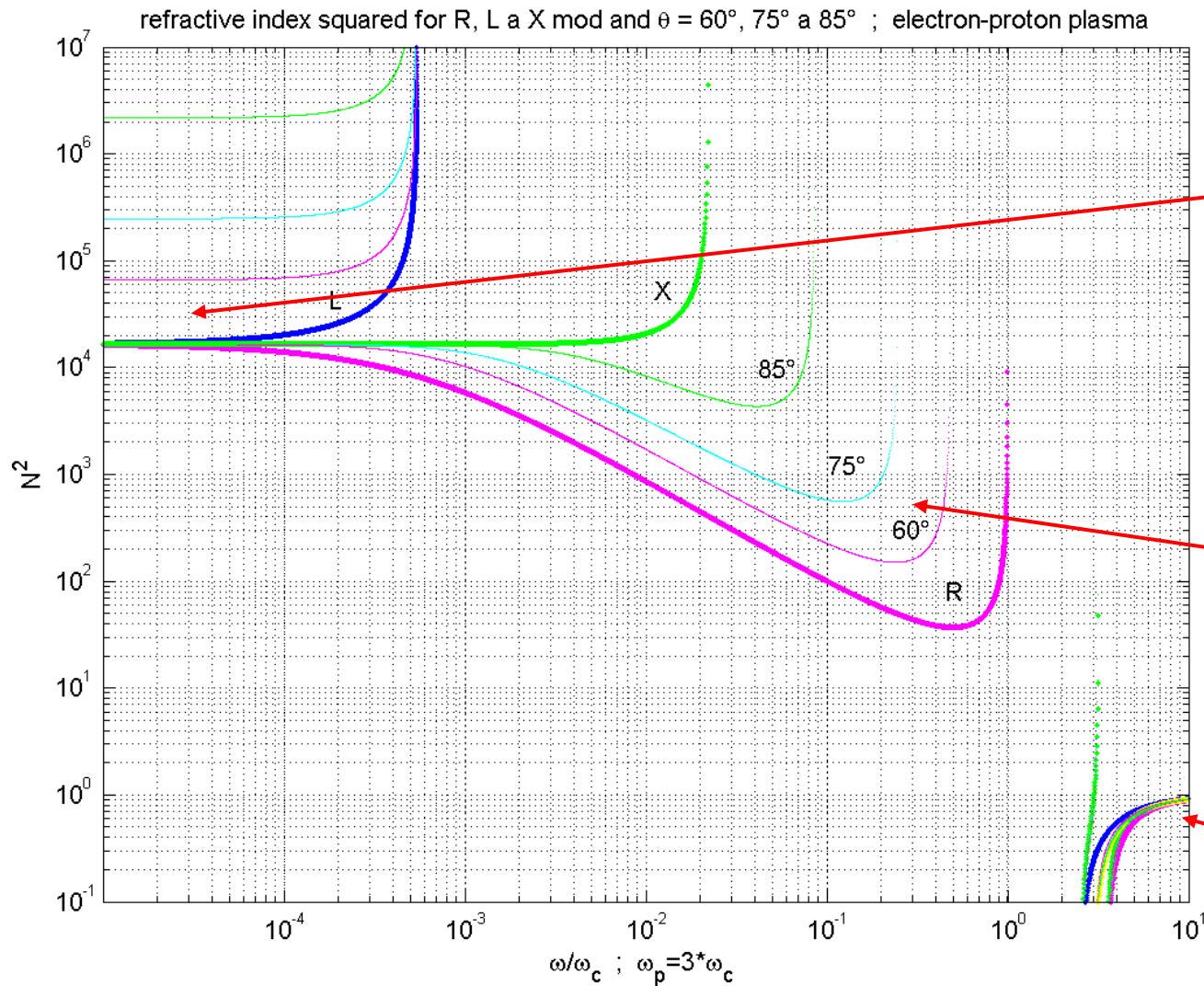
Pro “-” existuje řešení i pro $\omega < \omega_{pe}$ pokud $\omega < \omega_{ce} \cos \theta$

Pro $\omega \gg \omega_{ce} \cos \theta$ je disperze stejná jako pro nemagnetizované plazma

Index lomu v magnetizovaném plazmatu

Kmitočet normován k elektronové cyklotronní frekvenci

R pravotočivé
L levotočivé



magneto-
zvukové a
Alfvenovy vlny
(MHD)
Většinou se
uvažuje i
tepelný tlak
částic.

hvězdy

Vlny
volného
prostoru

Index lomu pro vícesložkové magnetizované plazma

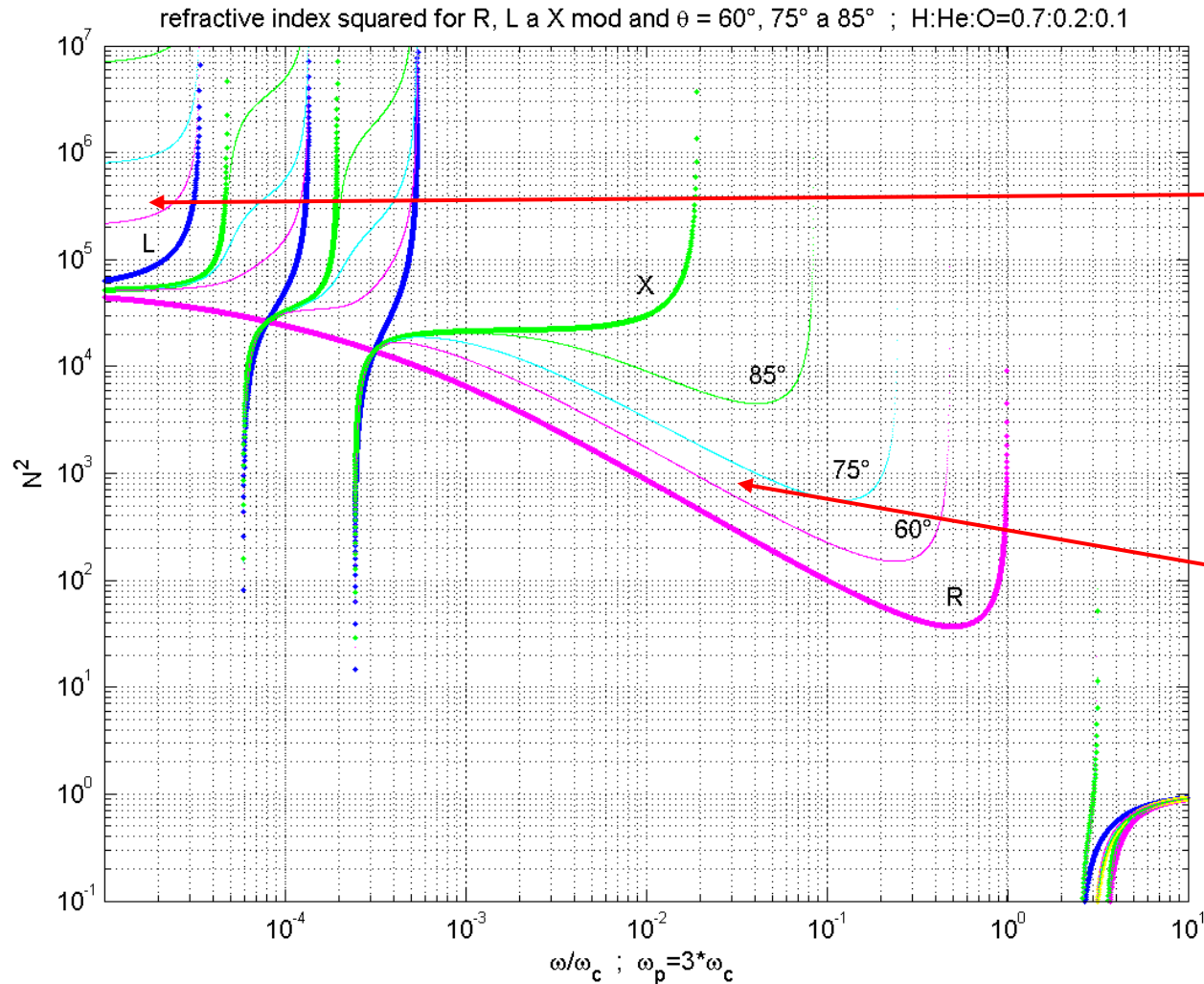
Kmitočet normován k elektronové cyklotronní frekvenci

R pravotočivé
L levotočivé

magneto-
zvukové a
Alfvenovy vlny
(MHD)
Většinou se
uvažuje i
tepelný tlak
částic.

hvězdy

Vlny
volného
prostoru



Klasické vedené hvizdy (elektronové)

Pravotočivé vlny šířící se na kmitočtech $\omega < \omega_{ce} \cdot \cos \theta$; ω_{pe}

$$N^2 \approx 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - \omega_{ce} \cos \theta)} \approx \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} \cos \theta - \omega)}$$

Vedené podél gradientů hustoty, θ je malý

Zpoždění příchodu,

pro $f < f_{nosova}$

$D = D(f_{ce}, f_{pe})$ podél dráhy šíření

$$t = D \frac{1}{\sqrt{f}}$$

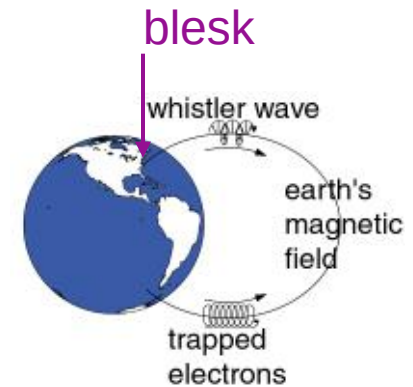
Hlavní příspěvek zpoždění (disperze) vzniká okolo rovníku. Hvizdy pozorované u nás pochází zpravidla od blesků v Jižní Africe.

Historie

dálkové telefony počátkem 20 stol., Storey 1953 vysvětlení, první měření hustoty plazmatu, Z hvízdavého zvuku název, Dnes název pro celý mod vln

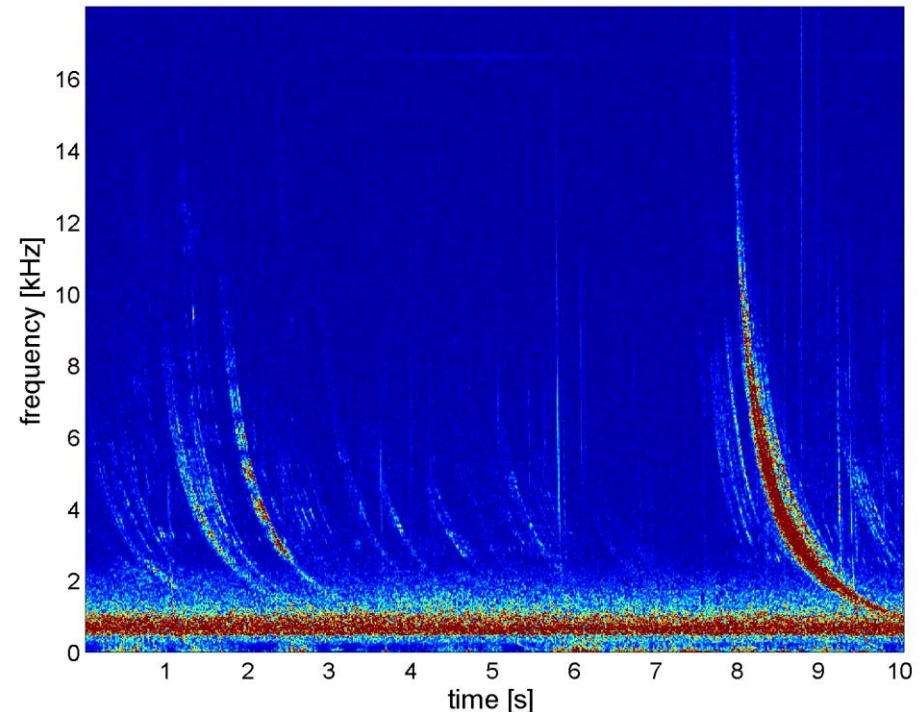


(.wav)



Pozorování DEMETER

time00 = 2004-8-21 10:21:20.238 ; L = 1.95 ; mlat = 44.7 ; alt = 703 ; mlt = 11.23 ; invlat = 46.3

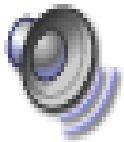


Nevedené hvizdy

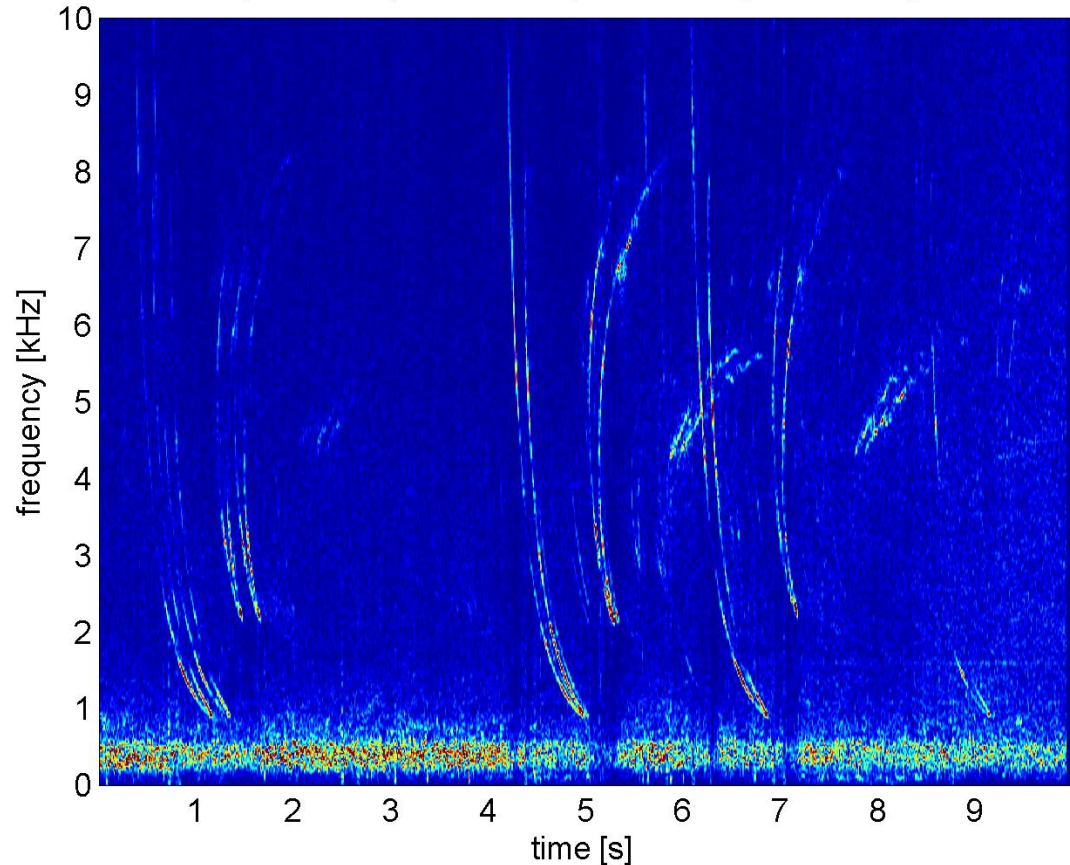
Neexistují výrazné gradienty hustoty (vlnovody). Různé frekvence se můžou šířit po jiných trajektoriích a pod různým úhlem θ . Zpravidla dochází k nárůstu θ během šíření, pro kmitočty nižší než kmitočet dolní hybridní resonance dochází pro vlny s velkým θ k odrazu (**vliv iontů**). Takové hvizdy nelze pozorovat na Zemi, ale pouze na družicích. Tvar ve spektrogramu může být složitější.

Pozorování
MAGION 5

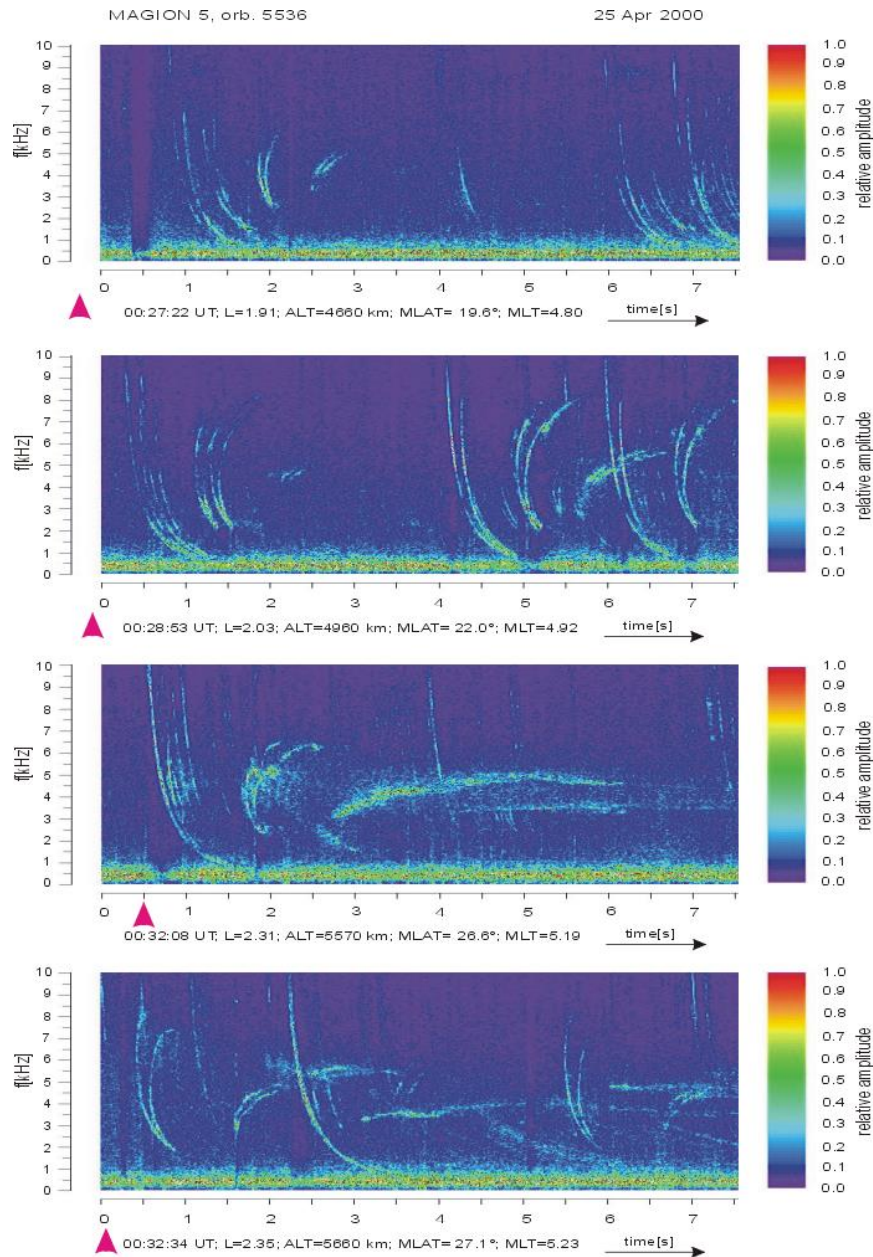
Blízko místa odrazu



time00 = 293s ; L = 1.96 ; mlat = 20.5 ; alt = 4763 ; mlt = 4.84 ; invlat = 44.4



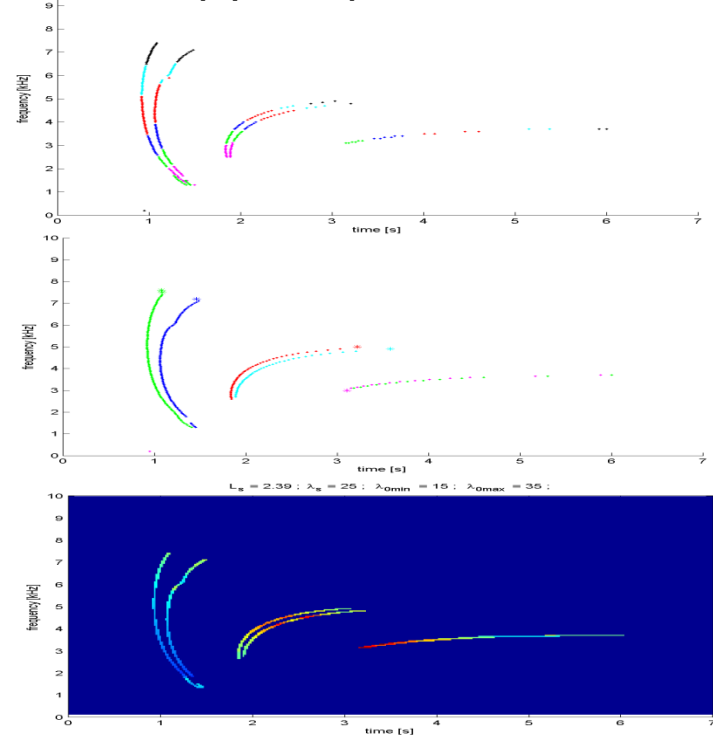
MR hvězdy blízko místa odrazu



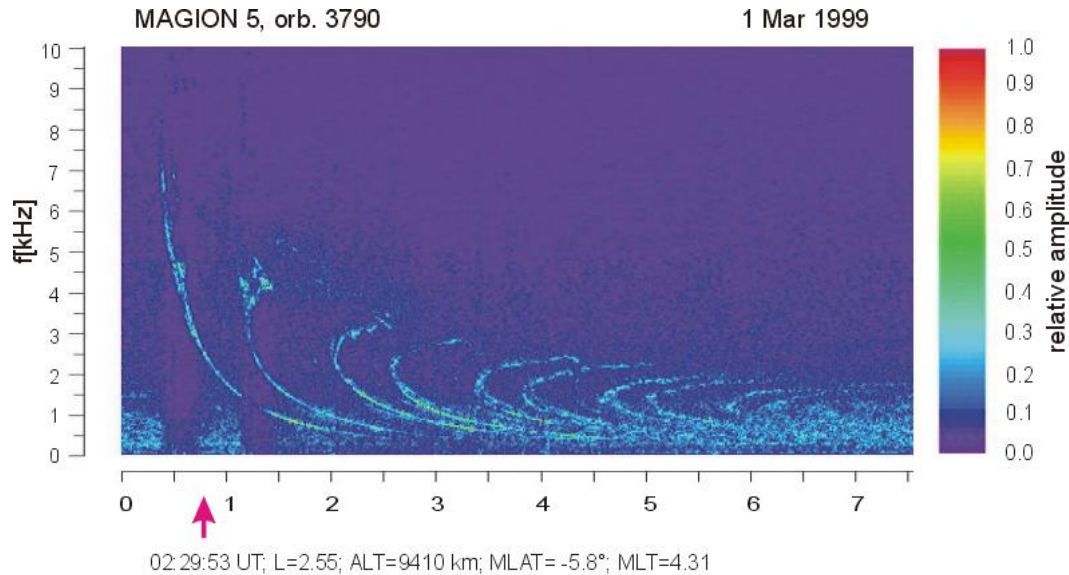
Pozorování v blízkosti magnetosférického (LHR) odrazu

Rozsah pozorovaných frekvencí klesá s počtem odrazů, kmitočet se přibližuje LHR frekvenci.

