

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rebeka Viznerová

Vysypávání energetických elektronů z radiálních pásů způsobené bleskovými emisemi

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

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

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2023

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

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 má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Rada by som sa týmto poďakovala doc. RNDr. Františkovi Němcovi, Ph.D. za neskutočnú ochotu a trpezlivosť pri vedení tejto bakalárskej práce. Ďakujem tiež mojej rodine za veľkú podporu pri štúdiu.

Název práce: Vysypávání energetických elektronů z radiačních pásů způsobené bleskovými emisemi

Autor: Rebeka Viznerová

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. František Němec, Ph.D., Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Abstrakt: Táto bakalárska práca sa zaoberá experimentálnym štúdiom vplyvu bleskových emisií (tzv. hvizdov) na energetické častice zachytené vo Van Allenových radiačných pásoch. Za týmto účelom sú využité dáta o energetických spektrách vysypávaných elektrónov a intenzite elektromagnetických vln v zodpovedajúcom frekvenčnom rozsahu získané družicou DEMETER a dáta o časoch a polohách bleskov z globálnej bleskovej detekčnej siete WWLLN. Štatistické spracovanie dát nad územím USA v rokoch 2004–2010 ukázalo koreláciu medzi početnosťou bleskov a veľkosťou toku vysypaných elektrónov. Identifikovali sme 240 udalostí, kedy k zvýšenému toku vysypaných častíc došlo krátko po zvýšenej intenzite vlnových emisií odpovedajúcich detekovanému hvizdu, ktoré ukazujú preferenciu pre letné obdobie. Vybraných 240 udalostí ďalej analyzujeme a sledujeme vlastnosti zapríčiňujúcich bleskov.

Klíčová slova: DEMETER, Van Allenove radiačné pásy, vysypávanie elektrónov

Title: Precipitation of energetic electrons from radiation belts caused by lightning emissions

Author: Rebeka Viznerová

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: doc. RNDr. František Němec, Ph.D., Department of Surface and Plasma Science

Abstract: This bachelor thesis explores the impact of lightning-generated whistlers on energetic particles trapped in the Van Allen radiation belts. The study uses energy spectra of precipitating electrons and electromagnetic wave intensity data measured by the DEMETER spacecraft, along with lightning times and locations provided by the global lightning detection network WWLLN. A statistical analysis of data measured above the USA region in 2004–2010 reveals a correlation between lightning occurrence and precipitating electron flux. We further identify 240 lightning-induced electron precipitation events where the precipitating flux is increased following a detected whistler, showing a notable preference for the summer period. The selected 240 events are further analyzed, and the properties of the associated lightning are investigated.

Keywords: DEMETER, Van Allen radiation belts, electron precipitation

Obsah

Úvod	2
1 Radiačné pásy a bleskové emisie	3
1.1 Formovanie radičných pásov	3
1.2 Vlny generované bleskovými emisiami	5
1.3 Vysypávanie energetických častíc	6
2 Dáta použité v práci	8
2.1 Družica DEMETER	8
2.1.1 Časticové dáta	8
2.1.2 Vlnové dáta	8
2.2 WWLLN	8
2.3 Kp index	9
3 Ciele práce	10
4 Získané výsledky	11
4.1 Globálny význam bleskovej aktivity	11
4.2 Identifikácia jednotlivých udalostí	14
4.3 Analýza identifikovaných udalostí	17
5 Diskusia	22
Záver	25
Seznam použité literatury	26

Úvod

Táto práca skúma vplyv bleskových emisií na energetické častice zachytené vo Van Allenových radiačných pásoch, presnejšie situáciu, kedy k vysypávaniu energetických častíc z radiačných pásov dochádza v dôsledku bleskových emisií. K tomu boli použité dáta z družice DEMETER (2004–2010), ktorá merala toky vysypaných častíc a vlnové emisie z bleskov, a dáta z globálnej bleskovej detekčnej siete WWLLN (World Wide Lightning Location Network), ktorá poskytuje informácie o pozícii a čase každého detekovaného blesku a pre neskoršie roky aj približný odhad energie daného bleskového výboja.

Energetické častice pochádzajúce zo slnečného vetra sa môžu zachytiť v približne dipólovom magnetickom poli Zeme. V takom prípade sa častica pohybuje pozdĺž magnetickej siločiar a zároveň okolo nej koná cyklotrónny pohyb. Prejavuje sa efekt magnetických zrkadiel, kedy v dôsledku rastúcej veľkosti magnetického poľa smerom k nižším výškam dochádza k odrazom energetických častíc. Oblasť takto zachytených častíc nazývame Van Allenovými radiačnými pásmi.

Celkové toky častíc v radiačných pásoch sú dané rovnováhou medzi zdrojovými a stratovými mechanizmami. Hlavným stratovým mechanizmom sú vlnovo-časticové interakcie vedúce na rozptyl v pitch uhle a následné vysypávanie častíc do atmosféry. Družica DEMETER sa pohybuje na nízkej orbite a merané toky energetických častíc odpovedajú tak pitch uhlom v stratovom kuželi alebo v jeho blízkom okolí. Jedná sa o častice, ktoré končia v atmosfére, bez ďalších odrazov na zemských magnetických zrkadlách.

Pôsobiace elektromagnetické vlny môžu byť generované priamo nestabilitami plazmy v zemskej magnetosfére, druhá podstatná časť emisií vzniká bleskovou aktivitou v blízkosti zemského povrchu. Každý blesk vytvorí krátky pulz elektromagnetického žiarenia pokrývajúci široký rozsah frekvencií. Časť týchto emisií následne uniká z vlnovodu medzi Zemou a ionosférou a šíri sa do vyšších výšok. Vzhľadom k svojmu frekvenčnému rozsahu a značným intenzitám tieto vlny výrazne interagujú s energetickými časticami zachytenými v radiačných pásoch a prispievajú podstatnou mierou k ich vysypávaniu do atmosféry.

Ako prvé sa venujeme globálnemu významu bleskovej aktivity v súvislosti s tokom vysypaných častíc, následne identifikujeme jednotlivé udalosti, kedy k zvýšenému toku vysypaných častíc došlo krátko po zvýšenej intenzite vlnových emisií a napokon identifikované udalosti analyzujeme.

1. Radiačné pásy a bleskové emisie

1.1 Formovanie radiačných pásov

Slnčný vietor je prúd nabitých častíc uvoľnených z vrchných vrstiev atmosféry Slnka. Táto plazma sa skladá predovšetkým z elektrónov, protónov a alfa častíc. V blízkosti Zeme dochádza k interakcii týchto častíc s magnetickým poľom Zeme. V oblasti, kde nastáva rovnováha tlaku vytváraného zemským magnetickým poľom a dynamického tlaku častíc slnečného vetra sa vzniká magnetopauza – hranica, kam efektívne dosiahne magnetické pole Zeme. Oblasť ohraničená magnetopauzou sa nazýva magnetosféra.

Magnetické pole Zeme, ktoré v prvom priblížení popisujeme ako magnetický dipól, teda vytvára ochranu pred slnečným vetrom. Navyše v ňom môžu byť efektívne zachytené nabité energetické častice, či už pôvodom zo slnečného vetra a urychlené procesmi v magnetosfére, alebo pochádzajúce z vrchných vrstiev ionosféry. Takto zachytená energetická častica sa môže pohybovať pozdĺž magnetickej siločiar, pohyb kolmý k siločiare vyústi v dôsledku Lorentzovej sily v gyračný pohyb okolo siločiar.

Uhlová frekvencia gyračného pohybu – cyklotronová frekvencia Ω je daná veľkosťou magnetickej indukcie B v danom mieste, veľkosťou náboja častice Q a jej hmotnosťou m

$$\Omega = \frac{QB}{m}. \quad (1.1)$$

S gyračným pohybom častice je možné, podobne ako s každým iným periodickým pohybom, spojiť príslušný adiabatický invariant. Jedná sa o veličinu, ktorá bude zachovaná aj v prípade zmien magnetického poľa, ak tieto zmeny budú prebiehať na časových škálach dlhších, než je perióda uvažovaného periodického pohybu. V prípade gyračného pohybu je adiabatickým invariantom magnetický moment μ daný ako

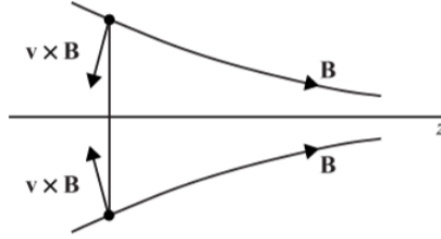
$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}, \quad (1.2)$$

kde v_{\perp} je zložka rýchlosti častice v kolmá k magnetickej siločiare.

Veľkosť magnetickej indukcie sa s menšou radiálnou vzdialenosťou a väčšími zemepisnými šírkami zvyšuje, pre zachovanie magnetického momentu sa musí zvyšovať aj kolmá zložka rýchlosti častice. Lorentzova sila pôsobiaca na časticu vždy pôsobí kolmo na smer pohybu častice, takže jej celková kinetická energia sa zachováva. Paralelná zložka rýchlosti sa preto nutne znižuje a môže nastať situácia kedy je všetka kinetická energia častice sústredená v cyklotronnom pohybe.

Častica konajúca cyklotronný pohyb v poli so zvyšujúcou sa veľkosťou magnetickej indukcie je teda vďaka Lorentzovej sile efektívne vytlačovaná z oblasti silnejšieho magnetického poľa, ako je znázornené na obrázku 1.1.

Ak magnetické pole postupne rastie (tj. v prípade zemskej magnetosféry sa častice typicky pohybujú pozdĺž magnetickej siločiar na nižšie výšky) dochádza teda k postupnému znižovaniu jej paralelnej rýchlosti, až táto eventuálne klesne na nulu a všetka kinetická energia častice zodpovedá kolmej zložke rýchlosti. V



Obrázek 1.1: V magnetickom poli so zväčšujúcou sa magnetickou intenzitou má Lorentzova sila pôsobiaca na časticu zložku orientovanú smerom von z oblasti silenjšieho poľa. Prevzaté z Gurnett a Bhattacharjee (2005)

takom bode potom dochádza k odrazu častice späť do smeru slabšieho magnetického poľa (na vyššie výšky, smerom ku geomagnetickému rovníku). Tento jav nazývame magnetické zrkadlenie.

