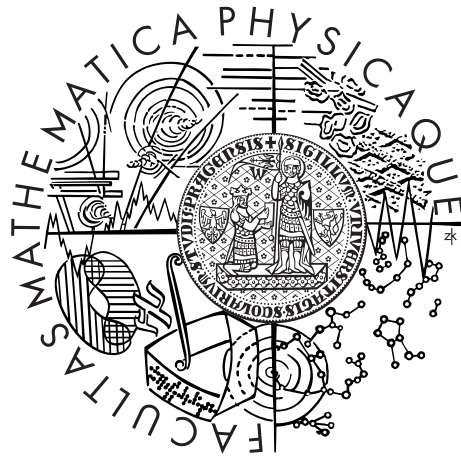


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta



Bc. Jan Záhlava

Hvizdové vlny pozorované družicí DÉMETER

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Praha 2016

Název práce: Hvizdové vlny pozorované družicí DEMETER

Autor: Bc. Jan Záhlava

Abstrakt: I když jsou hvizdy pocházející od blesků studovány již téměř celé století, jsou zde stále otázky, které čekají na vyřešení. Je zřejmé, že, alespoň v určitém rozsahu frekvencí, hvizdy významně přispívají k celkové intenzitě vln ve vnitřní magnetosféře. Hvizdy také ovlivňují rozdělovací funkce energetických částic ve Van Allenových radiačních pásích. Díky na palubě realizované neuronové síti pro detekci hvizdů můžeme ostatní data pořízená družicí DEMETER analyzovat podle počtu a disperze přítomných hvizdů v konkrétním časovém intervalu. Rozlišujeme případy s vysokou a nízkou hvizdovou aktivitou a využíváme tuto informaci k určení celkového vlivu hvizdů na měřené veličiny.

Klíčová slova: družice DEMETER, hvizdy, magnetosféra, radiační pásy, elektromagnetické vlny

Obsah

Úvod	2
1 Elektromagnetické vlny v plazmatickém okolí Země	3
1.1 Teorie šíření elektromagnetických vln ve studeném plazmatu	3
1.2 Analýza směrů šíření vln	7
2 Družice DEMETER	9
2.1 Obecné informace o družici	9
2.2 Přístrojové vybavení	9
2.2.1 Přístroj ICE	9
2.2.2 Přístroj IMSC	10
2.2.3 Přístroj IDP	11
2.3 Neuronová síť	11
3 Výsledky	12
3.1 Analýza fungování neuronové sítě	12
3.2 Přehled výskytu hvizdů	13
3.3 Efekt hvizdových vln na celkovou intenzitu v pásmu VLF	15
3.4 Efekt hvizdových vln na celkovou intenzitu v pásmu ELF	21
3.5 Efekt hvizdových vln na tok energetických elektronů v okolí hranice ztrátového kužele	23
4 Diskuse	28
4.1 Fungování neuronové sítě pro detekci hvizdů	28
4.2 Výskyt hvizdů	28
4.3 Analýza intenzity vln	29
4.3.1 Vyhodnocení vlivu hvizdů na intenzitu v pásmu VLF	30
4.3.2 Porovnání s analýzou směru šíření vln	30
4.4 Vliv hvizdů na toky energetických elektronů	31
Závěr	33
Literatura	34

Úvod

V plazmatickém okolí Země hrají vzhledem k prakticky nulové četnosti srážek klíčovou roli při přenosu energie elektromagnetické vlny. Ty se zde šíří v různých vlnových módech a v širokém spektru frekvencí. Jedním z příkladů takovýchto vln jsou vlny vznikající při bouřkové aktivitě. Část těchto vln uniká z vlnovodu mezi Zemí a spodní hranicí ionosféry a šíří se v plazmatickém prostředí do vyšších výšek (*Walker, 1976; Santolík a kol., 2009; Fišer a kol., 2010*). V tomto prostředí se šíří buď jako tzv. vedené („ducted“), nebo nevedené („unducted“) (*Green a Inan, 2006*). Vedené vlny se šíří prakticky podél magnetické siločáry v oblasti o odlišné hustotě plazmatu (*Helliwell, 1965*). Takové vlny mohou být detekovány na opačné polokouli v magneticky konjugované oblasti. Naproti tomu nevedené vlny se šíří po dráze určené gradienty indexu lomu a obecně směrem k větším radiálním vzdálenostem od Země (*Bortnik a kol., 2006a*).

Obě šíření probíhají v disperzním prostředí. To znamená, že grupová rychlost je závislá na frekvenci vlny, což vede k tomu, že vlny s různou frekvencí dorazí k pozorovateli s různým zpožděním a dochází k formování tzv. hvizdů („whistlers“). Teorii formování hvizdů a jejich využití k určování parametrů plazmatického prostředí odvodil již *Storey (1953)*, přehled historických pozorování hvizdů a základní teorii k nim pak publikoval *Helliwell (1965)*. Kromě využití pro zjišťování parametrů plazmatického prostředí v okolí Země (*Carpenter, 1983; Carpenter a Anderson, 1992*) jsou hvizdy důležité i z dalších důvodů. Jedním z nich je jejich vliv na populaci energetických elektronů ve Van Allenových radiačních páslech. Interakcí hvizdových vln s energetickými elektrony dochází k rozptylu elektronů v „pitch-úhlu“, který má za následek jejich vysypávání do atmosféry (*Voss a kol., 1998; Bortnik a kol., 2006a,b*). Druhým důvodem, proč jsou hvizdy stále předmětem výzkumu, je jejich vliv na celkovou intenzitu elektromagnetických vln v okolí Země. Ukazuje se, že, alespoň v určitém rozsahu frekvencí a především během noci, kdy je jejich útlum při šíření skrz ionosféru menší, zodpovídají hvizdy za podstatnou část pozorovaných emisí (*Němec a kol., 2010; Colman a Starks, 2013*). Přesné vyhodnocení významu hvizdů v závislosti na relevantních parametrech však stále zůstává otevřeným problémem (*Green a kol., 2005; Meredith a kol., 2006; Thorne a kol., 2006; Green a kol., 2006*).

V období od července 2004 do prosince 2010 se, mimo jiné, na měření hvizdů zaměřila francouzská družice DEMETER. Její měření pokrývají prakticky rovnoměrně oblasti od -65° do 65° geomagnetické šířky. Kromě měření elektrického a magnetického pole byly na palubě osazeny i přístroje pro měření koncentrace plazmatu a energetických elektronů. V předkládané práci se zaměřujeme na analýzu získaných dat. Pozornost je věnována hlavně analýze vlivu bleskových emisí na celkovou intenzitu elektromagnetických vln. Práce plynule navazuje na výzkum publikovaný v článku *Záhlava a kol. (2015)*. V kapitole 1 je popsáno šíření elektromagnetických vln v magnetosféře a rozebrán vznik hvizdů. Kapitola 2 obsahuje popis družice DEMETER a některých přístrojů na její palubě. V kapitole 3 uvádíme výsledky získané při výzkumu. Ty pak v kapitole 4 diskutujeme. V závěru jsou pak výsledky stručně shrnuty.

1. Elektromagnetické vlny v plazmatickém okolí Země

1.1 Teorie šíření elektromagnetických vln ve studeném plazmatu

V této sekci stručně popíšeme teorii šíření elektromagnetických vln ve studeném plazmatu. Podrobnější popis lze nalézt například ve *Stix* (1992). Předkládaná odvození předpokládají lineární chování vln, tedy, že žádné jejich charakteristiky nezávisí na jejich amplitudě. Navíc předpokládáme, že se pohybujeme v dostatečně homogenním prostředí, tedy v prostředí, jehož vlastnosti se na vzdálenostech odpovídajících vlnové délce šířící se vlny nemění. Při odvození budeme počítat s rovinnou vlnou, jejíž tvar můžeme díky lineárnímu přístupu zapsat ve tvaru

$$\vec{L}(\vec{r}, t) = \Re \left\{ \hat{L} e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \right\}, \quad (1.1)$$

kde \hat{L} je komplexní amplituda (obsahující amplitudu a fázi) reálného vektoru \vec{L} popisujícího zkoumanou veličinu, \vec{k} je vlnový vektor vlny a ω je její úhlová frekvence. Tento popis nám umožňuje zjednodušit aplikaci některých diferenciálních operátorů:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{L}}{\partial t} &\rightarrow -i\omega \vec{L} \\ \nabla \times \vec{L} &\rightarrow i\vec{k} \times \vec{L} \\ \nabla \cdot \vec{L} &\rightarrow i\vec{k} \cdot \vec{L}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Teorie šíření vln je založena na Maxwellových rovnicích

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \left[\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right] \\ \nabla \cdot \vec{E} &= \varrho / \varepsilon_0 \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1.3)$$

kde \vec{E} je vektor elektrické intenzity, \vec{B} je vektor magnetické indukce, μ_0 , resp. ε_0 je permeabilita, resp. permitivita vakua, ϱ je prostorová hustota náboje a \vec{J} je hustota elektrického proudu.

Použitím operátoru rotace na první rovnici a následným dosazením z rovnice druhé dostaneme po několika jednoduchých úpravách a nahrazením $1/(\varepsilon_0 \mu_0) = c^2$ vlnovou rovnicí ve tvaru

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = 0. \quad (1.4)$$

Pro další úpravy definujeme dielektrický tenzor

$$\overleftrightarrow{\varepsilon} = \overleftrightarrow{I} + \frac{i}{\varepsilon_0 \omega} \overleftrightarrow{\sigma}, \quad (1.5)$$

kde \overleftrightarrow{I} značí jednotkovou matici a $\overleftrightarrow{\sigma}$ je tenzor elektrické vodivosti popisující vztah mezi hustotou elektrického proudu \vec{J} a intenzitou elektrického pole \vec{E} vztahem

$$\vec{J} = \overleftrightarrow{\sigma} \cdot \vec{E}. \quad (1.6)$$

S použitím aproximace rovinné vlny dostaneme dosazením vztahů (1.2) a (1.5) po krátkých úpravách nový tvar vlnové rovnice (1.4):

$$n^2 \hat{k} \hat{k} \cdot \vec{E} - n^2 \vec{E} + \overleftrightarrow{\varepsilon} \cdot \vec{E} = 0, \quad (1.7)$$

kde $n = kc/\omega$ je index lomu a \hat{k} je jednotkový vektor ve směru vlnového vektoru \vec{k} .

V magnetosféře Země, kde nás šíření vln bude zajímat, vstupuje do hry ještě vnější magnetické pole. Pro jednoduchost můžeme bez újmy na obecnosti položit vektor vnější magnetické indukce

$$\vec{B}_0 = (0, 0, B_0), \quad (1.8)$$

tedy ve směru osy z . Dále budeme předpokládat, že vnější magnetické pole je mnohem silnější než pole šířící se vlny ($B_0 \gg B$). Dielektrický tenzor pak můžeme vyjádřit pomocí tzv. Stixových koeficientů:

$$\overleftrightarrow{\varepsilon} = \begin{pmatrix} S & iD & 0 \\ -iD & S & 0 \\ 0 & 0 & P \end{pmatrix}, \quad (1.9)$$

kde

$$S = \frac{1}{2}(R + L) \text{ a } D = \frac{1}{2}(R - L). \quad (1.10)$$

Koeficienty R , L a P pak definujeme vztahy

$$\begin{aligned} R &= 1 - \sum_i \frac{\Pi_i^2}{\omega(\omega + \Omega_i)} \\ L &= 1 - \sum_i \frac{\Pi_i^2}{\omega(\omega - \Omega_i)} \\ P &= 1 - \sum_i \frac{\Pi_i^2}{\omega^2}, \end{aligned} \quad (1.11)$$

kde

$$\Pi_i = \sqrt{\frac{n_i q_i^2}{\varepsilon_0 m_i}} \quad (1.12)$$

je plazmová frekvence i -tého druhu částic a

$$\Omega_i = \frac{B_0 q_i}{m_i} \quad (1.13)$$

je příslušná cyklotronová frekvence. Její hodnota může nabývat kladných i záporných hodnot podle znaménka náboje q_i .

Dosazením (1.9) do (1.7) dostaneme soustavu rovnic

$$\begin{pmatrix} S - n^2 \cos^2 \Theta & iD & n^2 \sin \Theta \cos \Theta \\ -iD & S - n^2 & 0 \\ n^2 \sin \Theta \cos \Theta & 0 & P - n^2 \sin^2 \Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0, \quad (1.14)$$

kde Θ je úhel mezi vnějším magnetickým polem \vec{B}_0 a vlnovým vektorem \vec{k} .

Podmínkou existence netriviálního řešení pro \vec{E} je nulovost determinantu matice soustavy. Tato podmínka vede v obecném případě na bikvadratickou rovnici pro index lomu n ve tvaru

$$An^4 + Bn^2 + C = 0. \quad (1.15)$$

Koeficienty A , B , C v rovnici (1.15) jsou určeny následujícími vztahy:

$$\begin{aligned} A &= S \sin^2 \Theta + P \cos^2 \Theta \\ B &= -RL \sin^2 \Theta - PS (1 + \cos^2 \Theta) \\ C &= PRL. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Řešení rovnice (1.15) pro druhou mocninu indexu lomu pak vypadá následovně:

$$n^2 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (1.17)$$

Pro pevnou frekvenci vlny, úhel odklonu jejího vlnového vektoru od vnějšího magnetického pole Θ a parametry plazmatu existují tedy nejvýše dva módy šíření vlny.

Hvizdový mód

Předmětem práce je zkoumání vln šířících se ve hvizdovém módu. Hvizdový mód je ve frekvenčním spektru omezen shora minimem elektronové cyklotronové frekvence Ω_e a elektronové plazmové frekvence Π_e . V následujících odstavcích provedeme odvození vzniku hvizdů v přiblížení nízkých frekvencí ($\omega \ll \min[\Pi_e, \Omega_e]$). Omezíme se na tzv. vedené („ducted“) hvizdy, které se šíří přibližně podél magnetické siločáry. Do koeficientů definovaných rovnicemi (1.16) můžeme tedy dosadit úhel mezi vlnovým vektorem \vec{k} a vektorem vnějšího magnetického pole \vec{B} hodnotu $\Theta = 0$. Dosazením do rovnice (1.17) získáme:

$$n^2 = \frac{-(-2PS) \pm \sqrt{4P^2S^2 - 4P^2RL}}{2P}. \quad (1.18)$$

Z odmocniny můžeme vytknout $4P^2$ a celý zlomek vykrátit výrazem $2P$. Rovnice pro kvadrát indexu lomu dostává jednodušší tvar

$$n^2 = S \pm \sqrt{S^2 - RL}. \quad (1.19)$$

Nyní můžeme výraz pod odmocninou upravit podle definice Stixových koeficientů (1.10) a pro kvadrát indexu lomu dostaneme jednoduchý výraz

$$n^2 = S \pm \sqrt{D^2}. \quad (1.20)$$

Tímto nám vzniknou dvě možná řešení

$$n^2 = S + D = R, \quad n^2 = S - D = L, \quad (1.21)$$

odpovídající pravotočivé a levotočivé polarizaci. Vyčíslením koeficientů R a L zjistíme, že na intervalu mezi protonovou cyklotronovou frekvencí Ω_i a frekvencí $\omega_L = \frac{1}{2} \left(-\Omega_e + \sqrt{\Omega_e^2 + 4\Pi_e} \right)$, tedy na většině diskutovaného frekvenčního rozsahu, je L záporné. Hvizdovému módu tedy odpovídá kvadrát indexu lomu $n^2 = R$.

