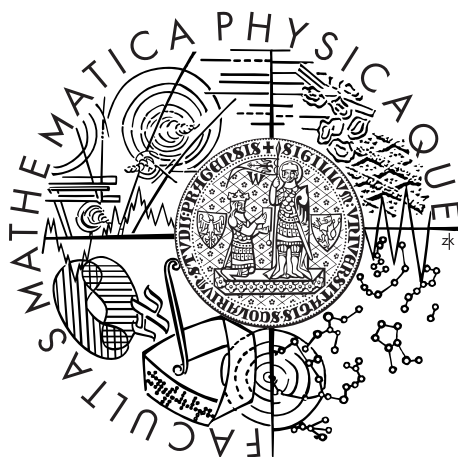


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Barbora Bezděková

Magnetosférické čárové záření pozorované družicí DEMETER

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. František Němec, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2015

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mojí bakalářské práce RNDr. Františkovi Němcovi, Ph.D. za udělení mnohých rad a pomoc během vypracování práce a především za trpělivost při mnohých konzultacích a objasňování řešených úkolů.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Název práce: Magnetosférické čárové záření pozorované družicí DEMETER

Autor: Barbora Bezděková

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. František Němec, Ph.D., KFPP MFF UK

Abstrakt: Ve frekvenčně-časových spektrogramech elektromagnetických vln pozorovaných ve vnitřní magnetosféře Země v rozsahu 1-8 kHz se někdy vyskytují téměř horizontální skoro rovnoběžné intenzivní čáry. Takové události byly zaznamenány pozemními observatořemi i družicemi a jsou nazývány magnetosférické čárové záření (Magnetospheric Line Radiation, MLR). Provedli jsme systematickou analýzu celkem 1230 událostí typu MLR nalezených v datech družice DEMETER (2004-2010, výška cca 700 km). Zaměřujeme se na možnou souvislost mezi výskytem událostí a parametry slunečního větru. Dlouhý interval analyzovaných dat umožňuje vyhodnotit případný vliv slunečního cyklu a ročního období. Ukazujeme, že existuje statisticky významná souvislost mezi MLR událostmi a parametry slunečního větru a že události jsou častěji pozorovány během zimních měsíců a spíše v době slunečního maxima. Četnost událostí je výrazně nižší na geomagnetických délkách odpovídajících Jihoatlantické anomálii (South Atlantic Anomaly, SAA). Analyzujeme spektra energetických elektronů vysypávajících se v této oblasti v době pozorování MLR událostí, u nichž se předpokládá, že by mohly souviset s mechanismem vzniku těchto vln.

Klíčová slova: magnetosférické čárové záření, DEMETER, sluneční vítr

Title: Magnetospheric Line Radiation Observed by the DEMETER Spacecraft

Author: Barbora Bezděková

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: RNDr. František Němec, Ph.D., KFPP MFF UK

Abstract: Frequency-time spectrograms of electromagnetic waves observed in the Earth's inner magnetosphere in the frequency range 1-8 kHz sometimes contain nearly horizontal and almost parallel intense lines. Such events were observed both by ground-based instruments and satellites, and they are called Magnetospheric Line Radiation (MLR). We systematically analyze 1230 MLR events identified in the data of the DEMETER spacecraft (2004-2010, altitude of about 700 km). We focus on a possible connection between the event occurrence and solar wind parameters. Long analyzed data interval allows us to evaluate a possible influence of the solar cycle and season of the year. We show that there is a statistically significant correlation between MLR events and solar wind parameters, and that the events are observed more often during the winter months and preferably during the solar maximum. The events occur less frequently at geomagnetic longitudes of South Atlantic Anomaly (SAA). We analyze spectra of energetic electrons precipitating in this region at the times of MLR events, which are supposed to be related to the wave generation.

Keywords: magnetospheric line radiation, DEMETER, solar wind

Obsah

Úvod	2
1 Cíle bakalářské práce	3
2 Dosud známé skutečnosti o magnetosférickém čárovém záření	4
2.1 Obecné vlastnosti MLR	4
2.2 První výsledky zkoumání původu MLR	4
2.3 Nová pozorování MLR událostí	5
3 Použitá data a způsob jejich zpracování	6
3.1 Družice DEMETER	6
3.2 Identifikace MLR událostí	6
4 Získané výsledky	8
4.1 Závislost na slunečním cyklu a ročním období	8
4.2 Optimální parametry slunečního větru	9
4.3 Energetické elektrony pozorované v době trvání MLR událostí . .	10
4.4 Prostorový rozsah MLR událostí	12
5 Diskuze dosažených výsledků	16
Závěr	19
Seznam použité literatury	20

Úvod

Práce je zaměřena na systematickou analýzu elektromagnetických událostí typu *magnetosférické čárové záření (Magnetospheric Line Radiation, MLR)* identifikovaných v datech družice DEMETER během celé její mise. Použitý soubor celkem 1230 událostí představuje pravděpodobně největší existující databázi těchto jevů.

Práce se zaměřuje na analýzu možných souvislostí mezi výskytem událostí typu MLR a jinými jevy, což by mohlo přispět k určení nejvhodnějších podmínek jejich vzniku.

V úvodní kapitole jsou uvedeny hlavní cíle předkládané práce. Ve 2. kapitole jsou shrnuta dosud zjištěná fakta o magnetosférickém čárovém záření. V další kapitole je popsána družice DEMETER a identifikace MLR událostí z jejích dat. Výsledky systematické analýzy výskytu MLR událostí jsou uvedeny v kapitole 4 a diskutovány v kapitole 5. Hlavní zjištění práce jsou shrnuta v Závěru.

1. Cíle bakalářské práce

V předkládané práci jsou zkoumány elektromagnetické vlnové události typu magnetosférické čárové záření (MLR) pozorované družicí DEMETER se zaměřením na systematickou studii velkého počtu identifikovaných událostí a hledání možné souvislosti jejich výskytu s jinými pozorovanými jevy. Hlavní cíle je možné shrnout do následujících bodů:

1. Seznámení se s družicí DEMETER, zvládnutí základní práce s daty.
2. Identifikace událostí magnetosférického čárového záření.
3. Systematická studie výskytu nalezených událostí.
4. Identifikace změn v měřených tocích energetických částic souvisejících s výskytem událostí.

2. Dosud známé skutečnosti o magnetosférickém čárovém záření

2.1 Obecné vlastnosti MLR

Magnetosférické čárové záření jsou elektromagnetické vlnové události ve frekvenčním rozsahu přibližně 1-8 kHz pozorované ve vnitřní magnetosféře Země. Pokud jsou reprezentovány ve formě frekvenčně-časových spektrogramů, skládají se z několika intenzivních téměř horizontálních a skoro rovnoběžných čar. Tyto čáry mohou vykazovat pomalý, obvykle pozitivní, frekvenční drift.

Události typu MLR byly pozorovány jak na pozemních observatořích (např. Rodger a kol., 1999, 2000b; Manninen, 2005), tak i družicemi s nízkou drahou letu (např. Bell a kol., 1982; Rodger a kol., 1995; Parrot a kol., 2005; Němec a kol., 2007b). Ačkoliv se zdá, že tyto elektromagnetické jevy mohou hrát roli při vzniku jiných emisí a potenciálně ovlivňovat částice v radičních páslech (např. Matthews – Yearby, 1981; Parrot – Němec, 2009), jejich původ je stále nejasný.

2.2 První výsledky zkoumání původu MLR

Někteří autoři (např. Bullough, 1995) spekulovali o možné souvislosti událostí typu MLR s událostmi typu PLHR (Power Line Harmonic Radiation), což jsou události generované díky elektromagnetickému záření z pozemní elektrické sítě (viz např. Němec a kol., 2006; Němec a kol., 2007a,b, 2008).

Ovšem Rodger a kol. (1999) analyzovali pozemní měření MLR událostí z dat pořízených v Halley na Antarktidě a zjistili, že frekvenční vzdálenosti čar tvořících MLR události neodpovídají základní frekvenci elektrické rozvodné sítě, tzn. 50 nebo 60 Hz. Závěrem jejich výzkumu bylo tvrzení, že magnetosférické čárové záření je přírodního původu a nespojuje s událostmi typu PLHR.