Veľkosť magnetickej indukcie v bode, kde nastáva odraz označíme B_{max} . V tomto bode je všetka kinetická energia častice sústredená v kolmej zložke rýchlosti. Uvážením zachovania magnetického momentu a 1.2 dostávame

$$\frac{B}{B_{max}} = \left(\frac{v_{\perp}}{v} \right)^2, \quad (1.3)$$

kde v je celková rýchlosť častice, v_{\perp} jej kolmá zložka a B veľkosť magnetickej indukcie v ľubovoľnom bode trajektórie študovanej častice. Kolmú zložku rýchlosti môžeme ďalej prepísať ako $v_{\perp} = v \sin \alpha$, kde α je uhol medzi vektorom rýchlosti častice a vektorom magnetickej indukcie v danom bode, tzv. pitch uhol. Rovnicu (1.3) môžeme prepísať ako

$$\frac{B}{B_{max}} = \sin^2 \alpha, \quad (1.4)$$

Ďalej je treba si uvedomiť, že v reálnej konfigurácii magnetického poľa nerastie nikdy jeho veľkosť ľubovoľne, ale je zhora obmedzená. V prípade častíc zachytených v zemskom magnetickom poli odpovedá tento limit výškam, kde sa začínajú uplatňovať kolízie (≈ 100 km). Ak sa častica dostane na takto nízke výšky, dochádza k jej tzv. vysypaniu (precipitation) do atmosféry a častica nami študovaný systém radiačných pásov opúšťa.

Minimálny pitch uhol potrebný na uskutočnenie odrazu potom definuje okraj tzv. stratového kužela. Častice s nižšími pitch uhlami sú vysypané do atmosféry, zatiaľ čo častice s vyššími pitch uhlami sa periodicky odrážajú na magnetických zrkadlách v konjugovaných hemisférach a môžu byť takto v systéme zachytené značne dlhú dobu.

V prípade, že by bol magnetický moment týchto častíc skutočne zachovaný, bola by táto doba v princípe prakticky neobmedzená. V skutočnosti však vďaka prítomnosti elektromagnetických vln môže dochádzať k porušeniu tohto invariantu. Fyzikálnym princípom tohto porušenia je skutočnosť, že odozva častíc na prítomnú elektromagnetickú vlnu závisí na fázi ich gyračného pohybu, t.j. líši sa pre jednotlivé častice. Zatiaľ čo pre niektoré z nich interakcia s vlnou vedie k zvýšeniu pitch uhlu, pre niektoré z nich pitch uhol naopak klesne. S ohľadom na rozdelenie gyračných fáz jednotlivých častíc je táto zmena v prípade vyššieho počtu častíc v podstate náhodá a dobre popísateľná štatistickými metódami (tzv.

rozptyl v pitch uhle, pitch angle diffusion). Klúčové je si však uvedomiť, že zatiaľ čo počet častíc vnútri stratového kužela je v princípe minimálny (lebo sú pri prvej príležitosti vysypané), počet častíc mimo stratového kužela je značný. Vyššie zmienená difúzia preto nutne globálne vedie k presunu častíc do stratového kužela (a nie opačne) – dochádza k strate častíc z radiačných pásov.

Pre úplnosť uvedme, že v dôsledku gradient B driftu a driftu zakrivenia energetické častice zachytené v radiačných pásoch – mimo vyššie zmienených pohybov – driftujú v azimutálnom smere. Smer tohto driftu závisí na náboji častice a vzniká tak kruhový prúd, ktorý oslabuje magnetické pole na malých radiálnych vzdialenostiach a naopak ho zosilňuje na väčších radiálnych vzdialenostiach.

Oblasti v okolí Zeme, kde sú energetické častice zachytené, nazývame Van Allenovými radiačnými pásmi. Typicky sa rozlišuje tzv. vnútorný radiačný pás (radiálna vzdialenosť príslušných magnetických siločiar v rovníkovej rovine vyjadrená v zemských polomeroch, tzv. L-shell, približne $L \approx 1.5\text{--}2.5$) a vonkajší radiačný pás ($L \approx 4\text{--}6$), ktoré sú oddelené oblasťou s pomerne nižším výskytom energetických častíc (slot region).

1.2 Vlny generované bleskovými emisiami

Blesk je elektrostatický výboj vznikajúci ako dôsledok nahromadeného napätia medzi dvomi oblasťami v atmosfére alebo medzi atmosférou a Zemou. Bleskový výboj generuje krátky pulz elektromagnetického žiarenia pokrývajúci široký rozsah frekvencií. Toto žiarenie sa následne môže šíriť vlnovodom tvoreným povrchom Zeme a ionosférou, až eventuálne uniká do ionosféry. Tieto elektromagnetické vlny sa následne šíria plazmatickým prostredím vnútornej magnetosféry, kde v dôsledku disperzie majú (za predpokladu, že frekvencia vlny je výrazne nižšia než elektrónová cyklotrónová frekvencia) vlny s vyššou frekvenciou vyššiu rýchlosť. Ak vlna prejde určitú vzdialenosť magnetosférou, pozorovateľ už nedetekuje krátky širokofrekvenčný impulz, ale najprv vlny vyšších frekvencií, ktoré s postupujúcim časom klesajú. Príslušné frekvencie pritom dobre odpovedajú počuteľnému pásmu a môžu byť (a historicky boli) priamo prevedené na zvuk a prehrané. Zodpovedajú hvízdajúcemu signálu s postupne sa znižujúcimi frekvenciami. Odtiaľ pochádza ich názov – hvizdy (whistlers).

Identifikácia efektov spojených s bleskovými emisiami je možná buď priamo na základe párovania meraných parametrov a údajov o výskyte jednotlivých bleskov alebo, globálnejšie a trochu menej rigorózne, na základe súhrnných znalostí o početnosti bleskov. Analýza dát z prístroja OTD (Optical Transient Detector – vesmírny prístroj určený na detekciu a lokalizáciu bleskových výbojov) umožnila vytvoriť mapy demonštrujúce geografickú a sezónnu distribúciu bleskovej aktivity (Christian a kol., 2003). Ukázalo sa, že výskyt bleskov je výrazne častejší v lokálnom lete než v zime a že pomer výskytu bleskov nad kontinentálnymi oblasťami/océánom je veľmi výrazne v prospech kontinentov, približne 10:1. Globálny cyklus je potom dominovaný výrazným príspevkom bleskov leta severnej hemisféry, kde je výskyt kontinentov vyšší než na južnej hemisfére.

Využitie výraznej sezónnej závislosti výskytu bleskov a dát družice DEMETER (výška ≈ 700 km) umožnilo preukázať silnú koreláciu medzi bleskovou aktivitou a intenzitou meraných nízkofrekvenčných a elektromagnetických vln (Němec a kol., 2010), a to najmä v noci, kedy je útlm elektromagnetických vln pri šírení

cez ionosféru nižší (Helliwell, 1965; Cohen a kol., 2012).

Navzdory pomerne výraznej severo–južnej asymetrii početnosti bleskov sú vlnové intenzity dobre symetrické medzi hemisférami, čo indikuje zodpovedajúce šírenie príslušných vln bez výraznejších strát. Na frekvenciách vyšších než približne 2 kHz potom vplyv bleskovej aktivity typicky dominuje nad ostatnými magnetosférickými vlnami. Započítanie realistických frekvenčných spektier bleskových emisií a útlmu pri šírení ionosférou potom umožňuje pomerne presnú rekonštrukciu intenzít meraných družicou DEMETER na základe globálnych bleskových máp (Colman a Starks, 2013).

Záhlava a kol. (2018) skúmali efekt bleskovej aktivity na intenzitu elektromagnetických vln meranú v rovníkovej oblasti na väčších radiálnych vzdialenostiach družicami Van Allen Probes. Využili na to výraznú dĺžkovú závislosť bleskovej aktivity zodpovedajúcu zastúpeniu kontinent/oceán a hľadali zodpovedajúcu závislosť v stredných hodnotách vlnových intenzít, a to pre rôzne frekvencie vln a pre polohy družice vnútri/mimo plazmasféry. Ukázali, že intenzita vln, ktoré majú frekvenciu nižšiu než približne 0,4 kHz a intenzita vln mimo plazmasféry je prakticky nezávislá na vlnovej dĺžke, tj. príslušné vlny nie sú výraznejšie ovplyvnené bleskovou aktivitou. Oproti tomu intenzity vln vnútri plazmasféry na frekvenciách vyšších než 0,4 kHz vykazujú dĺžkovú závislosť zodpovedajúcu dĺžkovej závislosti bleskovej aktivity podľa prístroja OTD. Táto závislosť na geomagnetickej dĺžke je potom najvýraznejšia behom noci a pre vlny s veľkým odklonom vlnového vektoru od vonkajšieho magnetického poľa (väčší než 60°). To je možné interpretovať ako podstatný príspevok od vln šíriacich sa nevedene, tj. s väčšími vlnovými normálami a nie striktne pozdĺž magnetických siločiar.

Vyhodnotením efektov bleskovej aktivity na základe priameho párovania s údajmi o polohách a časoch jednotlivých bleskových výbojov sa zaoberali Záhlava a kol. (2019). Uvažovali pritom realistický útlm intenzity vln pri šírení vlnovodom medzi Zemou a ionosférou a porovnávali údaje o vlnových intenzitách v časoch, kedy projekcia polohy družice pozdĺž magnetickej siločiar bola/nebola v mieste výraznejšej búrkovej aktivity. V súlade s prechádzajúcimi štúdiami demonštrovali výrazný vplyv bleskových emisií najmä v nočných hodinách. Zodpovedajúci frekvenčný rozsah potom podstatným spôsobom závisí na radiálnej vzdialenosti danej magnetickej siločiar na rovníku (L -shell), s rastúcou vzdialenosťou jeho horná hranica monotónne klesá.

1.3 Vysypávanie energetických častíc

Ako už bolo spomenuté v kapitole 1.1, pre častice zachytené v radiačných pásoch môže dôjsť k zmene ich magnetického momentu v dôsledku interakcie s elektromagnetickými vlnami, čo vedie na difúziu v pitch uhle, ktorá je z globálneho hľadiska príčinou presunu častíc do stratového kužela a následného vysypania do atmosféry. Tieto elektromagnetické vlny môžu byť generované bleskovými výbojmi, ako je popísané v kapitole 1.2. A tak v prípade, že dôjde k vysypaniu elektrónov v dôsledku bleskového výboja, hovoríme o LEP (Lightning-induced electron precipitation) udalosti.