Když povolíme odchylky od šíření přesně podél siločáry, můžeme odvodit tvar tzv. rezonančního kužele:

$$\operatorname{tg}^2 \Theta_R = -\frac{P}{S}, \quad (1.22)$$

přičemž musí vždy platit $\Theta < \Theta_R$.

V dalších rovnicích provedeme několik zanedbání, které vedou k jejich zjednodušení. Budeme předpokládat:

- Iontové členy v definičních vztazích pro Stixovy koeficienty R , L a P jsou v porovnání s elektronovým členem malé a do celkové sumy téměř nepřispívají.
- Vlny se šíří přibližně podél magnetické siločáry, tedy úhel mezi vlnovým vektorem \vec{k} a vektorem magnetické indukce \vec{B}_0 je malý.
- Řešíme vlnu, jejíž frekvence $\omega \ll \min\{\Omega_e, \Pi_e\}$.

Při platnosti uvedených předpokladů můžeme odvodit zjednodušenou disperzní relaci ve tvaru:

$$n^2 = \frac{k^2 c^2}{\omega^2} = \frac{\Pi_e^2}{\Omega_e \omega}. \quad (1.23)$$

Když si nyní vyjádříme grupovou rychlost, dostaneme

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{2k\Omega_e c^2}{\Pi_e^2} = \frac{2c\sqrt{\Omega_e}}{\Pi_e} \sqrt{\omega}. \quad (1.24)$$

Jak můžeme vidět, pro pevné parametry plazmatu se vlny s vyšší frekvencí šíří rychleji než vlny s frekvencí nižší. Dobu šíření T můžeme vyjádřit jako integrál

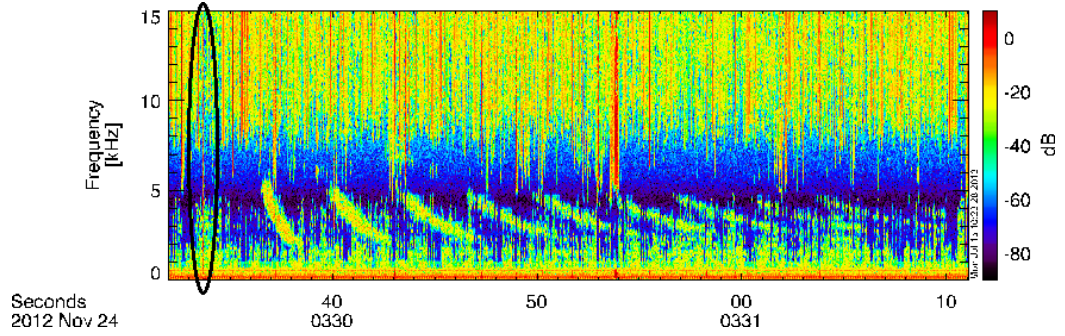
$$T = \int \frac{ds}{v_g} \approx \frac{1}{2c} \frac{1}{\sqrt{\omega}} \int \frac{\Pi_e}{\sqrt{\Omega_e}} ds. \quad (1.25)$$

Obecně lze napsat vztah pro dobu šíření

$$T = \frac{D}{\sqrt{\omega}}, \quad (1.26)$$

kde D je disperze a závisí na parametrech podél trajektorie šíření.

Vztah (1.25) určující tvar hvizdu ve frekvenčně-časových spektrogramech byl m.j. využíván pro určování koncentrace plazmatu. Za předpokladu dipólového



Obrázek 1.1: Příklad frekvenčně-časového spektrogramu obsahujícího několik hvizdů s postupně rostoucí disperzí. Intenzita vln je barevně kódována dle škály v pravé části obrázku. Černou elipsou je označena primární emise. (*University of Calgary*, 2012).

magnetického pole to je totiž jediný volný parametr. Příkladový frekvenčně-časový spektrogram obsahující několik hvizdů je na obrázku 1.1. V závislosti na čase (vodorovná osa) a frekvenci (svislá osa) je zde v barevném kódování znázorněna intenzita vln. Černou elipsou je zde označena primární emise. Ve frekvenčním pásu přibližně od 1 kHz do 5 kHz můžeme vidět několik příkladů hvizdu, jejichž disperze směrem doprava stoupá. To je zapříčiněno vícenásobným odrazem, tedy delší dráhou.

1.2 Analýza směrů šíření vln

V dnešní době umožňují přístroje na družicích měření více komponent elektrického a magnetického pole. Většinou se jedná o tři ortogonální složky magnetického pole a alespoň dvě složky pole elektrického. S takovými daty je možné kromě výkonových spekter určit i další vlastnosti pozorovaných vln, především směr jejich šíření a polarizaci (např. *Santolík a kol.*, 2003).

Základní informaci o směru šíření vln můžeme získat čistě z měření magnetického pole. Označíme-li komplexní amplitudu magnetického pole \vec{B} , můžeme definovat spektrální matici

$$S_{ij} = B_i B_j^*, \quad (1.27)$$

kde i a j indexují kartézské složky magnetického pole a $*$ značí komplexní sdružení. Za předpokladu monofrekvenční rovinné harmonické vlny dostaneme z Maxwellovy rovnice

$$\vec{k} \times \vec{E} = \omega \vec{B} \quad (1.28)$$

podmínku

$$\vec{B} \cdot \vec{k} = 0. \quad (1.29)$$

Tedy, že vlnový vektor je kolmý na magnetické pole. Postupným vynásobením rovnice (1.29) komponentami vektoru \vec{B}^* dostaneme soustavu (v ideálním případě) závislých rovnic, kterou lze zapsat pomocí spektrální matice \vec{S} ve tvaru

$$\vec{S} \cdot \vec{k} = 0. \quad (1.30)$$

Pro praktické použití místo komplexní matice \overleftrightarrow{S} použijeme rozpis na reálnou a imaginární část. Blokově lze pak soustavu rovnic zapsat ve tvaru

$$A \cdot \vec{k} = \begin{pmatrix} \Re S \\ \Im S \end{pmatrix} \cdot \vec{k} = 0. \quad (1.31)$$

Můžeme si všimnout, že vektor \vec{k} můžeme vynásobit libovolným reálným číslem a stále bude platit rovnice (1.31). Důsledkem toho je, že na základě měření pouze magnetického pole můžeme určit směr vlnového vektoru až na znaménko. Také nelze určit jeho velikost a tudíž ani vlnovou délku. Vzhledem k těmto skutečnostem je kompletní řešení dosažitelné touto metodou definovatelné pomocí dvou úhlových komponent sférických souřadnic. Různé implementace této metody lze nalézt například v *McPherron a kol.* (1972); *Means* (1972); *Samson a Olson* (1980).

Všechny tyto metody jsou založeny na tom, že se ze soustavy (1.30) řeší dvě vybrané rovnice. Experimentální data jsou ovšem zatížena šumem, navíc analýza vlna nemusí být nutně rovinná, což činí soustavu (1.30) přeuredenou a nemá tedy přesné řešení. Správnějším přístupem se tedy jeví hledání řešení nejlépe odpovídajícího celé soustavě, například metodou minimalizace součtu čtverců odchylek (*Santolík a kol.*, 2003).

Jak bylo zmíněno výše, pouze z měření magnetického pole nelze plně určit směr šíření. Máme-li však k dispozici i měření elektrického pole, můžeme z Faradayova zákona (1.28) tento směr určit. V případě, že máme k dispozici kompletní elektromagnetický vektor, můžeme postupovat obdobně jako v předcházejícím případě (místo 6 rovnic jich ovšem máme 36). V tomto případě již můžeme z výsledku určit jak kompletní směr, tak velikost vlnového vektoru.

2. Družice DEMETER

2.1 Obecné informace o družici

V této práci se zaměřujeme na analýzu dat pořízených několika různými přístroji umístěnými na palubě francouzské družice DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions). Mikrosatelit vážící 130 kg byl projektem řízeným francouzskou kosmickou agenturou CNES (Centre National d'Études Spatiales) ve spolupráci s laboratoří LPC2E/CNRS (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace / Centre National de la Recherche Scientifique) sídlící v Orléans. Družice byla v provozu od července 2004 do prosince 2010 a poskytla téměř nepřetržitá měření na geomagnetických šířkách menších než 65° . V prosinci 2005 došlo ke změně výšky kruhové oběžné dráhy z původních 710 km nad povrchem na nových 660 km. Za jeden den vykonala družice přibližně 14 orbitů.

Oběžná dráha družice byla téměř polární. Navíc byla synchronizována se Sluncem a rotací Země tak, že měření vždy probíhala přibližně v 10:30 a 22:30 lokálního času (LT). Je tedy možné rozlišit denní a noční půlorbity. Přesnější průběh rozložení měření družice v lokálním čase lze nalézt například na obrázku 1 v *Němec a kol.* (2010).

2.2 Přístrojové vybavení

Družice DEMETER byla vybavena přístroji umožňujícími měření elektromagnetického pole v širokém frekvenčním rozsahu. Další přístroje na palubě zaznamenávaly parametry plazmatu v okolí družice, jmenovitě koncentraci iontů H^+ , He^+ a O^+ , dále pak elektronovou teplotu a hustotu a tok energetických elektronů. Všech pět přístrojů, které tato měření realizovaly, bylo napojeno na centrální řídicí jednotku BANT (Boitier d'Acquisition, de Numérisation et de Traitement), která zajišťovala zpracování dat a komunikaci s řídicím centrem.

Pro měření elektromagnetického pole sloužily přístroje ICE (Instrument Champ Electrique) a IMSC (Instrument Magnétomètre Search Coil). Podrobný popis těchto přístrojů lze nalézt v *Berthelier* (2006) a *Parrot a kol.* (2006). Měření koncentrace iontů obstarával přístroj IAP (Instrument Analyseur de Plasma) a tok energetických elektronů přístroj IDP (Instrument Détecteur de Particules) (*Berthelier a kol.*, 2006; *Sauvaud a kol.*, 2006). Posledním měřícím přístrojem byla Langmuirova sonda (ISL - Instrument Sonde de Langmuir). V následujících sekcích stručně popíšeme přístroje, jejichž měření v práci používáme.

2.2.1 Přístroj ICE

Přístroj určený pro měření elektrického pole se skládal ze čtyř sférických hliníkových elektrod umístěných na teleskopických anténách dlouhých 4 metry. Délka antén a jejich orientace zajišťovaly dostatečnou vzdálenost elektrod od těla družice, aby byla rušení ostatními systémy a porušením plazmatu v okolí průletu

družice (tzv. „stopou“ družice) zanedbatelná. Pomocí potenciálových rozdílů mezi elektrodami bylo možné určit všechny tři složky elektrického pole.

Přístroj ICE měřil ve čtyřech frekvenčních pásmech:

- DC / ULF (Direct Current / Ultra Low Frequency) s frekvenčním rozsahem 0 - 15 Hz
- ELF (Extra Low Frequency) s frekvenčním rozsahem 15 Hz - 1 kHz
- VLF (Very Low Frequency) s frekvenčním rozsahem 15 Hz - 17.4 kHz
- HF (High Frequency) s frekvenčním rozsahem 10 kHz - 3.175 MHz

Data byla podle nastavení módu, ve kterém družice pracovala („Burst“ / „Survey“), a konkrétního frekvenčního pásma ukládána buď jako vlnová forma, nebo ve formě spočítaného výkonového spektra. Pro naši práci budou podstatná frekvenční pásma ELF a VLF.

Pásmo ELF

V pásmu ELF byly zaznamenávány všechny tři komponenty elektrického pole se vzorkovací frekvencí 2.5 kHz. Maximální měřitelná frekvence byla tedy dle Nyquistova teorému 1 250 Hz. Výsledky měření v tomto frekvenčním pásmu se (společně s analogickými měřeními magnetického pole - viz níže) dají použít k určení charakteristik šíření elektromagnetických vln, jako jsou například jeho směr vlnového vektoru nebo elipticita vlny. Data v tomto pásmu frekvencí jsou dostupná pouze v módu „Burst“ .

Pásmo VLF

V tomto frekvenčním rozsahu byla měřena pouze jedna komponenta elektrického pole. Vlnová forma byla na palubě družice zpracována a bylo vypočteno výkonové spektrum. V módu „Survey“ bylo ukládáno pouze toto spočtené výkonové spektrum. V takovém případě byly ještě rozlišovány tři podmódy měření s různými časovými a frekvenčními rozlišeními.

V módu „Burst“ bylo ukládáno nejen výkonové spektrum , ale také původní vlnová forma. Data v oblastech, kde byla družice v módu „Burst“ , jsou tedy dostupná s mnohem lepším rozlišením (volitelným dle použité metody spektrální analýzy).

2.2.2 Přístroj IMSC

Přístroj IMSC byl určen k měření magnetického pole. Skládal se ze tří na sebe kolmo umístěných magnetometrů. Tato skupina magnetometrů byla umístěna 1.9 m od těla družice, aby byly efekty rušení a interferencí minimalizovány. Frekvenční rozsahy jednotlivých pásem odpovídaly těm, které jsou popsány u přístroje ICE, a to včetně parametrů Fourierovy transformace počítané na palubě v jednotlivých podmódách módu „Survey“ .

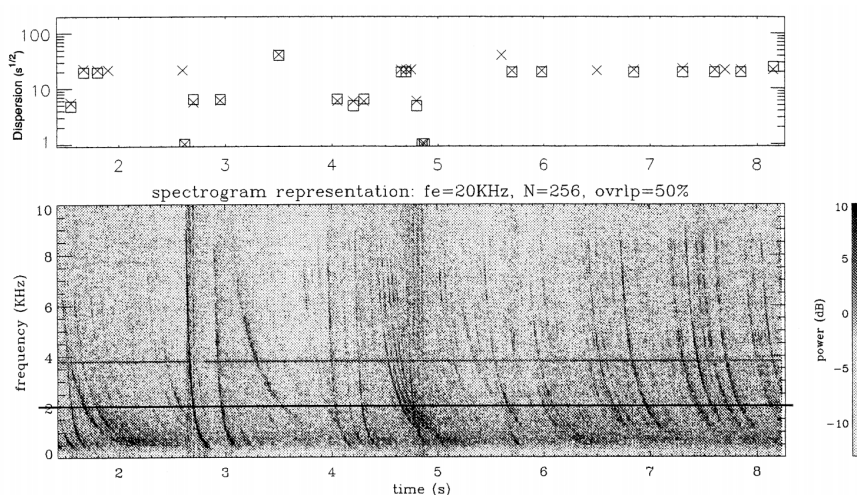
I přes umístění dále od těla družice docházelo k interferencím se systémy na palubě, a tudíž jsou data získaná tímto přístrojem na některých frekvencích obtížně použitelná. Měření magnetického pole je detailně popsáno v *Parrot a kol.* (2006).

2.2.3 Přístroj IDP

Na palubě družice byl také umístěn detektor pro měření toku energetických elektronů. Vstupní otvor tohoto detektoru byl natočen tak, aby přístroj monitoroval tok elektronů na hranici ztrátového kužele. Detekované elektrony byly tříděny podle jejich energie do 128 intervalů v rozsahu od 64 keV do 2.35 MeV. Všechny intervaly měly stejný energetický rozsah, který činil $\Delta E = 17.8$ keV. Časové rozlišení měření bylo 4 s. Popis přístroje a první výsledky byly publikovány v *Sauvaud a kol.* (2006).