Toto bylo následně potvrzeno další analýzou (Rodger a kol., 2000a). V dané souvislosti byly zkoumány parametry událostí typu MLR jako je denní závislost počtu událostí, možné asymetrie v šíření způsobené spojitostí se zářením americké pozemní elektrické sítě nebo počet detekovaných událostí v závislosti na dnu v týdnu. Doba trvání a výskyt MLR událostí naměřených v Halley na Antarktidě byly analyzovány v Rodger a kol. (2000b). Uváděná doba trvání jedné MLR události je kolem 30 minut a jejich výskyt v některých případech zřejmě souvisí s geomagnetickou aktivitou (24-48 hodin po velmi silných bouřích, $Kp > 6$).

Rodger a kol. (1995) publikovali výsledky první systematické studie magnetosférického čárového záření pozorovaného družicí z dat družic ISIS 1 a 2. Rozlišovali dva druhy událostí. Události prvního typu jsou tvořeny širokospektrálními čarami driftujícími ve frekvenci rychlostí několika desítek Hz za minutu. Frekvenční rozestup mezi jednotlivými čarami je u těchto událostí proměnlivý a neodpovídá násobkům 50 nebo 60 Hz. Technicky vzato, pouze tyto události by měly být pokládány za magnetosférické čárové záření. Události druhého typu jsou charakterizovány úzkospektrálními čarami o konstantních frekvencích, zpravidla odpovídajících násobkům 50 nebo 60 Hz.

Detailnější analýza těchto dvou druhů událostí za použití dat z družice DEMETER byla provedena v Němec a kol. (2007a). Druhý typ událostí je zde vysvětlen jako následek elektromagnetického záření z pozemní elektrické sítě, tj. události typu PLHR (Němec a kol., 2006; Němec a kol., 2007b, 2008). Rozbor v Němec a kol. (2007a) ukázal, že zatímco události typu PLHR jsou pozorovány bez závislosti na geomagnetické aktivitě, události typu MLR se častěji vyskytují během geomagneticky aktivních období. Také doby pozorování těchto druhů událostí byly odlišné – u PLHR událostí docházelo k jejich detekci v podstatě rovnoměrně během dne i noci, ale noční události byly intenzivnější, zatímco vliv intenzity na lokálním čase u událostí typu MLR pozorován nebyl, ovšem počet událostí nalezených ve dne byl vyšší než počet událostí detekovaných v noci.

2.3 Nová pozorování MLR událostí

Analýzu MLR události pozorované současně družicí DEMETER a pozemní observatoří (Sodankylä, Finsko) publikovali Parrot a kol. (2007). Událost trvala přibližně 2 hodiny a zabírala velkou oblast severní polokoule (více než 7 milionů km^2). Velký prostorový rozsah událostí typu MLR demonstrovala i studie využívající konjugovaná pozorování téže události družicemi DEMETER a Cluster (Němec a kol., 2012b). Frekvenční rozestupy zjištěné pro tuto událost sice zřejmě odpovídají určité frekvenci charakteristické pro oblast vzniku, není však možné dát ji do přímé souvislosti s událostmi typu PLHR. Ani hledání odpovídající frekvence porovnáním charakteristických frekvencí v možných zdrojových oblastech nebylo uspokojivé, hlavně proto, že frekvenční rozestupy spektrálních čar MLR události nevykazovaly jasnou změnu v závislosti na poloze (parametru L).

Systematické studie událostí typu MLR byly provedeny v Němec a kol. (2009, 2012a). Byla analyzována data z několika let pozorování družice DEMETER, tj. celkem několik stovek událostí (kolem 650 událostí). Bylo ukázáno, že události se vyskytují častěji ve dne než v noci a převážně během/po obdobích se zvýšenou geomagnetickou aktivitou. Události se typicky vyskytovaly v oblastech s $L > 2$, přičemž jejich výskyt byl přibližně limitován hranicí plazmasféry. Nejnižší četnost výskytu událostí byla v oblastech nad Jihoatlantickou anomálií (South Atlantic Anomaly, SAA) a východně od ní, což pravděpodobně souvisí se zvýšeným vysypáváním energetických elektronů v oblasti Jihoatlantické anomálie.

Frekvenční rozestupy mezi jednotlivými čarami jsou větší během silnější geomagnetické aktivity (tzn. v době, kdy plazmasféra dosahuje menších radiálních vzdáleností). Ani frekvenční drift ani frekvenční rozestupy jednotlivých čar nezávisí na hodnotě L , kde byly události pozorovány. Události se typicky vyskytovaly na frekvencích od 2 do 6 kHz a jejich celková frekvenční šířka byla ve většině případů menší než 2 kHz. Bylo navrženo, že vlny odpovídající MLR událostem mohou být vedeny po vnitřní hranici plazmasféry. Vznik událostí typu MLR vlivem působení člověka (tedy spojitost s událostmi typu PLHR) sice není v těchto pracích přímo vyloučena, magnetosférický původ MLR událostí se ovšem jeví pravděpodobnější.

3. Použitá data a způsob jejich zpracování

3.1 Družice DEMETER

K analýze magnetosférického čárového záření byla použita data z družice DEMETER, což byla francouzská družice s nízkou drahou letu, která zahájila svoji misi v červnu 2004. Družice měla téměř kruhovou dráhu synchronizovanou se Sluncem (lokální čas byl vždy přibližně 10:30 nebo 22:30). Měřila data prakticky kontinuálně na všech geomagnetických šířkách nižších než 65 stupňů. Původní výška družice 710 km byla v prosinci 2005 snížena na 660 km. Mise tohoto satelitu skončila v prosinci 2010.

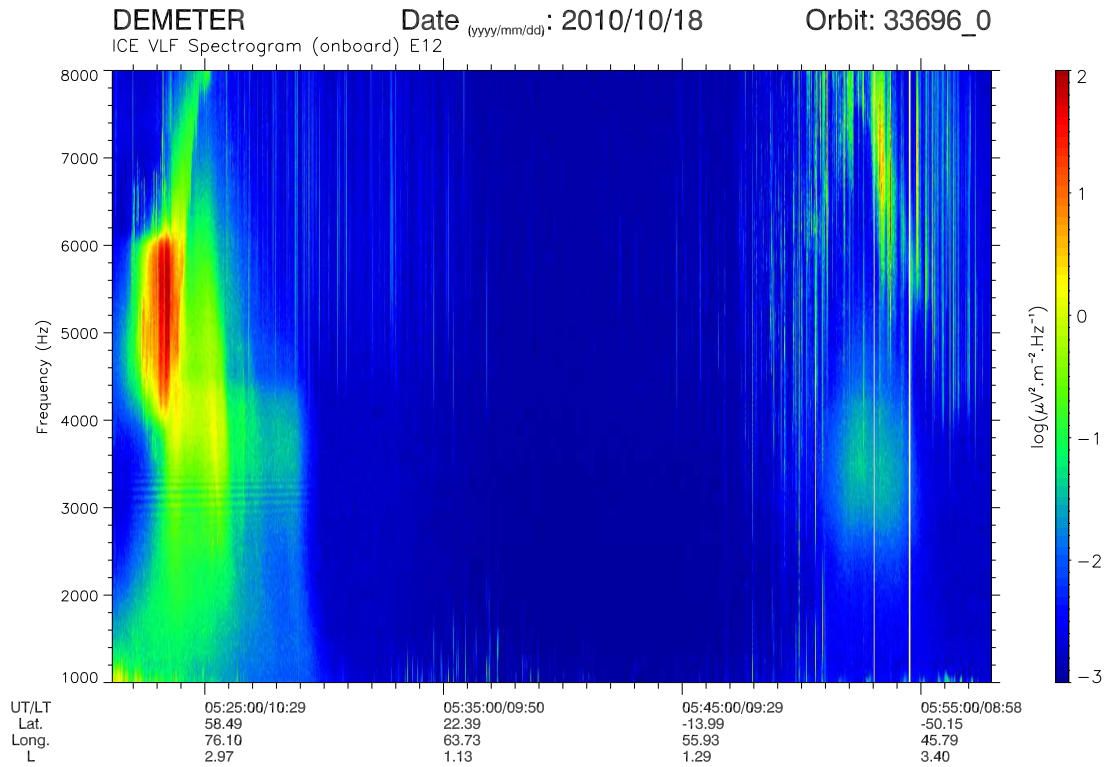
Družice DEMETER byla schopná pracovat ve dvou odlišných módech nazývaných „Burst“ a „Survey“. Detailnější data byla pořizována během Burst módu. Vzhledem k jejich velkému objemu byl ale tento mód aktivní pouze nad oblastmi zvláštního významu. Oproti tomu data s nižším rozlišením odpovídající módu Survey byla měřena stále.