LEP udalosti pozorovali Voss a kol. (1998) satelitom S81-1/SEEP. Niekoľko udalostí, ktoré sa vyskytli v septembri a októbri 1982, bolo jedna k jednej korelovaných s hvizdami na stanici Palmer v Antarktíde. Zistili, že LEP udalosti

sú asociované so skupinkami magneticky vedených 100–200 keV elektrónov, ktoré sú opakovane rozptyľované atmosférou a odrážajú sa medzi severnou a južnou hemisférou, pričom čas medzi bleskovým výbojom a príchodom prvej skupinky elektrónov sa zvyšuje s narastajúcim parametrom L -shell. Globálna distribúcia silných LEP udalostí pozorovaná SEEP satelitom koreluje s bleskovou aktivitou a ukazuje preferenciu pre L -shell rozsah 2–3, ktorý odpovedá slot regiónu.

Oblasti maximálneho toku vysypávaných elektrónov, ktoré majú veľkosť niekoľko desiatok stupňov šírky a dĺžky vznikajú približne 7–20° smerom k bližšiemu pólu od miesta počiatočného bleskového výboja. LEP udalosti významne prispievajú k strate energetických (>100 keV) elektrónov z radiačného pásu, a to najmä v oblasti $2,2 < L < 3,5$ (Lauben a kol., 2001). K výsledkom podobného typu dospeli na základe štatistickej štúdie uskutočnenej nad územím Európy aj Bourriez a kol. (2016) – LEP udalosť nastáva podstatne severnejšie než počiatočný bleskový výboj a rozpína sa viac než 1000 km na každú stranu geomagnetickej dĺžky blesku. So zvyšujúcou sa šírkou blesku sa znižuje vzdialenosť medzi bleskovým výbojom a LEP udalosťou, pričom táto udalosť nastáva v rámci jednej sekundy od zapríčiňujúceho bleskového výboja.

Gemelos a kol. (2009) analýzou dát z družice DEMETER zistili, že nad územím USA je tok vysypávaných energetických elektrónov v slot regióne ($2 < L < 3$) výrazne vyšší v období severného leta v porovnaní so zimou, čo súhlasí so sezónnou závislosťou bleskovej aktivity v severnej hemisfére. Asociácia tokov vysypávaných častíc s bleskovou aktivitou bola skúmaná pomocou dát o lokáciách bleskov z NLDN (National Lightning Detection Network) a vlnových dát z družice DEMETER. Zvýšené vysypávanie častíc do stratového kužela nad severnou hemisférou v lete je konzistentné s očakávaným rozptylom v pitch uhle spôsobeným hviezdami, ktoré sú generované bleskovými výbojmi, čo indikuje že blesková aktivita je výrazným prispievateľom straty elektrónov zo slot regiónu.

Vysypávanie energetických elektrónov z radiačných pásov nevedenými (magnetosféricky odrážanými) hviezdami pochádzajúcimi z bleskových výbojov potom teoreticky skúmali Bortnik a kol. (2006a). Ukázali, že jediný bleskový výboj môže prispieť k vysypávaniu častíc do atmosféry v oboch hemisférach, pričom s postupujúcim časom sa efekt posúva na vyššie hodnoty L (Bortnik a kol., 2006b).

2. Dáta použité v práci

2.1 Družica DEMETER

DEMETER (Detection of Electro–Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions) bola francúzska družica obiehajúca po kruhovej obežnej dráhe vo výške 710 km a s inklináciou $98,3^\circ$ od júna 2004 do decembra 2010. Jej orbit bol synchronizovaný so Slnkom, tj. meranie prebiehalo vždy približne v lokálnych časoch 10:30 a 22:30 hodín. Družica pracovala v módoch Survey a Burst. Dáta z Burst módu majú lepšie časové a frekvenčné rozlíšenie, ale tento mód bol aktívny iba v krátkych intervaloch v oblastiach zvýšeného záujmu, ktoré väčšinou odpovedali seizmickým regiónom. V móde Survey družica zbierala dáta na geomagnetických šírkach menších ako 65° kontinuálne a vďaka obmedzenej kapacite telemetrie majú tieto dáta horšie rozlíšenie. Súčasťou družice bolo viacero prístrojov, my sme využili dáta z časticového prístroja IDP (Instrument for Particle Detection) a prístroja pre meranie elektrického poľa ICE (Electric Field Instrument).

2.1.1 Časticové dáta

IDP je elektrónový spektrometer určený na meranie tokov energetických elektrónov v energetickom rozsahu od 70 keV do 2,5 MeV. V Burst móde boli údaje o tokoch elektrónov zaznamenané každú sekundu a energetické spektrum bolo rozdelené do 256 rovnako širokých kanálov, energetické rozlíšenie je teda okolo 10 keV. V Survey móde boli tieto údaje zaznamenané každé 4 sekundy do 128 energetických kanálov (Sauvaud a kol., 2006).

2.1.2 Vlnové dáta

Prístroj ICE poskytuje údaje o intenzite elektrického poľa v rozsahu frekvencií od jednosmerného prúdu až po 3,175 MHz, pričom tento frekvenčný rozsah je rozdelený do 4 kanálov (Berthelier a kol., 2006). V práci sme využili údaje z Burst módu o vlnách v kanáli VLF (very low frequency, veľmi nízka frekvencia) v rozsahu 15 Hz–17,4 kHz. Bola meraná jedna komponenta elektrického poľa s vzorkovacou frekvenciou 40 kHz.

2.2 WWLLN

WWLLN (World Wide Lightning Location Network) je celosvetová sieť pozemných VLF senzorov určených na detekciu bleskov (Holzworth, 2023).

Blesky sú lokalizované pomocou času skupinového príchodu (TOGA, time of group arrival) VLF žiarenia (3–30 kHz) z bleskového výboja, pričom každá lokalizácia vyžaduje TOGA údaje aspoň z piatich senzorov. Rozptýlená vlna bleskového impulzu je spracovaná na mieste každého prijímajúceho senzoru. Na rozdiel od iných VLF metód, ktoré vyžadujú prenos celého sledu vln z každej lokácie do centrálného miesta spracovania, metóda TOGA vyžaduje prenos jediného čísla

(TOGA) na výpočet polohy blesku. Stabilné šírenie a nízky útlm vln vo vlnovode Zem-ionosféra umožňujú veľký rozstup lokácií senzorov až do vzdialenosti niekoľkých tisíc kilometrov (Dowden a kol., 2002).

2.3 Kp index

K index kvantifikuje poruchy magnetického poľa v okolí Zeme pomocou škály 0–9, kde 1 znamená malú geomagnetickú aktivitu a 5 znamená geomagnetickú búrku. Jedná sa o lokálny index určený každé 3 hodiny a je odvodený z maximálnej fluktuácie horizontálnej zložky magnetického poľa pozorovanej na pozemných magnetometroch.

Kp index je globálny index geomagnetickej aktivity odpovedajúci váženému priemeru K indexov zo siete trinástich pozemných geomagnetických observatórií. Tiež je určený každé 3 hodiny a nadobúda hodnoty 0–9, pričom ide po tretinách. Typicky sa značí 0o, 0+, 1-, 1o, 1+, atď. Ide o historicky najstarší a najtradičnejšie používaný index globálnej geomagnetickej aktivity.

K aj Kp index zaviedli Bartels a kol. (1939).

3. Ciele práce

Prvým cieľom práce bolo zoznámiť sa s družicou DEMETER, prístrojmi na palube a formátom dát. Následne sme študovali strednú závislosť vysypávaných elektrónov na bleskovej aktivite. Identifikovali sme význačné udalosti odpovedajúce jednotlivým bleskovým výbojom a analyzovali ich polohy a vlastnosti.

4. Získané výsledky

4.1 Globálny význam bleskovej aktivity

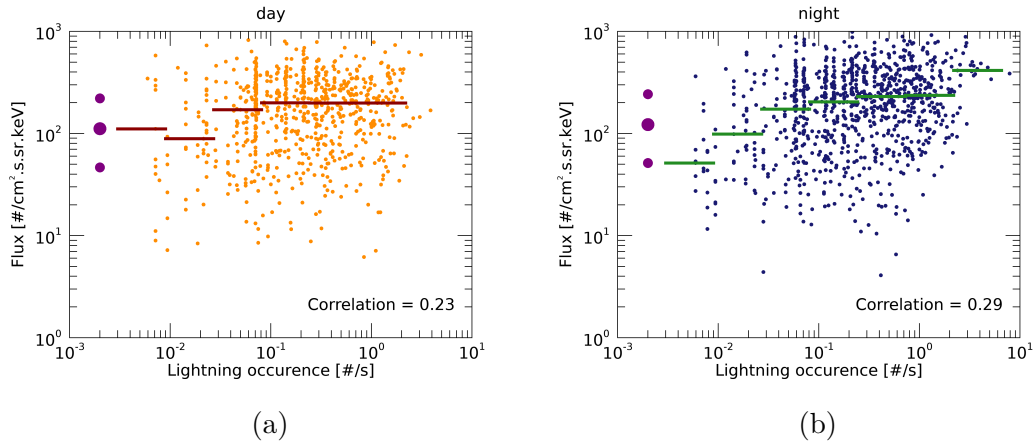
V prvom rade sme sa venovali globálnemu porovnaniu výskytu bleskov a meraných tokov energetických častíc. K tomu sme použili dáta o časoch a polohách bleskov z globálnej bleskovej detekčnej siete WWLLN a dáta z prístroja IDP družice DEMETER získané v móde Survey, ktoré boli získavané kontinuálne a sú preto vhodnejšie pre globálne porovnanie.

Obmedzujeme sa na dáta získané v období 2006 – 2010, kedy máme vhodné dáta ako z družice, tak aj z bleskovej detekčnej siete, nad územím USA (v rozmedzí zemepisných dĺžiek $240^\circ - 280^\circ$ a geomagnetických šíriek $42^\circ - 52^\circ$), kde sa očakáva viditeľný efekt bleskov na tok vysypaných elektrónov (Gemelos a kol., 2009).

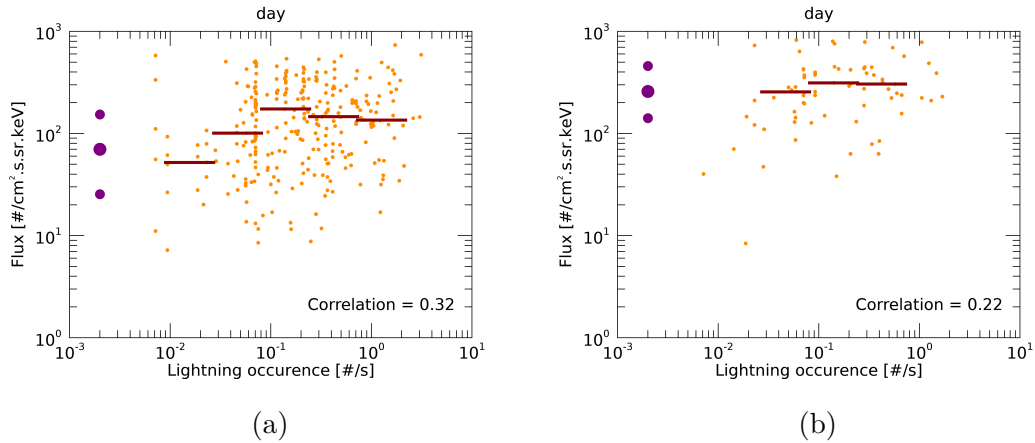
Obrázok 4.1 ukazuje závislosť meraného toku vysypávaných energetických elektrónov na výskyte bleskov, a to zvlášť pre denné (panel a)) a nočné (panel b)) orbity družice.