2.3 Neuronová síť

Vzhledem k tomu, že po velkou část měření operovala družice DEMETER pouze v módu „Survey“, byla přenášená data pro mnohé účely nevyužitelná. Jedním z nich je detekce hvizdů a určování jejich disperze. Za tímto účelem byla na palubě družice instalována neuronová síť, která zpracovávala data v plném rozlišení. V detailních spektrogramech byly vyhledávány definované útvary, které odpovídaly struktuře hvizdů. Detekované hvizdy byly podle disperze (viz rovnice (1.26)) rozdělovány do 19 disperzních tříd. Příklad detekce hvizdů ve spektrogramu a jejich zařazení do jednotlivých tříd je na obrázku 2.1. Symboly (\square) označují výsledky získané neuronovou sítí. Symboly (\times) pak označují správné/požadované výsledky (*Elie a kol.* (1999)). Získané informace o výskytu hvizdů nám umožňují jejich počet přiřadit jako parametr ostatním datům změřeným družicí.



Obrázek 2.1: Detekce hvizdů ve spektrogramech. Symboly (\square) značí výsledky získané neuronovou sítí. Symbolem (\times) jsou označeny očekávané výsledky (*Elie a kol.*, 1999).

3. Výsledky

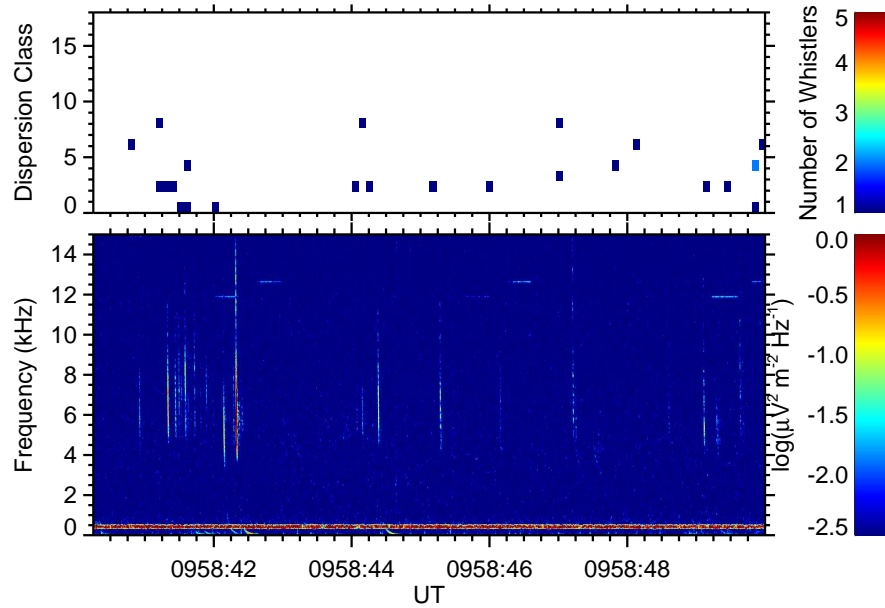
Zdrojem dat pro výzkum prezentovaný v této práci byla francouzská družice DEMETER. Postupně zpracováváme, vyhodnocujeme a vzájemně porovnáváme několik datových sad, které byly touto družicí získány. Jedná se o měření fluktuací elektrického a magnetického pole ve dvou frekvenčních pásmech - extrémně nízké frekvence (ELF) s rozsahem do 1250 Hz a velmi nízké frekvence (VLF) do 20 kHz přístroji ICE a IMSC (viz sekce 2.2.1, 2.2.2). Další sadou je měření toku energetických elektronů přístrojem IDP (viz sekci 2.2.3). Zdrojem sady dat stěžejní pro tuto práci je neuronová síť pro detekci hvizdů (viz sekci 2.3), která analyzovala detailní data, která nebylo možné v plném rozsahu odesílat na pozemní pracoviště, a vyhledávala v nich záznamy odpovídající hvizdům (viz sekci 1.1). Neuronová síť poskytuje informaci o počtu zaznamenaných hvizdů v závislosti na jejich disperzi s časovým rozlišením 0.1024 s. V porovnání s rozlišením frekvenčně-časových spektrogramů v pásmu VLF, které činí v módu „Survey“ 2.048 s, se jedná o 20× lepší rozlišení. Při porovnání s rozlišením měření přístroje IDP máme dokonce 40× lepší rozlišení. Pro provedené analýzy tedy není až tak nezbytné přesné určení časů výskytu jednotlivých hvizdů, nýbrž správné určení celkového počtu hvizdů za delší úsek měření.

3.1 Analýza fungování neuronové sítě

Data poskytnutá neuronovou sítí pro detekci hvizdů nebyla zatím detailně zkoumána a tudíž ani nebyly publikovány žádné články, dle kterých by bylo možné posuzovat správnost jejího fungování. Jediným zdrojem, který se nám podařilo získat, byla prezentace jejích autorů, kde je proklamována správnost výsledků přibližně 90% s tím, že většina chyb je typu „false positive“. Vzhledem k zmíněnému jsme se rozhodli učinit vlastní srovnání výsledků získaných neuronovou sítí s měřením přístroje ICE v pásmu VLF. Srovnání bylo provedeno na několika náhodně vybraných úsecích dat.

Na obrázku 3.1 je vidět srovnání dat získaných neuronovou sítí pro detekci hvizdů s frekvenčně-časovým spektrogramem změřeným v módu „Burst“ přístrojem ICE v pásmu VLF. V horní části je barevně kódován počet detekovaných hvizdů v závislosti na čase (vodorovná osa) a disperzní třídě, do které byl hvizd zařazen (svislá osa). Ve spodní části obrázku je detailní frekvenčně-časový spektrogram s barevně kódovanou výkonovou hustotou. Vzhledem k dostatečnému časovému rozlišení spektrogramu můžeme vidět jednotlivé hvizdy a přibližně odhadnout i jejich disperzi. Vidíme, že na „mikroskopické“ úrovni dochází k poměrně dobré shodě mezi oběma sadami dat.

Vzhledem k časovému rozlišení ostatních dat je pro tuto práci důležitější „makroskopická“ - statistická relevance detekce. Zajímavější je tedy porovnání počtu hvizdů detekovaných za delší časový úsek (několik sekund) s frekvenčně-časovými spektrogramy získanými v módu „Survey“. Na těchto spektrogramech odpovídá vykreslená intenzita průměrné intenzitě za určitý časový úsek. Když si tedy odmyslíme pomaleji se měnící pozadí, můžeme říci, že výkyvy mezi jednot-



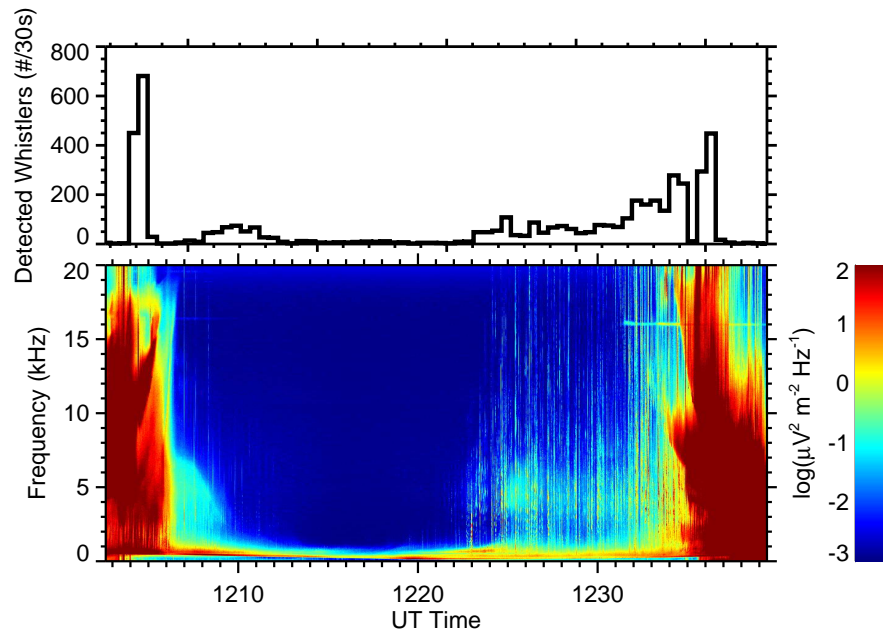
Obrázek 3.1: (Nahoře) Barevně kódovaný počet detekovaných hvizdů v závislosti na čase (vodorovná osa) a disperzní třídě, do které byl hvizd zařazen (svislá osa). (Dole) Frekvenčně-časový spektrogram barevně kódované výkonové spektrální hustoty fluktuací elektrického pole z měření přístroje ICE. Data byla změněna 1. ledna 2007.

livými svislými pruhy odpovídajícími postupnému sběru dat mají přímou souvislost se součtovou intenzitou hvizdů, které se za tento časový úsek objevily. Na obrázcích 3.2 jsou vždy v horní části zobrazeny souhrnné počty hvizdů detekovaných během 30 s intervalů v závislosti na čase. V dolní části je frekvenčně-časový spektrogram získaný v módu „Survey“ přístrojem ICE v pásmu VLF odpovídající stejnému časovému úseku. I v tomto srovnání si můžeme všimnout, že v časech, kde vidíme lokálně intenzivnější svislé pruhy na spektrogramu, jsou počty detekovaných hvizdů vyšší. Můžeme tedy prohlásit, že i na statistické úrovni odpovídají data získaná neuronovou sítí realitě. Pro další zpracování tedy můžeme předpokládat, že počty hvizdů detekovaných neuronovou sítí odpovídají počtům skutečně přítomných hvizdů.

Při hlubší analýze si můžeme všimnout, že na počty detekovaných hvizdů má negativní vliv zvýšená geomagnetická aktivita. Další analýzy (vyjma sekce 3.2) tedy ještě rozdělíme dle hodnoty K_p indexu a budeme brát v úvahu pouze případy, kdy byla jeho hodnota menší než 4-. Ohledně významu K_p indexu a jeho škálování se odkáží na literaturu (např. *Kivelson a Russell, 1995*). Díky tomu, že měření družice DEMETER probíhala v letech, kdy převládalo solární minimum, znamená toto omezení zanedbání pouze velmi malé části dat.

3.2 Přehled výskytu hvizdů

Při šíření v magnetosféře podléhají hvizdy disperzi, která vede na jejich typický tvar ve frekvenčně-časových spektrogramech (viz obrázek 1.1). Se vzrůstajícím počtem průchodů ze severní na jižní polokouli a zpět se prodlužuje optická drá-



Obrázek 3.2: (Nahoře) Celkové počty hvizdů detekovaných za časový úsek 30 s. (Dole) Frekvenčně-časový spektrogram výkonové spektrální hustoty fluktuací elektrického pole z měření přístroje ICE. Data byla změřena 11. července 2005 během denního půlorbitu.

ha, po které se jednotlivé frekvenční složky hvizdu šíří. To vede na čím dál tím větší zakřivení hvizdů ve frekvenčně-časových spektrogramech. Když tedy hvizdy roztřídíme podle disperze, můžeme říci, že je třídíme podle počtu průchodů rovníkovou oblastí. Vzhledem k měnícím se parametrům plazmatického prostředí, ve kterém se hvizdové vlny šíří, a obecně rozdílným drahám, nejsou hranice oddělující jednotlivé počty průchodů ostré, dokonce se mohou intervaly překrývat. Pro lepší představu o tom, kolik průchodů odpovídá konkrétním disperzním třídám, jsme vytvořili mapy světa v geomagnetických souřadnicích, kde je barevně kódován počet detekovaných hvizdů vztahený na dobu měření v daném místě. Tyto mapy ještě rozdělíme podle disperze hvizdů. Prostorové rozlišení map činí $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Navíc jsme se omezili na geomagnetické šířky v intervalu $[-63^\circ, 63^\circ]$, neboť na vyšších šířkách byly počty měření velmi nízké, a tudíž byl relativní výskyt hvizdů zatížen velkou chybou.

Po analýze map, kdy každá odpovídala jedné disperzní třídě (není zde publikováno), jsme určili hranice mezi skupinami disperzních tříd, které lze označit jako hvizdy s malou, střední, respektive vysokou disperzí. Skupina disperzních tříd označených jako malá disperze dle míst výskytu odpovídá tzv. 0+ hvizdům, tedy hvizdům, které byly detekovány nad místem svého vzniku během prvního průchodu. Skupina hvizdů se střední disperzí odpovídá svým prostorovým rozmístěním 1–, případně 1+ hvizdům, tedy takovým, které se došly do magneticky konjugované oblasti, a buď se šíří směrem dolů (směrem k povrchu Země), nebo se již odrazily a šíří se nahoru (směrem ke geomagnetickému rovníku). Skupina hvizdů klasifikovaných jako vysokodisperzní pak odpovídá vícenásobným průchodům rovníkovou oblastí.

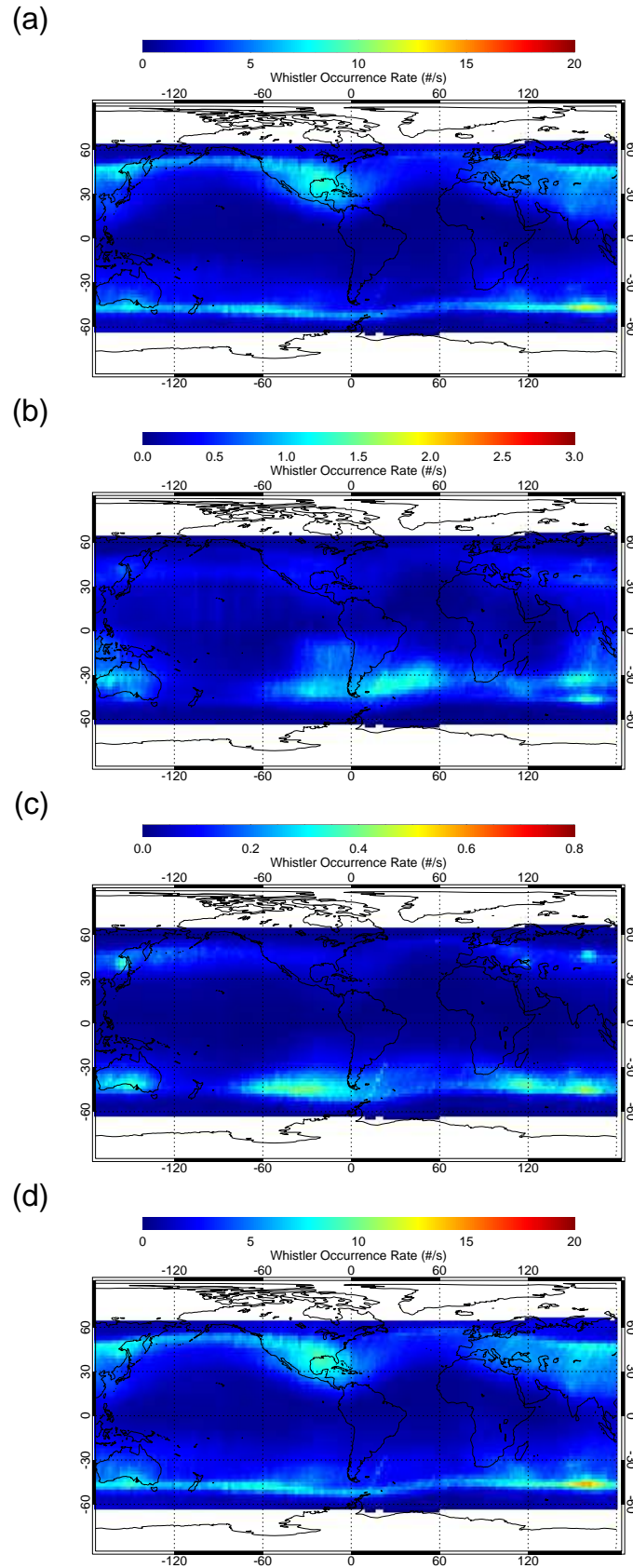
Pro lepší názornost jsme využili rozdělení na severní léto (květen až říjen) a severní zimu (listopad až duben). Na obrázcích 3.3 a 3.5, resp. 3.4 a 3.6 jsou postupně shora mapy relativního výskytu hvizdů s nízkou disperzí, se střední disperzí, s vysokou disperzí a nezávisle na disperzi během dne, resp. během noci. Toto rozdělení na denní a noční půlobity můžeme učinit díky tomu, že orbit družice DEMETER byl synchronizován se Sluncem. Obrázky 3.3 a 3.4 znázorňují situaci během severního léta, obrázky 3.5 a 3.6 potom zobrazují výskyt hvizdů během severní zimy.