V rozsahu velmi nízkých frekvencí (Very Low Frequency, VLF), tj. přibližně do 20 kHz, na které je tato práce zaměřena, byla během zapnutého módu Survey přímo na palubě družice počítána výkonová spektra jedné složky elektrického a jedné složky magnetického pole.

Vzhledem k tomu, že je měření magnetického pole silně poznamenáno interferencemi na palubě družice, jsou v této práci používána výhradně měření elektrického pole. Frekvenční rozlišení výkonových spektrogramů je 19.53 Hz a časové 2 s nebo 0.5 s (v závislosti na použitém módu přístroje). Další informace o družici DEMETER, jejich měřeních elektrického a magnetického pole a další související údaje uvádí Parrot (2006), Berthelier a kol. (2006) a Santolík a kol. (2006).

3.2 Identifikace MLR událostí

K analýze vlastností MLR událostí byl použit seznam identifikovaný autory v Němec a kol. (2009) a později rozšířený v Němec a kol. (2012a). Tento seznam událostí zahrnuje všechny události identifikované od počátku měření mise DEMETER do konce září 2008. V rámci předkládané práce byl stávající seznam MLR událostí opět rozšířen, a to tak, že nyní zahrnuje všechny události typu MLR nalezené během trvání celé mise družice DEMETER, tzn. až do konce roku 2010. Události, stejně jako v předchozích pracích, byly manuálně identifikovány ve frekvenčně-časových spektrogramech spektrální hustoty elektrického pole. Použitý postup přesně odpovídá předchozímu postupu hledání těchto událostí. Byly použity frekvenčně-časové spektrogramy s pevným rozsahem frekvence (1 až 8 kHz) a intenzity (od 10^{-3} do $10^2 \mu\text{V}^2 \text{m}^{-2} \text{Hz}^{-1}$). Pro každý půlorbit družice (trvajících přibližně 35 minut) byl vyhotoven jeden spektrogram. Příklad takového spektrogramu je ukázán na obr. 3.1. Událost typu MLR na tomto spektrogramu nastala přibližně mezi 05:22 UT a 05:29 UT na frekvencích kolem 3 000 Hz.



Obrázek 3.1: Příklad události typu MLR nalezené na frekvenčně-časovém spektrogramu odpovídajícímu jednomu půlorbitu družice DEMETER (tj. cca 35 minut). K události došlo přibližně mezi 05:22 UT a 05:29 UT na frekvenčním intervalu 2 800 Hz – 3 400 Hz.

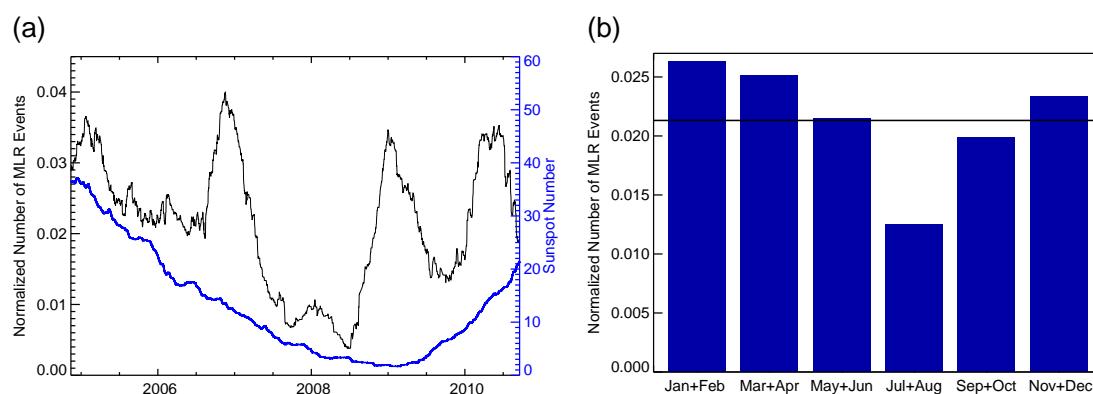
Dohromady bylo nalezeno 1230 MLR událostí celkem na 1054 půlorbitech (z celkového počtu 57 574 půlorbitů). Důvodem, proč je počet nalezených událostí vyšší než počet půlorbitů, na kterých byly události pozorovány, je, že v některých případech byly pozorovány dvě události během jednoho půlorbitu. Jak už bylo uvedeno dříve v Němec a kol. (2009), MLR události se vyskytují častěji během denních půlorbitů. Analýza finálního seznamu MLR událostí identifikovaných v datech družice DEMETER ukázala, že na denních půlorbitech bylo nalezeno 781 událostí, zatímco během nočních půlorbitů bylo nalezeno pouze 449 událostí.

4. Získané výsledky

4.1 Závislost na slunečním cyklu a ročním období

Vzhledem k vysokému počtu nalezených MLR událostí a poměrně rozsáhlému časovému intervalu (celkem období 6,5 roku - doba trvání mise družice DEMETER) bylo možné vyhodnotit vliv sluneční aktivity na výskyt zkoumaných událostí.

Výsledek této analýzy, kdy byla zkoumána časová závislost počtu MLR událostí během 90 denního plovoucího intervalu normovaného celkovým počtem půlorbitů družice DEMETER v tomto časovém intervalu, je vykreslen na obr. 4.1a černou čarou. Je patrné, že normovaný počet nalezených MLR událostí je výrazně nižší na konci roku 2007 a na začátku roku 2008. Překreslená modrá křivka na tomto obrázku udávající měsíční průměr počtu slunečních skvrn indikuje, že nejnižší výskyt MLR událostí zhruba odpovídá solárnímu minimu. Tato souvislost je ale poměrně slabá a pravděpodobně diskutabilní.