Jednotlivé body na obrázkoch odpovedajú jednotlivým preletom družice nad daným územím, pričom každý trvá minimálne 2 minúty (prelety družice, ktoré sa dostali nad okraj uvažovaného územia iba na chvíľu, sú z analýzy vyradené). Početnosť bleskov (lightning occurrence) sme určili ako počet všetkých bleskov na sledovanom území behom daného preletu družice vydelených trvaním tohto preletu v sekundách, jedná sa teda o priemernú početnosť bleskov za uvažovaný časový interval. Tok (flux) vysypaných elektrónov je určený ako priemerná hodnota toku v energetickom rozsahu elektrónov 90 keV – 170 keV. Tento energetický rozsah bol zvolený v súlade s predchádzajúcou štúdiou (Gemelos a kol., 2009) tak, aby korešpondoval s energetickým rozsahom, kde môžeme očakávať najvyšší efekt bleskových emisií. Vodorovné čiary označujú medián toku na danom rozsahu početnosti bleskov. Body vľavo označujú kvantily (25%, 50%, 75%) toku pre prípad, kedy bola početnosť bleskov nulová a nemohla byť teda – s ohľadom na logaritmickú škálu použitú na ose x – vynesená priamo do grafu. Aj keď je rozptyl jednotlivých bodov značný, mediánové hodnoty vykazujú pomerne jasný trend vyšších tokov vysypávaných elektrónov v obdobiach vyššej početnosti bleskov. Tento trend je výraznejší pre dáta získané behom nočných orbít. Hodnoty príslušných Spearmanových rank korelačných koeficientov pre deň a noc sú približne 0.23 a 0.29.

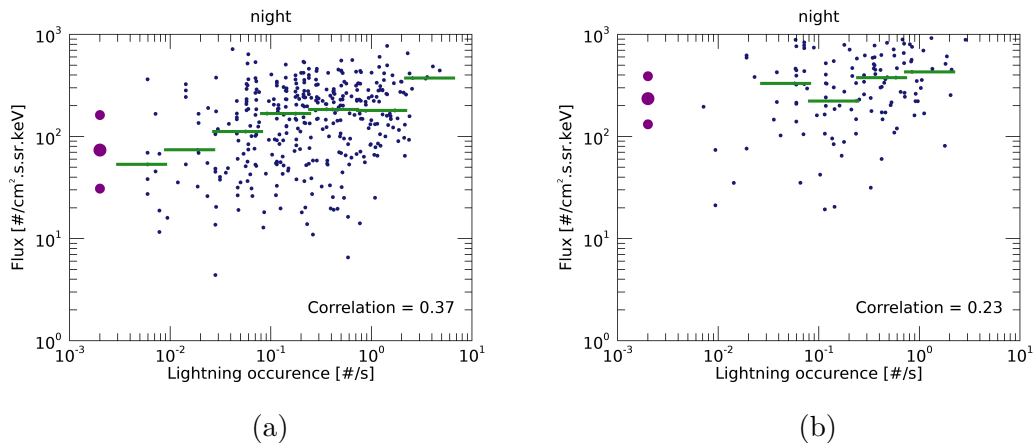
Obrázky 4.2 a 4.3 ukazujú rovnakú závislosť a používajú rovnaký formát ako obrázok 4.1, ale sú rozdelené podľa hodnoty indexu K_p na obdobia nízkej ($K_p \leq 1-$, panely a)) a vysokej ($K_p \geq 3o$, panely b)) geomagnetickej aktivity. Výsledky získané pre dáta merané behom denných polorbit družice sú znázornené na obrázku 4.2, výsledky získané pre dáta merané behom nočných polorbit družice sú znázornené na obrázku 4.3. Počet preletov družice v obdobiach vyššej geomagnetickej aktivity je pomerne nízky a trend rastúcich tokov vysypávaných častíc s rastúcou početnosťou bleskov je navyše menej výrazný. Oproti tomu v obdobiach nízkej geomagnetickej aktivity je tento trend podstatne výraznejší, a to predovšetkým pre nočné prelety. Hodnota Pearsonovho rank korelačného koeficientu pre nízku geomagnetickú aktivitu behom noci činí približne 0.37.



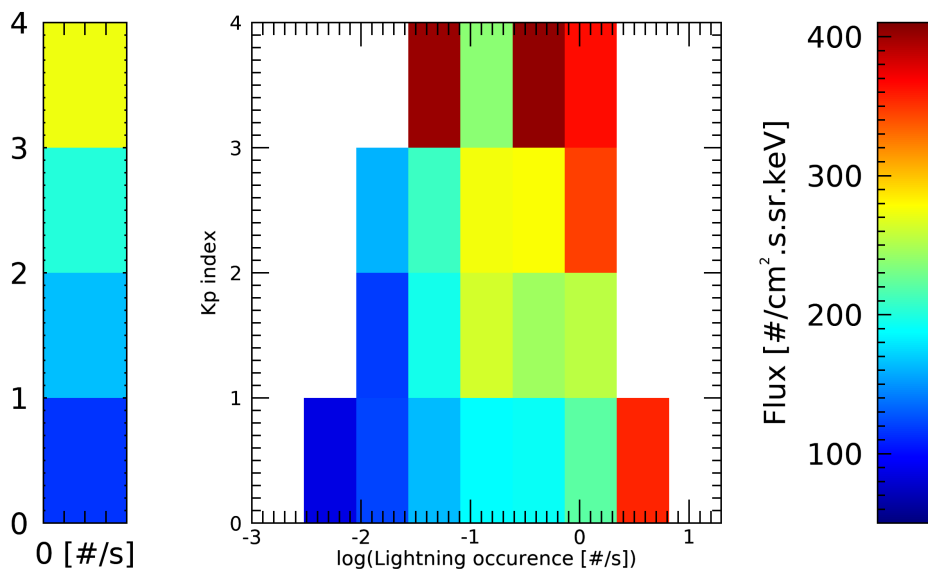
Obrázek 4.1: Závislost toku vysypaných energetických (90 keV – 170 keV) elektrónov na výskyte bleskov (a) počas dňa, (b) počas noci. Vodorovné čiary značia mediány toku v jednotlivých binoch, body vľavo označujú 0.25, 0.50 a 0.75 kvantily toku pre prípad nulovej počtynosti bleskov.



Obrázek 4.2: Závislost toku vysypaných energetických (90 keV – 170 keV) elektrónov na výskyte bleskov počas dňa (a) v období nízkej geomagnetickej aktivity ($K_p \leq 1-$), (b) v období vysokej geomagnetickej aktivity ($K_p \geq 30$). Formát obrázku je stejný jako formát obrázku 4.1.



Obrázek 4.3: Rovnaké ako obrázok 4.2, ale pre nočné polorbity družice.



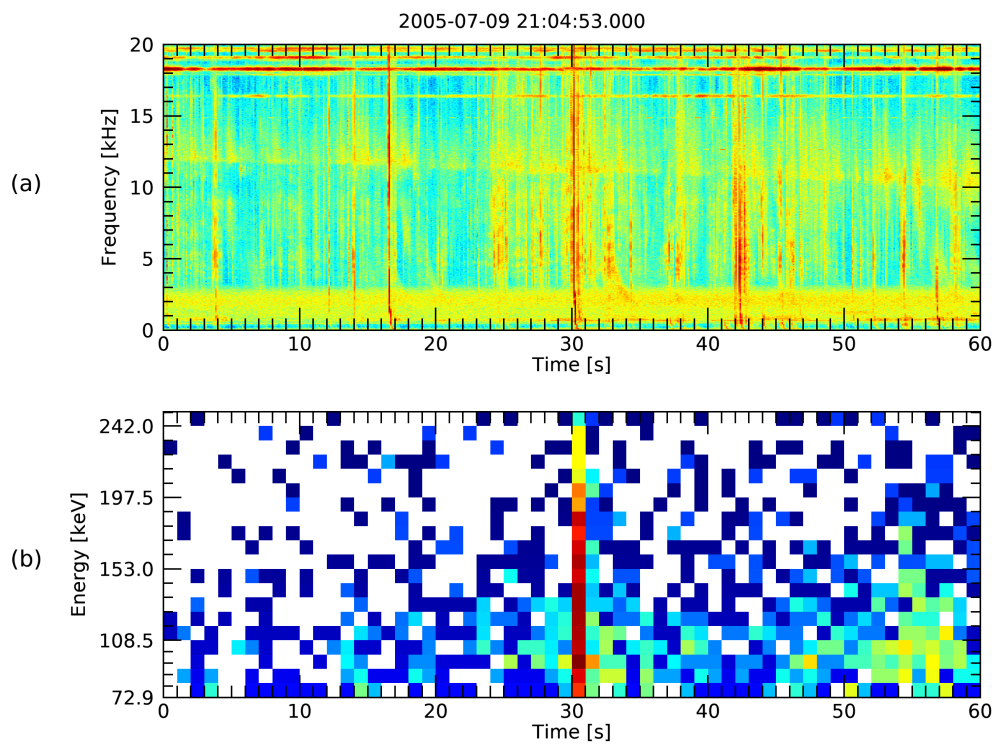
Obrázek 4.4: Závislosť toku vysypaných energetických (90 keV – 170 keV) elektrónov na výskyte bleskov a Kp indexe počas noci. Priemerná hodnota meraného toku vysypávaných elektrónov je farebne kódovaná podľa farebnej škály na pravej strane. Situácia pre nulovú početnosť bleskov je znázornená v stĺpci úplne vľavo.