Při pohledu na škály pro jednotlivé skupiny disperzních tříd můžeme vidět, že naprostou většinu detekovaných hvizdů tvoří hvizdy s nízkou disperzí. S rostoucí disperzí detekované počty řádově klesají. Mapy výskytu hvizdů s nízkou disperzí přibližně odpovídají výskytu blesků. Tato shoda není absolutní, odlišnosti lze nalézt v prostorovém i časovém rozložení. Pro tuto práci není přesná souvislost mezi vznikem hvizdů a bleskovou aktivitou stěžejní a dále ji nebudeme rozebírat. Při pohledu na mapy výskytu hvizdů se střední disperzí můžeme vidět, že nejvýraznější jsou oblasti magneticky konjugované s oblastmi, které jsou výrazné na mapě hvizdů s nízkou disperzí. V případě vysoké disperze jsou již výrazné obě skupiny oblastí, což odpovídá předpokladům, že se jedná o vícekrát (přesný počet není vzhledem k velkému rozsahu hodnot disperze blíže specifikován) odražené hvizdy.

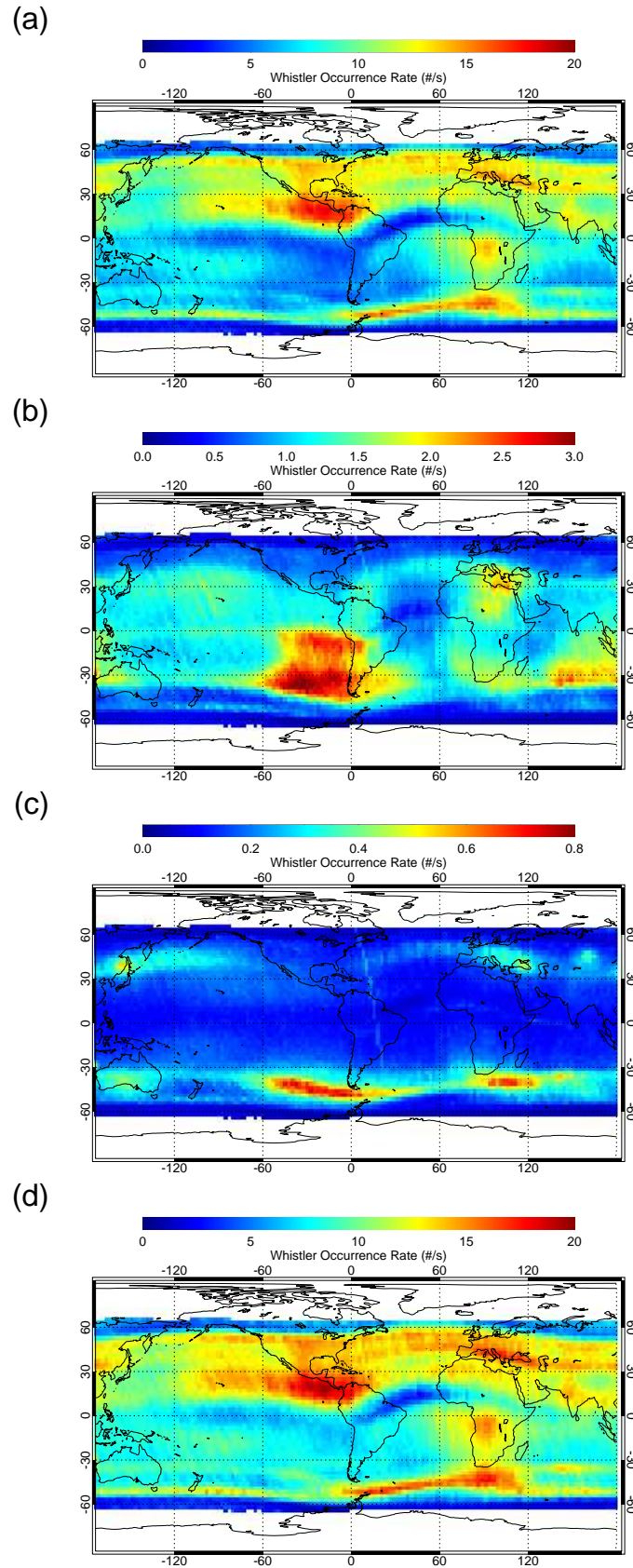
Při bližším zkoumání těchto čtyř sad map můžeme nalézt několik rozdílů. Ten nejvýraznější je mezi mapami hvizdové aktivity během dne oproti mapám hvizdové aktivity během noci. Během nočních půlobitů byly počty hvizdů detekovaných neuronovou sítí výrazně vyšší než během dne. V oblasti odpovídající geomagnetickou délkou Severní Americe můžeme také vidět podstatný rozdíl mezi výskytem hvizdů během léta a během zimy. V části roku, kterou definujeme jako severní léto (květen až říjen), můžeme vidět značné navýšení hvizdové aktivity v této oblasti. Stejný rozdíl je pozorovatelný i v oblasti Evropy a Asie. V oblasti jižní Afriky a Austrálie můžeme pozorovat opačný efekt. V období severního léta je zde hvizdová aktivita nižší. To dobře odpovídá tomu, že blesková aktivita je vysoká během lokálního léta (*Christian a kol., 2003*).

3.3 Efekt hvizdových vln na celkovou intenzitu v pásmu VLF

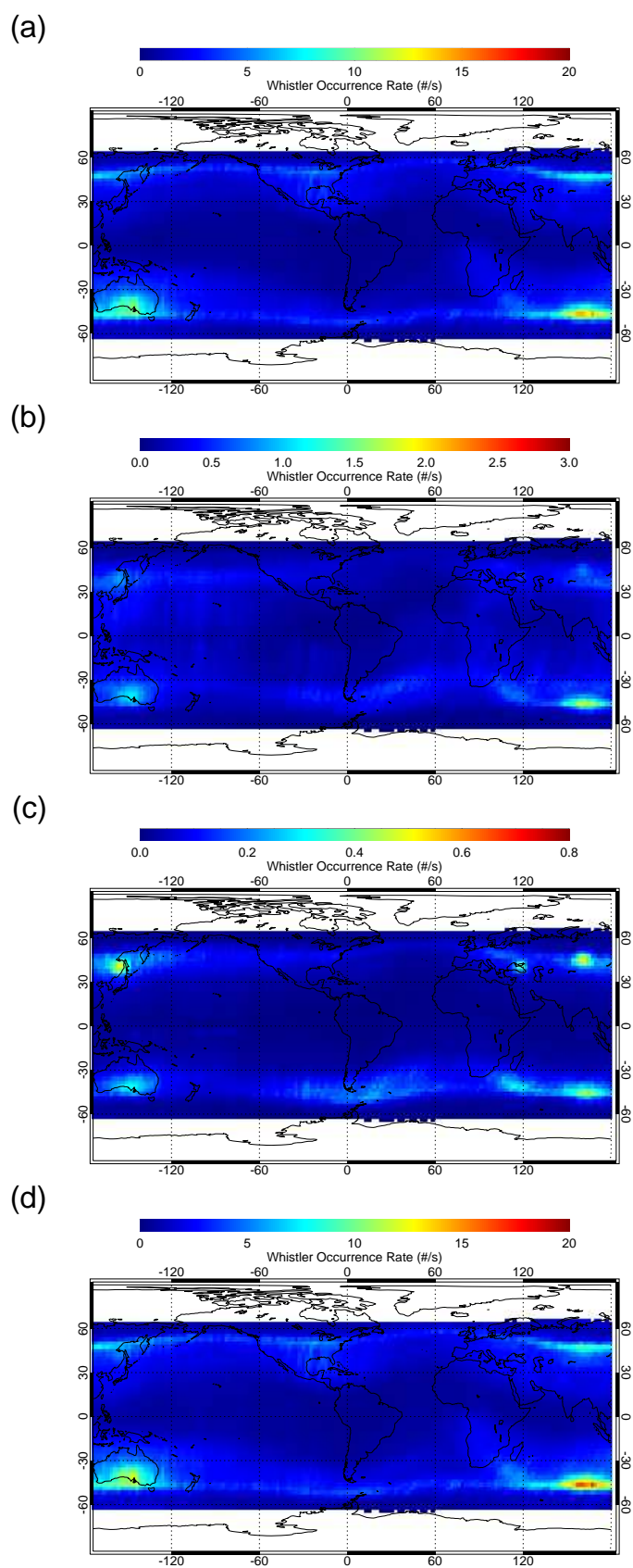
V této sekci se zaměříme na analýzu vlivu přítomnosti hvizdových vln na celkovou intenzitu vln v pásmu velmi nízkých frekvencí (do 20 kHz). Již bylo zmíněno v sekci 3.1, že se omezujeme pouze na data změřená při Kp indexu menším než 4–. Dále se omezíme pouze na hvizdy z kategorie s nízkou disperzí, které jsou výrazně nejčtenější a jejichž interpretace se jeví nejsnazší. V této části využíváme frekvenčně-časové spektrogramy získané přístrojem ICE v módu „Survey“ . Máme tedy k dispozici pouze informaci o celkové intenzitě vln v závislosti na čase (poloze družice) a frekvenci. Ve spojení s daty neuronové sítě jsme získali statistiku intenzity vln v závislosti na geomagnetické šířce a frekvenci vln rozdělenou podle počtu hvizdů detekovaných během 2.048 s, za které byly hodnoty intenzity průměrovány při vytváření spektrogramů. Dále se budeme zabývat případy, kdy bylo hvizdů během zmíněných 2.048 s málo ($n < 5/s$) a hodně ($n \geq 15/s$). Pří-



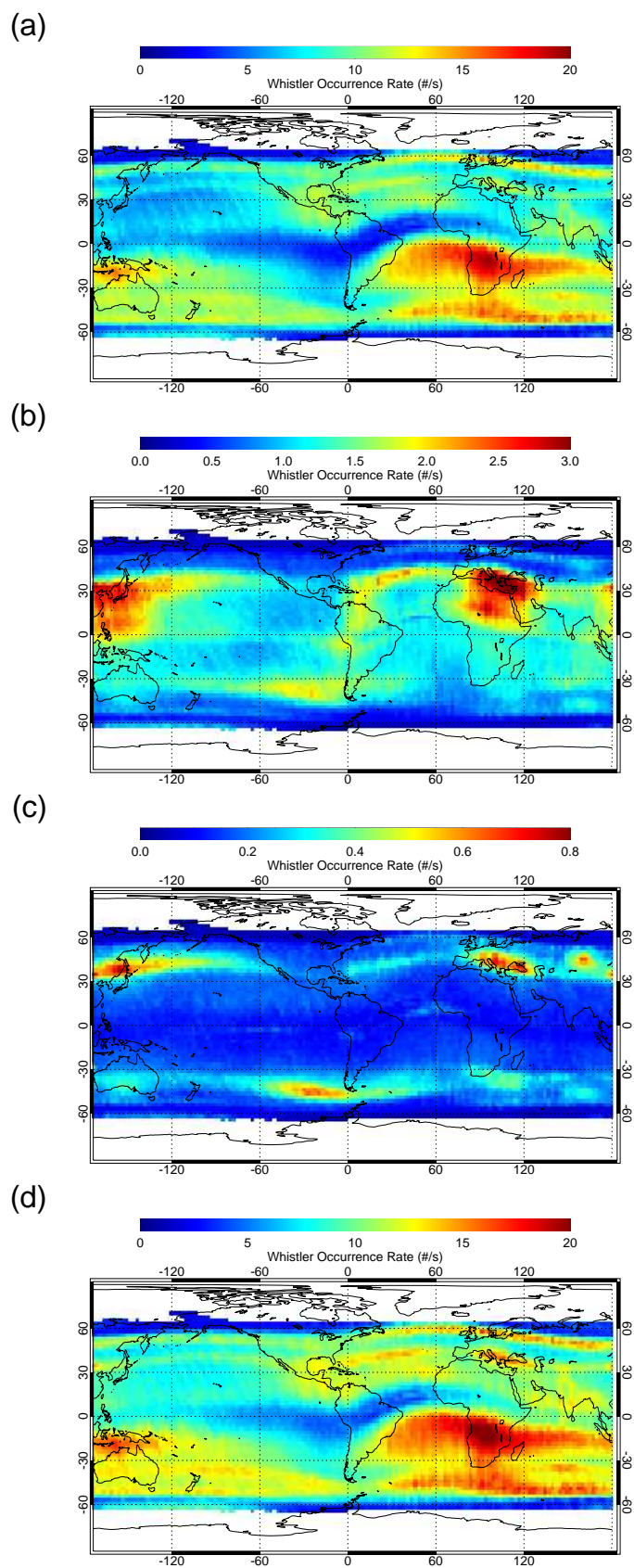
Obrázek 3.3: Barevně kódované geomagnetické mapy počtu detekovaných hvizdů vztaheného na dobu měření. (a) Hvizdy s nízkou disperzí ($D < 10 \text{ s}^{1/2}$). (b) Hvizdy se střední disperzí ($10 \text{ s}^{1/2} < D < 40 \text{ s}^{1/2}$). (c) Hvizdy s vysokou disperzí ($40 \text{ s}^{1/2} < D < 202 \text{ s}^{1/2}$). (d) Všechny detekované hvizdy nezávisle na disperzi. Měřeno během denních půlorbitů během severního léta (květen až říjen).



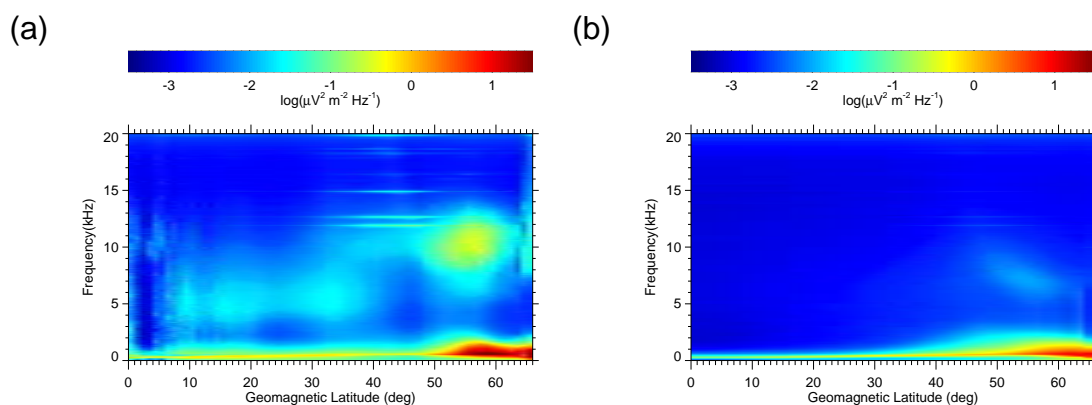
Obrázek 3.4: Barevně kódované geomagnetické mapy počtu detekovaných hvizdů vztaheného na dobu měření. (a) Hvizdy s nízkou disperzí ($D < 10 \text{ s}^{1/2}$). (b) Hvizdy se střední disperzí ($10 \text{ s}^{1/2} < D < 40 \text{ s}^{1/2}$). (c) Hvizdy s vysokou disperzí ($40 \text{ s}^{1/2} < D < 202 \text{ s}^{1/2}$). (d) Všechny detekované hvizdy nezávisle na disperzi. Měřeno během nočních půlorbitů během severního léta (květen až říjen).