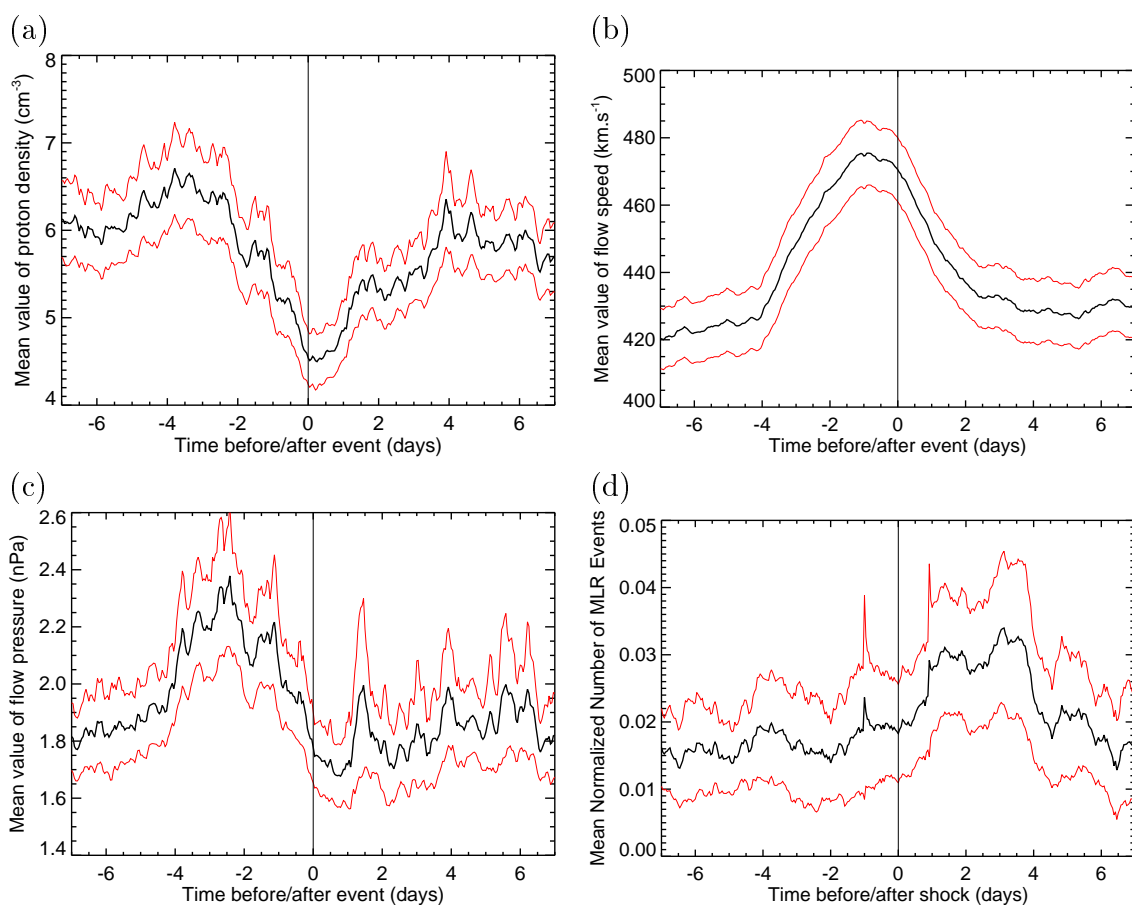
Obrázek 4.1: a) Počet událostí typu MLR pozorovaný družicí DEMETER během 90 denního plovoucího intervalu normovaný celkovým počtem půlorbitů této družice v daném časovém intervalu (černá čára) v porovnání s měsíčním průměrem počtu slunečních skvrn (modrá křivka). (b) Počet pozorovaných MLR událostí normovaný celkovým počtem půlorbitů družice DEMETER v jednotlivých měsících. Překreslená černá vodorovná čára odpovídá střední hodnotě četnosti výskytu MLR událostí (0,021).

Na obr. 4.1a lze nicméně dále pozorovat několik zřetelných maxim (píků) výskytu MLR událostí, které obecně nastávají během zimních měsíců. Tento výsledek naznačuje, že výskyt událostí typu MLR závisí na ročním období. Tento předpoklad byl prostudován podrobněji. Výsledek je ukázán na obr. 4.1b, který znázorňuje závislost počtu pozorovaných MLR událostí normovaného celkovým počtem půlorbitů družice DEMETER v daném měsíci.

Z tohoto obrázku je patrné, že během zimních měsíců je četnost událostí téměř dvakrát větší než v letních měsících. Překreslená tučná čára udává průměrnou hodnotu četnosti výskytu MLR událostí (přibližně 0,021).

4.2 Optimální parametry slunečního větru

Souvislost mezi parametry slunečního větru a výskytem MLR událostí je za použití metody překrývaných časových intervalů (superposed epoch analysis) analyzována na obr. 4.2. Pro tento rozbor byla použita data OMNI ze slunečního větru s časovým rozlišením 1 hodina (viz <http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Výsledky zahrnující vliv protonové hustoty, rychlosti a dynamického tlaku slunečního větru jsou znázorněny v panelech a), b), c). Černé čáry ukazují střední hodnoty parametrů slunečního větru jako funkci času relativně k času výskytu MLR události. Vykreslený časový interval odpovídá období jednoho týdne před událostí po jeden týden po události. Červené křivky odpovídají ± 3 standardním odchylkám průměrné hodnoty.



Obrázek 4.2: Analýza výskytu MLR událostí jako funkce vybraných parametrů slunečního větru provedená metodou překrývaných časových intervalů. Černé křivky odpovídají středním hodnotám daných parametrů slunečního větru, červené křivky znázorňují ± 3 standardní odchylky jejich průměrných hodnot. (a) Výsledky získané pro protonovou hustotu slunečního větru. (b) Výsledky dosažené z hodnot rychlosti slunečního větru. (c) Výsledky pro dynamický tlak slunečního větru. (d) Průměrná četnost výskytu MLR událostí jako funkce času vzhledem k času, kdy došlo k meziplanetárnímu šoku.

Obrázek 4.2a ukazuje, že průměrná hodnota protonové hustoty klesá v době události (v průměru asi o 20%). Souvislost mezi rychlostí slunečního větru a výskytem MLR událostí je vyšetřována na obr. 4.2b. Je patrné, že MLR události

se většinou objevují během/krátce po období zvýšené rychlosti slunečního větru. Střední hodnota rychlosti slunečního větru dosahuje svého maxima (kolem 480 km/s) přibližně 1 den před nastáním události a poté postupně klesá. Fluktuační středních hodnot dynamického tlaku slunečního větru viditelné na obr. 4.2c jsou značné. Je ovšem zřetelné, že MLR události jsou v průměru spjaty asi s 20% nárůstem dynamického tlaku slunečního větru, ke kterému dochází několik dnů před časem události.

Mělo by se poznamenat, že ačkoliv jsou pozorované variace parametrů slunečního větru statisticky významné, amplituda pozorovaných jevů je v porovnání s běžnými fluktuacemi analyzovaných parametrů spíše malá. To znamená, že tyto variace parametrů slunečního větru mohou být pro jednotlivé MLR události výrazně odlišné od průměrných průběhů ukázaných na obr. 4.2.

Obrázek 4.2d ukazuje výsledek analýzy metodou překrývaných časových intervalů při hledání spojitosti mezi výskytem MLR událostí a meziplanetárními (interplanetary, IP) šoky. Šoky byly identifikovány automatickou procedurou uvedenou v Kruparova a kol. (2013) a následně manuálně ověřeny. V době trvání mise družice DEMETER (2004-2010) bylo nalezeno celkem 241 šoků. Průměrná četnost MLR událostí vypočítaná během plovoucího dvacetičtyřhodinového časového intervalu je v grafu znázorněna černou čarou jako funkce centrálního času daného intervalu relativně k času šoku. Červené čáry odpovídají ± 3 standardním odchylkám střední četnosti MLR událostí. Nárůst průměrné četnosti MLR událostí asi o 75% několik dní po pozorování šoku je dobře zřetelný.

Je nutné poznamenat, že časy šoků použité při výpočtech jsou časy odpovídající okamžiku, kdy byly šoky detekovány družicí monitorující sluneční vítr a nejedná se tedy o časy, kdy se očekává jejich dosažení magnetosféry. Tento časový posun je ovšem typicky přibližně hodina, což je výrazně menší interval než časová škála použitá při vykreslení obr. 4.2d, takže nijak významně neznepřesňuje získané výsledky.