Na obrázku 4.4 vidíme kombinovanú závislosť toku vysypaných energetických (90 keV – 170 keV) elektrónov na výskyte bleskov a Kp indexe počas noci. Interval medzi 0 a 1 na škále Kp indexu odpovedá indexom 0o, 0+, 1-, interval medzi 1 a 2 odpovedá hodnotám 1o, 1+, 2- a podobne. Jednotlivé prelety nad daným územím boli rozdelené podľa Kp indexu a početnosti bleskov a pre každú dvojicu Kp indexu a početnosti bleskov bol určený aritmetický priemer toku vysypaných elektrónov. Ten je farebne kódovaný podľa farebnej škály napravo, farebný stĺpec úplne vľavo potom zodpovedá situácii pri nulovej početnosti bleskov, ktorá nemohla byť – s ohľadom na použitú logaritmickú škálu na ose x – znázornená v hlavnom obrázku. Je vidieť systematický trend rastúceho toku vysypávaných energetických elektrónov ako s rastúcou početnosťou bleskov (tj. “po riadkoch”), tak s rastúcou geomagnetickou aktivitou charakterizovanou pomocou Kp indexu (tj. “po stĺpcoch”). Pre najvyššie hodnoty geomagnetickej aktivity (horný riadok) potom závislosť na početnosti bleskov prakticky vymizne, v súlade s vyššie uvedenými výsledkami.

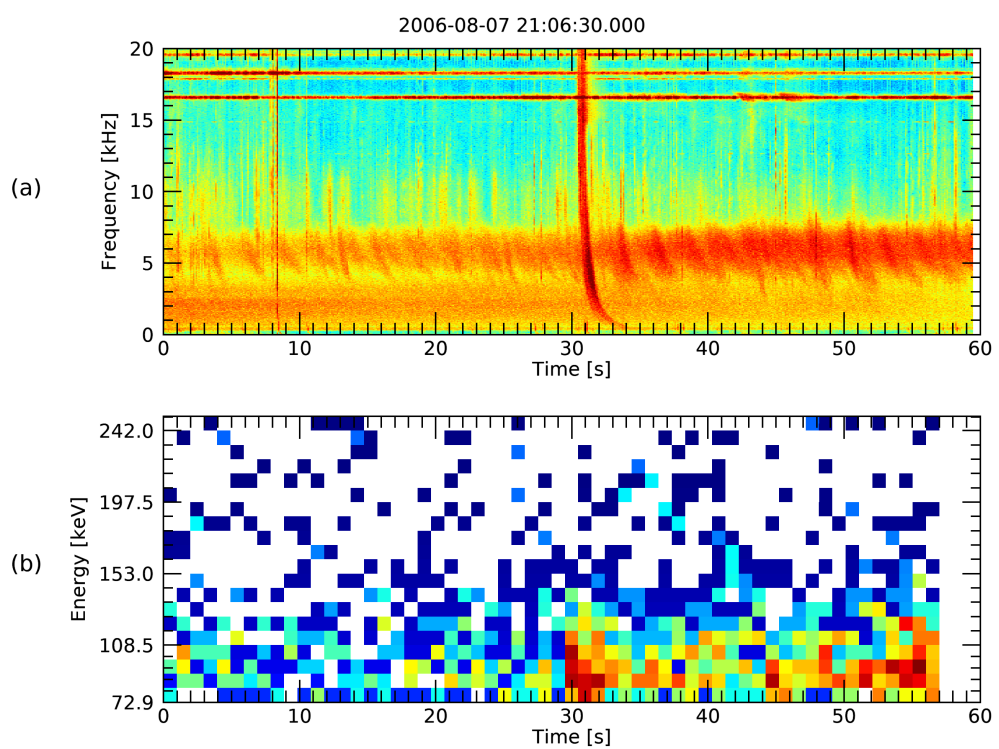
4.2 Identifikácia jednotlivých udalostí

Po štatistickom spracovaní sme sa zamerali na hľadanie konkrétnych udalostí, kedy k zvýšenému toku vysypávaných častíc došlo krátko po zvýšenej intenzite vlnových emisií odpovedajúcich detekovanému hvizdu. Na to sme použili dáta z Burst módu družice DEMETER, konkrétne z prístrojov IDP (časticové dáta) a ICE (vlnové dáta). Ako prvé sme takéto udalosti nechali hľadať automaticky pomocou programu. Vyvinutá identifikačná procedúra fungovala s časovým rozlíšením daným rozlíšením časticových meraní, tj. 1 sekunda. Bola založená na súčasnom vyhodnotení časovej závislosti toku vysypávaných častíc (integrovaných cez energie) a časovej závislosti vlnových intenzít (integrovaných cez frekvencie vo frekvenčnom pásme 2–12 kHz, aby sme sa vyhli nízkym frekvenciám výrazne ovplyvnenými disperziou a vysokým frekvenciám ovplyvnenými žiarením nízko-frekvenčných vojenských vysielateľov). Toky vysypávaných častíc aj vlnové intenzity boli uvažované v dekadických logaritmoch. Tieto dve časovo závislé veličiny sme vynásobili a pre pozitívnu identifikáciu sme vyžadovali, aby výsledná časová závislosť prekročila prah stanovený ako 3 smerodatné odchýlky od priemeru za každý minútový interval. Funkčnosť procedúry bola otestovaná na udalostiach uvedených v Inan a kol. (2007) a následne aplikovaná na všetky dostupné dáta družice DEMETER.

Týmto spôsobom sme našli 731 možných udalostí a ku každej z nich sme nechali vykresliť spektrogramy ako vidíme na obrázkoch 4.5 a 4.6, s časom identifikovaných udalostí uprostred minútových intervalov (absolútne jednotky použitej farebnej škály tu nie sú podstatné, kľúčový je relatívny nárast toku častíc a intenzít v dobe udalosti). Tie sme následne prešli ručne, vytriedili príležitostne sa vyskytujúce chybné identifikované udalosti alebo nejasné udalosti a získali sme tak 240 výsledných udalostí, ktoré predstavujú jasné prípady častíc vysypávaných vďaka bleskovej aktivite. Dve z týchto udalostí sú práve na obrázkoch 4.5 a 4.6. Panel (a) zobrazuje výkonovú spektrálnu hustotu fluktuácií elektrického poľa, tieto dáta pochádzajú z prístroja ICE družice DEMETER a panel (b) zobrazuje energetický spektrogram toku vysypávaných častíc na základe dát z prístroja IDP.



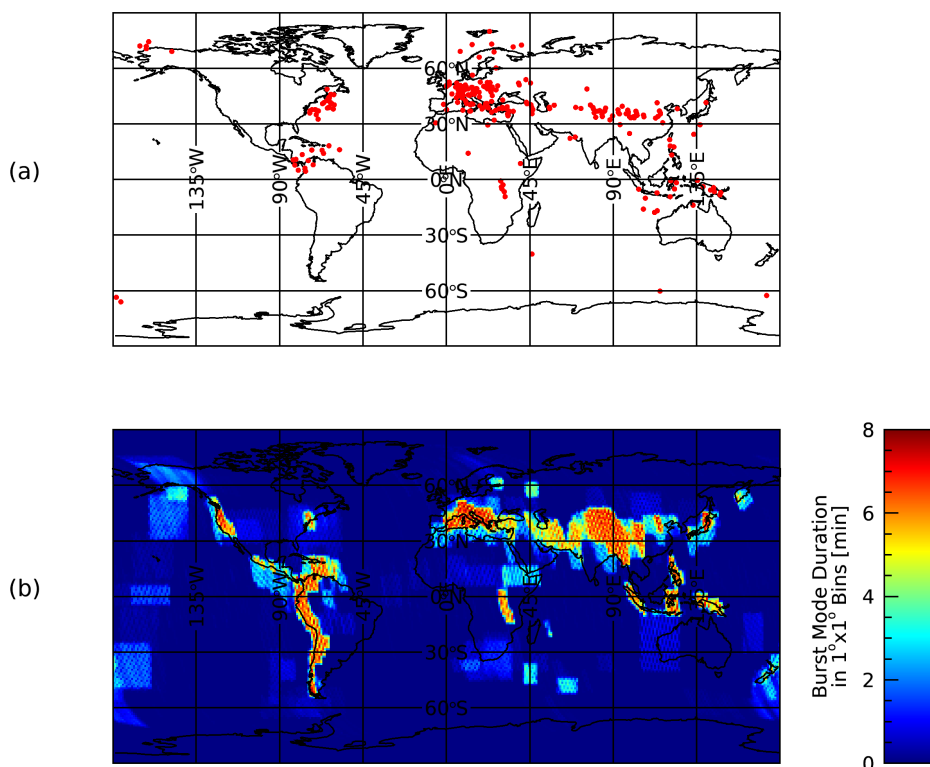
Obrázek 4.5: Príklad identifikovanej udalosti, ku ktorej došlo 9. júla 2005 o 21:04:53. (a) Frekvenčne–časový spektrogram fluktuácií elektrického poľa. (b) Energetický spektrogram toku vysypávaných častíc.



Obrázek 4.6: Rovnako ako obrázok 4.5, ale pre udalosť, ku ktorej došlo 7. augusta 2006 o 21:06:30.

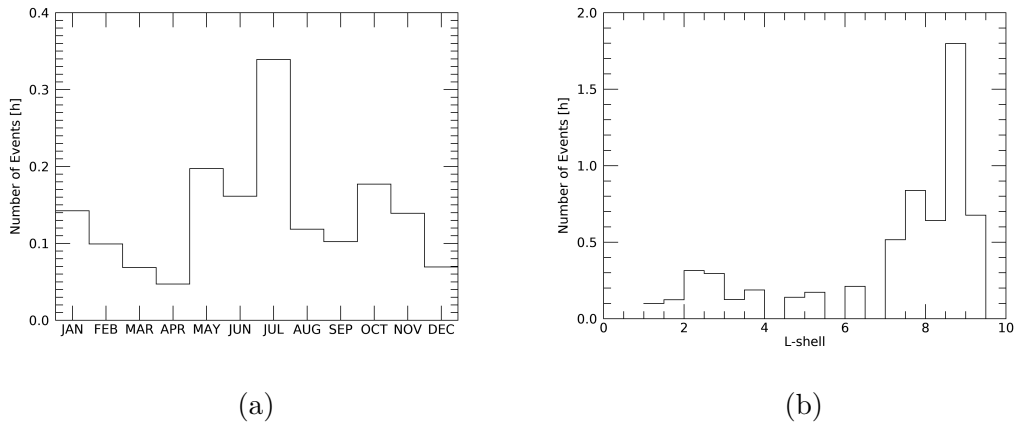
4.3 Analýza identifikovaných udalostí

Vybraných 240 udalostí sme skúmali bližšie. Na obrázku 4.7 panel (a) zobrazuje vyznačené miesta nad ktorými sa družica nachádzala pri zachytení udalostí. Je vidno, že väčšina udalostí sa vyskytuje nad Európou a takmer všetky identifikované udalosti sa vyskytujú na severnej pologuli. Pre riadnu interpretáciu tohto rozloženia je nutné uvážiť skutočnosť, že udalosti boli hľadané iba v dátach získaných behom aktívneho módu Burst – a že tento nie je aktívny nad všetkými oblasťami rovnomerne, ale primárne nad predom stanovenými, predovšetkým seizmicky aktívnymi, regiónmi. Pre porovnanie je preto na obrázku 4.7 v paneli (b) znázornené geografické rozloženie polôh družice v dobe aktívneho módu Burst. Vzhľadom k tomu že väčšina identifikovaných udalostí (232) sa vyskytla behom nočných polorbít, zameriavame sa iba na Burst mód aktívny behom nich. V obrázku je potom farebne znázornená celková doba trvania Burst módu v jednotlivých oblastiach o veľkosti $1^\circ \times 1^\circ$ geografickej šírky \times dĺžky počas celého trvania fungovania družice (2004–2010). Je vidno pomerne dobrý súhlas medzi oblasťami s aktívnym Burst módom a geografickým rozdelením identifikovaných udalostí. S ohľadom na obmedzené pokrytie módu Burst tak nie je možné na základe tohoto rozloženia urobiť jasný záver o tom, že by udalosti preferovali niektorú geografickú oblasť.