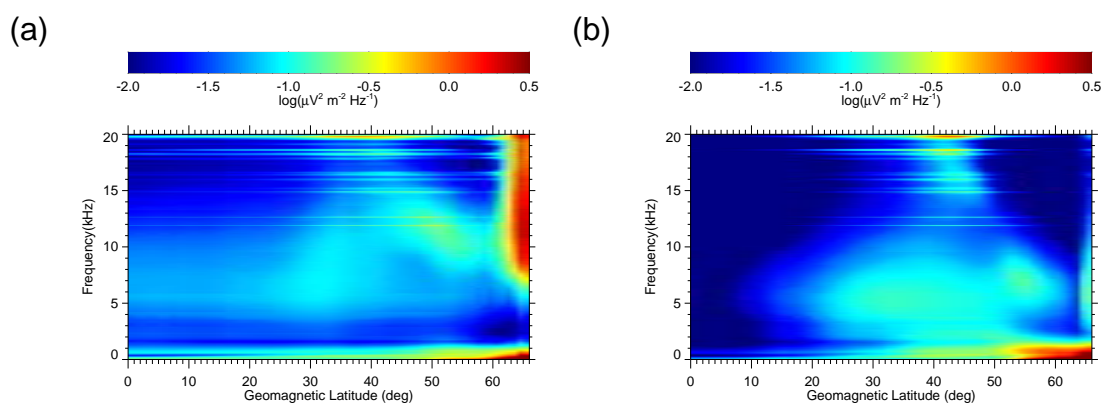
Obrázek 3.5: Barevně kódované geomagnetické mapy počtu detekovaných hvizdů vztáženého na dobu měření. (a) Hvizdy s nízkou disperzí ($D < 10 \text{ s}^{1/2}$). (b) Hvizdy se střední disperzí ($10 \text{ s}^{1/2} < D < 40 \text{ s}^{1/2}$). (c) Hvizdy s vysokou disperzí ($40 \text{ s}^{1/2} < D < 202 \text{ s}^{1/2}$). (d) Všechny detekované hvizdy nezávisle na disperzi. Měřeno během denních pólorbitů během jižního léta (listopad až duben).



Obrázek 3.6: Barevně kódované geomagnetické mapy počtu detekovaných hvizdů vztaheného na dobu měření. (a) Hvizdy s nízkou disperzí ($D < 10 \text{ s}^{1/2}$). (b) Hvizdy se střední disperzí ($10 \text{ s}^{1/2} < D < 40 \text{ s}^{1/2}$). (c) Hvizdy s vysokou disperzí ($40 \text{ s}^{1/2} < D < 202 \text{ s}^{1/2}$). (d) Všechny detekované hvizdy nezávisle na disperzi. Měřeno během nočních půlorbitů během jižního léta (listopad až duben).



Obrázek 3.7: Barevně kódovaná závislost mediánové výkonové hustoty fluktuací elektrického pole na absolutní hodnotě geomagnetické šířky (vodorovná osa) a frekvenci (svislá osa). (a) Případy, kdy bylo detekováno hodně hvizdů ($\geq 15/s$). (b) Případy, kdy bylo detekováno málo hvizdů ($< 5/s$). Měřeno během denních půlorbitů.



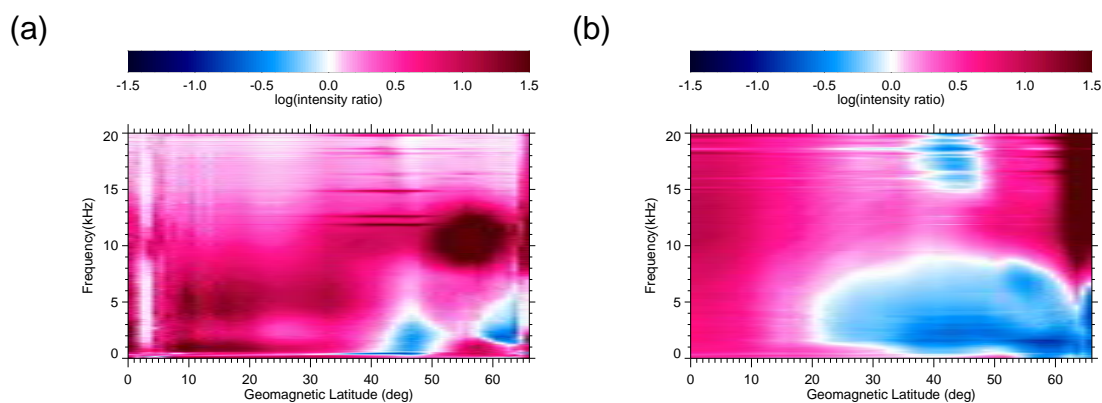
Obrázek 3.8: Stejně jako obrázek 3.7, ale během nočních půlorbitů.

pady, kdy počet hvizdů nespadá ani do jedné z kategorií, odpovídají přechodové oblasti, a tudíž ji z analýzy vynecháme.

Stejně jako v předchozí sekci, i zde jsme data ještě rozdělili podle lokálního času na denní a noční. Na obrázcích 3.7 a 3.8 jsou barevně kódovány mediány výkonové spektrální hustoty fluktuací elektrického pole v závislosti na absolutní hodnotě geomagnetické šířky (vodorovná osa) a frekvenci (svislá osa). Část (a) obrázku odpovídá případu, kdy bylo detekováno hodně hvizdů, část (b) potom odpovídá případu, kdy bylo hvizdů detekováno málo. Obrázek 3.7 obsahuje data z denních půlorbitů, obrázek 3.8 odpovídá nočním půlorbitům.

Abychom zjistili, jaký efekt mají na celkovou intenzitu vln hvizdy, zajímá nás poměr mezi případy s hodně a málo hvizdy. Vzhledem k tomu, že jsou hodnoty na obrázcích 3.7 a 3.8 vyneseny v logaritmu, dostaneme tento poměr jako numerický rozdíl vynášených hodnot. Na obrázku 3.9 jsou tyto rozdíly zobrazeny. Část (a) obrázku 3.9 obsahuje rozdíl pro denní případ (obrázek 3.7), část (b) obsahuje rozdíl pro noční případ (obrázek 3.8).

Až na dvě malé frekvenčně-šířkové oblasti můžeme říci, že během denních



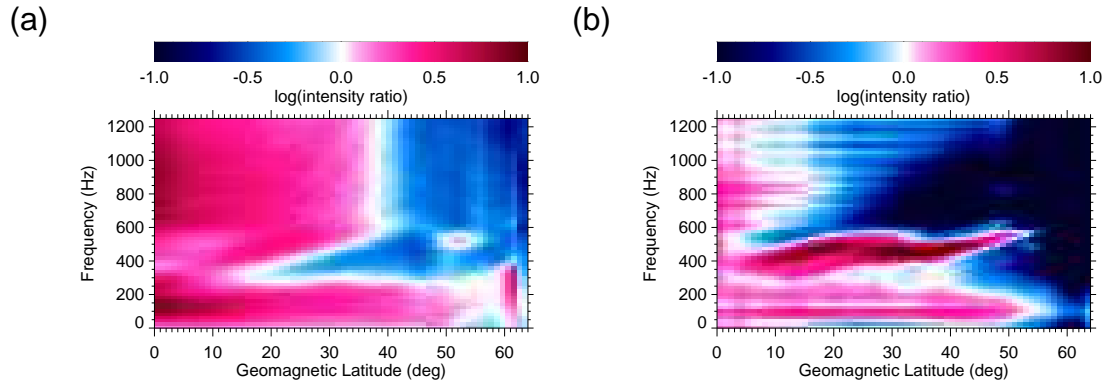
Obrázek 3.9: Barevně kódovaný poměr mediánů výkonové hustoty fluktuací elektrického pole v případě, že bylo detekováno hodně hvizdů, k případu, kdy bylo detekováno málo hvizdů. (a) Poměr hodnot z obrázku 3.7 - měření během dne. (b) Poměr hodnot z obrázku 3.8 - měření během noci.

půlorbitů znamená vyšší výskyt hvizdů i vyšší celkovou intenzitu vln. Během noci již situace tak jednoduchá není. Zde se objevují dvě poměrně významné frekvenčně-šířkové oblasti, ve kterých je vyšší intenzita spojena s nižšími počty detekovaných hvizdů. Jedna tato oblast zasahuje v geomagnetické šířce od 20° až po 65° . Ve frekvenci je tato oblast lokalizována mezi 0 a 8 kHz. Na hranici pak plynule přechází k opačným hodnotám, nepozorujeme skokovou změnu. Druhá oblast se vyskytuje na frekvencích 15 až 20 kHz na geomagnetických šířkách kolem 45° . Obě tyto oblasti mají pozorovatelné ekvivalenty i v denním rozdílu, nicméně během dne nepozorujeme zvýšenou intenzitu při nízkém počtu hvizdů.

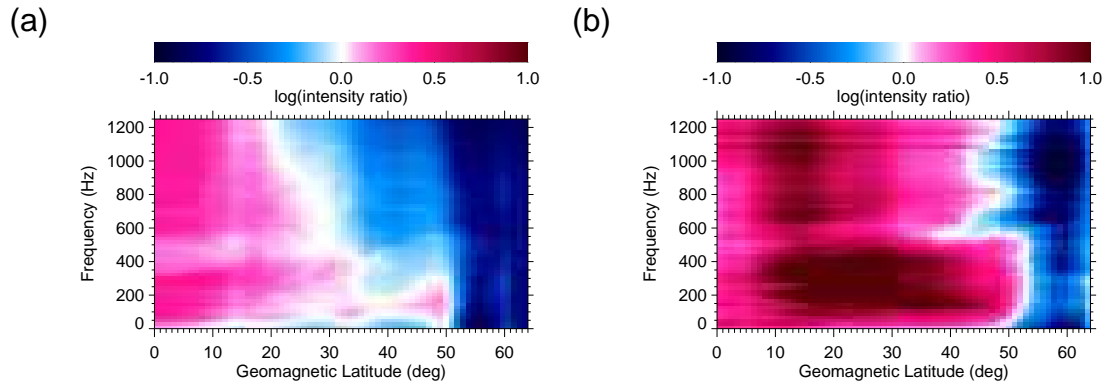
3.4 Efekt hvizdových vln na celkovou intenzitu v pásmu ELF

V pásmu extrémně nízkých frekvencí (do 1250 Hz) máme k dispozici měření kompletního elektromagnetického vektoru. K analýze těchto dat jsme využili implementace metod popisovaných v kapitole 1.2, konkrétně programu PRASSADCO (Propagation Analysis of STAFF-SA Data with Coherency Tests) (Santolík, 2003). Díky této analýze máme k dispozici informaci o intenzitě vln spolu s jejich převládajícím směrem šíření. Při třídění podle počtu detekovaných hvizdů uvažujeme pouze hvizdy z kategorie s nízkou disperzí. Takové hvizdy se šíří od povrchu Země nahoru (jak je popsáno výše). Srovnávání případů, kdy je hvizdů hodně a kdy je hvizdů málo, nachází proto analogii ve srovnání intenzity vln, u nichž převládá šíření nahoru (odpovídá případu s hodně hvizdy), s intenzitou vln, u nichž převládá šíření dolů (odpovídá případu s málo hvizdy).

Chceme porovnat výsledky získané pomocí analýzy směru šíření s výsledky popsány v předcházející sekci. Obě sady dat byly připraveny se stejným frekvenčním rozlišením, konkrétně bylo použito 64 frekvenčních intervalů v rozsahu 0 až 1250 Hz, což odpovídá frekvenčnímu rozlišení dat z VLF Survey módu. Příslušné výřezy z obrázku 3.9 jsou vždy v části (a) obrázku 3.10 (denní půlorbity), resp. 3.11 (noční půlorbity).



Obrázek 3.10: (a) Stejně jako obrázek 3.7a, výřez nízkých frekvencí. (b) Barevně kódovaný poměr mediánové intenzity vln šířících se nahoru k mediánové intenzitě vln šířících se dolů vážený četností směru šíření (dle rovnice (3.1)) v závislosti na absolutní hodnotě geomagnetické šířky a frekvenci. Výsledky z denních pólorbitů



Obrázek 3.11: Stejně jako obrázek 3.10, ale pro noční pólorbitů

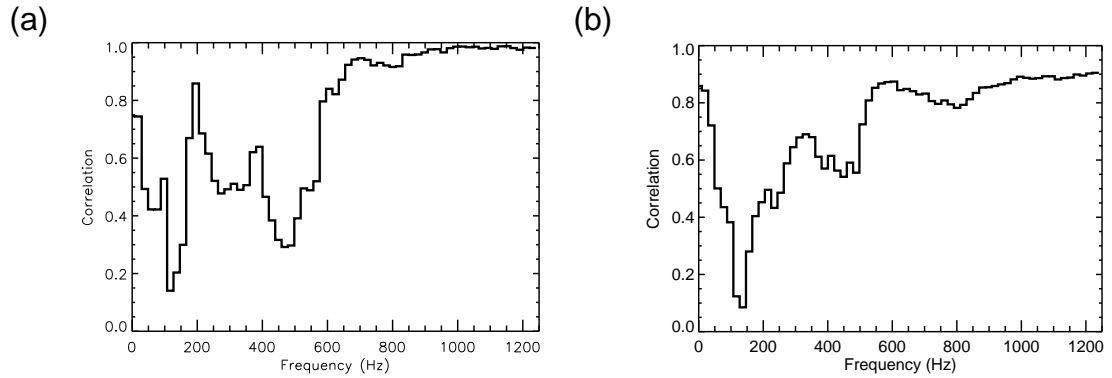
V části (b) obrázků 3.10 a 3.11 jsou vyobrazeny hodnoty získané následujícím výpočtem:

$$R = p \cdot U - (1 - p) \cdot D, \quad (3.1)$$

kde R je vyobrazená hodnota, U je logaritmus mediánové intenzity vln šířících se nahoru, D je logaritmus mediánové intenzity vln šířících se dolů a p je relativní počet měření, kdy převládalo šíření směrem nahoru.

Při pohledu na obrázky 3.10 a 3.11 si můžeme všimnout určité podobnosti mezi levou a pravou částí. Abychom míru této podobnosti vyčíslili kvantitativně, spočítáme pro každý frekvenční interval korelaci přes geomagnetické šířky. Hodnoty korelace jsou vyneseny v grafech na obrázku 3.12 pro den (a) a pro noc (b).