Simulace (vpravo)

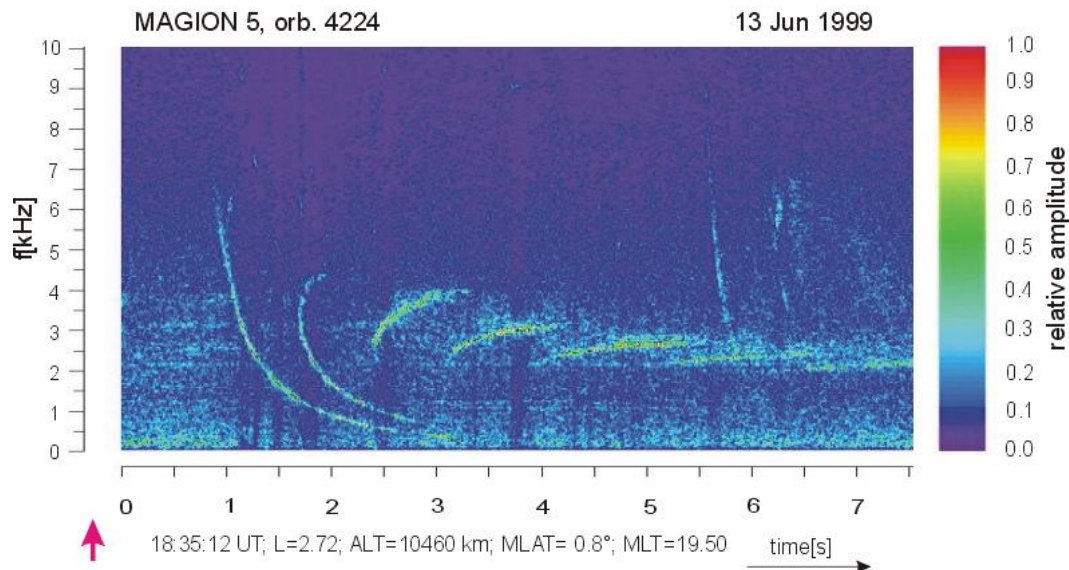


MR hvězdy pozorované poblíž rovníku



Rozdílné typy spektrogramů díky různým místům pozorování a různému umístění zdrojů

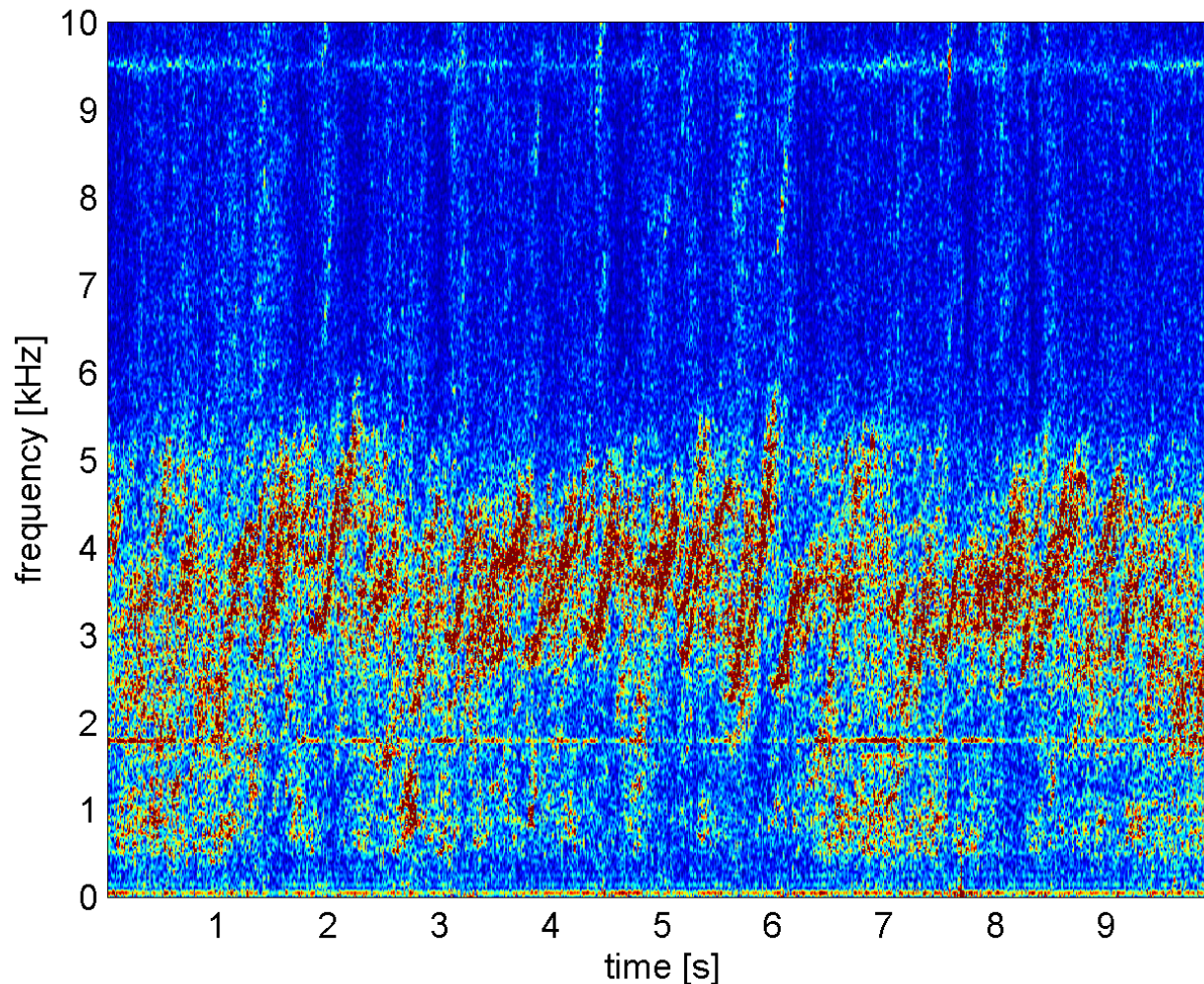
Horní obrázek (3790), pozorování na MLAT = - 5.8° ... lze vidět malou asymetrii (malé a větší zpoždění ..)



Spodní obrázek, pozorování na MLAT = 0.8° ... takřka symetrické

Chorus, příklad choru pozorovaného ve vyšších šířkách

Chorus, vlny hvizdového modu, generované v zemské magnetosféře v oblasti geomagnetického rovníku. Silně ovlivňují energetické částice v radiačních pásch



MAGION 5,
alt~7000 km,
mlat~40°

Příklad pozorování choru na družicích CLUSTER

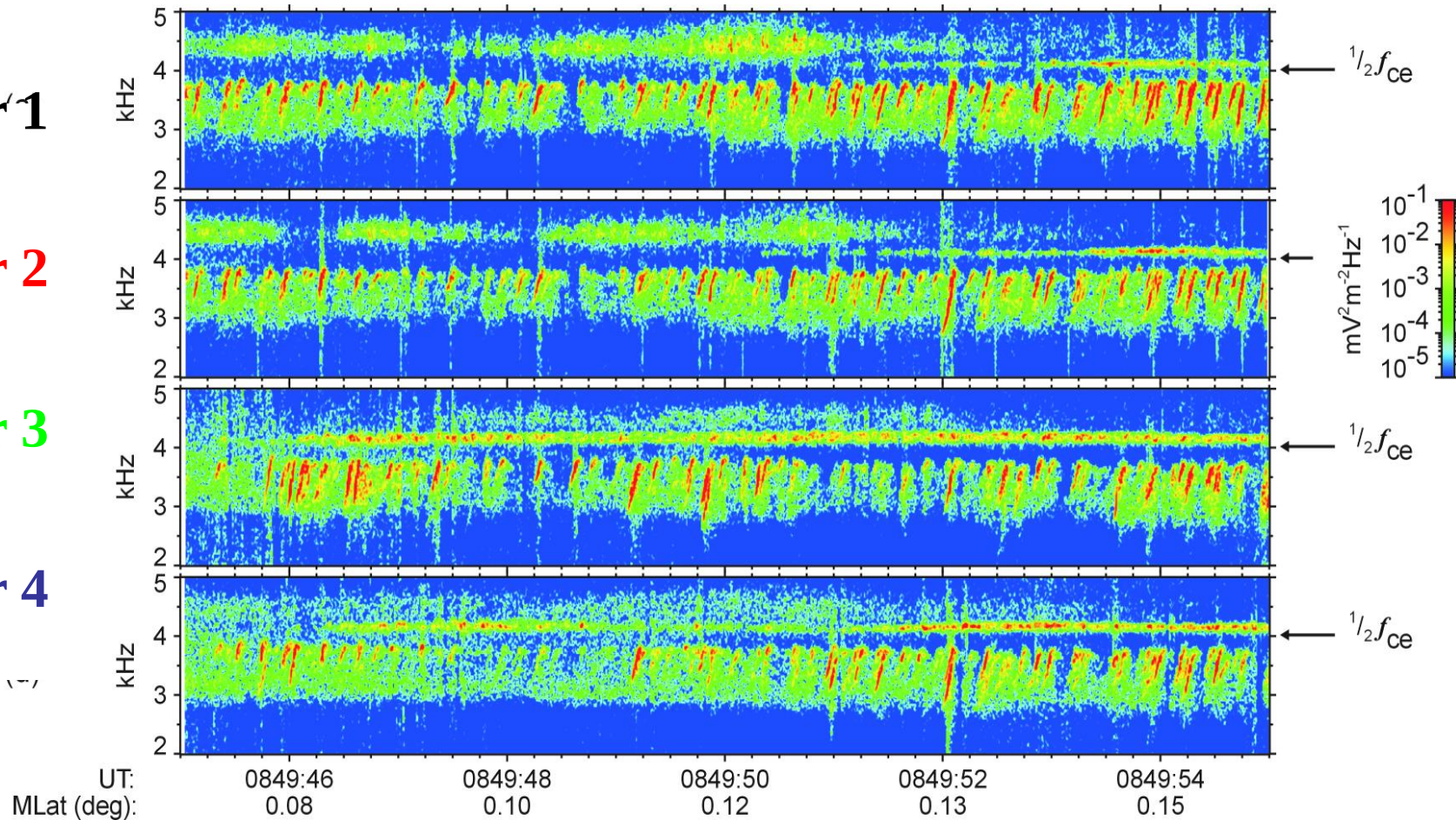
Pozorování ve zdroji v rovině magnetického rovníku, $\theta \sim 0$, pěkné vzestupné elementy, nádherná ukázka choru

Cluster 1

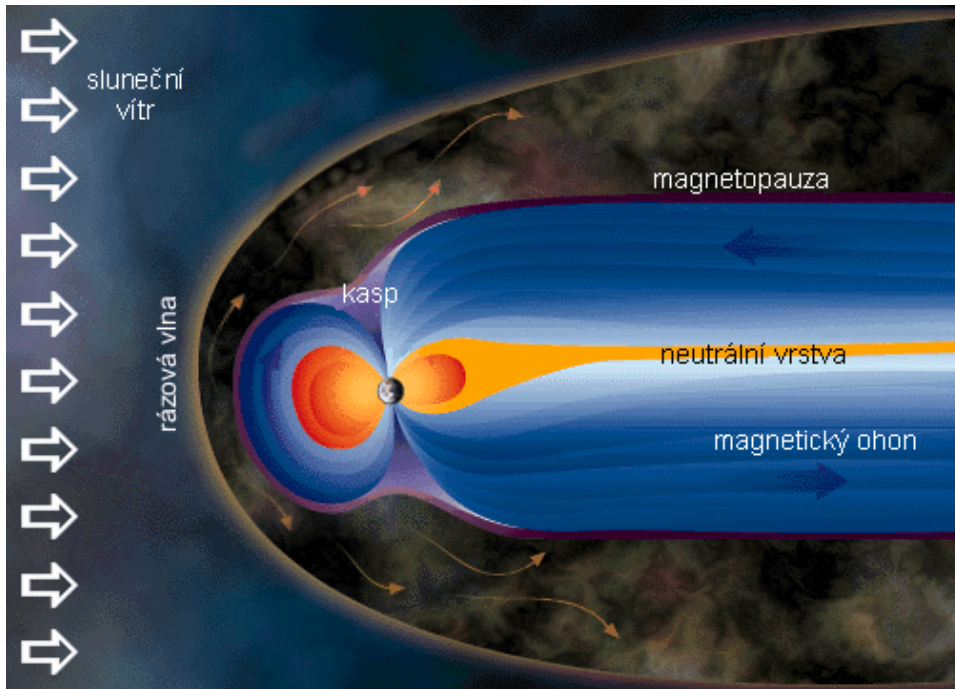
Cluster 2

Cluster 3

Cluster 4



Zemská magnetosféra



Její tvar je důsledkem interakce slunečního větru s magnetickým polem Země.

Magnetické pole by bez vlivu slunečního větru mělo přibližně dipólový tvar, ale díky tlaku slunečního větru je na denní straně “stlačené” (~6-10 Re) a na noční “protažené”
Za dipolové jej v prvním přiblížení lze považovat cca do 3 až 4 Re.

sluneční vítr tok nabitých částic (plazmatu) ze Slunce, z kladných iontů převažují protony (H^+), podíl iontů Helia 0-25%, těžší ionty jen neptarně;

rychlost slunečního větru: 200-900 km/s, hustota 1-100 částic/cm³

Sluneční vítr (plazma) si sebou unáší i **zamrzlé magnetické pole** Slunce (meziplanetární pole): 0.2 -50 nT, jeho orientace se mění.

Magnetopauza: tlak magnetického pole se rovná dynamickému tlaku slunečního větru; Za magnetopausou je prudký pokles velikosti mag. Pole. Dále pak rázová vlna.

Polární záře

Masivní vypadávání“ nabitých částic, zejména v **aurorálních oblastech** způsobené interakcí Zemské magnetosféry se slunečním větrem → excitace atomů a iontů ve vysokých vrstvách atmosféry. Nejčastěji bývá okem vidět emise atomu kyslíku na $\lambda=557$ nm (žlutozelená) ve výškách ~100 km. Dynamický, pohyblivý jev. V aurorálních oválech kolem obou magnetických pólů.

Současně se v aurorálních oblastech objevují i výrazné **fluktuace magnetického pole**



Pozemní měření – ionosonda v Průhonicích

Pruhorice, PQ052

2010.11.06 (310) 00:00:00 _IE

- Ionosonda**: radar s proměnnou frekvencí. Měří koncentraci ionizovaných částic (elektronů) v závislosti na výšce na základě doby zpoždění mezi vysláním a příjmem pulsu pro dané frekvence.