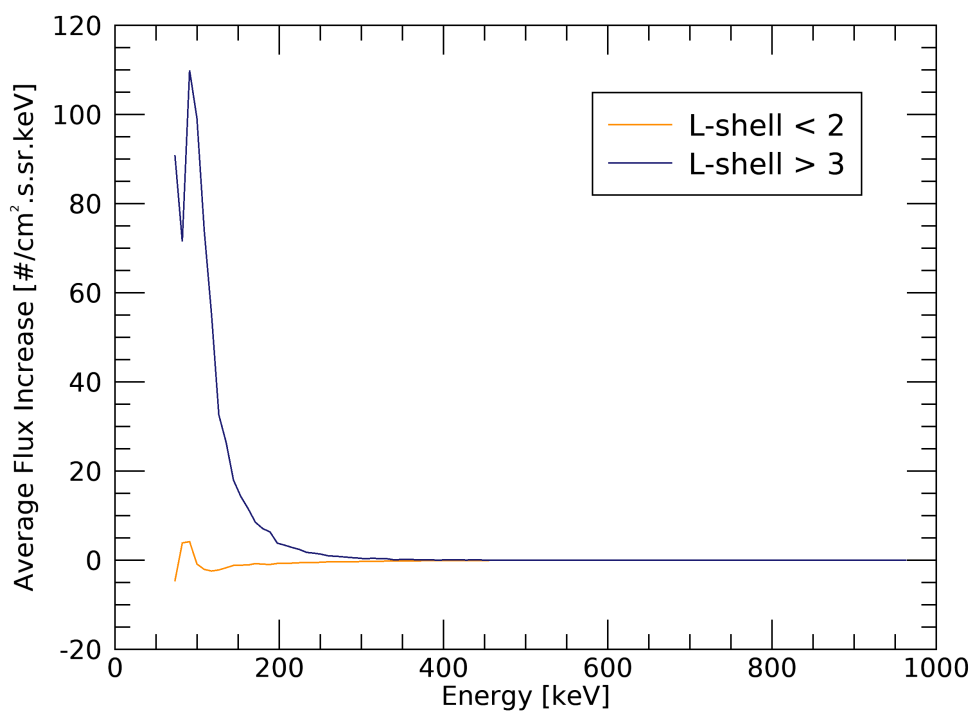
Obrázek 4.7: (a) Geografické polohy družice pri zachytení udalosti sú znázornené červenými bodmi. (b) Celková doba trvania Burst módu družice v jednotlivých $1^\circ \times 1^\circ$ binoch geografickej šírky a dĺžky behom nočných polorbít.

Na obrázku 4.8 preto rozdelenie početnosti výskytu udalostí študujeme podrobnejšie, a to v závislosti na (a) mesiaci v roku a (b) hodnote parametra L -shell. Vykreslený je pritom priemerný počet udalostí za hodinu merania módu Burst. Na paneli (a) vidíme očakávaný nárast normovaného výskytu udalostí v letných mesiacoch severnej pologule, ktorý súvisí s častejším výskytom bleskov v tomto období. Panel (b) potom indikuje drobný nárast normovaného výskytu udalostí v L -shell rozsahu 2–3 a predovšetkým potom výrazný nárast normovaného výskytu udalostí pre veľké hodnoty L ($L \gtrsim 7$). V oblasti väčšieho parametra L -shell však družica merala omnoho zriedkavejšie než v oblastiach menšieho L -shell, a tak tu vzniká väčšia chyba pri prepočte na priemerný počet udalostí za hodinu.



Obrázek 4.8: Počet identifikovaných udalostí normovaný celkovou dobou trvania módu Burst v závislosti na (a) mesiacov a (b) L -shell.

Dôležitou charakteristikou identifikovaných udalostí je rozsah energií, na ktorých dochádza k nárastu tokov vysypávaných energetických elektrónov. Toto sme študovali v obrázku 4.9, a to s rozdelením podľa L -shell na udalosti, ktoré sa vyskytli na $L < 2$ a $L > 3$, pretože očakávané globálne toky energetických častíc na malých/veľkých hodnotách L -shell sú výrazne odlišné. Udaloostí s $L < 2$ je 140 a s $L > 3$ je ich 29. Pre každú udalosť sme od energetického spektra vysypávaných elektrónov v čase udalosti odčítali pozadie, tj. energetické spektrum očakávané v danom čase bez prítomnosti udalosti. To jsme vypočítali ako priemer tokov 5 sekúnd pred a po udalosti. Výsledné priemerné hodnoty nárastu toku vysypávaných elektrónov v závislosti na energii sú znázornené na obrázku 4.9. Je vidno, že aj keď je absolútna hodnota nárastu (rovnako ako vlastné toky) výrazne vyššia pre udalosti pozorované na vyšších L -shell, je rozsah energií s najväčším nárastom tokov vysypávaných častíc pomerne porovnateľný, a to zhruba 80–100 keV.

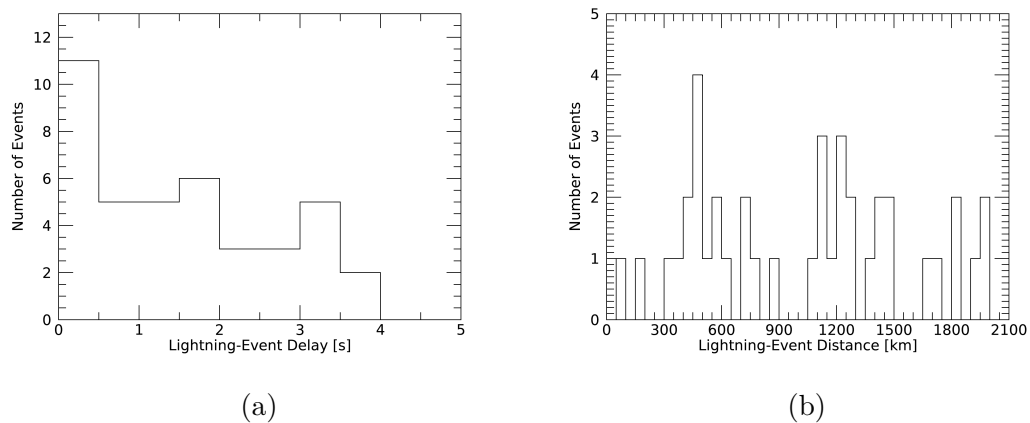


Obrázek 4.9: Priemerné energetické spektrá nárastu toku detekovaných energetických elektrónov počas udalostí. Výsledky získané pre udalosti na $L < 2$ jsou znázornené červenou čiarou, výsledky získané pre udalosti na $L > 3$ sú znázornené modrou čiarou.

Ako posledné sme sa pokúsili k jednotlivým udalostiam priradiť blesky z databázy WWLLN. Cieľom bolo bližšie preskúmať priebeh udalostí a vlastnosti zapríčiňujúcich bleskov, rozhodli sme sa preto využiť dáta (tiež zo siete WWLLN) poskytujúce informácie o energii jednotlivých bleskov, ktoré sú však dostupné až od apríla 2009. Snažili sme sa teda priradiť blesky k udalostiam v rámci rokov 2009 a 2010.

Hľadanie zapríčiňujúcich bleskov prebiehalo nasledovne: družicu sme pozdĺž magnetickej siločiarly projektovali na povrch bižšej hemisféry a hľadali sme blesky, ktoré nastali do 4 sekúnd pred časom zachytenia udalosti a zároveň nastali v mieste vzdialenom maximálne 2000 km od miesta, kam sme projektovali družicu. Motiváciou bolo, že sa vlny z bleskového výboja šíria pozdĺž magnetických siločiar a interagujú s protiúdúcimi elektrónmi, ktoré môžu postrčiť do stratového kužela. Časová a priestorová podmienka pre blesky boli stanovené hrubým odhadom ako rozumné horné medze odpovedajúce dobe šírenia hvizdu pozdĺž magnetickej siločiarly (Helliwell, 1965), resp. útlmu vln pri šírení vlnovodom medzi Zemou a ionosférou (Fiser a kol., 2010).

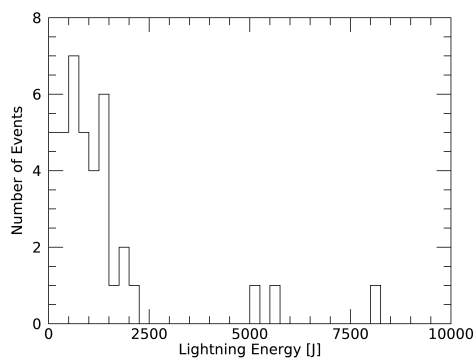
Týmto spôsobom sa nám podarilo priradiť zapríčiňujúci blesk k 40 udalostiam. Panel (a) obrázku 4.10 zobrazuje rozdelenie udalostí podľa časového oneskorenia udalosti po blesku. Panel (b) potom zobrazuje rozdelenie podľa vzdialenosti udalosti od miesta blesku. Je vidno, že väčšina priradených bleskov sa vyskytla veľmi tesne pred udalosťami a počet priradených bleskov s väčšími časovými odstupmi postupne klesá. S ohľadom na to, že žiadny časový odstup nebol v rámci priradzovacieho algoritmu preferovaný, predstavuje toto pomerne dobrú indikáciu toho, že proces priradzovania bol – aspoň typicky – korektný. Oproti tomu vzdialenosti medzi zdrojovými bleskami a jednotlivými udalosťami nevykazujú zrejme žiadny trend.