Obecně můžeme říci, že s rostoucí geomagnetickou šířkou začíná prakticky v celém analyzovaném frekvenčním pásmu převládat intenzita vln šířících se dolů. Analogické chování vykazuje i poměr mezi intenzitou při hodně a málo hvizdech. Geomagnetická šířka, na které začnou převládat vlny šířící se směrem dolů (vlny nepocházející z blesků), je však různá. Při pohledu na grafy znázorňující závislost korelačního koeficientu jako funkce frekvence (obrázek 3.12) můžeme vidět, že



Obrázek 3.12: Frekvenční závislost korelace mezi analýzou pomocí četnosti výskytu hvizdů a směrem šíření vln počítané přes geomagnetické šířky. (a) Korelace závislostí z obrázku 3.10 během dne. (b) Korelace závislostí z obrázku 3.11 během noci.

na frekvencích vyšších než přibližně 550 Hz je dosaženo velmi dobré korelace (0.85-1.0). Na nižších frekvencích již shoda tak dobrá není. Při pohledu na denní rozdíl (obrázek 3.10) si můžeme všimnout výrazného „jazyku“ na frekvencích kolem 500 Hz. Při analýze pomocí počtu detekovaných hvizdů vychází, že tyto vlny nepocházejí od hvizdů. Analýza směrů šíření však značí, že jde o vlny, které se šíří převážně nahoru. Pravděpodobným vysvětlením je odraz přírodních vln šířících se původně směrem dolů na tzv. $L=0$ cut-offu (např. *Gurnett a Burns*, 1968; *Santolík a kol.*, 2006). Tento jev rovněž vysvětluje nízké hodnoty korelačního koeficientu na nízkých frekvencích.

3.5 Efekt hvizdových vln na tok energetických elektronů v okolí hranice ztrátového kužele

Kromě měření intenzity elektrického a magnetického pole byla družice DEMETER vybavena také analyzátozem toku energetických elektronů. Data získaná tímto přístrojem obsahují počty detekovaných elektronů tříděných podle energie do 128 intervalů (viz sekci 2.2.3). Jak bylo zmíněno výše, hvizdové vlny hrají důležitou roli při formování radiačních pásů a slot regionu. Zajímaly nás proto změřené toky energetických elektronů v závislosti na počtu hvizdů detekovaných za příslušný časový úsek.

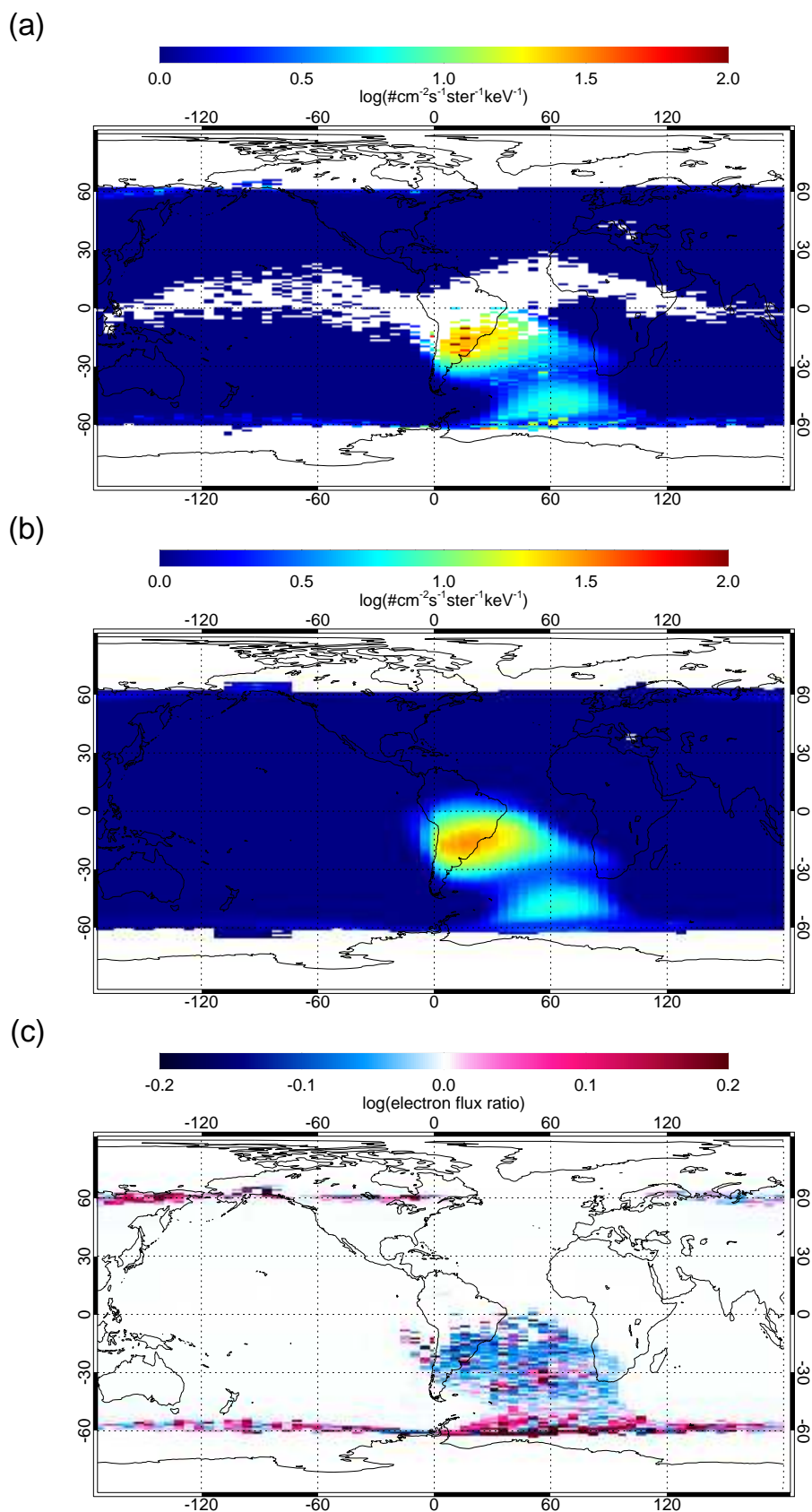
Na obrázcích 3.13, resp. 3.14 jsou vyobrazeny mapy v geomagnetických souřadnicích, na kterých jsou barevně kódovány mediánové toky energetických elektronů nezávisle na energii. Horní mapa zobrazuje pokaždé případ, kdy bylo detekováno hodně hvizdů, prostřední mapa zobrazuje vždy případ, kdy bylo hvizdů málo. Spodní mapa znázorňuje rozdíl (a)-(b). Hodnoty považované za hodně/málo hvizdů jsou v tomto případě ($n < 2.5 \text{ s}^{-1}$) a ($n \geq 7.5 \text{ s}^{-1}$). Nižší prahové hodnoty oproti předcházejícím sekcím byly zvoleny z toho důvodu, že významné toky se vyskytují nad oceánem, kde jsou počty blesků nižší.

Když pomíneme slabé toky na vysokých geomagnetických šířkách, všechny

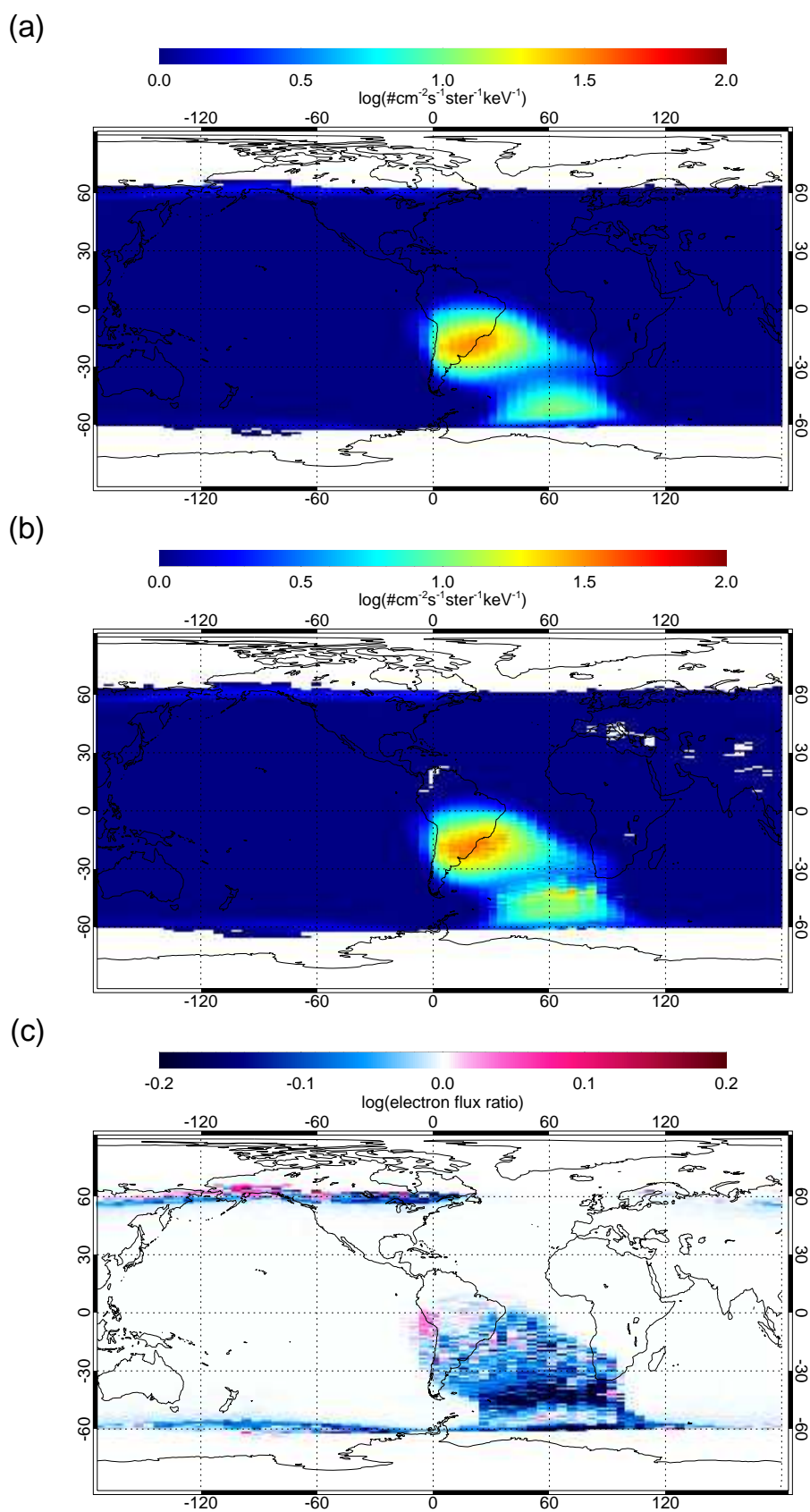
nezanedbatelné toky jsou koncentrovány do okolí Jihoatlantické anomálie. V další analýze jsme se tedy omezili pouze na tuto oblast. V rozsahu geomagnetických délek 0° až 80° jsme spočítali závislost mediánu toku elektronů na energii a geomagnetické šířce. Vzhledem k proměnlivému počtu případů s hodně a málo hvizdy na jednotlivých délkách však došlo k vymizení všech efektů, a takové výsledky nedávají dobrý smysl. Rozdělili jsme proto oblast na pásy široké 5° geomagnetické délky a provedli analýzu v každém zvlášť. Na obrázku 3.15, resp. 3.16 jsou barevně kódovány toky elektronů v závislosti na geomagnetické šířce a energii během denních, resp. během nočních půlorbitů. Vlevo jsou hodnoty při hodně hvizdech, vpravo potom hodnoty při málo hvizdech. Na obrázku 3.17 jsou vyneseny poměry mezi toky z obrázků 3.15 (v části (a)), resp. 3.16 (v části (b)). Vykreslené hodnoty jsou z intervalu geomagnetických délek 35° až 40° . Ostatní případy jsou téměř shodné s tím, který je zde prezentován.

Na obrázcích 3.15 a 3.16 můžeme pozorovat vždy dvě oblasti, kde je zvýšený tok energetických elektronů. První, méně výrazná, se nachází na geomagnetických šířkách od -30° do -5° a v pásmu energií od 1500 keV do 2200 keV. Směrem k vyšším energiím stoupá hodnota toku a oblast se rozšiřuje v geomagnetické šířce. Druhá, výraznější oblast, je na opačném konci energetického spektra, přibližně do 500 keV. Začíná na geomagnetické šířce přibližně -55° jako velmi úzký pruh. Se vzrůstající geomagnetickou šířkou se postupně rozšiřuje směrem k větším energiím a na šířce -20° dosahuje maximálních energií kolem zmíněných 500 keV. Následně energie detekovaných elektronů s rostoucí šířkou rychle klesají a na úrovni geomagnetického rovníku oblast končí.

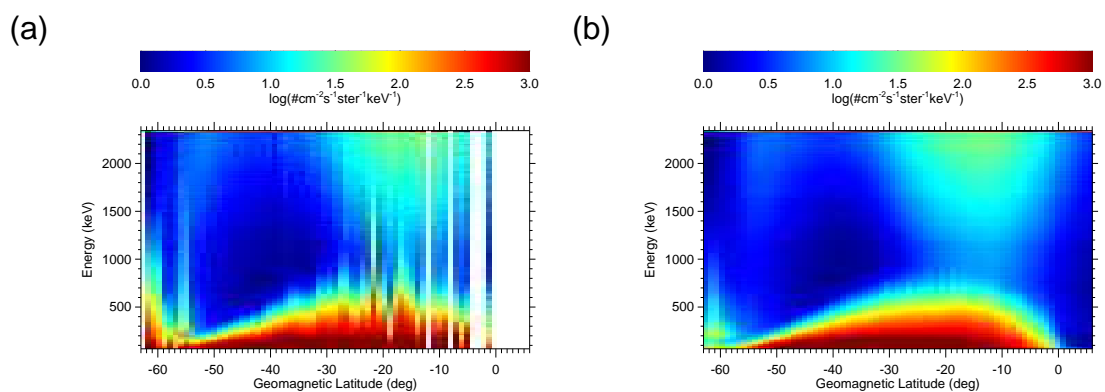
V závislosti na počtu hvizdů a denní době se mírně mění průběh hodnoty toku elektronů v popsáných oblastech. Tyto rozdíly jsou dobře vidět na obrázku 3.17. Zatímco oblast ve vysokoenergetickém pásmu téměř žádné rozdíly nevykazuje, oblast nižších energií závisí na počtu hvizdů významně. Během noci můžeme zřetelně vidět, že prakticky v celé popsané oblasti jsou toky vyšší, když je hvizdů detekováno málo. V případě denních měření jsou data více zašuměna, někde dokonce zcela chybí. To je způsobeno velmi malým počtem případů, kdy bylo během dne detekováno hodně hvizdů.



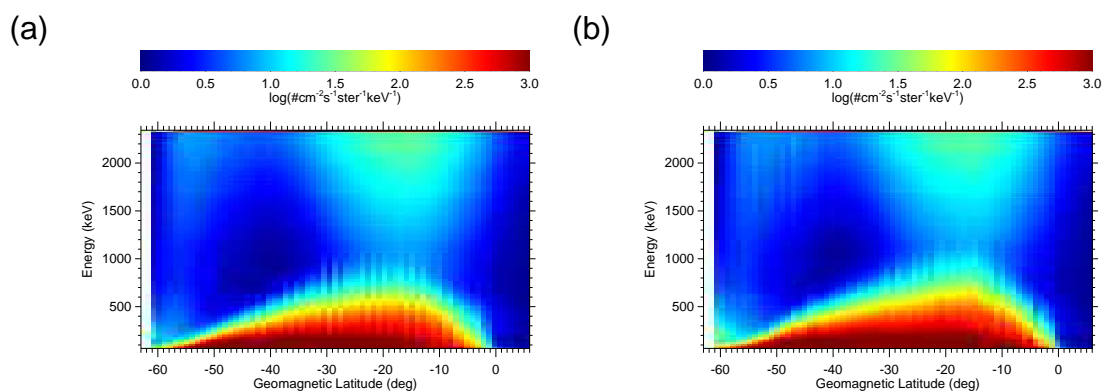
Obrázek 3.13: Barevně kódované geomagnetické mapy toku energetických elektronů. (a) Mediánové hodnoty toků detekovaných spolu s velkým počtem hvizdů ($\geq 7.5/\text{s}$). (b) Mediánové hodnoty toků detekovaných spolu s malým počtem hvizdů ($< 2.5/\text{s}$). (c) Poměr toků z části (a) k tokům z části (b). Měření během denních půlorbitů.