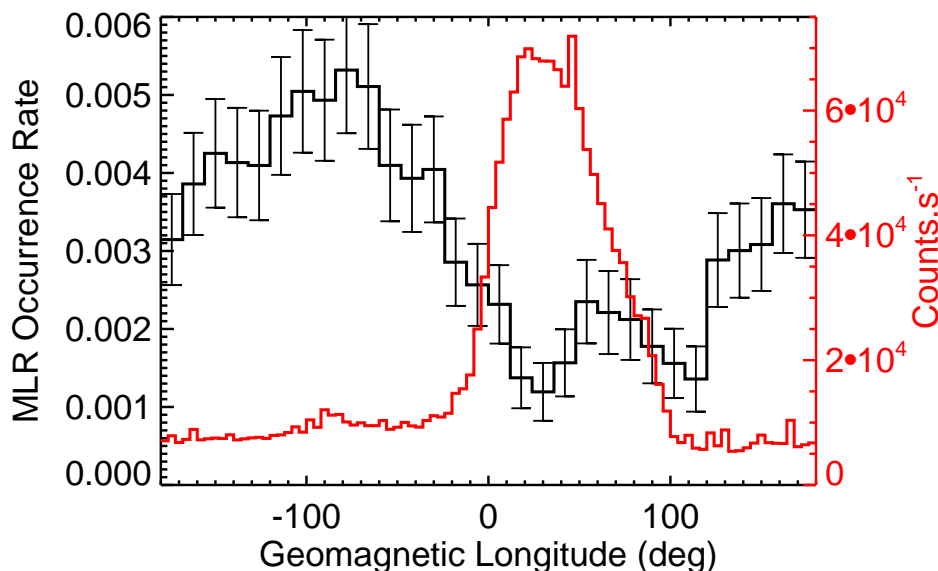
4.3 Energetické elektrony pozorované v době trvání MLR událostí

Němec a kol. (2009) uvedli, že počet událostí vyskytujících se nad Atlantickým oceánem je nižší než počet událostí, které se objevují na jiných geomagnetických délkách. Ukazuje se, že pravděpodobnost výskytu MLR událostí na geomagnetických délkách mezi 0° – 100° je oproti ostatním oblastem asi poloviční. Oblast sníženého výskytu MLR událostí přitom přibližně odpovídá geomagnetickým délkám Jihoatlantické anomálie (SAA) a oblasti východně od ní. Jako možná příčina tohoto jevu bylo navrženo masivní vysypávání elektronů v driftovém ztrátovém kuželi (drift loss cone) nad Jihoatlantickou anomálií. Za předpokladu, že právě tyto elektrony jsou zodpovědné za generování MLR událostí, lze jejich výrazný nedostatek v oblasti na východ od Jihoatlantické anomálie přímo svázat se sníženým výskytem událostí typu MLR.

Pro potvrzení/vyvrácení výše uvedených výsledků byl v této práci použit rozšířený seznam MLR událostí, jejichž četnost výskytu v závislosti na poloze byla porovnávána s počtem detekovaných energetických elektronů v blízkosti ztrátového kužele (měření počtu těchto elektronů prováděl přímo přístroj IDP družice

DEMETER, viz Sauvaud a kol., 2006) a podle získaných výsledků lze výše uvedené závěry potvrdit.

Normovaná doba trvání nalezených MLR událostí (occurrence rate) jako funkce geomagnetické délky je černou křivkou vykreslena na obr. 4.3. Je zde jasně vidět zřetelný pokles výskytu MLR událostí v oblasti geomagnetických délek mezi 0° a 120° . Chybové úsečky znázorňují horní odhad směrodatné odchylky vypočítaný z binomického rozdělení a počtu půlorbitů družice DEMETER na dané geomagnetické délce.



Obrázek 4.3: Normovaná doba trvání nalezených událostí typu MLR jako funkce geomagnetické délky (černá křivka, použitá škála je na levé straně grafu). Chybové úsečky ukazují horní odhad směrodatné odchylky (viz text). Červená křivka (škála na pravé straně grafu) znázorňuje závislost středního počtu elektronů detekovaných za sekundu v intervalu energií 73 keV až 2342 keV na geomagnetické délce.

Červená čára vykreslená na obr. 4.3 ukazuje závislost středního počtu elektronů za sekundu ($\text{counts} \cdot \text{s}^{-1}$) v energetickém rozmezí 73 keV až 2342 keV zaznamenaného družicí DEMETER na geomagnetické délce. Největší toky vysypávajících se elektronů jsou pozorovány podle očekávání na geomagnetických délkách 0° až 80° , což odpovídá poloze Jihoatlantické anomálie. Četnost výskytu MLR událostí dosahuje svého minima právě na těchto geomagnetických délkách a původních vysokých hodnot nabývá až na geomagnetických délkách kolem 120° .

Získané výsledky a vysvětlení navržené v Němec a kol. (2009) naznačují, že MLR události vznikají díky energetickým elektronům ve ztrátovém kuželi, které se vysypávají při dosažení geomagnetické délky odpovídající poloze Jihoatlantické anomálie.

To umožňuje pozorovat změny v rozložení elektronů spjaté s výskytem MLR událostí. Pokud je totiž událost typu MLR pozorována na geomagnetických délkách Jihoatlantické anomálie nebo mírně západně od ní, elektrony způsobující její vznik by se vzápětí měly vysypat na geomagnetických délkách Jihoatlantické anomálie. Tato myšlenka byla využita při sestavení obrázku 4.4.

Byla vyšetřována energetická spektra elektronů a jejich případné změny v době výskytu MLR událostí. Obrázek 4.4a ukazuje mediánové hodnoty toku elektronů zaznamenané družicí DEMETER na geomagnetických délkách odpovídajících Jihoatlantické anomálii ($0^\circ - 80^\circ$) jako funkci energie elektronů a geomagnetické šířky v rozsahu $-63^\circ - 15^\circ$. Hodnoty toků energetických elektronů pro vyšší geomagnetické šířky nejsou vykresleny z důvodu extrémně nízkých toků v těchto polohách (typicky pod detekčním prahem přístroje IDP). Pro vykreslení této závislosti byla použita data naměřená během celé mise družice DEMETER. Jsou patrné zvýšené elektronové toky odpovídající poloze vnitřního radiačního pásu mezi -50° a -10° . Na velkých záporných šířkách je také pozorovatelná oblast vyšších elektronových toků, která koresponduje s polohou vnějšího radiačního pásu.

Obrázek 4.4b je vykreslený ve stejném formátu jako obrázek 4.4a, ale tentokrát byla do výpočtu zahrnuta pouze data odpovídající orbitům, na kterých byly nalezeny MLR události, a data z orbitů bezprostředně následovaných orbity, kde byla MLR událost pozorována. Jelikož měla DEMETER dráhu téměř synchronizovanou se Sluncem, efektivně se pohybovala na západ. Orbit následovaný orbitem, na kterém byla pozorována MLR událost, je tudíž ekvivalentní MLR události pozorované západně od Jihoatlantické anomálie. Tyto výsledky jsou zatíženy výraznějším šumem než výsledky znázorněné na obrázku 4.4a, protože k dispozici bylo menší množství dat, kvalitativně ale zůstává výsledný obrázek stejný.