Index lomu N , závisí na frekvenci

Bez vlivu m.pole, $B=0$

$$N^2 = 1 - \frac{f_{pe}^2}{f^2} \quad f_{pe} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \cong 8.98 \sqrt{n_e}$$

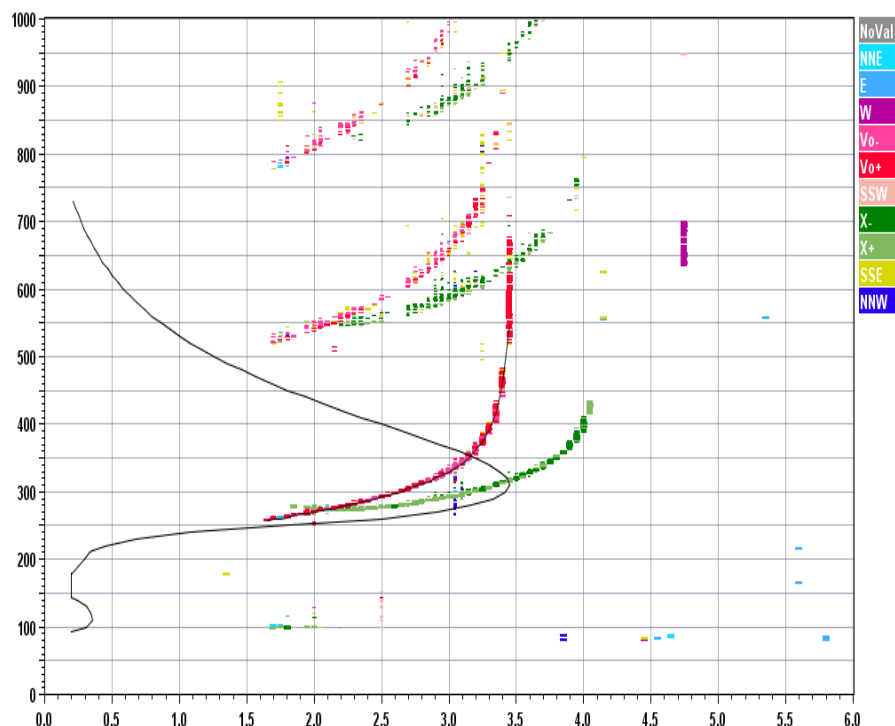
$f > f_{pe} \dots 0 < N < 1$; $v_f = c/N > c$,

$f \gg f_{pe} \dots N \rightarrow 1$; $v_f \rightarrow c$

$f = f_{pe} \dots N = 0$; totální odraz

$f < f_{pe} \dots N^2 < 0$ neexistuje reálný index lomu, vlny se nešíří

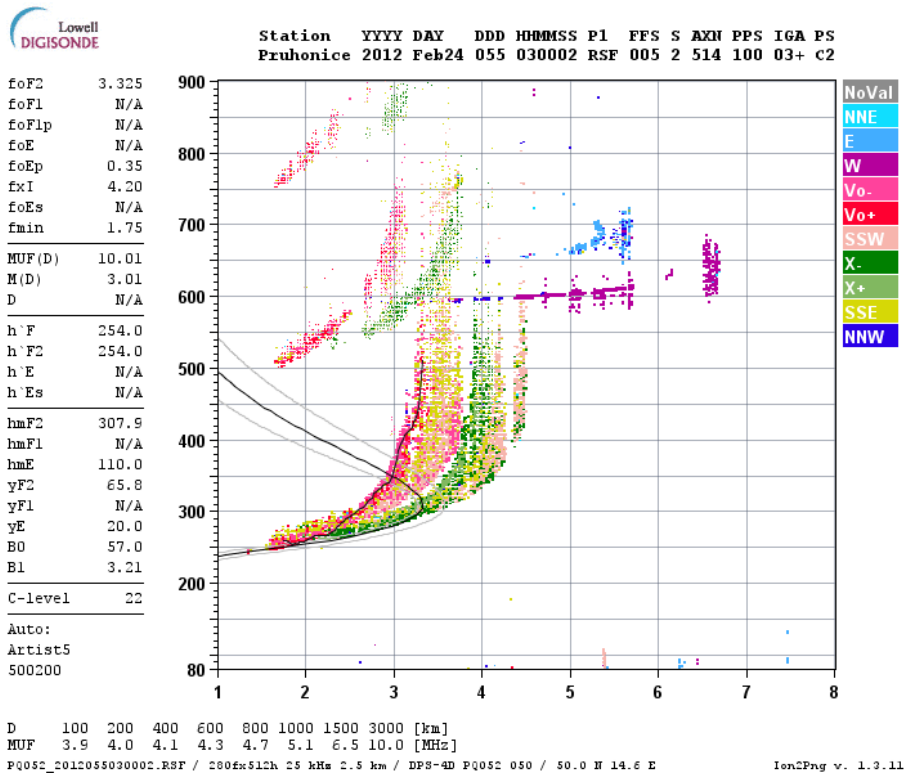
f_{pe} roste s hustotou elektronů, rozštěpení paprsku (stopy) na ionogramu vlivem B



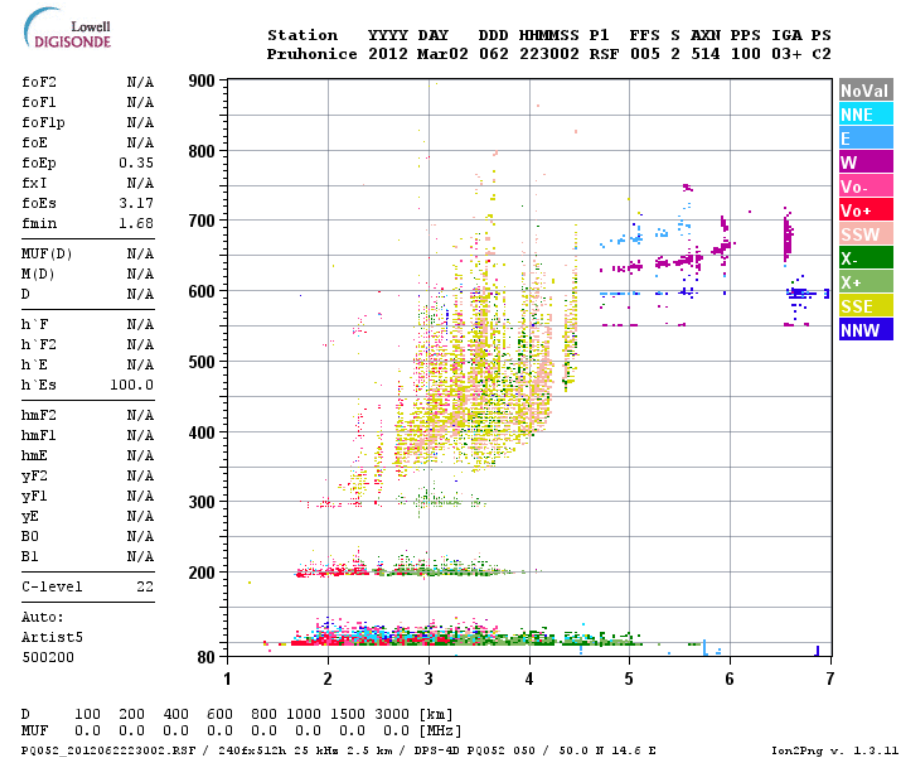
SAO Explorer, v 3.4.14b5

$v_g = Nc \rightarrow$ reálné výšky

Složitější ionogramy



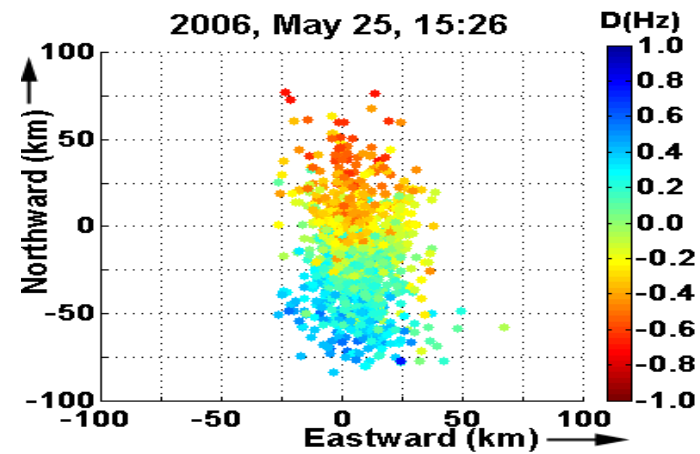
Spread F



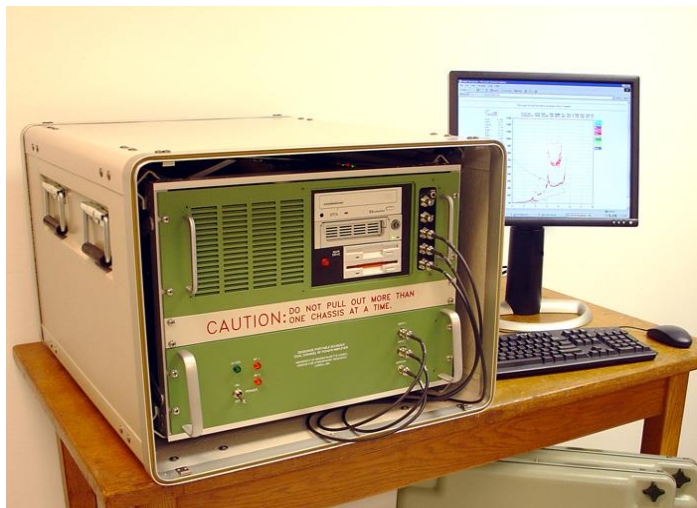
Sporadická E vrstva a spread F

Obtížné určit profil elektronové hustoty i kritickou frekvenci

Ionosonda v Průhoncích

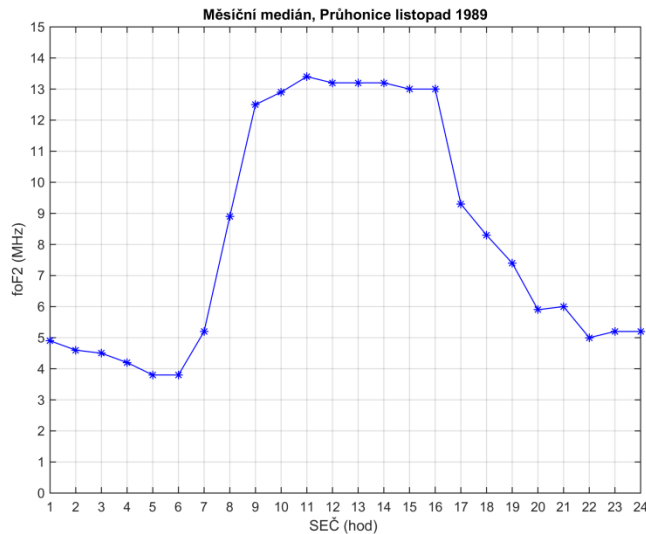


Přijímací anténa, 4 ks

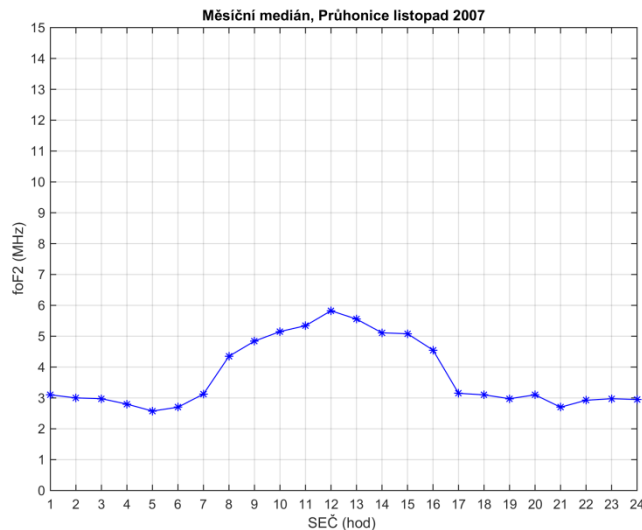
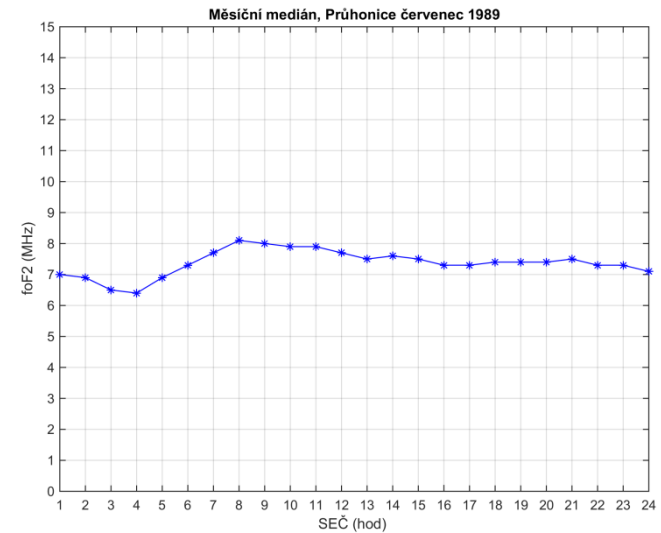


Variabilita ionosféry, denní chod

Ukázka závislosti kritické frekvence foF2 (nejvyšší frekvence, která se ještě odráží při vertikálním sondování) ve stanici Průhonice (hodinové mediány).



Vysoká
sluneční aktivita



Nízká
sluneční aktivita

$$f_{oF2} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_{eMAX}}{\epsilon_0 m_e}} \cong 8.98 \sqrt{n_{eMAX}}$$

foF2 závisí též na roční době, sluneční a geomagnetické aktivitě, geografické a geomagnetické šířce,...

Proč má ionosféra vliv na GPS ?

Rychlost šíření vlnového balíku (signálu GPS) - **grupová rychlost** v_g $v_g = Nc$

Index lomu N závisí na frekvenci a hustotě elektronů n

Hustota plazmatu, n , ovlivňuje index lomu, tedy šíření elektromagnetických vln, mění fázi i zpoždění signálu - **Vliv na GPS** i přesto, že $f \gg f_{pe}$. Důležitá je celková integrální hustota plazmatu podél dráhy signálu, tzv. **TEC** (Total Electron Content)

Poloha přijímače GPS je počítána ze známé polohy družic systému GPS a doby šíření signálu z jednotlivých družic. Prvně se předpokládá rychlost šíření c .

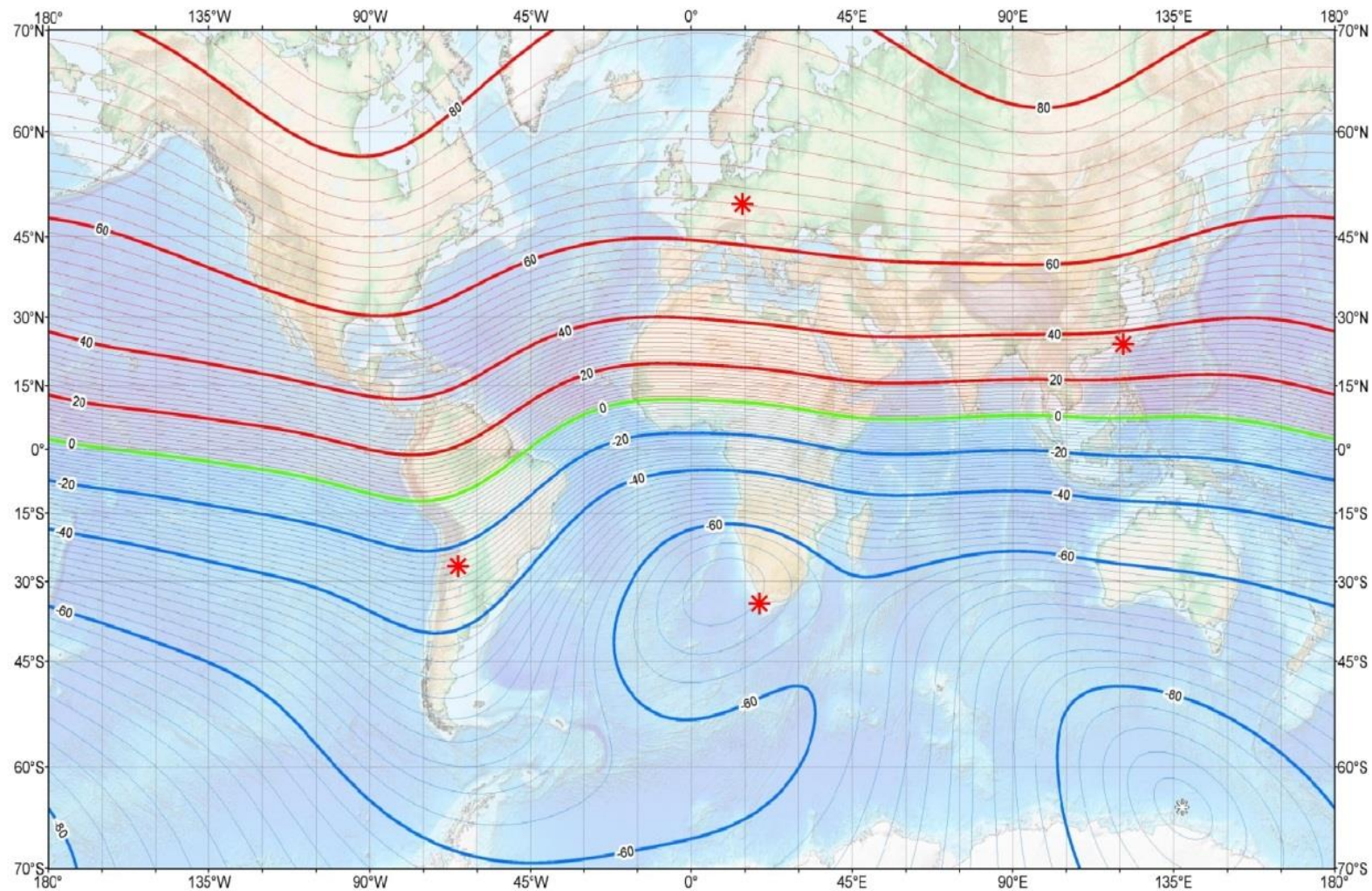
Provádí se korekce ma TEC, ale krátkodobé fluktuace činí problém. Pomocí speciálních GPS pracujících na dvou různých frekvencích lze TEC měřit – ionosférický výzkum.

TEC závisí na denní, roční době, zeměpisné oblasti (šířce), sluneční, geomagnetické aktivitě a dalších fluktuací hustoty.

$$t = \int_0^H \frac{ds}{v_g} = \frac{H}{c} + \frac{e^2}{2c(2\pi f)^2 \varepsilon_0 m_e} \int_0^H n ds$$

Umístění Dopplerovských systémů pro sledování dynamiky ionosféry s vyšším časovým rozlišením (Doppler~10 s; ionosonda sonduje typicky po 5 až 15 min)

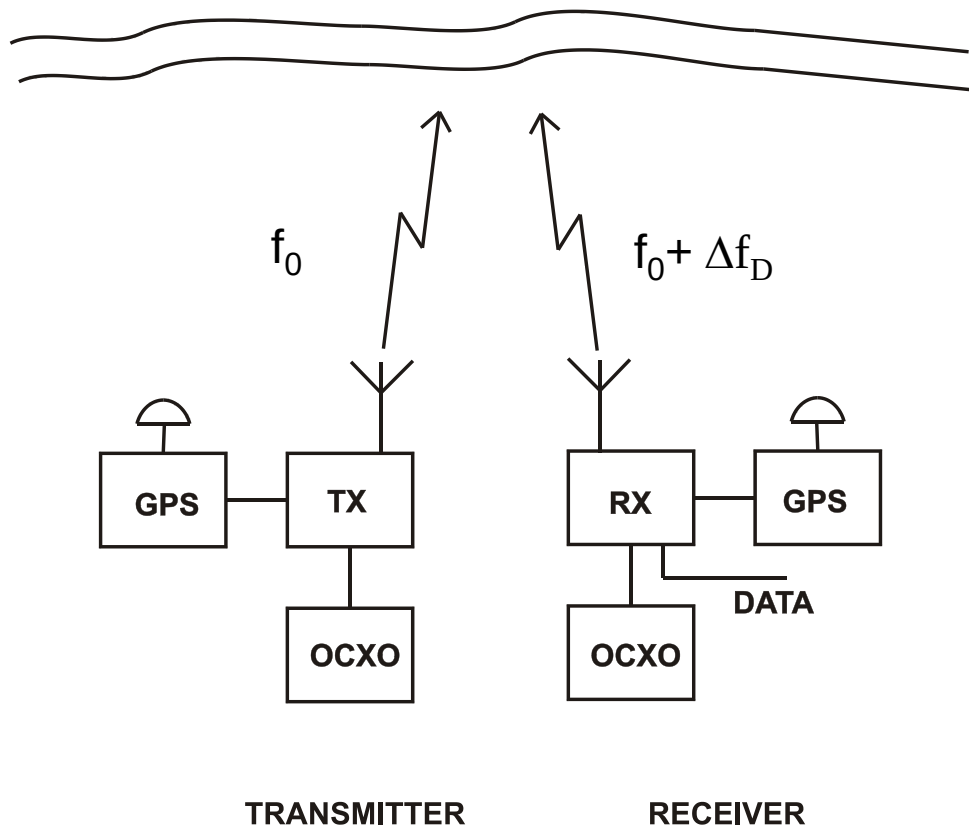
US/UK World Magnetic Model -- Epoch 2010.0
Main Field Inclination (I)



Main field inclination (I)
Contour interval: 2 degrees, red contours positive (down); blue negative (up); green zero line.
Mercator Projection.
☼ : Position of dip poles

Map developed by NOAA/NGDC & CIRES
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>
Map reviewed by NGA/BGS
Published January 2010

Princip Dopplerovského sondování



Ionosféra

Pohyby ionosféry a zhušťování/zředování plazmatu (koncentrace elektronů) způsobují, že dochází k Dopplerovskému posunu frekvence, Δf_D , signálu odraženého od ionosféry