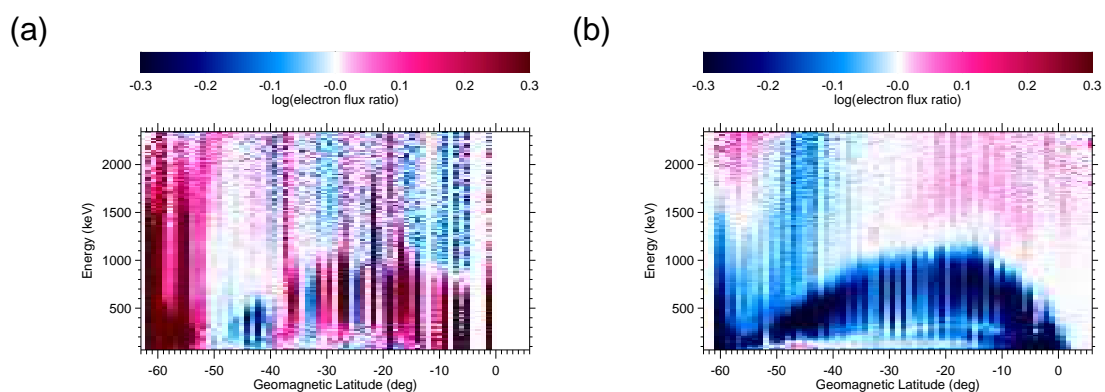
Obrázek 3.14: Stejně jako obrázek 3.13, ale během nočních půlorbitů.



Obrázek 3.15: Barevně kódované závislosti toku energetických elektronů na energii a geomagnetické šířce při (a) hodně hvizdech a (b) málo hvizdech. Měření během denních pólorbitů.



Obrázek 3.16: Stejně jako obrázek 3.15, ale během nočních pólorbitů



Obrázek 3.17: Barevně kódovaný poměr toků energetických elektronů jako funkce energie a geomagnetické šířky během (a) denních a (b) nočních pólorbitů.

4. Diskuse

4.1 Fungování neuronové sítě pro detekci hvizdů

Klíčovou sadou dat použitou v této práci byl výstup na palubě umístěné neuronové sítě určené k detekci a klasifikaci hvizdů. Tato neuronová síť poskytuje počty detekovaných hvizdů rozdělené podle disperzí s časovým rozlišením 0.1024 s. Z prezentace, kterou jsme měli k dispozici, lze vyčíst, že úspěšnost detekce byla údajně lepší než 90 %. Vzhledem k tomu, že však zatím nebyla publikována žádná práce, která by se těmito daty detailně zabývala, rozhodli jsme se fungování detekce hvizdů ověřit. Na několika vybraných časových úsecích bylo provedeno srovnání s frekvenčně-časovými spektrogramy výkonové spektrální hustoty fluktuací elektrického pole. Na obrázku 3.1 je možné porovnat detekci jednotlivých hvizdů. V tomto případě můžeme říci, že pro většinu hvizdů zobrazených ve spektrogramu (svislé čáry) lze nalézt odpovídající bod v horní části obrázku a totéž naopak. Vzhledem k tomu, že časové rozlišení ostatních použitých dat bylo více než $10\times$ horší, nebylo přesné určení časů výskytu hvizdů stěžejní. Proto jsme se kromě zmíněné detailní analýzy rozhodli ověřit i statistickou relevanci detekce hvizdů. Pro toto ověření jsme zvolili několik náhodně vybraných půlobitů. Na nich jsme napočítali celkové počty detekovaných hvizdů během časových intervalů dlouhých 30 s, nezávisle na disperzi. Tyto celkové počty jsme porovnali s frekvenčně-časovými spektrogramy výkonové spektrální hustoty fluktuací elektrického pole z módu „Survey“. Výkonová hustota v těchto spektrogramech reprezentuje průměr za 2.048 s. Jednotlivé hvizdy v takovém rozlišení nejsou pozorovatelné, ale hodnota výkonové hustoty odpovídá přibližně součtové intenzitě přítomných hvizdů. Na obrázku 3.2 si můžeme všimnout, že časové úseky, kdy se ve spektrogramu pohybujeme v horní části barevné škály, odpovídají intervallům, kdy byly počty detekovaných hvizdů vyšší. I z této analýzy tedy můžeme usuzovat, že detekce hvizdů fungovala správně.

4.2 Výskyt hvizdů

Po ověření, že data, která se chystáme dále používat, jsou relevantní, jsme přikročili ke zmapování výskytu hvizdů. Data poskytovaná družicí obsahují kromě samotných měření také informace o čase, poloze družice a mnoha dalších parametrech. Bylo tedy možné zkonstruovat mapy hvizdů, které jsme dále rozdělili podle denní (den a noc) a roční (léto a zima) doby. Také jsme rozlišili případy, kdy měly hvizdy nízkou, střední a vysokou disperzi. Pro dělení podle ročního období byly zvoleny intervaly [květen - říjen] jako léto a [listopad - duben] jako zima. Intervaly zahrnují přibližně stejně dlouhé časové úseky a období jara a podzimu si rovnoměrně rozdělují. Obě hranice intervalu středních disperzí byly určeny na základě analýzy výskytu hvizdů v jednotlivých disperzních třídách. Přesnost určení byla již od začátku omezena celkovým počtem (19) disperzních tříd, do kterých byly hvizdy tříděny. Pro určení hranice, pod kterou lze disperzi považovat za nízkou, bylo klíčové, aby bylo možné tyto hvizdy interpretovat tak, že pochází z té hemisféry, na které byly detekovány. Horní hranice skupiny disperzních tříd, které splňovaly kritérium střední disperze, byla určena na základě požadavku maximál-

ně jednoho průchodu rovníkovou rovinou. Díky tomuto rozdělení by tedy měly hvizdy s nízkou disperzí svým výskytem odpovídat výskytu blesků. Hvizdy se střední disperzí by se potom měly vyskytovat převážně v oblastech magneticky konjugovaných. Přesnou souvislost mezi výskytem blesků a vznikem detekovatelných hvizdů jsme v této práci nestudovali, neboť nebyla stěžejní pro interpretaci dalších výsledků.

Když porovnáme mapu výskytu hvizdů během dne a během noci, zjistíme, že během nočních půlorbitů bylo hvizdů detekováno více. Tato skutečnost není překvapivá a je důsledkem několika faktorů. Z těch nejzjevnějších můžeme uvést například to, že výskyt blesků je vyšší ve večerních hodinách. Poměr průměrné bleskové aktivity během nočních půlorbitů k průměrné bleskové aktivitě během denních půlorbitů je přibližně $3/2$ (Colman a Starks, 2013). Dalším faktorem, který přispívá k tomuto rozdílu, jsou parametry ionosféry, které jsou v daných případech značně odlišné. Během dne pak dochází k výrazně většímu útlumu elektromagnetických vln při šíření skrz ionosféru (např. Němec a kol., 2008) a slabší hvizdy mohou být následně na družici nedetekovatelné. Také stojí za povšimnutí klesající výskyt hvizdů s rostoucí disperzí. I při šíření mezi severní a jižní hemisférou dochází k útlumu a také ztrátám při odrazu. Stejně jako v předchozím případě mají pak hvizdy příliš nízkou intenzitu a na pozadí jiného původu jsou hůře detekovatelné. Navíc nevedené hvizdy se nemusí dostat dolů na výšky DEMETER.

4.3 Analýza intenzity vln

Pro další analýzu byla spolu s informacemi o výskytu hvizdů použita data změřená přístrojem ICE, v případě vlnové analýzy i přístrojem IMSC, ve frekvenčních pásmech VLF (do 20 kHz) a ELF (do 1.25 kHz). Cílem této analýzy bylo vyhodnotit, jak se hvizdy pocházející od blesků podílejí na celkové intenzitě přítomných vln. Za tímto účelem byly určeny počty hvizdů, které jsme považovali za nízké, střední a vysoké. Na základě výskytu hvizdů jsme hranice mezi těmito případy stanovili na 5 a 15 hvizdů za sekundu. Stejně jako v předchozím případě, i tentokrát byl dalším parametrem magnetický lokální čas, který nám data dělil na denní a noční.

Aby byla interpretace výsledků jednodušší, uvažujeme pro další analýzu pouze hvizdy s nízkou disperzí. Takové hvizdy pocházejí ze stejné hemisféry, na jaké byly detekovány. Lze také říci, že se tyto hvizdy šíří směrem od povrchu Země. Jak je vidět z map výskytu hvizdů, s rostoucí disperzí četnost výskytu významně klesá. Toto kritérium tedy znamená zanedbání pouze velmi malého počtu detekovaných hvizdů. Dále jsme se omezili pouze na období, kdy byla nízká geomagnetická aktivita, konkrétně hodnoty Kp indexu menší než 4-. Důvodem tohoto omezení je, že při zvýšené geomagnetické aktivitě jsou hvizdy hůře detekovatelné, a tudíž by mohlo dojít ke zkreslení statistiky. Díky tomu, že měření družice DEMETER probíhala v období slunečního minima, neznamená ani tato restrikce žádné výrazné zmenšení studovaného souboru dat.

4.3.1 Vyhodnocení vlivu hvizdů na intenzitu v pásmu VLF

Ve frekvenčním rozsahu do 20 kHz jsme zkonstruovali závislosti mediánové elektrické intenzity na absolutní hodnotě geomagnetické šířky a frekvenci. Tyto závislosti jsme také rozdělili na denní a noční. K dalšímu porovnání byly vybrány případy, kdy bylo hvizdů hodně, a ty, kdy bylo hvizdů málo. Na obrázku 3.9 lze vidět poměr mediánové intenzity mezi těmito případy. Můžeme říci, že během dne je intenzita pocházející od hvizdů dominantní téměř v celém frekvenčním spektru i rozsahu geomagnetických šířek. Za zmínku rovněž stojí výrazné stopy pocházející od pozemních VLF vysílačů na vyšších frekvencích. Tento výsledek není překvapivý. Např. *Parrot a kol.* (2009) nebo *Lefeuvre a kol.* (2013) zjistili, že umělé vysílače mají vliv na prostupnost ionosféry pro vlny pocházející od blesků a v době, kdy jsou aktivní, se hvizdy ionosférou šíří snáze. Dochází tedy k tomu, že při aktivitě vysílačů je detekováno více hvizdů, což přesně odpovídá našemu zjištění.

Během noci je situace komplikovanější. Můžeme nalézt dvě oblasti v geomagnetické šířce a frekvenci, kde jsou naopak dominantní emise jiného původu. Jedna z těchto oblastí se nachází na vyšších frekvencích v relativně úzkém rozsahu geomagnetických šířek. I v tomto případě je možné pozorovat výkyvy spojené s umělými vysílači. Stejně jako během dne je vyšší intenzita na frekvencích vysílačů spojena s vyšším výskytem blesků. V tomto případě není rozdíl tak výrazný. Rozdíly oproti výsledkům z denních pólorbitů je pravděpodobně možné částečně vysvětlit stejnou volbou hranic mezi případy s velkým, středním a malým výskytem hvizdů. Při porovnání denních a nočních map výskytu hvizdů je zjevné, že během noci je hvizdů pozorováno více. Je proto možné, že počet, který můžeme během dne považovat za „hodně“, během noci hodně není. V takovém případě může být statistika vychýlena ve prospěch nízké hvizdové aktivity. Další rozdíl mezi denní a noční stranou může souviset s celkovou dynamikou zemské magnetosféry. Intenzivní emise nebleskového původu se mohou tvořit díky energetickým částicím pocházejícím z noční strany, a tudíž být zde i detekovány. Tento efekt může být dále zesilován tím, že v přítomnosti intenzivních emisí je detekce hvizdů značně ztížena a její úspěšnost je pravděpodobně nižší.

4.3.2 Porovnání s analýzou směru šíření vln

Ve frekvenčním rozsahu do 1.25 kHz byly měřeny všechny složky elektromagnetického pole. Bylo proto možné určit kromě intenzity vln i směr jejich šíření. V každém časovém okamžiku se jedná o převládající směr šíření vln s danou frekvencí. Na základě těchto dat jsme zkonstruovali závislost mediánové elektrické intenzity na frekvenci a absolutní hodnotě geomagnetické šířky se stejným rozlišením, jaké bylo dostupné u výřezu výsledků předchozího případu. Díky použití pouze hvizdů s nízkou disperzí lze říci, že případy, kdy je hvizdů detekováno hodně, odpovídají případům, kdy je dominantní šíření směrem od povrchu Země. Analogicky případy s nízkým výskytem hvizdů odpovídají případům, kdy převládalo šíření vln směrem k povrchu Země. Právě panely obrázků 3.10 a 3.11 byly spočteny jako vážený poměr mezi mediánovou intenzitou vln šířících se nahoru a mediánovou intenzitou vln šířících se dolů. Jako váhu jsme zvolili relativní četnost těchto případů.

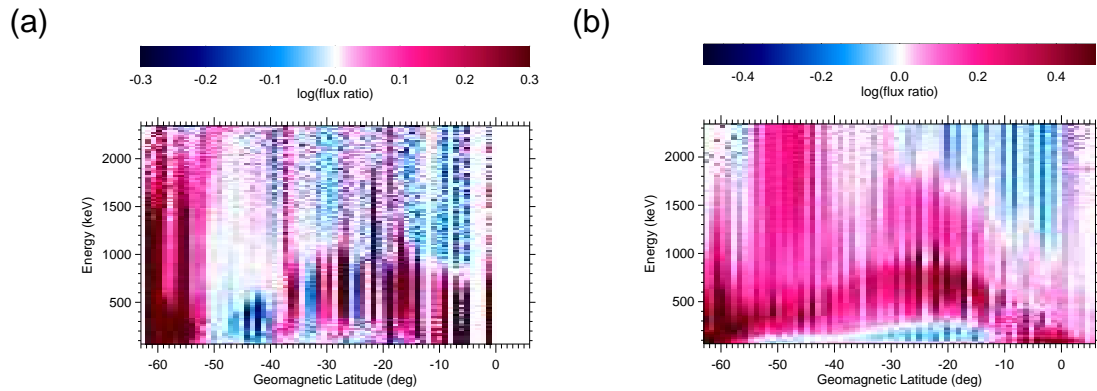
Při porovnání levé a pravé části obrázků 3.10 a 3.11 můžeme vidět, že závislost na geomagnetické šířce je velmi podobná. Pro kvantizaci této podobnosti jsme spočítali korelační koeficient pro každou frekvenci přes geomagnetické šířky. Na frekvencích vyšších než 500 Hz pozorujeme velmi dobrou korelaci (> 0.8). Tato frekvence nejspíš není jen náhodnou hranicí. Přibližně odpovídá protonové cyklotronové frekvenci na orbitu DEMETER. Během dne můžeme v okolí této frekvence pozorovat oblast, kde si analýza pomocí četnosti hvizdů protiřečí se směrem šíření vln. Možným vysvětlením tohoto jevu je, že se jedná o vlny, které nepocházejí od blesků. Tyto vlny se tedy šíří z vyšších výšek směrem k povrchu Země. V blízkosti protonové cyklotronové frekvence jsou tyto vlny odraženy na tzv. „ $L=0$ “ cut-offu a následně jsou detekovány během šíření směrem nahoru (*Santolík a kol., 2006*). V souladu s tímto vysvětlením je i fakt, že interval frekvencí, na kterých je tento „jazyk“ pozorován, není konstantní, ale s rostoucí geomagnetickou šířkou se mírně posouvá k vyšším frekvencím.