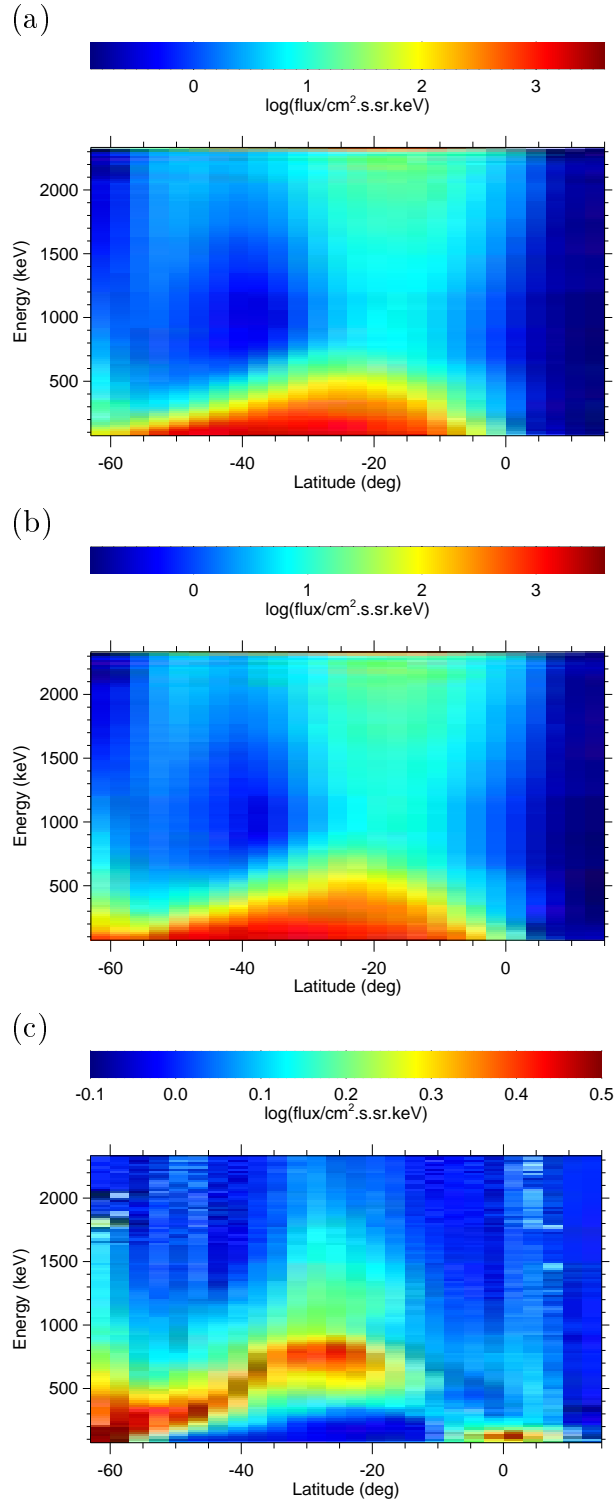
Hodnoty elektronových toků na obrázku 4.4b se poněkud odlišují od hodnot toků na obrázku 4.4a. Rozdíl logaritmů mediánů elektronových toků na těchto dvou obrázcích, resp. logaritmus podílu mediánu elektronových toků v přítomnosti MLR události a mediánu elektronových toků během celého trvání mise družice, je vykreslen na obrázku 4.4c. Nejzřetelnější efekt vzrůstu elektronových toků během pozorování MLR událostí je pozorovatelný na geomagnetických šířkách kolem -60° na energiích do 1000 keV. To znamená, že toky elektronů v blízkosti ztrátového kužele jsou na těchto energiích a šířkách silně zvýšeny během MLR událostí. Další oblast zvýšených toků energetických elektronů se nachází na nižších šířkách. Energie, na kterých dochází ke zvýšení elektronových toků, se mění v závislosti na hodnotě geomagnetické šířky. K nárůstu elektronových toků na nejvyšších energiích (asi 1000 keV) dochází na geomagnetických šířkách kolem -30° .

4.4 Prostorový rozsah MLR událostí

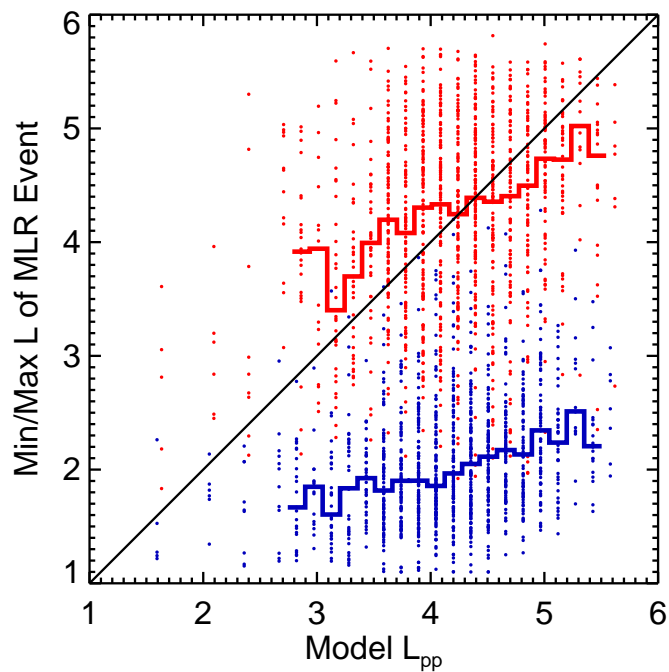
Červené a modré body na obrázku 4.5 ukazují maximální a minimální hodnoty parametru L pro jednotlivé MLR události jako funkci modelové polohy plazmapauzy vypočítané podle modelu navrženého v Carpenter – Anderson (1992). Červenou a modrou čarou je vykreslena mediánová závislost těchto parametrů. Černá diagonální čára odpovídá lineární závislosti a rozděluje tak graf na dvě části - uvnitř plazmasféry (spodní pravá část) a vně plazmasféry (horní levá část).

Lze si všimnout, že některé události typu MLR se objevují za hranicí plazmasféry, zatímco výskyt jiných je omezen pouze na její vnitřní část. Při analýze tohoto grafu by se měly vzít do úvahy nepřesnosti, ke kterým dochází při určování maximálních a minimálních hodnot L parametru pro jednotlivé MLR události,

a především nepřesnosti plynoucí z určování polohy plazmapauzy s využitím daného empirického modelu. Mediánové závislosti nicméně jasně ukazují, že události obecně zasahují do plazmasféry (minimální hodnota L) a pak ve svých maximálních hodnotách přibližně dosahují hranice plazmapauzy.



Obrázek 4.4: Hodnoty mediánů toku elektronů měřené družicí DEMETER na geomagnetických délkách Jihoatlantické anomálie ($0^\circ - 80^\circ$) jako funkce energie elektronů a geomagnetické šířky. (a) Závislost získaná za použití dat ze všech půlorbitů družice DEMETER. (b) Výsledky dosažené po použití dat z půlorbitů, kde byly pozorovány události typu MLR, a dat z půlorbitů, které jim bezprostředně předcházely. (c) Rozdíl logaritmů mediánů elektronových toků získaných v přítomnosti MLR událostí a logaritmů mediánů toků naměřených během celé mise družice DEMETER, tj. rozdíl předchozích dvou panelů.



Obrázek 4.5: Maximální a minimální hodnoty parametru L pro jednotlivé MLR události (červené a modré body) jako funkce modelové polohy plazmapauzy a mediánová závislost těchto hodnot (červená a modrá čára). Černá diagonální čára ukazuje hranici plazmasféry - spodní pravá část představuje vnitřek plazmasféry a horní levá část její vnějšek.

5. Diskuze dosažených výsledků

Rozsáhlá databáze MLR událostí pozorovaných během celé mise družice DEMETER, tedy asi během 6,5 roku, je dostatečná k analýze možného vlivu sluneční aktivity na výskyt těchto událostí. Výsledky zobrazené na obrázku 4.1a naznačují, že výskyt událostí typu MLR je v době vyšší solární aktivity větší. Tento průběh je předpokladatelný a pravděpodobně je možné ho vysvětlit zvýšeným přísunem energie ze slunečního větru v době solárního maxima. Rozbor využívající metodu překrývaných časových intervalů uvedený na obrázku 4.2d dále ukazuje, že pravděpodobnost výskytu MLR událostí se po proběhnutí šoku ve slunečním větru značně zvětší, což opět odkazuje na souvislost se sluneční aktivitou.