Odrazná vrstva $f \sim f_p$

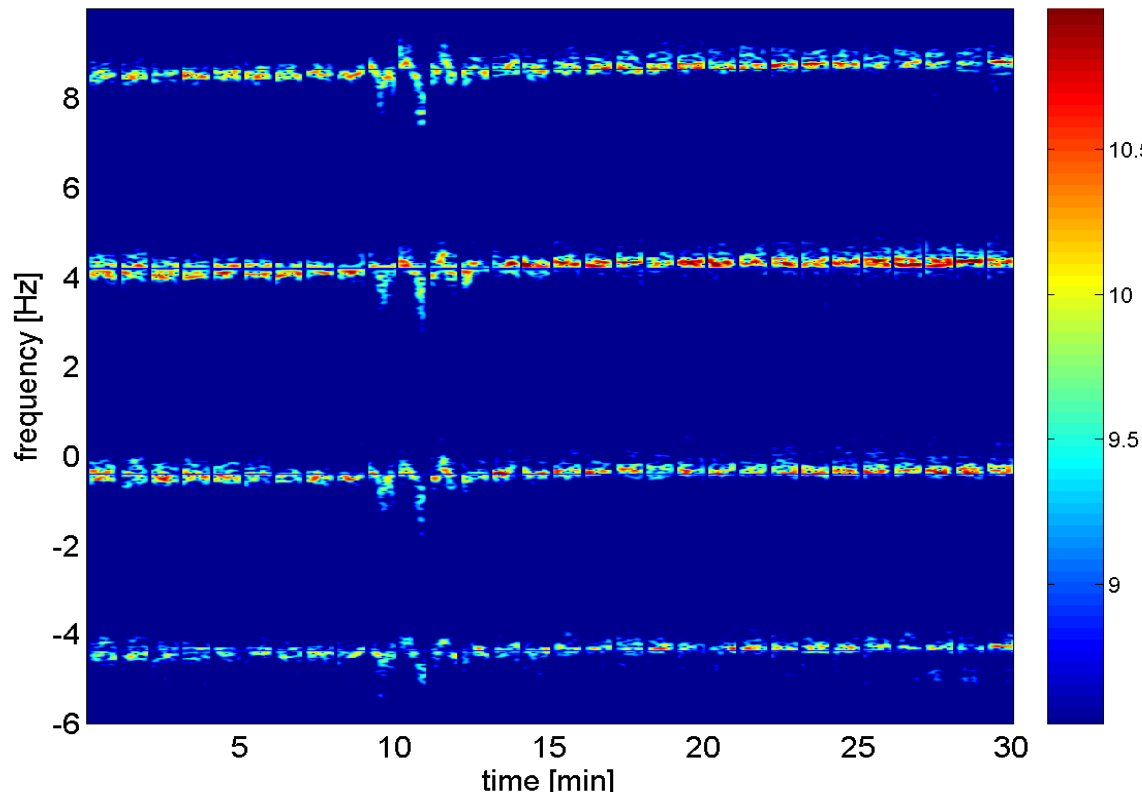
Odrazná vrstva se přibližuje
 $\Delta f_D > 0$

Odrazná vrstva se vzdaluje
 $\Delta f_D < 0$

Obvykle používáme 3 vysílače (Tx1, Tx2, Tx3) a jeden přijímač RX

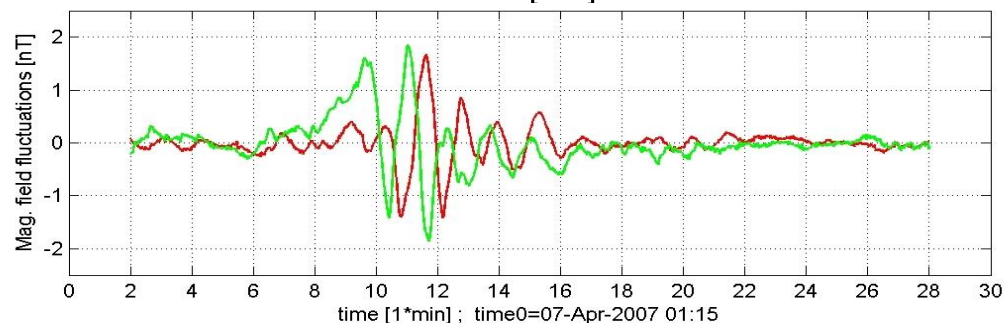
Pohyby ionosféry způsobené pulsacemi geomagnetického pole

time=0 is at 2007/04/07 01:15



Ionosferické fluktuace
zaznamenané
Dopplerovským měřením.

příčina MHD vlny



Geomagnetické fluktuace
zaznamenané na
observatoři v Budkově
Složka východ-západ
Složka sever-jih

Ovlivnění ionosféry zdola

Přílivové vlny a vlny na peridách několika dnů (planetární vlny)

(Interní atmosférické) gravitační vlny
~10 min až několik hodin

(Akusticko-gravitační vlny)

Infrazvukové vlny
(~10 s až 4 min,)

Rychlost a směr neutrálních větrů, složení atmosféry, ...

Atmosférické gravitační vlny,
z rovnic pro tekutiny (plyny) v g

X

gravitační vlny plynoucí
z Obecné teorie relativity

Gravity waves

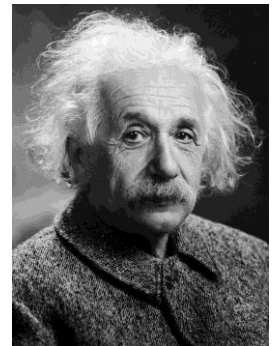
X

Gravitational waves

Hines (1960)

X

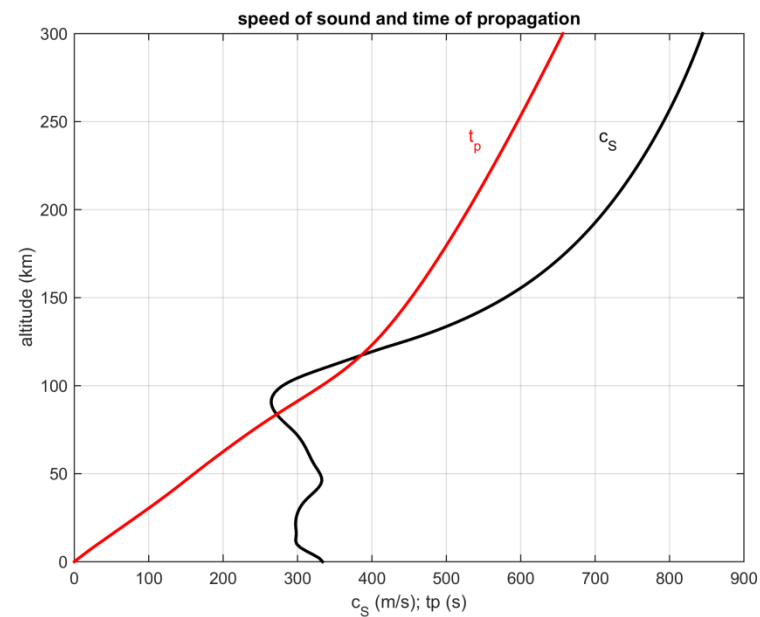
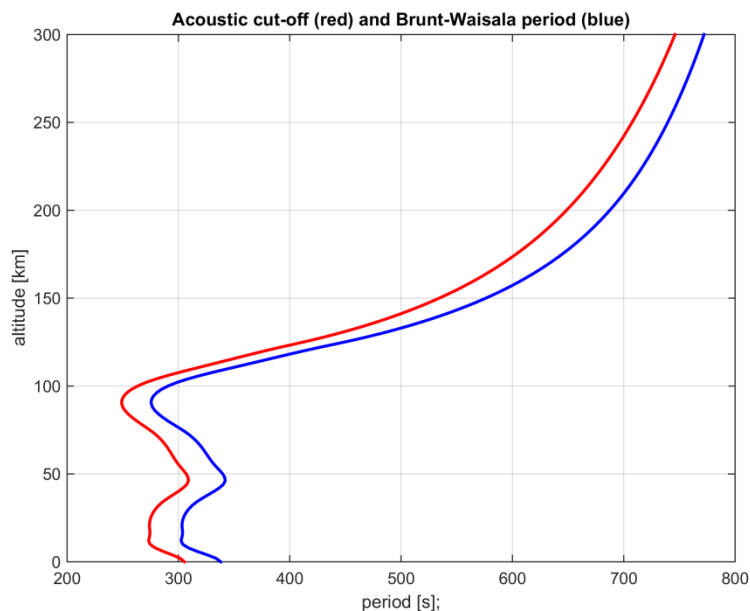
Albert Einstein (1916)



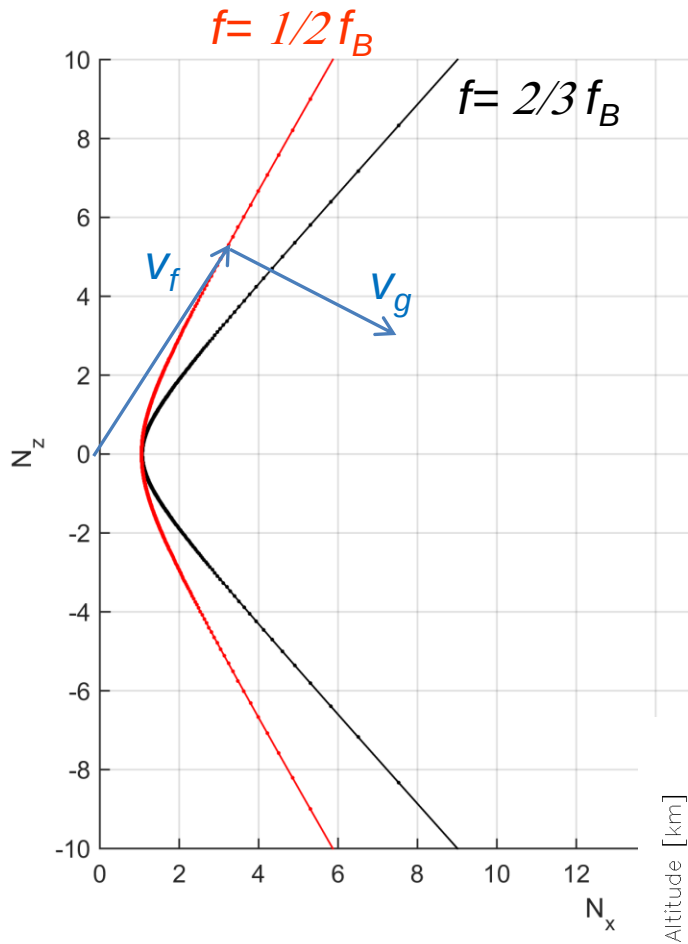
Atmosférické gravitační vlny

V nehomogenní atmosféře, kdy hustota s výškou klesá, $\rho \sim \rho_0 e^{-z/H}$ existují 2 módy pro šíření poruchy.

- Zvukový mód, šíří se nad frekvencí akustického ořezání f_a , podélné vlnění, rychlost nezávisí na směru a kmitočtu (pro $f \gg f_a$)
- Interní gravitační vlny, šíří se pod tzv. Brunt-Waisala frekvencí f_B , přibližně příčné vlnění, rychlost závisí na směru a kmitočtu, směr grupové a fázové rychlosti je odlišný.



Směry šíření gravitačních vln

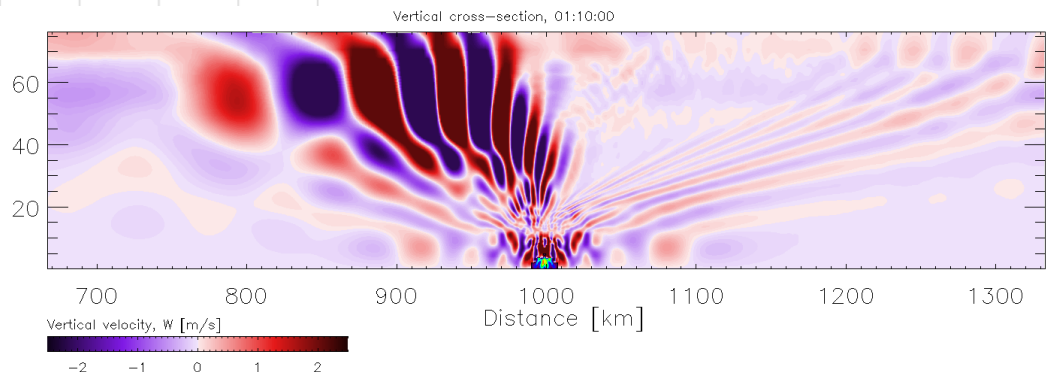


Povrch indexu lomu N pro $f = \text{const}$
(pro zvukové vlny by byl kruh)

N_z vertikální složka, N_x horizontální složka
Index lomu je definován k rychlosti zvuku

Vertikální složka fázové (V_f) a grupové (V_g)
rychlosti má opačné znaménko. Pokud se
energie (grupová rychlost) šíří nahoru,
fázová rychlost směřuje dolů

Dopravní zácpa

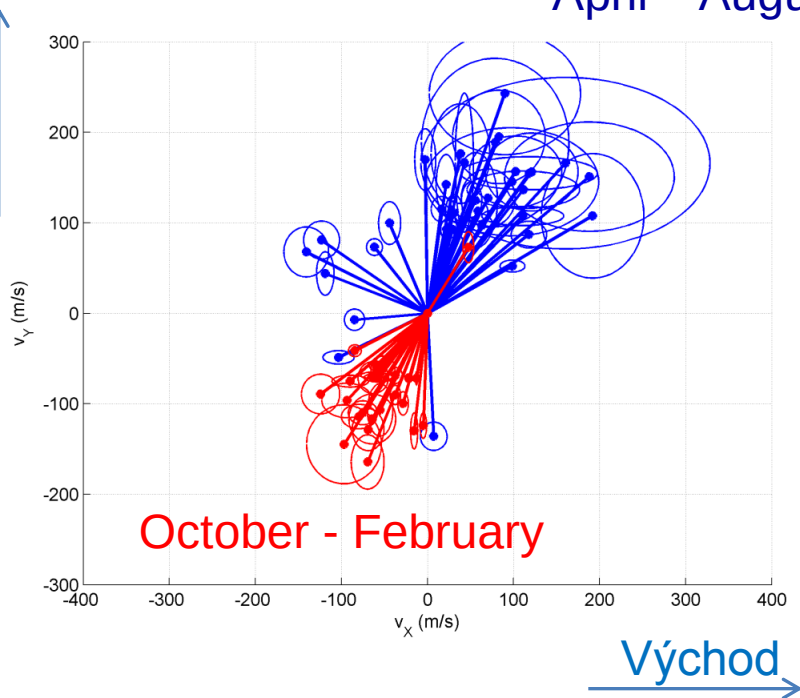


Horizontální rychlosti GW v JAR

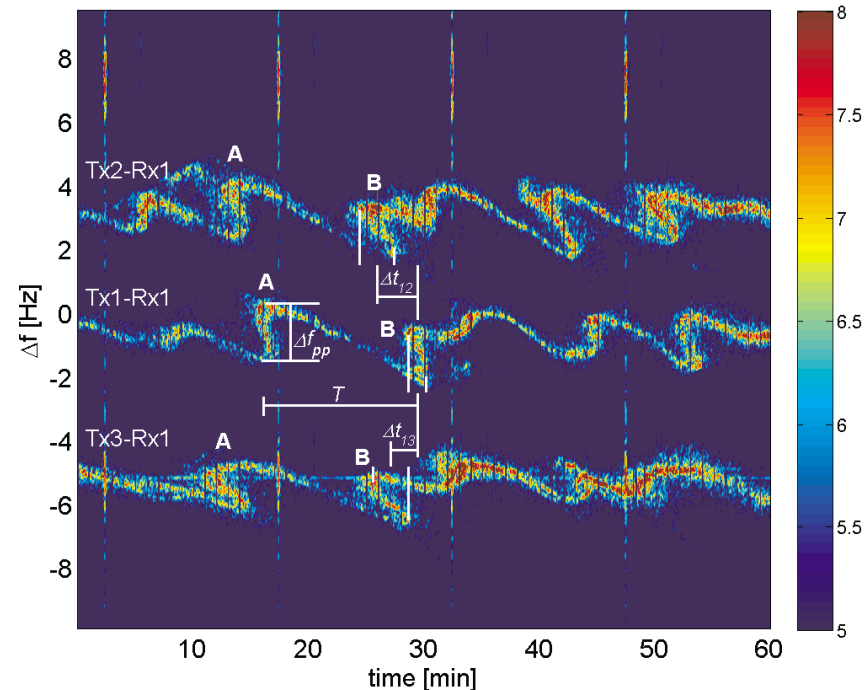
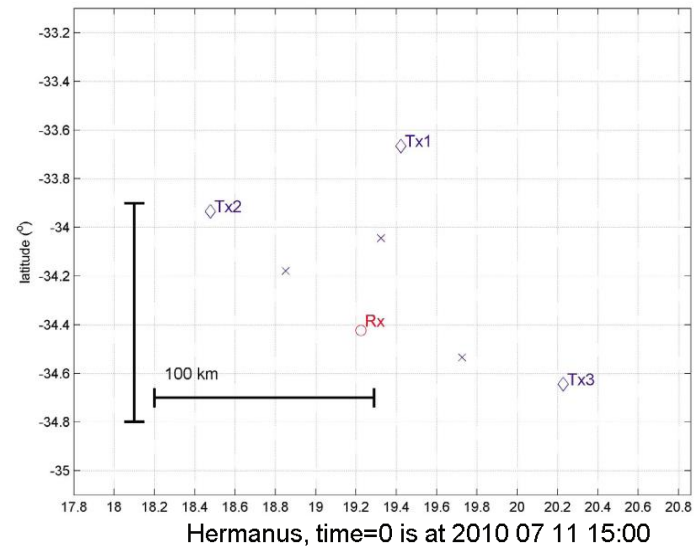
3 odrazné body v různých místech,
ale na stejném kmotočtu (stejná
výška odrazu) umožňují určit pouze
horizontální rychlosti