4.4 Vliv hvizdů na toky energetických elektronů

Kromě analýzy přímého vlivu hvizdů na elektrickou intenzitu jsme se zaměřili i na analýzu toků energetických elektronů. Elektromagnetické vlny jsou hlavním prostředkem výměny energie v magnetosféře Země. Ovlivňují tak významně rozdělovací funkci energetických elektronů a mají zásadní vliv na formování Van Allenových radiačních pásů. Přístroj IDP družice DEMETER monitoroval toky elektronů v okolí hranice ztrátového kužele na energiích od 64 keV do 2.35 MeV s rozlišením na 128 stejných intervalů. Stejně jako v případě elektrické intenzity jsme i v tomto případě rozlišovali mezi vysokou a nízkou hvizdovou aktivitou a mezi denními a nočními půlobitami. Na obrázcích 3.13 a 3.14 jsou geomagnetické mapy mediánových toků v jednotlivých případech nezávisle na energii. Jsou zde také vyobrazeny poměry mezi toky při vysoké a nízké hvizdové aktivitě. Nezanebatelné hodnoty můžeme vidět na geomagnetických šířkách nad 60° na severní i jižní polokouli. Tyto hodnoty jsou jen mírně zvýšené oproti velmi nízkému okolí. Tyto oblasti nebyly v rámci této práce podrobněji zkoumány.

Nejvýznamnější toky můžeme pozorovat v okolí Jihoatlantické anomálie. Tento fakt odpovídá předpokladům. Družice DEMETER se pohybovala na relativně nízké oběžné dráze, a tudíž byl efekt způsobený sklonem a posunem magnetického pole oproti dipólové idealizaci významný. Při pohledu pouhým okem jsou mapy velmi podobné nezávisle na denní době nebo hvizdové aktivitě. Poměry toků v částech (c) však naznačují, že nějaké rozdíly zaznamenány byly. V další analýze jsme se omezili pouze na interval mezi 0° a 80° geomagnetické délky, který odpovídá Jihoatlantické anomálii.

Na obrázcích 3.15 a 3.16 můžeme pozorovat dvě oblasti s vysokými toky. Jedna leží ve spodní části energetického spektra, druhá naopak v té horní. Zatímco nízkooenergetická oblast zasahuje do širokého rozsahu geomagnetických šířek, ta vysokoenergetická je omezena na šířky mezi -30° a geomagnetickým rovníkem. V denních datech při vysoké hvizdové aktivitě můžeme pozorovat bílá místa, která značí nedostatek pozorování. Vzhledem k statistické relevanci výsledků jsme



Obrázek 4.1: Srovnání poměrů toků energetických elektronů v oblasti Jihoatlantické anomálie. (a) Poměr mediánových toků během dne na geomagnetických délkách 35° až 40° při vysoké a nízké hvizdové aktivitě. (b) Poměr mediánových toků při MLR a nezávisle na výskytu MLR.

neuvážovali lokality, kde bylo méně než 1000 případů. Prakticky celá zkoumaná oblast leží nad oceánem. Protože během dne je hvizdová aktivita nízká, zvláště v okolí geomagnetického rovníku, právě případy vysoké hvizdové aktivity jsou v této lokalitě relativně vzácné. Na obrázku 3.17 je znázorněn poměr toku energetických elektronů během vysoké a nízké hvizdové aktivity. Rozdíly mezi toky jsou mnohem výraznější v nízkoenergetické části. Během noci je zřejmé, že vyšší toky jsou spojeny s nízkou hvizdovou aktivitou. Bylo prokázáno, že hvizdy pocházející od blesků způsobují vysypávání (*precipitation*) elektronů do atmosféry (*Bortnik a kol.*, 2006a). Můžeme předpokládat, že vysoká hvizdová aktivita značí měření během probíhající bouřky. Na základě nezávislosti výskytu bouřek a místa měření můžeme uvažovat, že měření probíhá „uprostřed“ bouřky. Nižší detekované toky tak lze odůvodnit tím, že již došlo k vysypání značného počtu elektronů před příletem družice. Během dne jsou data více zašuměná. To může být důsledkem zmíněného nízkého počtu případů s vysokou hvizdovou aktivitou. Výrazné rozdíly mezi toky můžeme také pozorovat na šířkách menších než -50° .

Oblast na nízkých energiích mezi -50° a geomagnetickým rovníkem je zajímavá v porovnání s toky elektronů měřenými během elektromagnetických událostí typu MLR (Magnetospheric Line Radiation) (*Bezděková a kol.*, 2015). Toky energetických elektronů pozorované během těchto událostí se od průměrného stavu odlišují v přibližně stejném rozsahu energií a geomagnetických šířek jako v případě dělení podle počtu detekovaných hvizdů. Na obrázku 4.1 jsou porovnány poměry toků energetických elektronů v závislosti na energii a geomagnetické délce. Část (a) je identická s obrázkem 3.17a. Část (b) je převzata z *Bezděková a kol.* (2015) obr. 8. Na základě této podobnosti a sezónní preference výskytu událostí typu MLR lze usuzovat na možnou souvislost mezi jejich výskytem a počtem detekovaných hvizdů.

Závěr

V této práci byla zpracována měření elektromagnetického pole a toků energetických elektronů prováděná družicí DEMETER. Klíčovou sadou dat pro analýzu byl výstup neuronové sítě pro detekci hvizdů umístěné na palubě družice. Neuronová síť poskytovala počty a disperze detekovaných hvizdů s časovým rozlišením 0.1 s.

Diskutovali jsme význam vlnovodu Země-ionosféra pro pozorované vlnové jevy (*Záhlava a kol.*, 2015). Byla ověřena lokální i globální správnost detekce hvizdů porovnáním s frekvenčně-časovými spektrogramy výkonové spektrální hustoty fluktuací elektrického pole. Následně byly zkonstruovány geomagnetické mapy výskytu hvizdů v závislosti na denní a roční době a na disperzi detekovaných hvizdů. Bylo zjištěno, že výskyt hvizdů koresponduje s výskytem blesků.

Byla analyzována měření elektrického pole v pásmu velmi nízkých frekvencí (do 20 kHz) na základě četnosti výskytu hvizdů. Byly identifikovány intervaly v geomagnetické šířce a frekvenci, kdy je příspěvek hvizdů k celkové elektrické intenzitě dominantní. V pásmu extrémně nízkých frekvencí (do 1.25 kHz) byla analýza pomocí výskytu hvizdů porovnána s analýzou založenou na směru šíření vln. Ukázalo se, že na frekvencích vyšších než 500 Hz jsou tyto dvě metody v dobré shodě. V okolí protonové cyklotronové frekvence byla během dne zjištěna neshoda mezi těmito dvěma metodami a bylo navrženo její možné vysvětlení.

Byly zmapovány toky energetických elektronů v závislosti na počtech detekovaných hvizdů, energii a geomagnetické šířce. Při porovnání s toky detekovanými během událostí MLR se ukázalo, že intervaly v energii a geomagnetické šířce, na kterých mediánové toky závisí na četnosti výskytu hvizdů, jsou podobné.

Literatura

- Berthelier, J., M. Godefroy, F. Leblanc, E. Seran, D. Peschard, P. Gilbert, a J. Artru (2006), IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER, *Planet. Space Sci.*, 54, 487–501.
- Berthelier, J. J. (2006), ICE, the electric field experiment on DEMETER, *Planet. Space Sci.*
- Bezděková, B., F. Němec, M. Parrot, O. Santolík, a O. Krupařová (2015), Magnetospheric line radiation: 6.5 years of observations by the DEMETER spacecraft, *J. Geophys. Res.*, 120, doi:10.1002/2015JA021246.
- Bortnik, J., U. Inan, a T. Bell (2006a), Temporal signatures of radiation belt electron precipitation induced by lightning-generated MR whistler waves: 1. methodology, *J. Geophys. Res.*, 111(A02204), doi:10.1029/2005JA011182.
- Bortnik, J., U. Inan, a T. Bell (2006b), Temporal signatures of radiation belt electron precipitation induced by lightning-generated MR whistler waves: 2. global signatures, *J. Geophys. Res.*, 111(A02205), doi:10.1029/2005JA011398.
- Carpenter, D. (1983), Some aspects of plasmopause probing by whistlers, *Radio Science*, 18(6), 917–925.
- Carpenter, D., a R. Anderson (1992), An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 97(A2), 1097–1108.
- Christian, H. J., R. Blakeslee, D. Boccippio, W. Doeck, D. Buechler, K. Driscoll, S. Goodman, J. Hall, W. Koshak, D. Mach, a M. Stewart (2003), Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D1), ACL 4–1–ACL 4–15, doi:10.1029/2002JD002347.
- Colman, J., a M. Starks (2013), VLF wave intensity in the plasmasphere due to tropospheric lightning, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 4471–4482, doi:10.1002/jgra.50217.
- Elie, F., M. Hayakawa, M. Parrot, J.-L. Pincon, a F. Lefeuvre (1999), Neural network system for the analysis of transient phenomena on board the DEMETER micro-satellite, *IEICE Trans. Fundamentals*, E82-A, 1575–1580.
- Fišer, J., J. Chum, G. Diendorfer, M. Parrot, a O. Santolík (2010), Whistler intensities above thunderstorms, *Ann. Geophys.*, 28(11), 37–46.
- Green, J., a U. Inan (2006), Chapter 4: Lightning effects on space plasmas and applications, *Plasma Physics Applied*.
- Green, J., S. Boardsen, L. Garcia, W. Taylor, S. Fung, a B. Reinisch (2005), On the origin of whistler mode radiation in the plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, 110(A03201), doi:10.1029/2004JA010495.

- Green, J., S. Boardsen, L. Garcia, S. Fung, a B. Reinisch (2006), Reply to "comment on"on the origin of whistler mode radiation in the plasmasphere"by Green et al.", *J. Geophys. Res.*, *111*(A09211), doi:10.1029/2006JA011622.
- Gurnett, D., a T. Burns (1968), The low-frequency cutoff of ELF emissions, *J. Geophys. Res.*, *73*, 7437–7445.
- Helliwell, R. (1965), *Whistlers and related ionospheric phenomena*, Stanford University Press.
- Kivelson, M., a C. Russell (1995), *Introduction to Space Physics*, Cambridge atmospheric and space science series, Cambridge University Press.
- Lefeuvre, F., J. Pincon, a M. Parrot (2013), Midlatitude propagation of VLF to MF waves through nighttime ionosphere above powerful VLF transmitters, *J. Geophys. Res.*, *118*, 1210–1219, doi:10.1002/jgra.50177.
- McPherron, R., C.T.Russel, a P. Jr. (1972), Fluctuating magnetic fields in the magnetosphere, 2, ULF waves, *Space Sci. Rev.*, *13*, 411–454.
- Means, J. (1972), Use of the three-dimensional covariance matrix in analyzing the polarization properties of plane waves, *J. Geophys. Res.*, *77*, 5551–5559.
- Meredith, N., R. Horne, M. Clilverd, D. Horsfall, R. Thorne, a R. Anderson (2006), Origins of plasmaspheric hiss, *J. Geophys. Res.*, *111*(A09217), doi:10.1029/2006JA011707.
- Němec, F., O. Santolík, M. Parrot, a J. Bortnik (2008), Power line harmonic radiation observed by satellite: Properties and propagation through the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, *113*(A08317), doi:10.1029/2008JA013184.
- Němec, F., O. Santolík, M. Parrot, a C. J. Rodger (2010), Relationship between median intensities of electromagnetic emissions in the VLF range and lightning activity, *J. Geophys. Res.*, *115*(A08315), doi:10.1029/2010JA015296.
- Parrot, M., D. Benoist, J. Berthelier, J. Blecki, Y. Chapuis, F. Colin, F. Elie, P. Fergeau, D. Lagoutte, F. Lefeuvre, C. Legendre, M. Lèveque, J. Pincon, B. Poirier, H.-C. Seran, a P. Zamora (2006), The magnetic field experiment imsc and its data processing onboard DEMETER: Scientific objectives, description and first results, *Planet. Space Sci.*, *in press*.
- Parrot, M., U. Inan, N. Lehtinen, a J. Pincon (2009), Penetration of lightning MF signals to the upper ionosphere over VLF ground-based transmitters, *J. Geophys. Res.*, *114*, A12,318, doi:10.1029/2009JA014598.
- Samson, J., a J. Olson (1980), Some comments on the descriptions of the polarization states of waves, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, *61*, 115–129.
- Santolík, O., M. Parrot, a F. Lefeuvre (2003), Singular value decomposition methods for wave propagation analysis, *Radio Sci.*, *38*, doi:10.1029/2000RS002523.

- Santolík, O. (2003), Propagation analysis of STAFF-SA data with coherency tests (a user's guide to PRASSADCO), *LPCE/NTS/073.D*.
- Santolík, O., F. Němec, M. Parrot, D. Lagoutte, L. Madrias, a J. Berthelier (2006), Analysis methods for multi-component wave measurements on board the DEMETER spacecraft, *Planet. Space Sci.*, *54*, 512–527.
- Santolík, O., M. Parrot, U. Inan, D. Burešová, D. Gurnett, a J. Chum (2009), Propagation of unducted whistlers from their source lightning: A case study, *J. Geophys. Res.*, *114*(A03212).
- Sauvaud, J., T. Moreau, R. Maggiolo, J.-P. Treilhou, C. Jacquy, A. Cros, J. Coutelier, J. Rouzaud, E. Penou, a M. Gangloff (2006), High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt, *Planet. Space Sci.*, *54*, 502–511.
- Stix, T. H. (1992), *Waves in plasmas*, Springer Science & Business Media.
- Storey, L. R. O. (1953), An investigation of whistling atmospheric, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A* *246*, 113–141.
- Thorne, R., R. Horne, a N. Meredith (2006), Comment on "on the origin of whistler mode radiation in the plasmasphere" by Green et al., *J. Geophys. Res.*, *111*(A09210), doi:10.1029/2005JA011477.
- University of Calgary (2012), Above an array for broadband observations of VLF/ELF emissions: <http://www.ucalgary.ca/above/node/34> (7.1.2016).
- Voss, H., M. Walt, W. Imhof, J. Mobilia, a U. Inan (1998), Satellite observations of lightning-induced electron precipitation, *J. Geophys. Res.*, *103*(A6), 11,725–11,744.
- Walker, A. (1976), The theory of whistler propagation, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, *14*(4).
- Záhlava, J., F. Němec, O. Santolík, I. Kolmašová, M. Parrot, a C. J. Rodger (2015), Very low frequency radio events with a reduced intensity observed by the low-altitude DEMETER spacecraft, *J. Geophys. Res.*, *120*, 9781–9794, doi: 10.1002/2015JA021607.