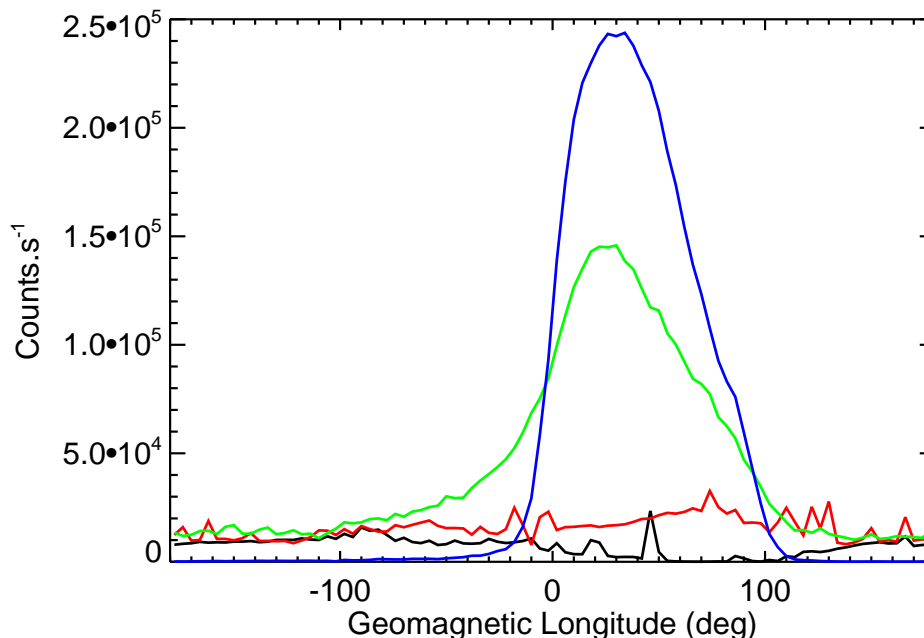
Roční závislost četnosti událostí analyzovaná na obrázku 4.1b ukazuje, že k MLR událostem dochází výrazně více v zimních měsících než v letních (roční období uvažováno vzhledem k severní polokouli). Tento výsledek je v kontrastu s výsledky uvedenými v Rodger a kol. (2000b), kde v datech pořízených na stanici Halley na Antarktidě pozorovali spíše opačný průběh této závislosti. Rodger a kol. (2000b) také dále zmiňují, že roční rozdělení MLR událostí vůči celkovému množství vyskytujících se vlnových událostí zůstává téměř konstantní. Roční závislost vlnové aktivity pozorovaná družicí DEMETER byla vyšetřována v Němec a kol. (2010). Ačkoliv se při rozboru zaměřili primárně na analýzu elektromagnetických vln pocházejících z blesků, na jejich obrázcích 2 a 3 je patrné, že medián vlnové intenzity je na vyšších šířkách v zimě větší než v létě.

Tento efekt by mohl být způsoben obecně nižším počtem blesků pozorovaných během zimních měsíců (Christian a kol., 2003) a tím pádem i nižším počtem vysypávaných elektronů (Gemelos a kol., 2009). Nižší počet vysypávajících se elektronů by se pak mohl projevit větším množstvím elektronů v blízkosti ztrátového kužele, které zvýší množství vznikajících vln (předpokládá-li se, že tyto vlny jsou generovány nestabilitou na ztrátovém kuželi).

Obrázek 4.3 demonstruje, že počet událostí typu MLR vzniklých na geomagnetických délkách odpovídajících Jihoatlantické anomálii (SAA) je nižší než jinde. Možným vysvětlením je nedostatek energetických elektronů v této oblasti, protože v rozsahu geomagnetických délek odpovídajících Jihoatlantické anomálii dochází k jejich masivnímu vysypávání (Němec a kol., 2009). Jelikož tento obrázek ukazuje závislost středního počtu částic (counts) na geomagnetické délce bez ohledu na geomagnetickou šířku, není možné určit geomagnetické šířky, na kterých primárně dochází k vysypávání elektronů.

Proto byl vytvořen obrázek 5.1, který ukazuje závislost středního počtu vysypávaných elektronů na geomagnetické délce ve čtyřech různých intervalech geomagnetických šířek. Černá křivka znázorňuje elektrony na severní polokouli, ostatní na jižní – modrá čára mezi šířkami -40 a 0 stupňů, zelená ukazuje závislost pro šířky -48 až -40 stupňů a červená pro šířky nižší než -48 stupňů. Z důvodu nízkých počtů elektronů vysypávajících se na severní polokouli (a tím pádem i jejich relativně malému příspěvku k výslednému střednímu počtu) nebyla tato množství rozdělena do více intervalů jako v případě počtu elektronů měřených na jižní polokouli. Tento graf ukazuje, že na geomagnetických šířkách nižších než -48 stupňů a vyšších než 0 stupňů nedochází k žádnému výraznému vzrůstu toků vysypávajících se elektronů v závislosti na geomagnetických délkách, tj. vliv

Jihoatlantické anomálie je omezen pouze na šířky v intervalu přibližně $-48 - 0$ stupňů. Vezme-li se do úvahy uvažovaný vliv Jihoatlantické anomálie na výskyt MLR událostí, pak se dá předpokládat, že MLR události vznikají na polohách odpovídajících L nižšímu než 2,5.



Obrázek 5.1: Závislost středního počtu vysypaných částic na geomagnetické délce ve čtyřech různých intervalech geomagnetických šířek – šířky severní polokoule (černá křivka), $-40^\circ - 0^\circ$ (modrá čára), $-48^\circ - -40^\circ$ (zelená čára), šířky nižší než -48° (červeně).

Jak ukazuje obrázek 4.4c, toky elektronů o energiích kolem několika set keV na geomagnetických šířkách kolem 60 stupňů jsou během trvání MLR událostí zřetelně vyšší oproti dlouhodobé mediánové hodnotě. Částice v oblastech odpovídajících vysokým hodnotám L ovšem téměř nejsou ovlivněny existencí Jihoatlantické anomálie (viz výše). Proto se jeví pravděpodobnějším, že za vznik MLR událostí jsou zodpovědné elektrony vysypávající se na nižších hodnotách L. Obrázek 4.4c ukazuje, že tok elektronů na těchto nižších polohách je během doby trvání MLR událostí zvýšen. K tomuto zvýšení toků dochází v poměrně dobře definovaném pásu energií, které se mění v závislosti na geomagnetické šířce.

Obrázek 4.5 ukazuje, že mediánové hodnoty maximálního L pozorovaných událostí souvisí s modelovou polohou plazmapauzy. Velký rozptyl jednotlivých bodů může být výsledkem nepřesností použitého modelu polohy plazmapauzy, ale je zřetelné, že MLR události pronikají také vně plazmapauzy. Pro nižší hodnoty L plazmapauzy (L_{pp}) se zdá, že události typu MLR se častěji rozpínají mimo plazmasféru. Oproti tomu při vyšších hodnotách L_{pp} jsou MLR události soustředěny uvnitř plazmasféry. Pozorované závislosti naznačují význam vedení událostí typu MLR podél plazmapauzy (např. Inan – Bell, 1977) během šíření alespoň některých MLR událostí z oblasti jejich vzniku do nižších výšek (kde měřila družice DEMETER). Toto vedení podél plazmapauzy, spolu s odchýlením vedených vln do nižších geomagnetických šířek na výškách několika tisíců kilo-

metrů (Inan – Bell, 1977), je rovněž konzistentní s korelací mezi minimálními hodnotami parametru L a hodnotami L_{pp} . Pozorovaný velký prostorový rozsah MLR událostí (Parrot a kol., 2007; Němec a kol., 2012b) by tak mohl být čistě efekt šíření vlny. Ukazuje se totiž, že i vlny vznikající v prostorově omezené oblasti mohou ovlivnit značnou část vnitřní magnetosféry (Němec a kol., 2014).

Závěr

V rámci této práce byl dokončen seznam MLR událostí nalezených v datech družice DEMETER za dobu trvání celé její mise (2004–2010). Celkem bylo nalezeno 1230 událostí typu MLR, což pravděpodobně představuje dosud největší vytvořený seznam těchto událostí.

Byla nalezena závislost výskytu MLR událostí na roční době. Z provedených rozborů bylo zjištěno, že MLR události jsou častější během zimních a jarních měsíců než v letních měsících (vzhledem k severní polokouli).

Dále byl analyzován vztah mezi výskytem MLR událostí a parametry slunečního větru. Pomocí metody překrývaných časových intervalů (superposed epoch analysis) byla zkoumána statistická závislost mezi parametry slunečního větru a MLR událostmi. Bylo ukázáno, že četnost výskytu MLR událostí se zvyšuje v důsledku proběhlého meziplanetárního šoku (interplanetary shock, IP shock).