Sever

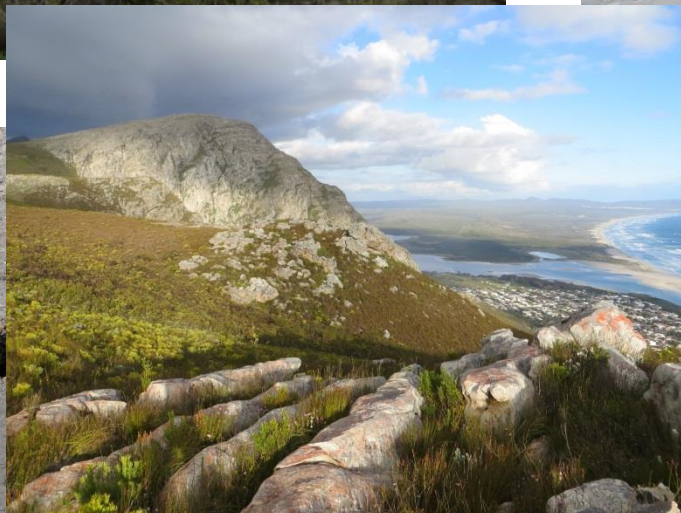
April – August



October - February

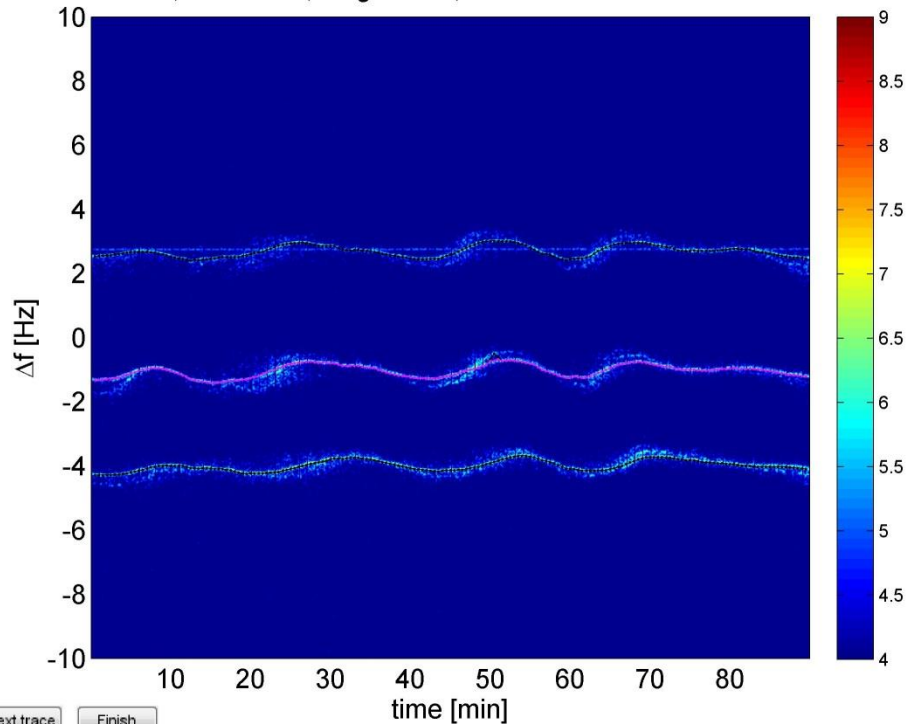


Cíp Jižní Afriky

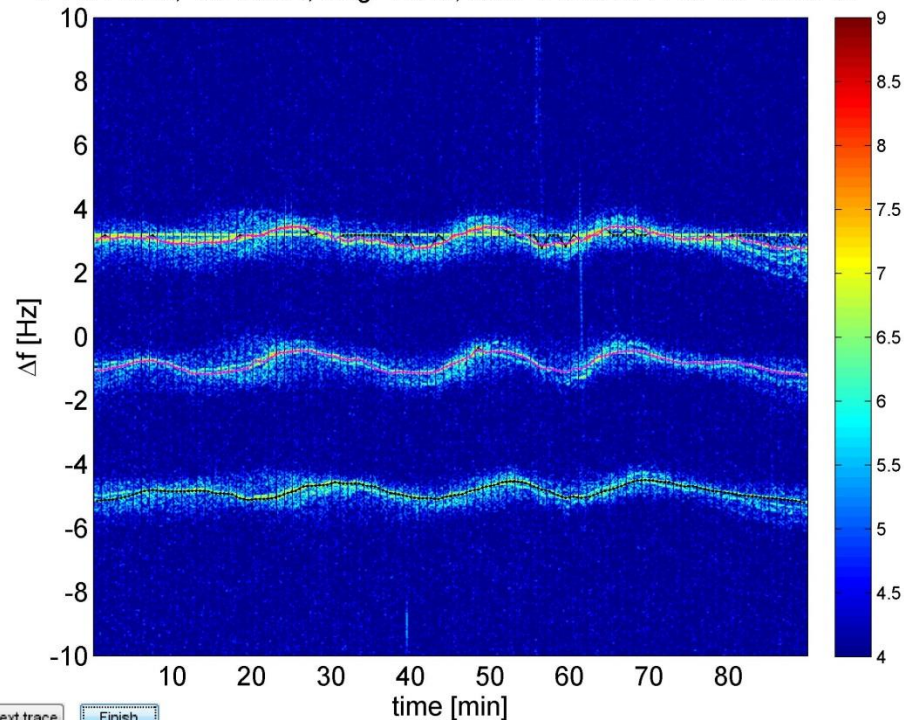


Příklad pozorování GW nad ČR

$f=4.65$ MHz; lat=50.04; long=14.48, time=0 is at 2014 07 13 19:30 UT

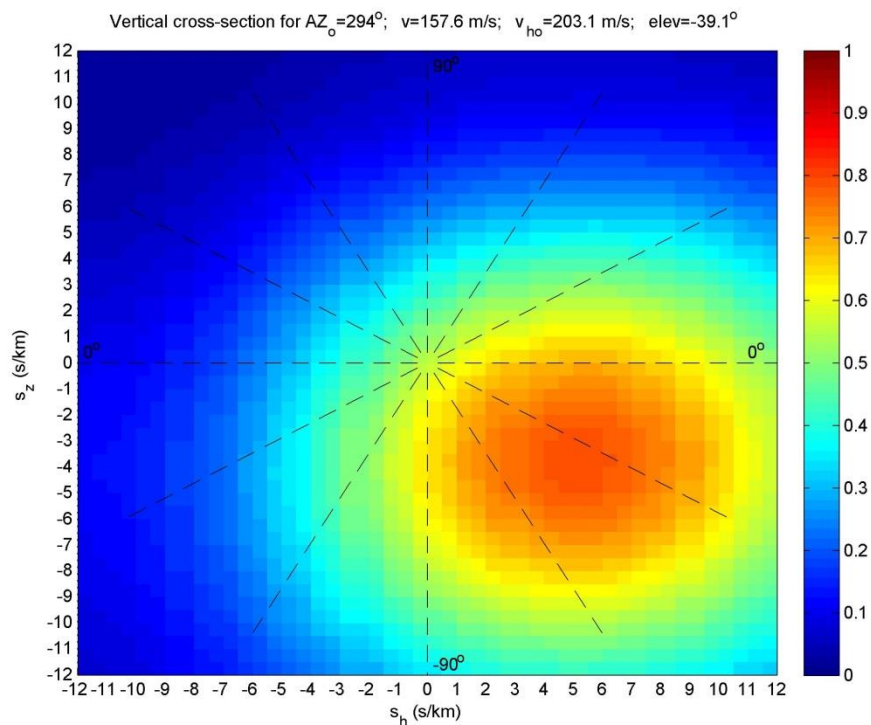


$f=7.04$ MHz; lat=50.04; long=14.48, time=0 is at 2014 07 13 19:30 UT

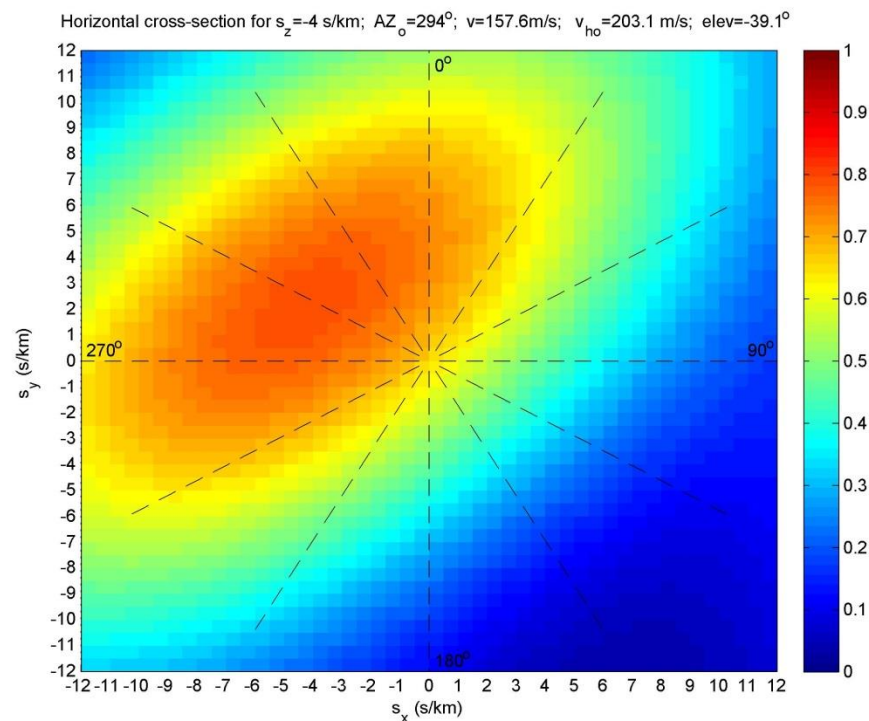


Pozorování na více kmítočtech (více odrazných výšek) a ve více odrazných bodech umožňuje určit rychlost a směr šíření ve 3D

Příklad analýzy GW nad ČR ve 3D



Vertikální řez



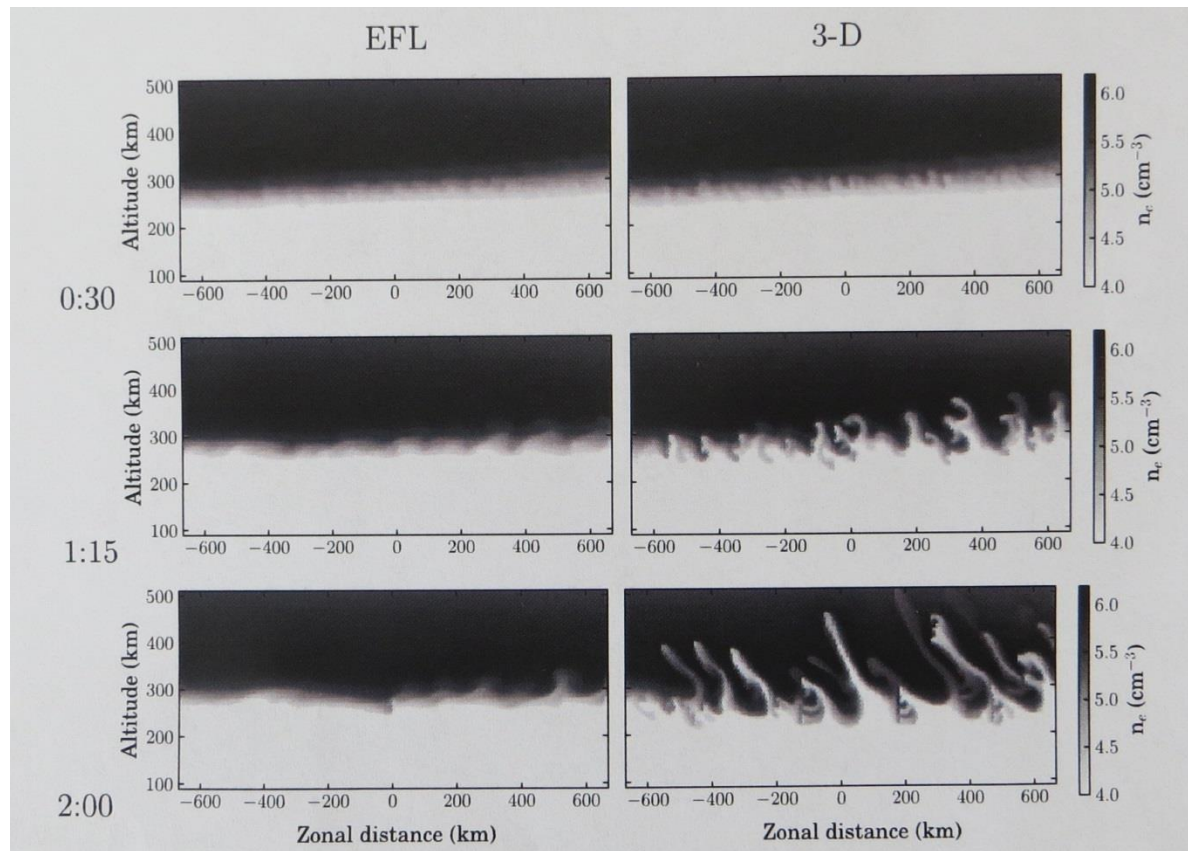
Horizontální řez

pomalosti (převrácené hodnoty rychlostí)

Fázová rychlost (pomalost) směrem dolů, energie směrem nahoru)

Plazmové bubliny v ionosféře

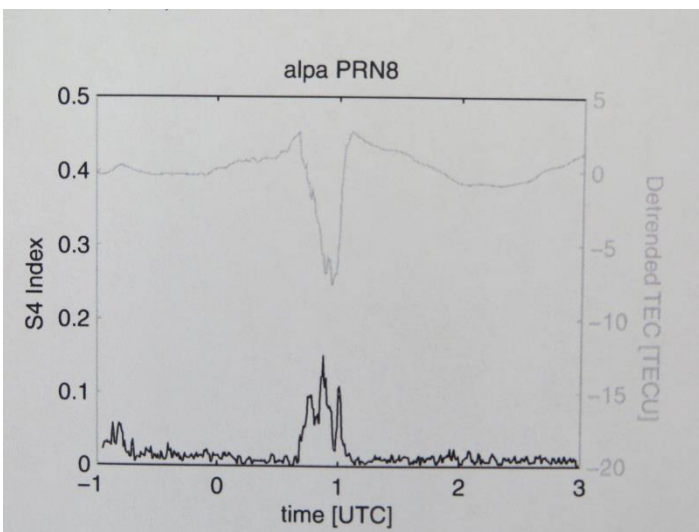
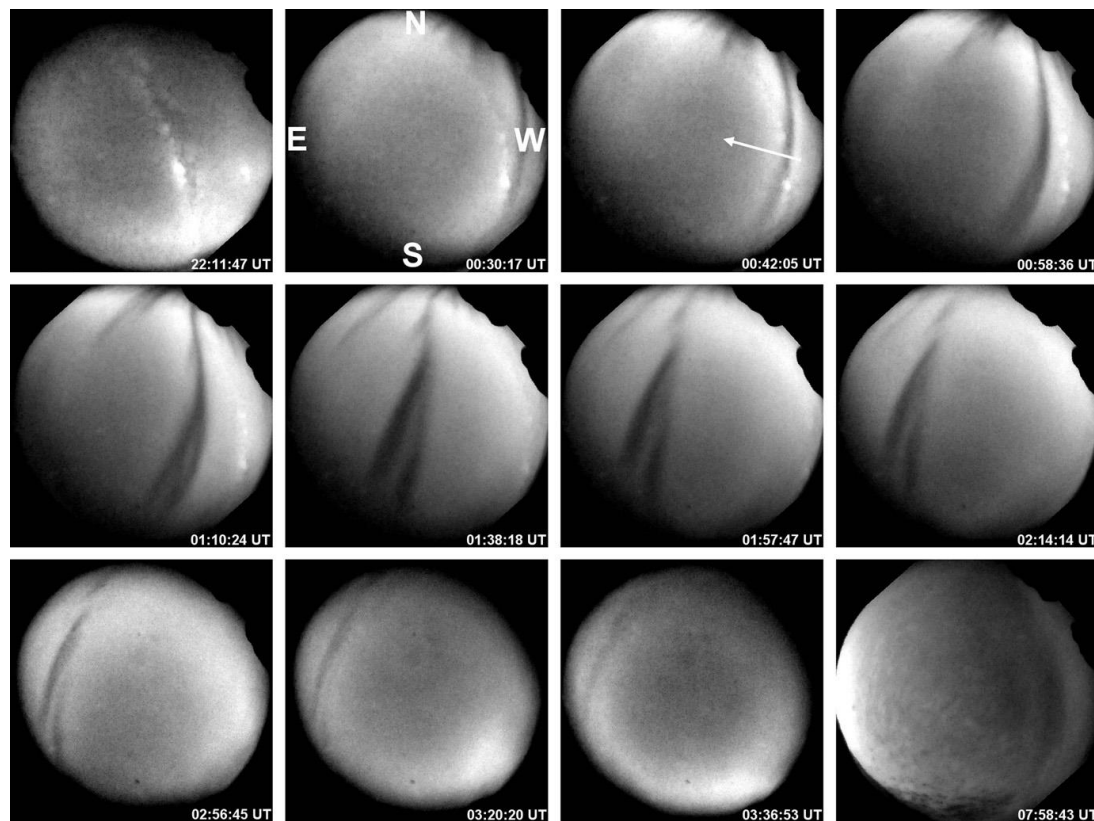
Nestability v ionosférickém plazmatu (místa s nízkou koncentrací) v blízkosti geomagnetického rovníku, po západu slunce. Pravděpodobně důsledek vysokého gradientu a transportu plazmatu směrem vzhůru (E-pole díky dynamu).



Způsobují výrazné kolísání amplitudy a fáze GPS signálu (zhoršení přesnosti, případně i ztrátu zachycení signálu)

Aveiro and Hysell (2012)

Optické a GPS pozorování plazmových bublin

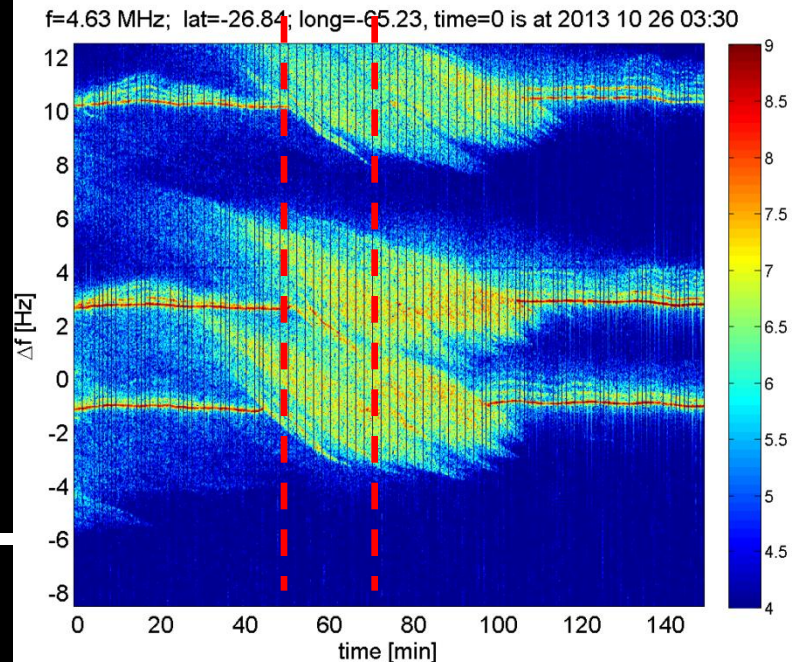
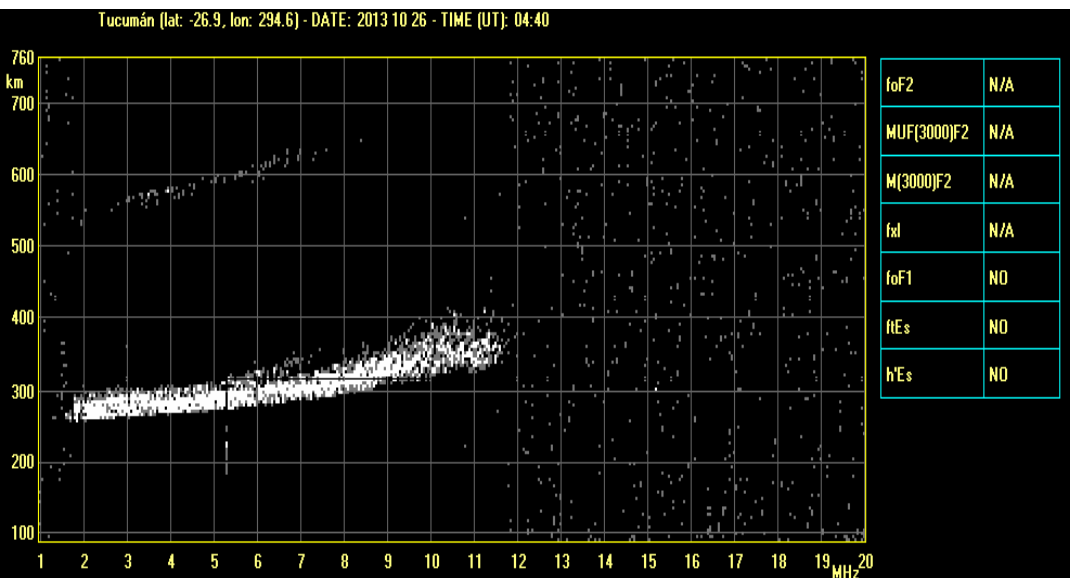
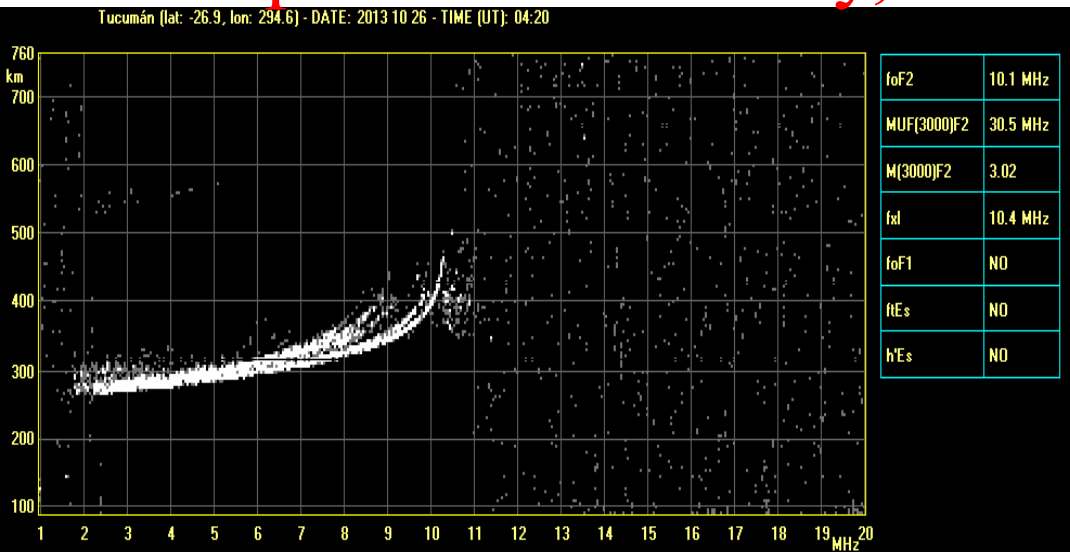


Průběh TECu pro signál z družice PRN8 a scitlační index S4 (ukazuje míru fluktaucí GPS signálu)