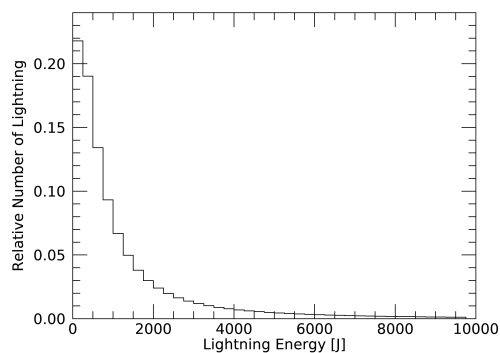
Obrázek 4.10: Charakteristika identifikovaných dvojíc udalost–zdrojový blesk. (a) Časový rozdiel medzi bleskom a časom udalosti. (b) Vzdialenosť medzi miestom blesku a udalosťou.

Na paneli (a) obrázku 4.11 vidíme rozdelenie udalostí podľa energie priradeného blesku. Na paneli (b) potom vidíme relatívny počet všetkých bleskov v období apríl 2009 – november 2010 v závislosti na energii blesku. Pomocou tohto rozdelenia sme normalizovali rozdelenie udalostí z panelu (a) a výsledok znázornili na paneli (c). Je vidno, že väčšina priradených bleskov má pomerne

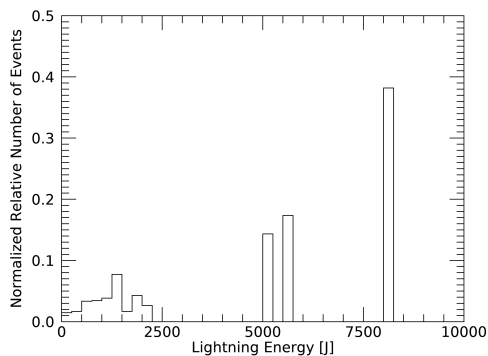
malé energie a počet priradených bleskov s väčšími energiami postupne klesá. To dobre zodpovedá celkovému rozdeleniu energií bleskov, kedy je pozorovaný rovnaký trend. Normované rozdelenie energií bleskov však indikuje, že blesky vyšších energií sú s udalosťami párované o niečo častejšie, než by odpovedalo náhodnému výberu. Je ale potrebné poznamenať, že v skutočnosti je tento zdanlivý nárast počtu párovaných bleskov o vyšších energiách spôsobený len troma udalosťami a nie je možné ho teda považovať za štatisticky významný.



(a)



(b)



(c)

Obrázek 4.11: (a) Rozdelenie udalostí s priradeným bleskom podľa energie daného blesku. (b) Relatívne rozdelenie všetkých bleskov podľa energie za zodpovedajúce obdobie (apríl 2009 – november 2010). (c) Normalizované relatívne rozdelenie udalostí s priradeným bleskom podľa energie daného blesku.

5. Diskusia

Pri skúmaní globálneho významu bleskovej aktivity sme použili dáta o časoch a polohách bleskov z globálnej bleskovej detekčnej siete WWLLN a energetické spektrá vysypávaných energetických elektrónov z prístroja IDP družice DEMETER. Vzhľadom k tomu, že táto časť štúdie nevyžadovala dáta s vysokým časovým rozlíšením, využili sme dáta získané behom módu Survey, ktorého výhoda je prakticky kontinuálne pokrytie (mimo polárnych oblastí). Zamerali sme sa pritom výhradne na územie USA, kde je sezónna závislosť početnosti bleskov veľmi výrazná (Němec a kol., 2010) a takéto priamočiare vyhodnotenie bleskových efektov je tak možné (Gemelos a kol., 2009).

Na obrázkoch 4.1, 4.2 a 4.3 vidíme, ako denná doba a Kp index ovplyvňujú koreláciu veľkosti toku vysypaných častíc a výskytu bleskov. V noci je útlm elektromagnetických vln šíriacich sa ionosférou približne o rád menší ako počas dňa (Helliwell, 1965; Cohen a kol., 2012) a tak očakávame väčší vplyv bleskových emisií počas noci, keďže intenzity zodpovedajúcich hvizdových emisií šíriacich sa magnetosférou sú všeobecne vyššie (Záhlava a kol., 2019). Toto sa potvrdilo a vyššie spomínaná korelácia je bez ohľadu na hodnotu Kp indexu vždy vyššia behom nočných než behom denných polorbitov. Ďalej vidíme, že táto korelácia je menšia pri vyššom Kp indexe – to sa dá vysvetliť tým, že zvýšená geomagnetická aktivita vedie k zvýšeným intenzitám ostatných (tj. s bleskovými emisiami nesúvisiacich) magnetosférických vln (Agapitov a kol., 2018; Spasojevic a kol., 2015) a vplyv bleskových emisií sa tým pádom stáva menej dominantný (lebo o týchto je možné predpokladať, že sú na geomagnetickej aktivite nezávislé). Toto pozorovanie zhrňa obrázok 4.4, ktorý zobrazuje iba dáta namerané v noci. V prípade nízkeho Kp indexu sledujeme výraznú koreláciu medzi početnosťou bleskov a veľkosťou toku vysypaných častíc, zatiaľ čo pri vyššom Kp indexe (3o a viac) táto korelácia mizne.

Poznamenajme, že vyššie zmienené efekty boli demonštrované štatisticky nad vybraným územím, pričom bol uvažovaný celkový počet zachytených bleskov behom daného preletu družice (minimálne 2 minúty) a celkový tok vysypávaných elektrónov. Aj keď teda táto analýza jednoznačne demonštruje vplyv bleskových emisií, neumožňuje odlíšiť krátkotrvajúce veľmi význačné udalosti od globálne zvýšených tokov vysypávaných častíc. Možnosti identifikácie týchto význačných krátkodobých udalostí a ich následnej analýze sme sa venovali v ďalšej časti práce.

Hľadané udalosti predpokladajú (takmer) súčasnú detekciu prudko zvýšeného toku vysypávaných energetických elektrónov a intenzity elektromagnetických vln odpovedajúcich šíriacemu sa bleskom generovanému hvizdu. Okrem nižšieho množstva dát je negatívnym efektom aj obmedzené geografické pokrytie, ktoré podstatných spôsobom obmedzuje a komplikuje ďalšiu analýzu. Vlastná identifikácia udalostí prebiehala semi-automaticky. Kvôli lepšiemu časovému, frekvenčnému a energetickému rozlíšeniu sme využili dáta z Burst módu, ktorý ale nebol aktívny stále. Tým pádom nemáme žiadne informácie o udalostiach, ktoré prebehli v dobe, kedy bol aktívny Survey mód družice. Začali sme automatickým vyhľadávaním udalostí pomocou programu. Aj keď bol jeho algoritmus vyvinutý a príslušné parametre nastavené tak, aby riadne identifikoval všetky testovacie udalosti, je nanajvýš pravdepodobné, že niektoré z reálne sa vyskytnutých udalostí

nerozpoznal (false negative). Bohužiaľ nemáme žiadnu možnosť ako tieto udalosti odhaliť a charakterizovať početnosť ich výskytu. Všetkých 731 udalostí, ktoré program identifikoval, sme jednotlivo zhodnotili ručne a eliminovali sme tak možnosť nesprávne pozitívne identifikovanej udalosti (false positive). Prípadné nejasnosti tak mohli vzniknúť jedine subjektivitou pozorovateľa. Výsledných udalostí, na ktorých sme vykonávali ďalšiu analýzu, bolo 240.

Týchto 240 udalostí sme najprv vyznačili na mape (teda miesta, kde sa družica pri zachytení udalostí nachádzala) spolu s trvaním Burst módu družice v oblastiach veľkosti $1^\circ \times 1^\circ$ geografickej šírky \times dĺžky. Pomerne nízky počet identifikovaných udalostí a ich striktné obmedzenie na viacmenej fixné oblasti s aktívnym Burst módom bohužiaľ neumožnilo urobiť výraznejšie závery o ich geografickom rozložení. Ďalej sme preto študovali početnosť výskytu udalostí nie absolútnu, ale normovanú príslušnou dobou trvania módu Burst, a to vždy v závislosti na jednom vybranom parametri.

Týmto spôsobom sa nám podarilo demonštrovať, že identifikovaných 240 udalostí vykazujú preferenciu pre letné obdobie na severnej pologuli (obrázok 4.8, panel a). Táto preferencia je pravdepodobne spôsobená vyššou početnosťou bleskov v tomto období, a to ako globálne, tak predovšetkým na severnej pologuli, kde je doba trvania Burst módu výrazne vyššia (Christian a kol., 2003). Panel (b) obrázku 4.8 zobrazuje peak na vyšších hodnotách L-shell parametra. Výsledky získané na týchto veľkých hodnotách L však nie je možné považovať za štatisticky významné. Družica DEMETER sa v oblasti vyšších L vyskytovala omnoho menej ako v oblasti menších L a zodpovedajúca doba trvania módu Burst je limitovaná ešte výraznejšie. Pri normalizácii z celkového počtu udalostí na priemerný počet udalostí za hodinu trvania módu Burst preto nutne dochádza k deleniu veľmi malým číslom a výsledok je zatažený značnou chybou. Zaujímavým výsledkom je menší nárast počtu udalostí v oblasti L-shell 2–3, čo je približne oblasť slot regiónu.

Porovnaním energetických spektier vysypaných elektrónov počas vybraných udalostí s energetickými spektrami pozorovanými tesne pred a tesne po týchto udalostiach (obrázok 4.9) sme zistili že k najväčšiemu nárastu tokov vysypávaných elektrónov dochádza približne v rozsahu energií 80–100 keV, a to nezávisle na L-shell daných udalostí. Pre vyššie L je však absolútny nárast toku vysypávaných elektrónov výrazne väčší – to sa dá pravdepodobne vysvetliť tým, že v oblasti väčších L sú toky elektrónov celkovo značne väčšie než na nižších L.

V poslednej časti práce sme sa pokúsili priradiť k jednotlivým udalostiam zapríčínujúci blesk a následne študovať ich rozloženie a vlastnosti. Pretože sú energie jednotlivých bleskov v dátach siete WWLLN k dispozícii až od roku 2009, bola táto časť našej analýzy obmedzená na roky 2009 a 2010. Priradenie prebiehalo na základe jednoduchých podmienok na časovú a priestorovú odľahlosť blesku a pozorovanej udalosti. Poznamenajme pritom, že z podmienky gyrorozonancie (Gurnett a Bhattacharjee, 2005) a skutočnosti, že frekvencie hvizdového módu sú zhora obmedzené elektrónovou cyklotrónovou frekvenciou, priamo plynie, že príslušný hvizd a s ním interagujúce elektróny sa musia pohybovať proti sebe. Ak ďalej uvážime, že k interakcii dochádza v roníkovej rovine (Rycroft, 2011), je zrejmé, že družica DEMETER by mala pozorovať vysypávané častice v hemisfére zdrojového blesku, a to s určitým časovým odstupom po detekcii príslušného hvizdu (ak neuvažujeme komplikovanejšiu situáciu hvizdov odrazených medzi he-

misférami).