Ukázalo se také, že množství pozorovaných MLR událostí je nižší na geomagnetických délkách zhruba mezi 0 až 120 stupni, což je oblast odpovídající Jihoatlantické anomálii (SAA) a polohám ležícím východně od ní. Tato skutečnost naznačuje, že MLR události by mohly být generovány energetickými elektrony v blízkosti ztrátového kužele, které se „vysypávají“ při dosažení geomagnetických délek Jihoatlantické anomálie.

Toky vysypávajících se energetických elektronů měřené v době pozorování MLR událostí byly porovnány s jejich dlouhodobým rozdělením. Získané výsledky ukazují, pro které energie se toky elektronů v přítomnosti MLR událostí zvyšují. Díky tomu je možné odhadnout, jaké jsou energie elektronů, které mohou být zodpovědné za tvorbu událostí typu MLR.

MLR události se vyskytují převážně uvnitř plazmasféry, ale mohou zasahovat i mimo ni. Získané výsledky indikují význam vedení MLR událostí podél plazmapauzy pro jejich šíření.

Seznam použité literatury

- BELL, T. F. – LUETTE, J. P. – INAN, U. S. ISEE 1 Observations of VLF Line Radiation in the Earth's Magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1982, 87, A5, s. 3530–3536.
- BERTHELIER, J. J. a kol. ICE, The Electric Field Experiment on DEMETER. *Planet. Space Sci.* 2006, 54, s. 456–471.
- BULLOUGH, K. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, 2, Power Line Harmonic Radiation: Sources and Environmental Effects, s. 291–332. CRC Press, Boca Ralton, Fla., 1995.
- CARPENTER, D. L. – ANDERSON, R. R. An ISEE/Whistler Model of Equatorial Electron Density in the Magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992, 97, A2, s. 1097–1108.
- CHRISTIAN, H. J. a kol. Global Frequency and Distribution of Lightning as Observed from Space by the Optical Transient Detector. *J. Geophys. Res.* 2003, 108, D1. doi: 10.1029/2002JD002347.
- GEMELOS, E. S. – INAN, U. S. – WALT, M. – PARROT, M. – SAUVAUD, J. A. Seasonal Dependence of Energetic Electron Precipitation: Evidence For a Global Role of Lightning. *Geophys. Res. Lett.* 2009, 36, L21107. doi: 10.1029/2009GL040396.
- INAN, U. S. – BELL, T. F. The Plasmapause as a VLF Wave Guide. *J. Geophys. Res.* 1977, 82, 19, s. 2819–2827.
- KRUPAROVA, O. – MAKSIMOVIC, M. – ŠAFRÁNKOVÁ, J. – NĚMEČEK, Z. – SANTOLÍK, O. – KRUPAR, V. Automated Interplanetary Shock Detection and Its Application to Wind Observations. *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2013, 118, s. 4793–4803. doi: 10.1002/jgra.50468.
- MANNINEN, J. *Some Aspects of ELF-VLF Emissions in Geophysical Research*, Magnetospheric Line Radiation, s. 85–110. Č. 98. Sodankylä Geophysical Observatory Publications, Sodankylä, Finland, 2005.
- MATTHEWS, J. P. – YEARBY, K. Magnetospheric VLF Line Radiation Observed at Halley, Antarctica. *Planet. Space Sci.* 1981, 29, s. 97–106.
- NĚMEC, F. – SANTOLÍK, O. – PARROT, M. – BERTHELIER, J. J. Power Line Harmonic Radiation (PLHR) Observed by the DEMETER Spacecraft. *J. Geophys. Res.* 2006, 111. doi: 10.1029/2005JA011480.
- NĚMEC, F. – SANTOLÍK, O. – PARROT, M. – BERTHELIER, J. J. Comparison of Magnetospheric Line Radiation and Power Line Harmonic Radiation: a Systematic Survey using the DEMETER Spacecraft. *J. Geophys. Res.* 2007a, 112. doi: 10.1029/2006JA012134.

- NĚMEC, F. – SANTOLÍK, O. – PARROT, M. – BERTHELIER, J. J. Power Line Harmonic Radiation: A Systematic Study using DEMETER Spacecraft. *Adv. Space Res.* 2007b, 40, s. 398–403.
- NĚMEC, F. – SANTOLÍK, O. – PARROT, M. – BORTNIK, J. Power Line Harmonic Radiation Observed by Satellite: Properties and Propagation Through the Ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2008, 113, A08317. doi: 10.1029/2008JA013184.
- NĚMEC, F. a kol. Survey of Magnetospheric Line Radiation Events Observed by the DEMETER Spacecraft. *J. Geophys. Res.* 2009, 114, A05203. doi: 10.1029/2008JA014016.
- NĚMEC, F. – SANTOLÍK, O. – PARROT, M. – RODGER, C. J. Relationship Between Median Intensities of Electromagnetic Emissions in the VLF Range and Lightning Activity. *J. Geophys. Res.* 2010, 115, A08315. doi: 10.1029/2010JA015296.
- NĚMEC, F. – PARROT, M. – SANTOLÍK, O. Detailed Properties of Magnetospheric Line Radiation Events Observed by the DEMETER Spacecraft. *J. Geophys. Res.* 2012a, 117, A05210. doi: 10.1029/2012JA017517.
- NĚMEC, F. – SANTOLÍK, O. – PARROT, M. – PICKETT, J. S. Magnetospheric Line Radiation Event Observed Simultaneously on Board Cluster 1, Cluster 2 and DEMETER Spacecraft. *Geophys. Res. Lett.* 2012b, 39, L18103. doi: 10.1012/GL053132.
- NĚMEC, F. – PICKETT, J. S. – SANTOLÍK, O. Multi-spacecraft Cluster Observations of Quasi-Periodic Emissions Close to the Geomagnetic Equator. *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2014, 119, s. 9101–9112. doi: 10.1002/2014JA020321.
- PARROT, M. (Ed.). *First Results of the DEMETER Micro-Satellite*, 54, s. 411–558. Special Issue of Planet. Space Sci., 2006.
- PARROT, M. – NĚMEC, F. MLR Events and Associated Triggered Emissions Observed by DEMETER. *Adv. Space Res.* 2009, 44, s. 979–986.
- PARROT, M. – NĚMEC, F. – SANTOLÍK, O. – BERTHELIER, J. J. ELF Magnetospheric Lines Observed by DEMETER. *Ann. Geophys.* 2005, 23, s. 3301–3311.
- PARROT, M. – MANNINEN, J. – SANTOLÍK, O. – NĚMEC, F. – TURUNEN, T. – RAITA, T. – MACUSOVA, E. Simultaneous Observation on Board a Satellite and on the Ground of Large-Scale Magnetospheric Line Radiation. *Geophys. Res. Lett.* 2007, 34, L19102. doi: 10.1029/2007GL030630.
- RODGER, C. J. – THOMSON, N. R. – DOWDEN, R. L. VLF Line Radiation Observed by Satellite. *J. Geophys. Res.* 1995, 100, A4, s. 5681–5689.
- RODGER, C. J. – CLILVERD, M. A. – YEARBY, K. H. – SMITH, A. J. Magnetospheric Line Radiation Observations at Halley, Antarctica. *J. Geophys. Res.* 1999, 104, A8, s. 17441–17447.

- RODGER, C. J. – CLILVERD, M. A. – YEARBY, K. – SMITH, A. J. Is Magnetospheric Line Radiation Man-Made? *J. Geophys. Res.* 2000a, 105, s. 15981–15990.
- RODGER, C. J. – CLILVERD, M. A. – YEARBY, K. H. – SMITH, A. J. Temporal Properties of Magnetospheric Line Radiation. *J. Geophys. Res.* 2000b, 105, A1, s. 329–336.
- SANTOLÍK, O. – NĚMEC, F. – PARROT, M. – LAGOUTTE, D. – MADRIAS, L. – BERTHELIER, J. J. Analysis Methods for Multi-Component Wave Measurements on board the DEMETER Spacecraft. *Planet. Space Sci.* 2006, 54, s. 512–527.
- SAUVAUD, J. a kol. High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt. *Planet. Space Sci.* 2006, 54, s. 502–511.