Optické pozorování záře (airglow) z výšek 200-300 km
Na vlnové délce 630 nm. Tmavé čáry odpovídají
plazmovým bublinám

Haase et al. (2011)

Nestabilní chování ionosféry „spreads“, plasmové bubliny, Tucumán, Argentina



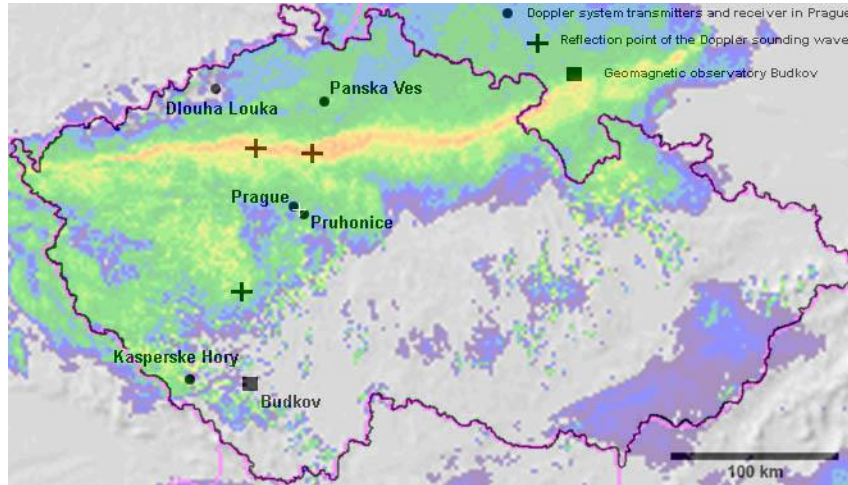
$v_H \sim 83-130$ m/s

AZ=102-125°

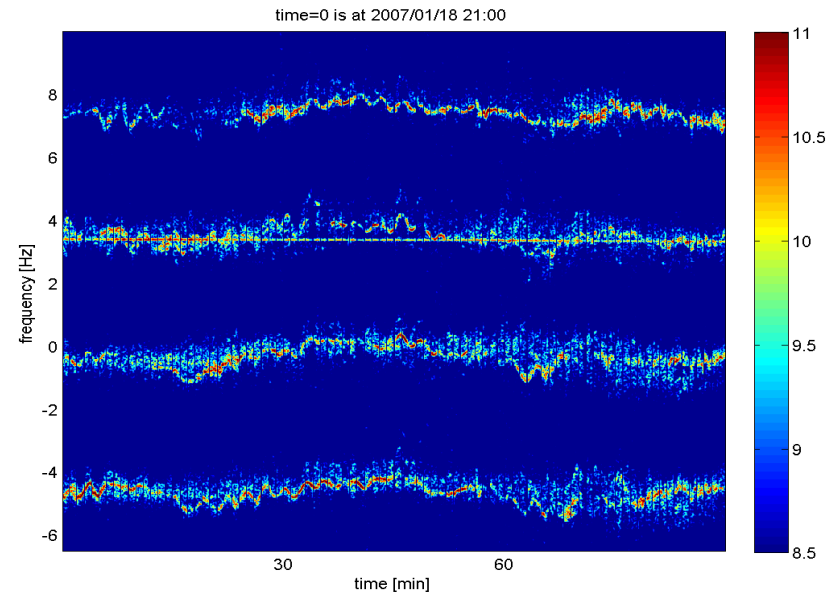
Drobné nehomogenity
způsobují, že odraz signálu je z
mnoha různých míst a
vzdáleností.

Pohyb východním směrem.

Vliv extrémního počasí (1)

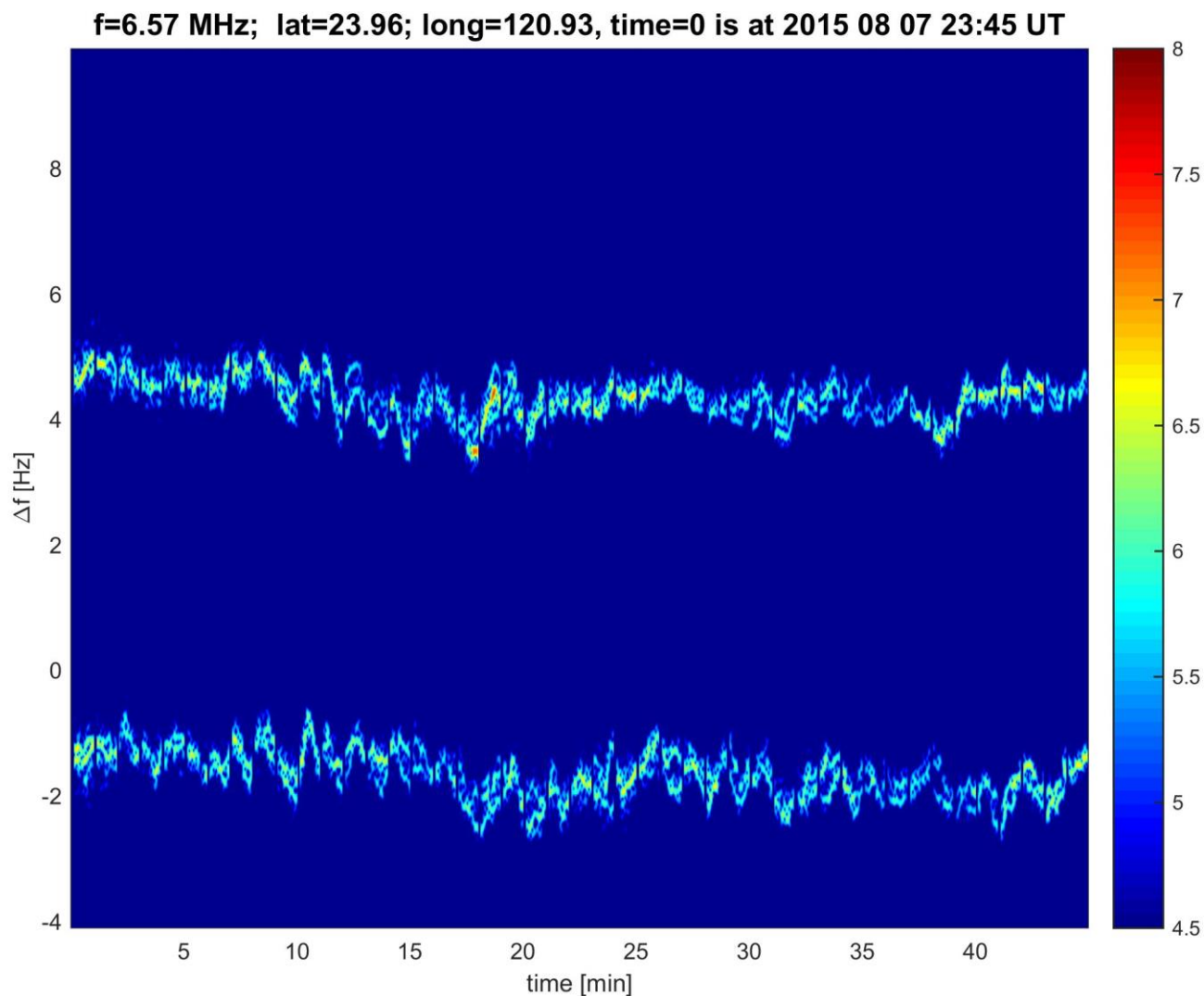


Přechod výrazné studené fronty (orkán Kyrill) přes Čechy 18 ledna 2007 v 21:00 UT podle meteorologického radaru.



Ionosferické fluktuace of periodách ~2.5–4.5 minut (infrazvuk) pozorované ~21:00 – 22:25 UT jsou pravděpodobně troposférického původu (geomagnetické pole klidné). Podobné vlny byly pozorovány při přechodu extrémně silných bouřkových systémů.

Vliv extrémního počasí (2)



Taiwan
7 srpen 2015

Poněkud
chaotické
fluktuační
na
periodách ~2-4
min.
(infrazvuk o
extrémně
dlouhých
periodách)

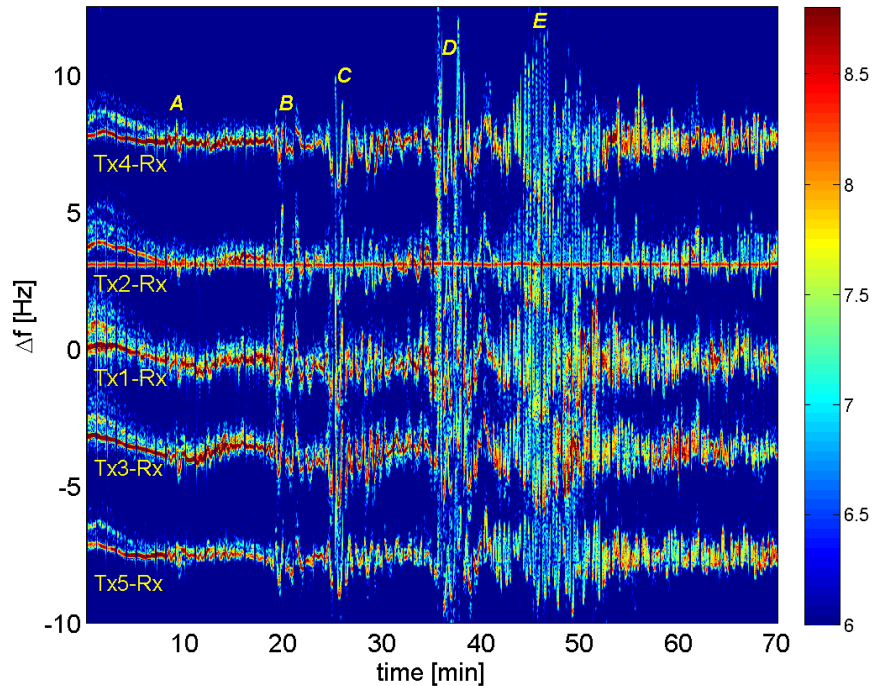
**Typhoon
Soudelor**

Taiwan

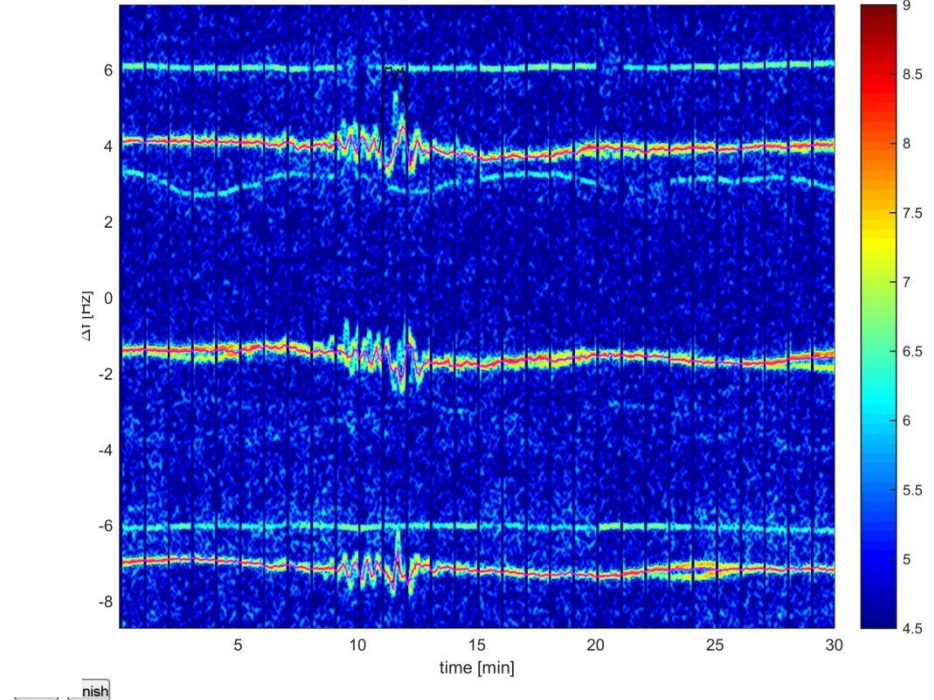


???

$f=3.59$ MHz, time=0 is at 2011 03 11 06:00



$f=6.57$ MHz; lat=23.96; long=120.93, time=0 is at 2015 04 25 06:30 UT



Česká Republika, 11. 3. 2011

Japonské zemětřesení

Vzdálenost od epicentra ~9000 km

Periody ~20 – 40 s, infrazvuk

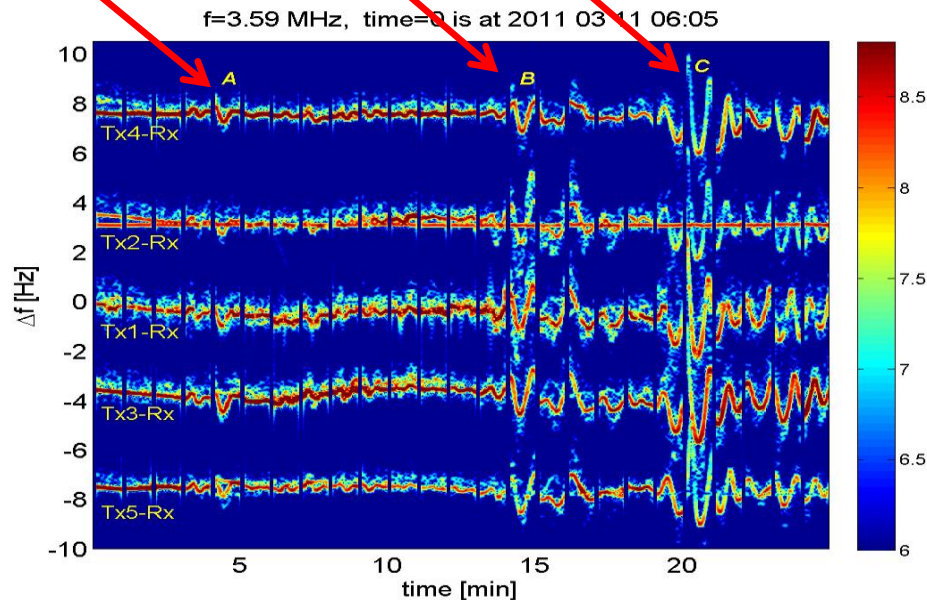
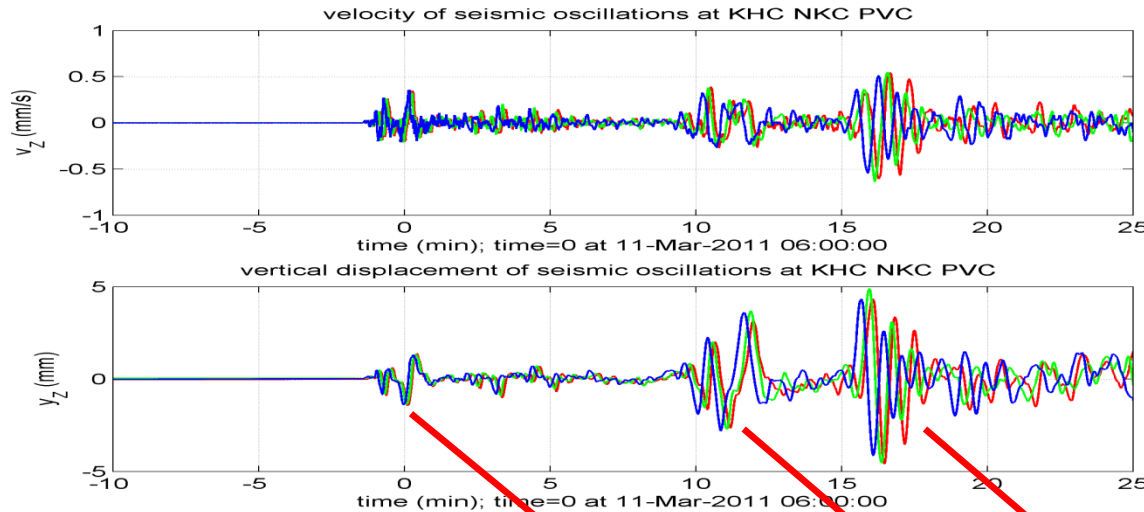
Taiwan, 25. 4. 2015

Nepálské zemětřesení

Vzdálenost od epicentra ~3700 km

Vliv vln ze zdola na ionosféru

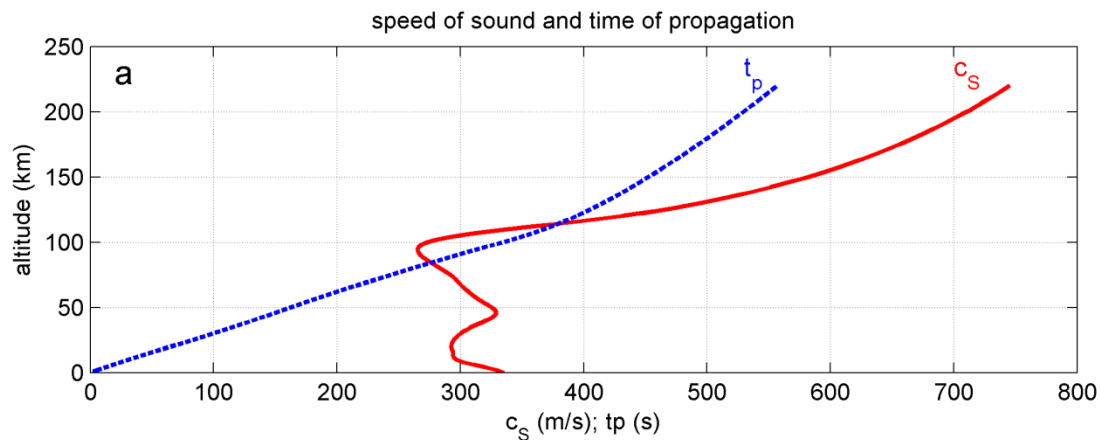
Japonské zemětřesení 11.3.2011 nad ČR



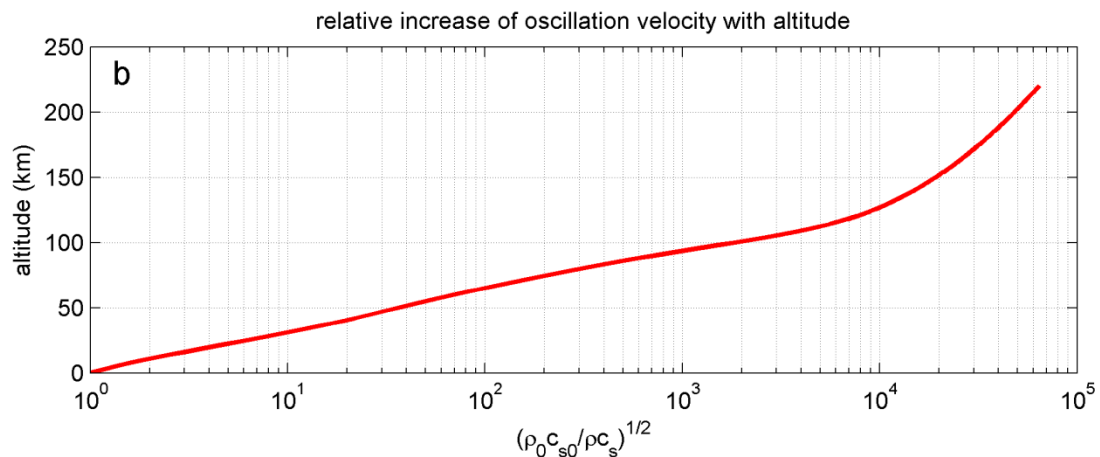
Odpovídající vlny byly v ionosféře (cca 215 km vysoko) pozorovány asi 9 minut po příchodu seismické vlny.

To velmi dobře odpovídá spočtené době pro vertikální šíření infrazvuku.