Získané rozdelenie časových oneskorení pre nami priradené udalosti vykazuje klesajúci počet udalostí pre väčšie časové odstupy. To je možné považovať za indikáciu toho, že priradenie prebehlo (aspoň väčšinovo) korektne. Podmienka pre priradenie blesku bola, aby sa nachádzal do 2000 km od miesta udalosti. V rámci tejto vzdialenosti nepozorujeme preferenciu čo sa týka počtu udalostí. Intuitívne by pritom bolo možné očakávať väčší počet bleskov priradených na menších vzdialenostiach. Je však potrebné uvážiť, že: i) obsah oblasti v danom intervale vzdialeností od udalostí rastie s touto vzdialenosťou, teda počet bleskov v danom časovom intervale na väčších vzdialenostiach je všeobecne vyšší, ii) hvizdy sa môžu šíriť aj nevedene, teda nie striktne pozdĺž magnetických siločiar a iii) trasovanie magnetickej siločiar, akokoľvek založené na realistickom modeli magnetického poľa, nemusí byť úplne presné.

Rozdelenie energií priradených bleskov (obrázok 4.11, panel a) ukazuje, že väčšina udalostí nastáva pri bleskoch s pomerne malou energiou. To je na prvý pohľad opäť proti intuitívnemu očakávaniu. Pre zrovnanie je však nutné uvážiť rozdelenie energií všetkých bleskov za dané časové obdobie. Aj pre globálne sa vyskytujúce, s udalosťami nesúvisiace, blesky totiž platí, že čím vyššia energia bleskov, tým je menšia ich početnosť (obrázok 4.11, panel b). Preto sme spomínané rozdelenie udalostí normalizovali podľa počtu bleskov s danou energiou (obrázok 4.11, panel c). Vo výsledku by sa mohlo zdať, že blesky s vyššou energiou majú vyššiu pravdepodobnosť spôsobenia hľadanej udalosti, treba však mať na pamäti, že zo 40 priradených bleskov majú iba 3 z nich vyššiu energiu (> 5000 J). Nemáme teda dostatočne veľký štatistický súbor na vyvodenie záverov ohľadom energetickej preferencie bleskov spôsobujúcich udalosti.

Záver

Skúmali sme vplyv bleskových emisií na vysypávanie elektrónov z Van Allenových radiačných pásov. Použili sme pri tom dáta z družice DEMETER (vlnové dáta z prístroja ICE a časticové dáta z prístroja IDP) a dáta o časoch a polohách bleskov z globálnej bleskovej detekčnej siete WWLLN.

Ako prvé sme sa venovali štatistickej analýze nad územím USA. Využili sme družicové dáta zaznamenané v móde Survey a dáta z WWLLN. Ukázali sme, že v obdobiach vyššej početnosti bleskov nad daným územím je vyšší aj tok vysypávaných elektrónov. Tento efekt je najvýraznejší pre dáta merané v noci a pri nízkom Kp indexe. To je možné vysvetliť na základe väčšieho útlmu bleskami generovaných vln v ionosfére behom dňa, resp. na základe relatívne väčšej role magnetosférických vln generovaných nestabilitami plazmatu v dobe väčšej geomagnetickej aktivity.

Po štatistickom spracovaní sme identifikovali konkrétne udalosti, kedy k zvýšenému toku vysypaných častíc došlo krátko po zvýšenej intenzite vlnových emisií odpovedajúcich detekovanému hvizdu. Na to sme použili nami vytvorený automatický program, ktorého výsledky sme následne manuálne overili. S ohľadom na nutnosť dobrého časového rozlíšenia boli ako vstupné dáta použité časticové a vlnové merania pochádzajúce z Burst módu. Najskôr sme možné udalosti nechali vyhľadať programom a tie sme ručne pretriedili. Celkom sme týmto spôsobom získali 240 udalostí vhodných na ďalšiu analýzu. Zistili sme, že počet zachytených udalostí je výrazne vyšší behom leta na severnej pologuli, v dobrom súlade s globálnym výskytom bleskov a pokrytím módu Burst. Vyhodnotenie energetických spektier vysypávaných elektrónov odhalilo, že najviac sú ovplyvnené elektróny s energiou 80–100 keV. Ku 40 z týchto udalostí sa nám podarilo priradiť odpovedajúce bleskové výboje, ktorých energie sme ďalej analyzovali,

Nami získané výsledky jasne demonštrujú význam elektromagnetických emisií vznikajúcich vďaka bleskovej aktivite pre vysypávanie energetických častíc zachytených vo Van Allenových radiačných pásoch.

Seznam použité literatury

- AGAPITOV, O. V., MOURENAS, D., ARTEMYEV, A. V., MOZER, F. S., HOSPODARSKY, G., BONNELL, J. a KRASNOSELSKIKH, V. (2018). Synthetic empirical chorus wave model from combined Van Allen Probes and Cluster statistics. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **123**, 297–314.
- BARTELS, J., HECK, N. H. a JOHNSTON, H. F. (1939). The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, **44**, 411–454.
- BERTHELIER, J. J., GODEFROY, M., LEBLANC, F., MALINGRE, M., MENVIELLE, M., LAGOUTTE, D., BROCHOT, J., COLIN, F., ELIE, F., LEGENDRE, C., ZAMORA, P., BENOIST, D., CHAPUIS, Y., ARTRU, J. a PFAFF, R. (2006). ICE, the electric field experiment on DEMETER. *Planetary and Space Science*, **54**, 456–471.
- BORTNIK, J., INAN, U. S. a BELL, T. F. (2006a). Temporal signatures of radiation belt electron precipitation induced by lightning-generated MR whistler waves: 1. Methodology. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **111**, A02204.
- BORTNIK, J., INAN, U. S. a BELL, T. F. (2006b). Temporal signatures of radiation belt electron precipitation induced by lightning-generated MR whistler waves: 2. Global signatures. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **111**, A02205.
- BOURRIEZ, F., SAUVAUD, J. A., PINÇON, J. L., BERTHELIER, J. J. a PARROT, M. (2016). A statistical study over Europe of the relative locations of lightning and associated energetic burst of electrons from the radiation belt. *Annales Geophysicae*, **34**, 157–164.
- CHRISTIAN, H. J., BLAKESLEE, R. J., BOCCIPPIO, D. J., BOECK, W. L., BUECHLER, D. E., DRISCOLL, K. T., GOODMAN, S. J., HALL, J. M., KOSHAK, W. J., MACH, D. M. a STEWART, M. F. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research*, **108**, ACL 4–1–ACL 4–15.
- COHEN, M. B., LEHTINEN, N. G. a INAN, U. S. (2012). Models of ionospheric VLF absorption of powerful ground based transmitters. *Geophysical Research Letters*, **39**, L24101.
- COLMAN, J. J. a STARKS, M. J. (2013). VLF wave intensity in the plasmasphere due to tropospheric lightning. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **118**, 4471–4482.
- DOWDEN, R. L., BRUNDELL, J. B. a RODGER, C. J. (2002). VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **64**, 817–830.

- FISER, J., CHUM, J., DIENDORFER, G., PARROT, M. a SANTOLIK, O. (2010). Whistler intensities above thunderstorms. *Annales Geophysicae*, **28**, 37–46.
- GEMELOS, E. S., INAN, U. S., WALT, M., PARROT, M. a SAUVAUD, J. A. (2009). Seasonal dependence of energetic electron precipitation: Evidence for a global role of lightning. *Geophysical Research Letters*, **36**, L21107.
- GURNETT, D. A. a BHATTACHARJEE, A. (2005). *Introduction to Plasma Physics*. 1. Cambridge University Press, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom. ISBN 0-521-36483-3.
- HELLIWELL, R. A. (1965). *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*. Stanford University Press, Stanford, California.
- HOLZWORTH, R. (2023). WWLLN. <https://wwlln.net/>. 29/03/2023.
- INAN, U. S., PIDDYACHY, D., PETER, W. B., SAUVAUD, J. A. a PARROT, M. (2007). DEMETER satellite observations of lightning-induced electron precipitation. *Geophysical Research Letters*, **34**, L07103.
- LAUBEN, D. S., INAN, U. S. a BELL, T. F. (2001). Precipitation of radiation belt electrons induced by obliquely propagating lightning-generated whistlers. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **106**, 29745–29770.
- NĚMEC, F., SANTOLÍK, O., PARROT, M., PARROT, M. a RODGER, C. J. (2010). Relationship between median intensities of electromagnetic emissions in the VLF range and lightning activity. *Journal of Geophysical Research*, **115**, A08315.
- RYCROFT, M. J. (2011). Interactions between whistler-mode signals and magnetospheric energetic electrons: An overview of some experimental observations and theoretical interpretations. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, **40**, 241–252.
- SAUVAUD, J., MOREAU, T., MAGGIOLO, R., TREILHOU, J.-P., JACQUEY, C., CROS, A., COUTELIER, J., ROUZAUD, J., PENOU, E. a GANGLOFF, M. (2006). High-energy electron detection onboard DEMETER: The IDP spectrometer, description and first results on the inner belt. *Planetary and Space Science*, **54**, 502–511.
- SPASOJEVIC, M., SHPRITS, Y. Y. a ORLOVA, K. (2015). Global empirical models of plasmaspheric hiss using Van Allen Probes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **120**, 10370–10383.
- VOSS, H. D., WALT, M., IMHOF, W. L., MOBILIA, J. a INAN, U. S. (1998). Satellite observations of lightning-induced electron precipitation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **103**, 11725–11744.
- ZÁHLAVA, J., NĚMEC, F., SANTOLÍK, O., KOLMAŠOVÁ, I., HOSPODARSKY, G. B., PARROT, M., KURTH, W. S., BORTNIK, J. a KLETZING, C. (2018). Longitudinal dependence of whistler mode electromagnetic waves in the Earth’s inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **123**, 6562–6575.

ZÁHLAVA, J., NĚMEC, F., SANTOLÍK, O., KOLMAŠOVÁ, I., HOSPODARSKY, G. B., PARROT, M., KURTH, W. S. a KLETZING, C. (2019). Lightning contribution to overall whistler mode wave intensities in the plasmasphere. *Geophysical Research Letters*, **46**, 8607–8616.