Vertikální šíření infrazvuku



Doba šíření
Rychlost šíření infrazvuku

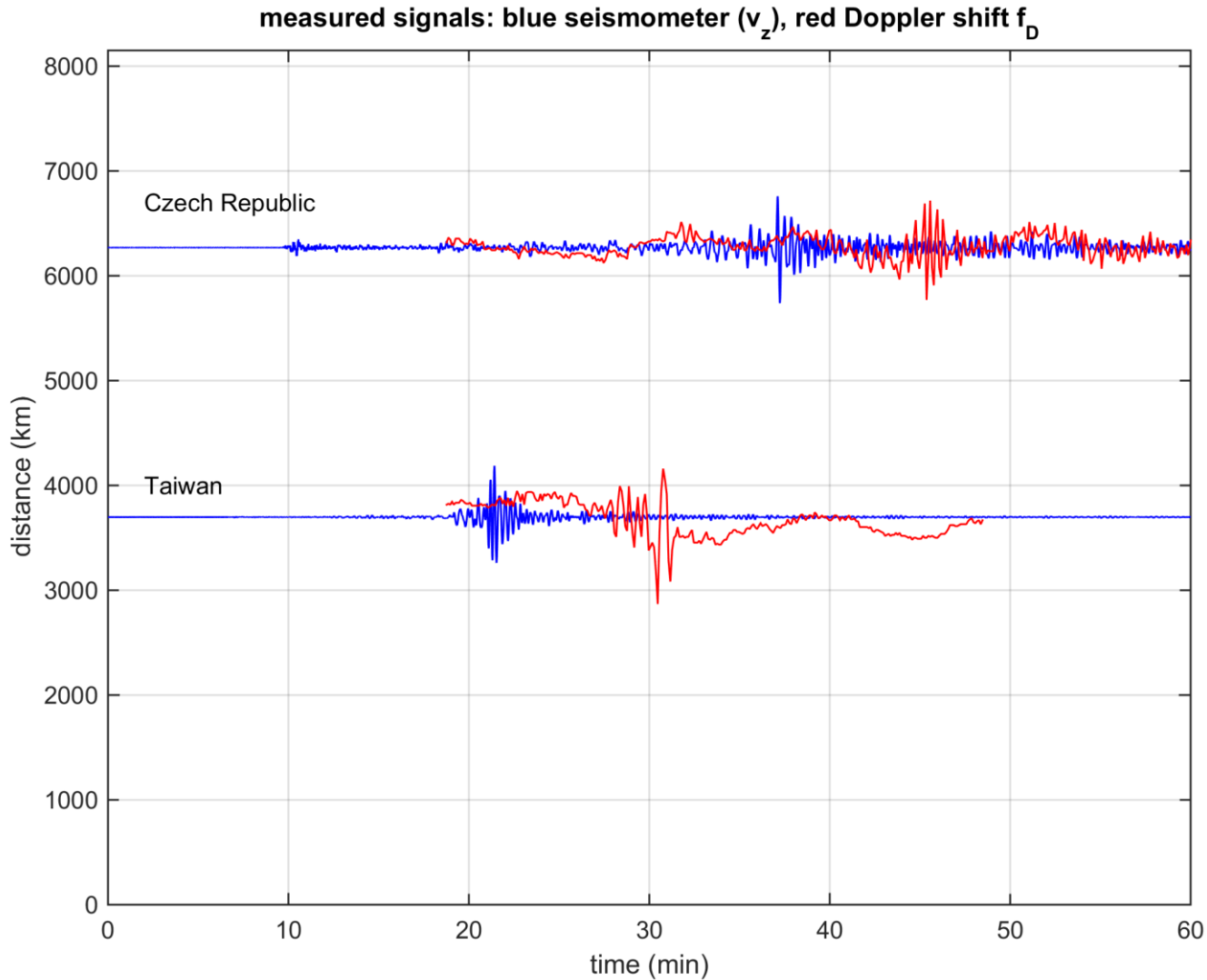


Nárůst amplitudy vlny
(oscilační rychlosti) s
výškou pro netlumenou
rovinou vlnu (za
předpokladu zachování
energetického toku)

Na Zemi byly
infrazvukové vlny pod
hranicí šumu

Ionosférické poruchy od Nepálského zemětřesení

Normalizované signály (ne reálné velikosti)



16 září, 2015 Illapel, Chile, M 8.3 zemětřesení; pozorování v Tucumán, Argentina

~800 km od epicentra

Tvary signálů v_Z and f_D se výrazně liší.

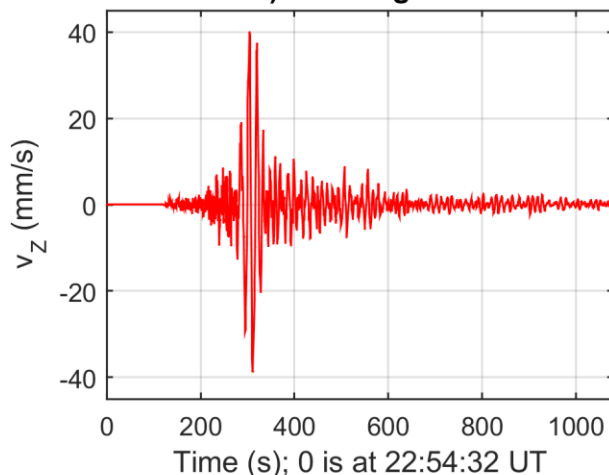
Výška odrazu
pro $f=4.63$ MHz
~190 km

Rychlosti částic vzduchu
w mají tvar N-pulsu

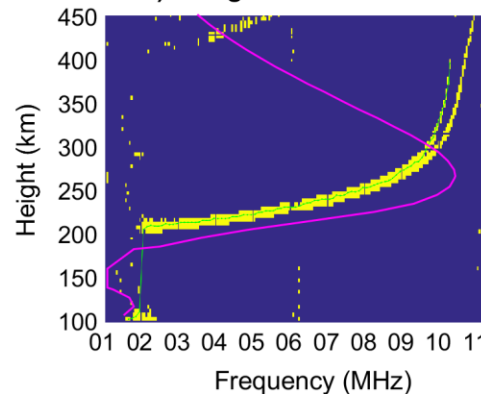
Velké perturbace,
 $v_Z=w$ na zemi ->
nonlinear phenomena

**Time=0 počátek
zemětřesení**

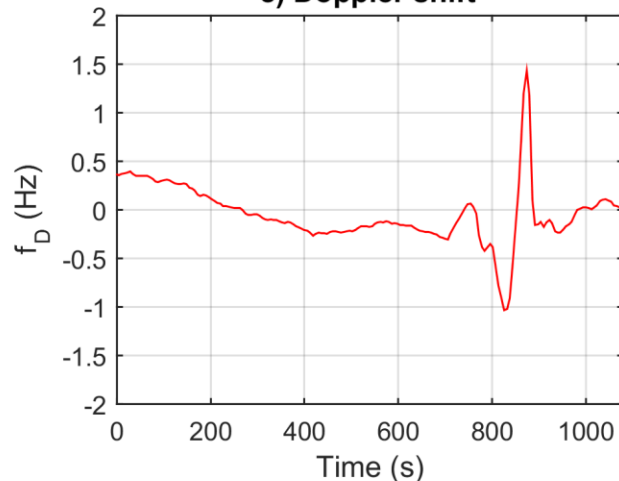
a) Seismogram



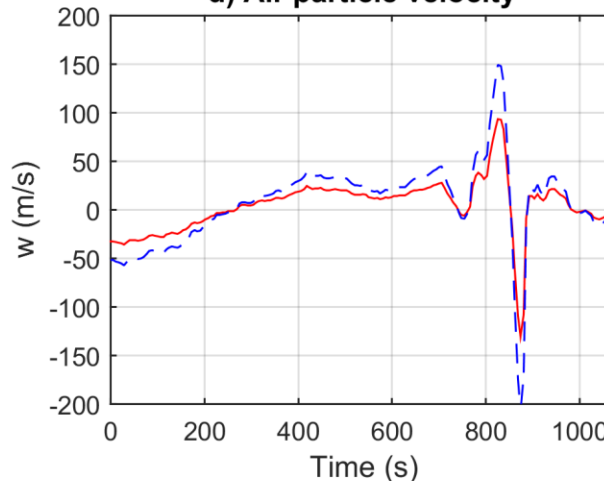
b) Ionogram at 23:00 UT



c) Doppler shift



d) Air particle velocity



Numerické řešení nelineárního vertikálního šíření ve viskozní (ztráty) atmosféře v 1D

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho_0 + \rho_1)}{\partial z} w - \frac{\partial w}{\partial z}(\rho_0 + \rho_1),$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial w}{\partial z} w - \frac{R(T_0 + T_1)}{(\rho_0 + \rho_1)} \frac{\partial(\rho_0 + \rho_1)}{\partial z} - R \frac{\partial(T_0 + T_1)}{\partial z} - g + \frac{4}{3} \frac{\mu}{(\rho_0 + \rho_1)} \frac{\partial^2 w}{\partial z^2},$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = -\frac{\partial(T_0 + T_1)}{\partial z} w - (\gamma - 1)(T_0 + T_1) \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\gamma \mu}{\text{Pr}(\rho_0 + \rho_1)} \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2},$$

Rovnice kontinuity
(zachování hmoty)

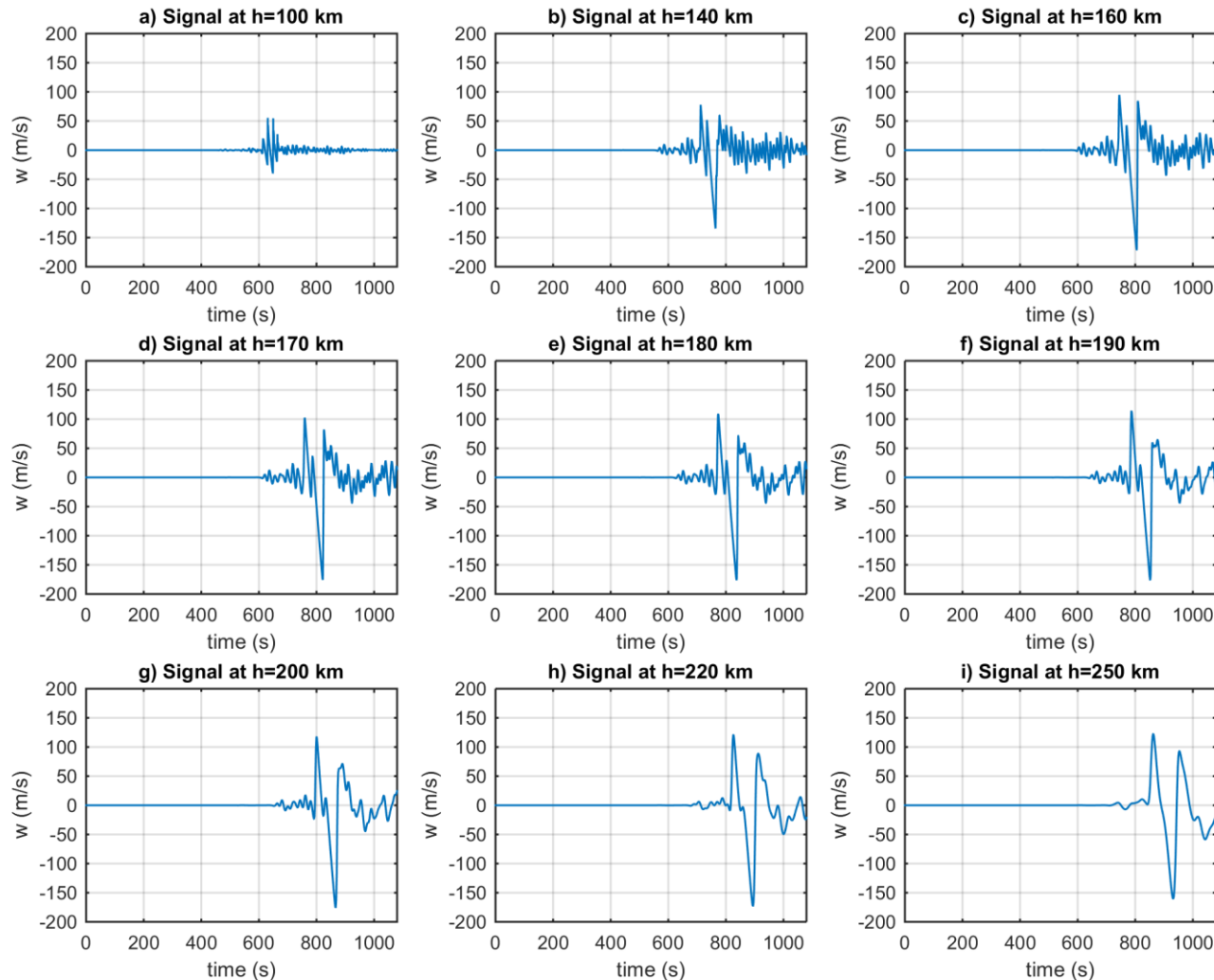
Pohybová rovnice
(Navier-Stokes equation)

Rovnice pro teplo

ρ_0 and T_0 is the unperturbed air density and temperature, respectively, obtained by the NRLMSISE-00 model for location and time of measurement, ρ_1 is the density perturbation, T_1 is the temperature perturbation, w is the vertical component of air particle velocity (unperturbed value is assumed zero), R is the specific gas constant, g is the gravitational acceleration, μ is the molecular viscosity, γ is the adiabatic exponent and Pr is the Prandtl number that relates the molecular viscosity with the thermal conductivity; Pr is approximately 0.7 for the air.

Numerické řešení, výsledek

pro $w=v_z$ v místě Dopplervského pozorování

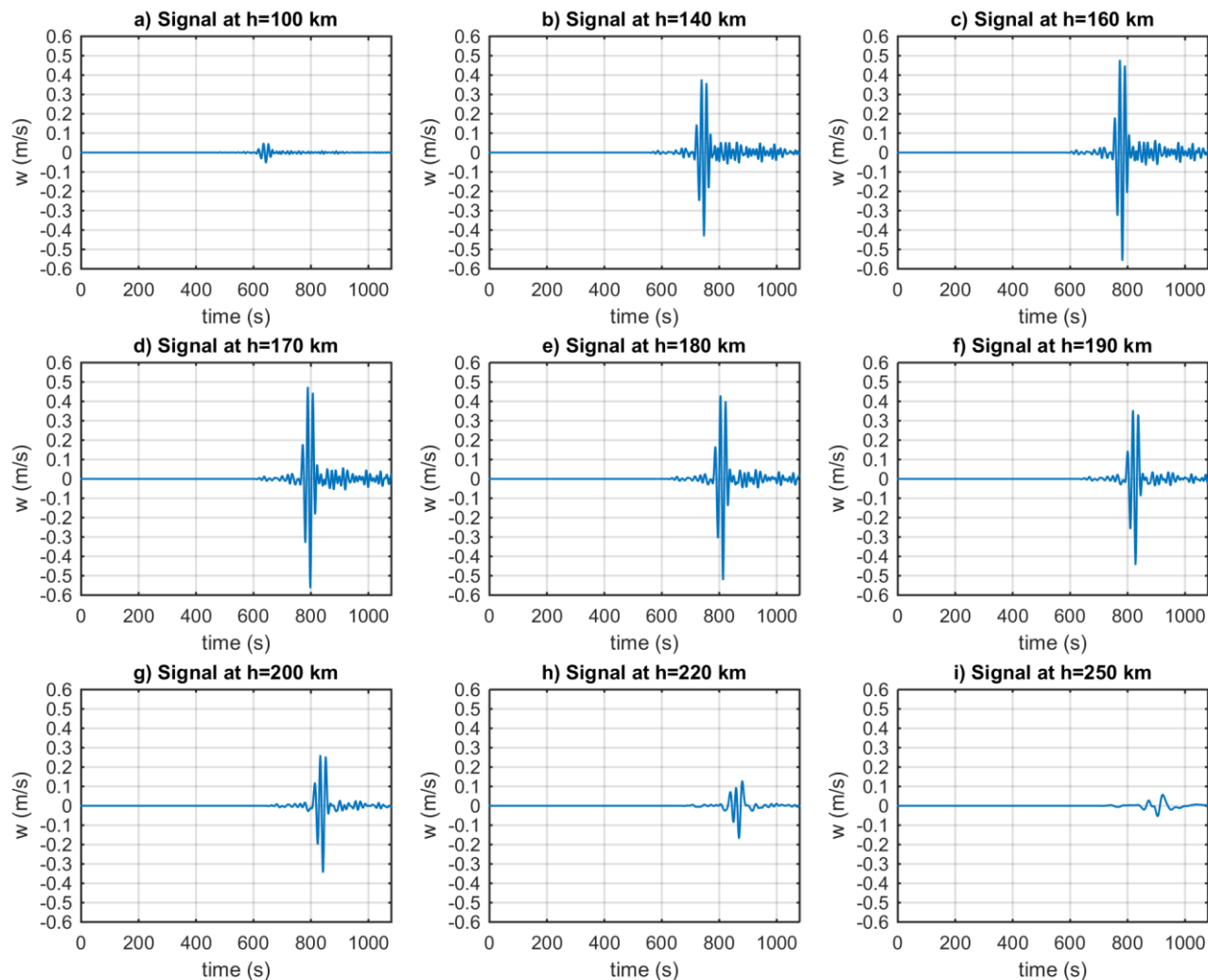


Tvoří se N-pulz

Dominantní
frekvence je
nízká, vlna se
může šířit do
poměrně
velkých výšek

Numerické řešení, výsledek

Stejně jako předtím ale pro $w=v_z/1000$ (Lineární případ)



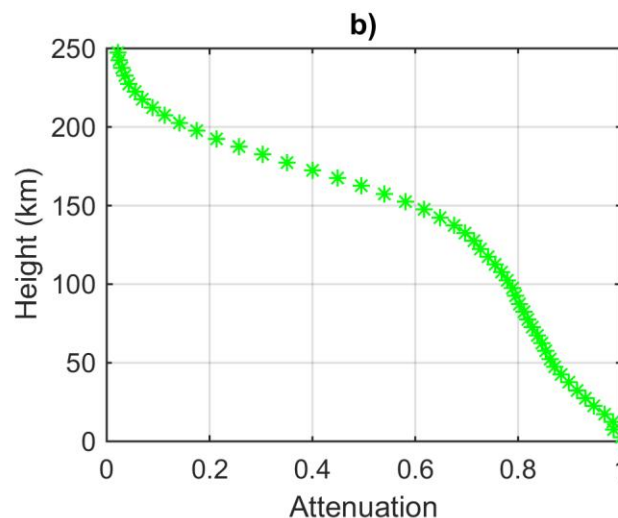
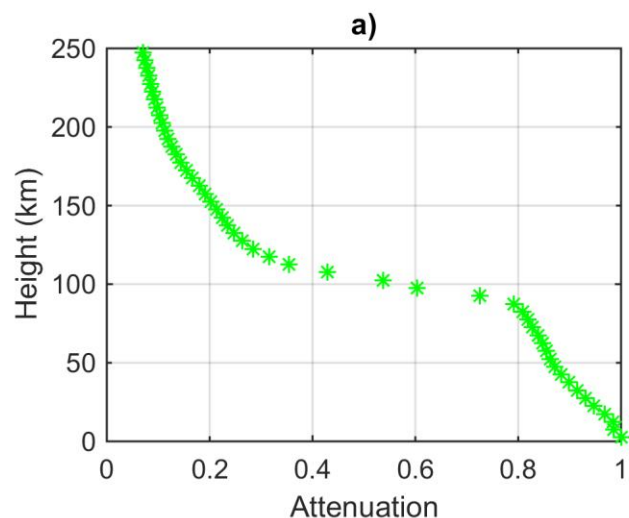
N-pulz se
netvoří

Signál si dlouho
zachovává svůj
původní tvar

Jiný způsob porovnání lineárního a nelineárního řešení

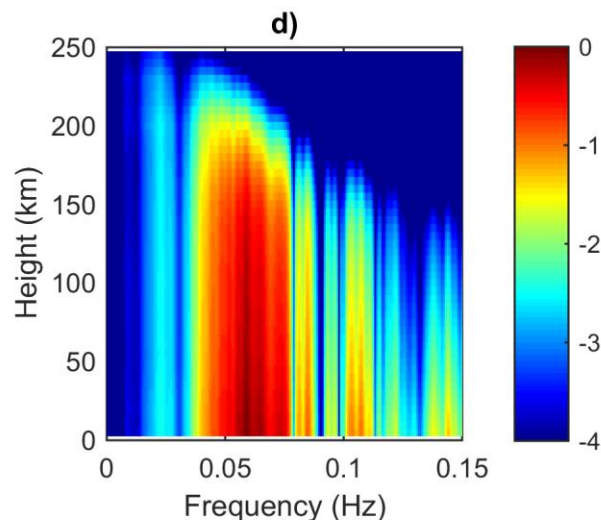
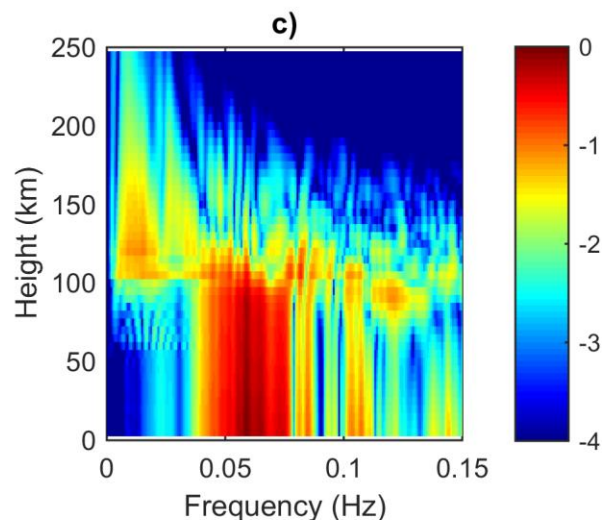
$w=v_Z$ (Nelineární případ)

$w=v_Z/1000$ (Lineární případ)

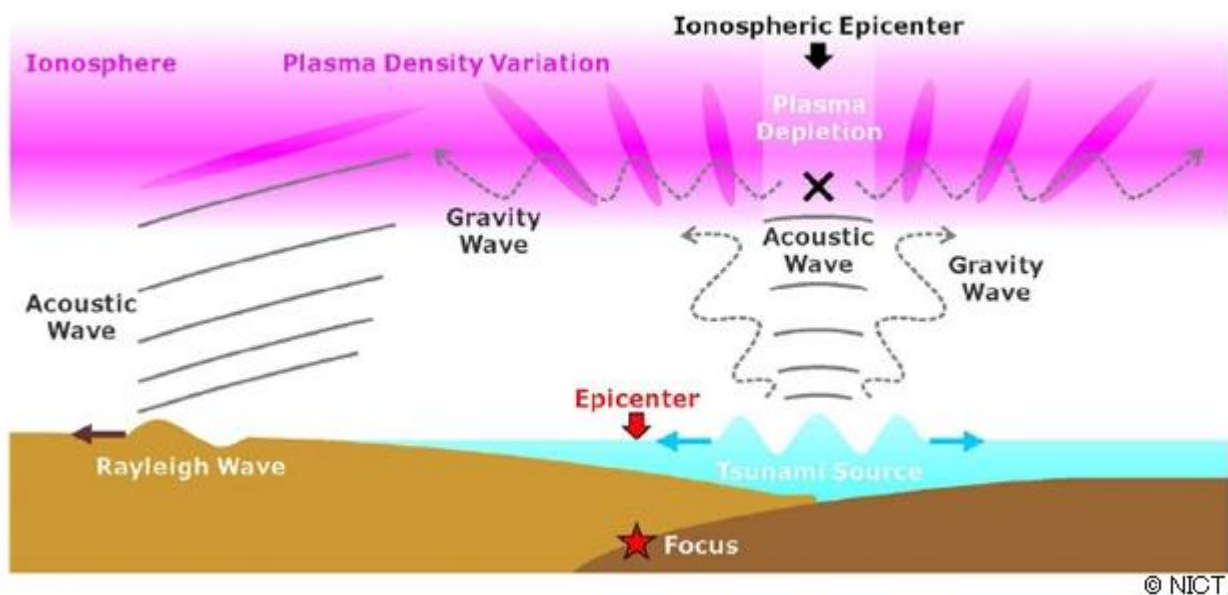


Útlum je normován
k počátečnímu
signálu (na zemi)
pro každý případ
zvlášť

Pozor absolutní
velikosti jsou pro
oba případy
rozdílné



Možné využití, včasné varování před tsunami ???



Tsunami se na volném moři šíří rychlostí ~ 200 m/s. Infrazvuk se šíří rychlostí ~ 340 m/s. Pokud by epicentrum bylo dostatečně vzdáleno od pobřeží, případné příznaky (v ionosféře) nad pobřežím by byly pozorovány před příchodem tsunami. Lze je skutečně identifikovat? ... Některé studie naznačují, že možná ano...Tsunami ale generuje hlavně gravitační vlny, problém spolehlivé analýzy v reálném čase...

Tucumán, SZ Argentina



?



Děkuji za pozornost!

Lze pozorování ionosféry využít pro předpověď zemětřesení?

Existují studie, že nad místy budoucích epicenter zemětřesení dochází k anomáliím v ionosféře několik hodin až dní před zemětřesením.

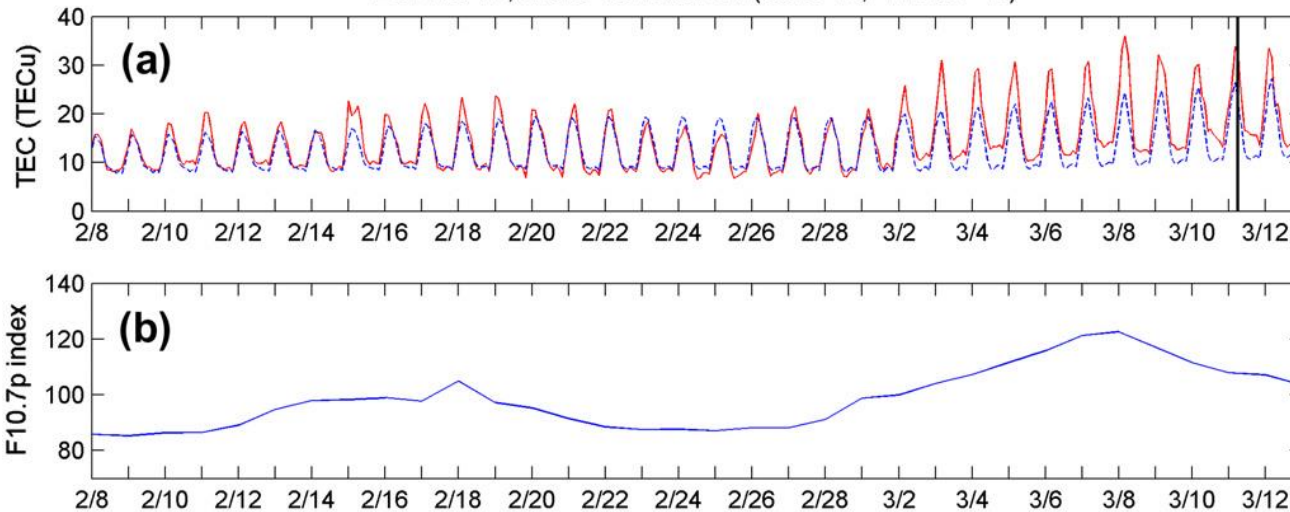
Doposud nebylo jednoznačně vyvráceno ani potvrzeno.

družice DEMETER

Měření TECu

Příklady měření TECu

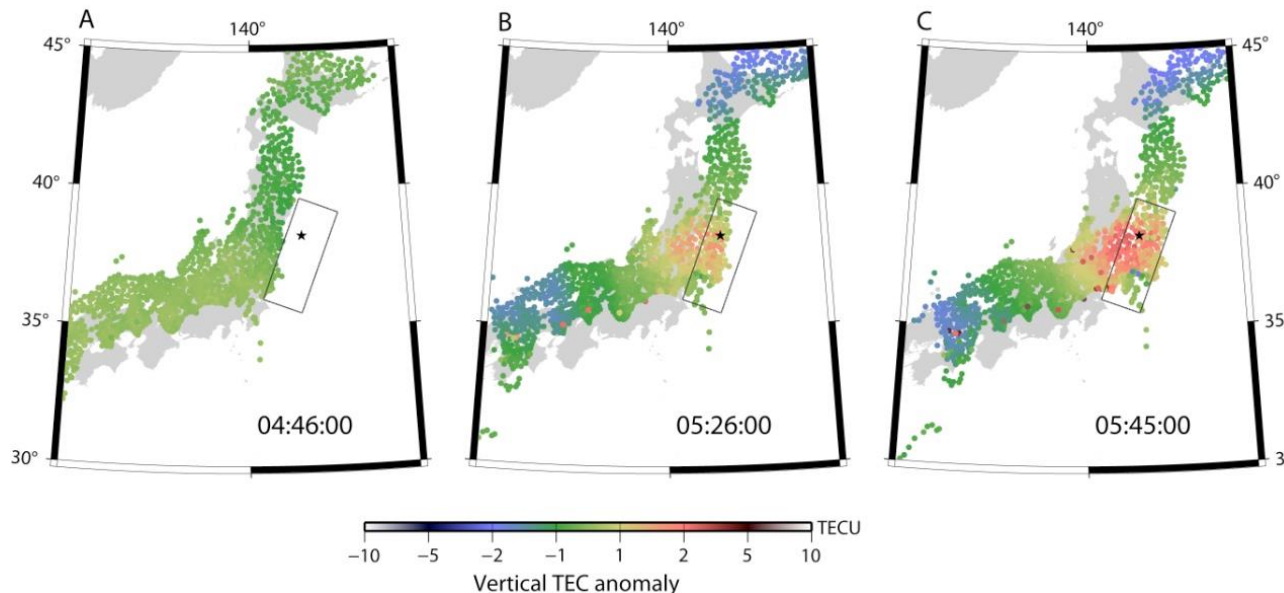
2011/3/11, M9.0 Tohoku-Oki(38.3° N, 142.37° E)



Le et al. (2013)
TEC a 30 denní medián

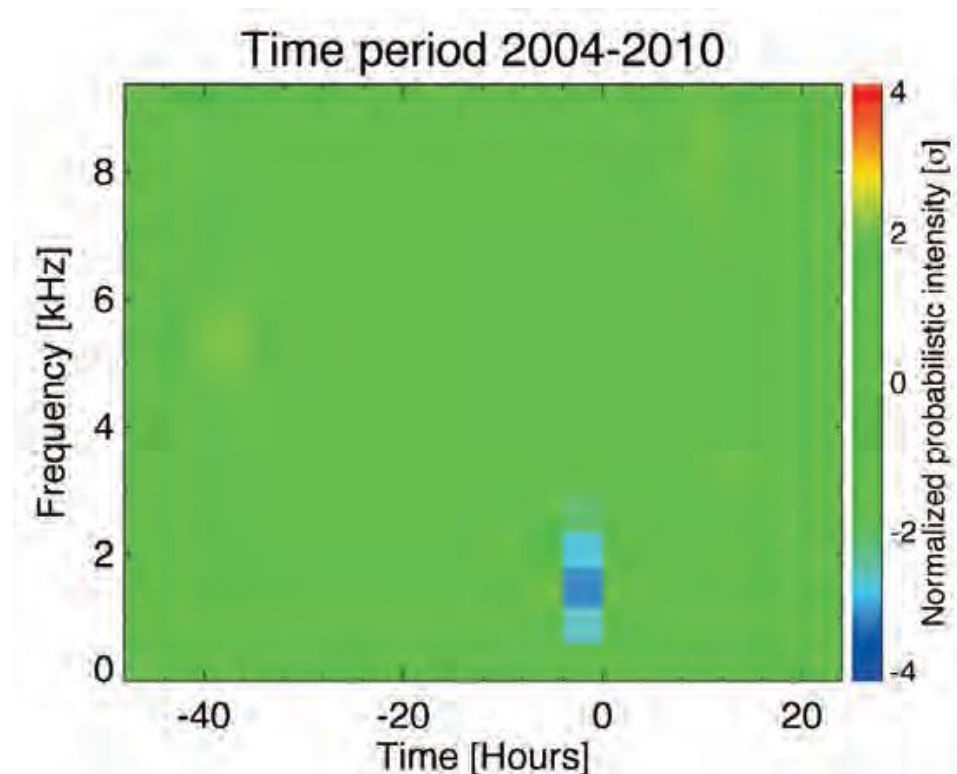
Anomálie 8. březen
Slunce nebo precursor?

Index Sluneční aktivity



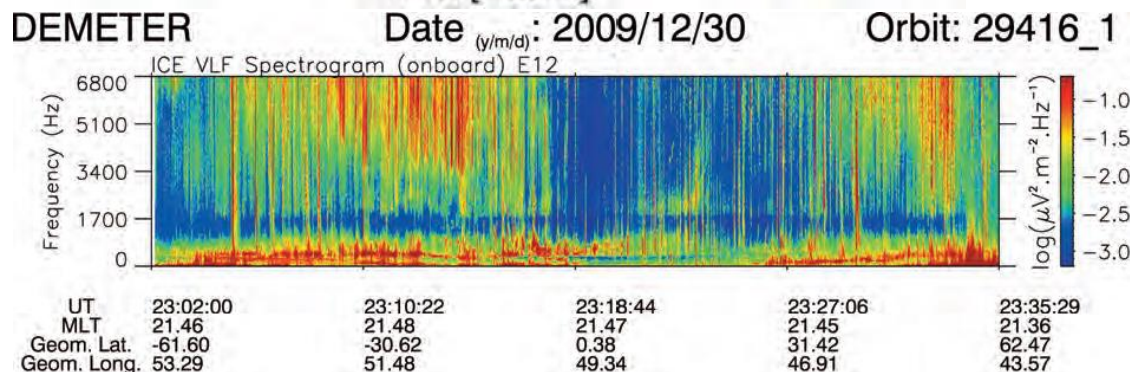
Heki (2011)
Vertikální TEC
1 hod (A),
20 minut (B) a
1 minutu (C)
před zemětřesením
(pro jiné družice trochu
posunuté..)

Příklad DEMETER



Statistická studie *Píša et al.* (2012)
Pokles intenzity elektrické složky
vln okolo 1.7 kHz před začátky
zemětřesení $M > 5$, $d < 40$ km
vzdálených do 440 km. Noční data!

Vztaženo, ale k nejistotě
očekávané (průměrné) hodnoty.
Rozptyl dat je mnohem vyšší. Nelze
využít pro věrohodnou předpověď.



Pravděpodobně souvisí
s posunem kmitočtu
základního módu
ionosféra – povrch
Země, tedy výšky
spodku ionosféry.

Hypotézy

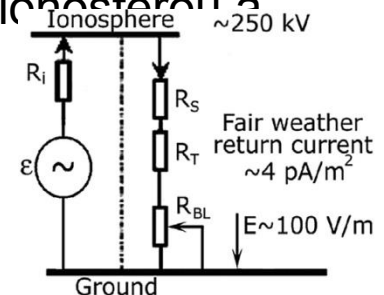
Vyberme alespoň některé...

Vliv elektrického pole

Při přípravě zemětřesení vzrůstá tlak a objevuje se elektrické pole a proud (něco jako piezoeфекt).

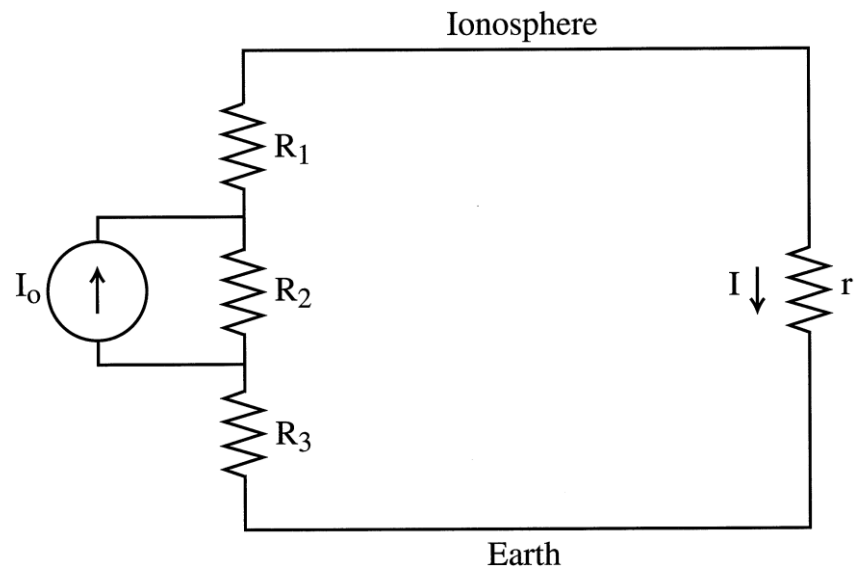
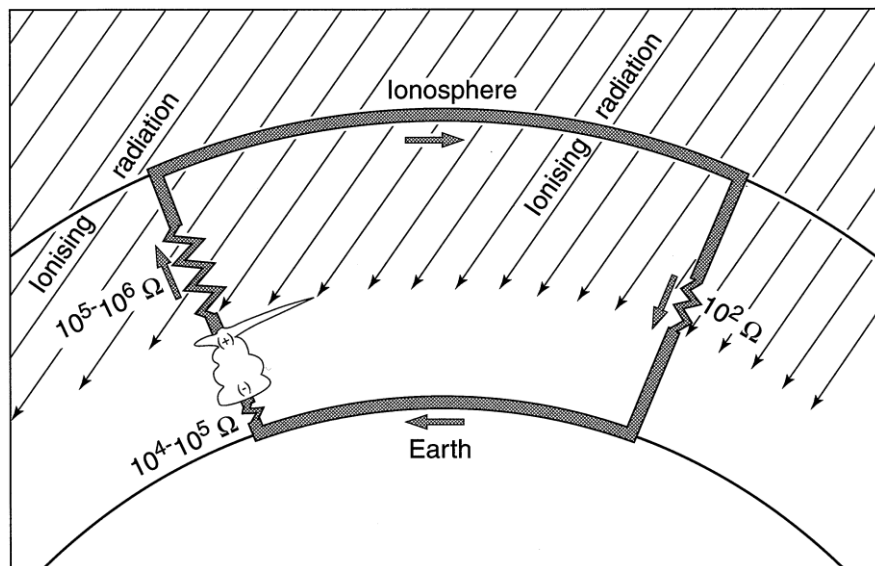
Pokud by se toto pole „přeneslo“ do ionosféry, a bylo by orientováno východním směrem, $E \times B$ drift by zvedl plazma do větších výšek, kde je menší rekombinace (fungovalo by hlavně v nízkých šířkách).

Únik radonu, změna Globálního elektrického obvodu, ve spodní části atmosféry se formují těžké ionty, které snižují vodivost – roste napětí mezi ionosférou a povrchem Země – nárůst TECu ?



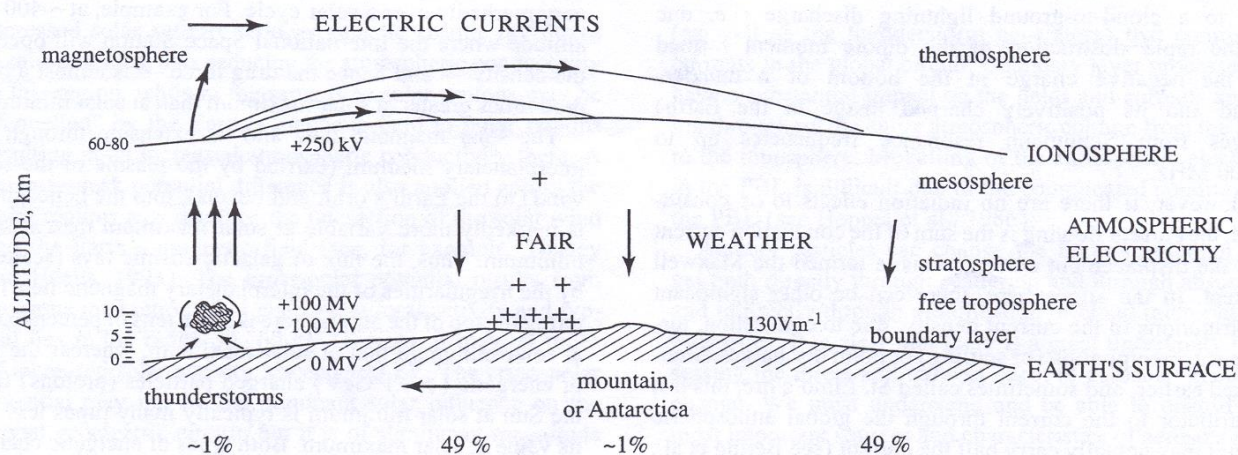
Thermální vyzařování, a mnohé další spekulace...

Globální elektrický obvod



M.J. Rycroft et al. | *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 62 (2000) 1563–1576

1567



Bouře udržují napětí
~250 kV mezi
ionosférou a zemí.

V oblastech pěkného
počasí teče proud
~2 pA/m² směrem k
zemí