



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Adrián Mokrý

Vliv geomagnetické aktivity na polohu magnetopauzy

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: Prof. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2022

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce prof. Zdeňku Němečkovi za podnětné odborné konzultace k probíranému tématu, za doporučení a zapůjčení vhodné literatury, za trpělivost, když jsem tuto práci psal, a především za rady pro její psaní, bez kterých by tato práce nevznikla. Dále děkuji prof. Janě Šafránkové za pomoc a rady při organizačních záležitostech a RNDr. Jirímu Šimůnkovi, Ph. D. za poskytnutí dat o souboru průchodů přes magnetopauzu identifikovaných v datech z družic THEMIS, jejichž analýza je náplní této práce. Také musím poděkovat Ježíši Kristu, bez jehož podpory jsem neměl šanci vydržet nároky (nejen) studia a studium dokončit.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval 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 má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V dne.....

podpis

Název práce: Vliv geomagnetické aktivity na polohu magnetopauzy

Autor: Adrián Mokrý

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: Prof. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc., Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Abstrakt:

Magnetopauza odděluje oblast, ve které jsou veškeré jevy ovlivňovány magnetickým polem Země, od meziplanetárního prostoru, který je vyplněn slunečním větrem. Schopnost předpovědět její polohu je měřítkem našeho porozumění procesům, které v tomto prostoru probíhají. Tato práce je zaměřená na analýzu databáze zhruba 30 000 průchodů magnetopauzou od subsolární oblasti až po ohon magnetosféry, s cílem objasnit/ověřit vliv elektrických proudů v magnetosféře reprezentovaných geomagnetickými indexy. Byla zjištěna lineárně klesající závislost polohy magnetopauzy na AE indexu. Dále byla provedena korelační analýza vlivu Dst indexu a v subsolární oblasti byl zjištěn vliv Dst indexu na polohu magnetopauzy se zpožděním kolem 5 hodin, zatímco na noční straně jsou výsledky rozporuplné a pro jejich objasnění bude třeba shromáždit větší množství pozorování.

Klíčová slova: sluneční vítr, magnetosféra, magnetopauza, kruhový proud, aurorální proudy, geomagnetické indexy

Title: Relations between geomagnetic activity and magnetopause locations

Author: Adrián Mokrý

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: Prof. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc., Department of Surface and Plasma Science

Abstract: The magnetopause separates the area in which all phenomena are influenced by the Earth's magnetic field from the interplanetary space filled with the solar wind. Our ability to predict its location is a measure of our understanding of the processes that take place in this space. The present thesis is focused on the analysis of a database of roughly 30,000 magnetopause passes observed from the subsolar region to the tail of the magnetosphere with the aim of clarifying/verifying the influence of magnetospheric electric currents represented by geomagnetic indices. A linearly decreasing dependence of the magnetopause position on the AE index was found from the subsolar point down the tail. Furthermore, a correlation analysis of the influence of the Dst index was performed and we have found the delay of about 5 hours between the Dst peak and magnetopause displacement in the subsolar region, while the results are contradictory on the night side and more observations would be collected to clarify them.

Keywords: solar wind, magnetosphere, magnetopause, ring current, field-aligned currents, geomagnetic indices

Obsah

Úvod.....	1
1 Sluneční vítr a jeho interakce s magnetickým polem Země.....	3
1.1 Vznik a šíření slunečního větru.....	3
1.2 Magnetosféra a její hranice.....	6
1.3 Souřadné soustavy.....	7
1.4 Geomagnetické pole.....	7
1.5 Geomagnetická aktivita a magnetosférické proudy.....	9
1.6 Modely magnetopauzy.....	11
1.6.1 Příklady empirických modelů magnetopauzy.....	12
1.6.2 Porovnání modelů.....	13
2 Cíle práce.....	14
3 Vstupní data.....	15
3.1 Pozorování magnetopauzy.....	15
3.2 Zpracování dat.....	16
4 Výsledky analýzy.....	18
4.1 Závislost na AE indexu.....	18
4.2 Závislost na Dst indexu.....	22
4.2.1 Oblast 1 (subsolární).....	23
4.2.2 Oblast 2 (po stranách vepředu).....	25
4.2.3 Oblast 3 (po stranách vzadu).....	28
5 Diskuze získaných výsledků a závěr.....	30
5.1 Závislost na AE indexu.....	30
5.2 Vliv Dst indexu.....	32
Seznam použité literatury.....	37

Úvod

Země je vystavena neustálému toku nabitých částic slunečního původu, který se nazývá sluneční vítr. Ten interaguje s magnetickým polem Země, které v něm vytváří dutinu – magnetosféru. Intenzita slunečního větru je velmi proměnlivá a závisí na okamžité sluneční aktivitě. Pokud například dojde na Slunci k erupci, prudce vzroste rychlost a koncentrace slunečního větru, tím se zvýší tlak, kterým vítr působí na magnetosféru a dojde k její kompresi. Kompresi magnetosféry vede ke změnám magnetického pole v ní, které se projeví i na Zemském povrchu a tam mají za následek vytvoření indukovaných proudů. Ty mohou případně poškodit rozvodné sítě a další elektrická zařízení.

Magnetosféru odděluje od slunečního větru výrazná hranice nazývaná magnetopauza. Její poloha souvisí jak s parametry slunečního větru, tak i s vnitřním stavem magnetosféry. Zatímco závislost polohy magnetopauzy na parametrech slunečního větru je již dobře popsána současnými empirickými modely, je vliv stavu magnetosféry prozatím předmětem diskuzí. Předložená práce je zaměřena na objasnění tohoto vlivu na základě souboru průchodů přes magnetopauzu, identifikovaných v datech družic Themis.

V 1. kapitole je přehled současných znalostí o slunečním větru a jeho vlastnostech relevantních pro jeho interakci s magnetosférou. Jsou zde charakterizována rozhraní mezi magnetosférou a slunečním větrem, která jsou výsledkem této interakce, resp. jí zprostředkovávají. Jsou uvedeny definice souřadných systémů, které budeme dále používat. Dále jsou popsány systém elektrických proudů a jejich vliv na magnetické pole v magnetosféře, procesy zodpovědné za geomagnetickou aktivitu a jejich charakteristický průběh. Jsou zde rozebrány principy tvorby empirických modelů magnetopauzy a diskutovány rozdíly mezi již vytvořenými modely. Ve 2. kapitole jsou na základě již známého z předchozí kapitoly více rozvedeny hlavní cíle práce. V kapitole 3 – Vstupní data – jsou stručně představeny družice THEMIS a jejich oběžné dráhy. Je zde popsán použitý datový soubor, základní zpracování dat před dalšími analýzami a znázorněno rozdělení těchto dat do oblastí. V kapitole 4 – Výsledky analýzy – je prezentován zjištěný vliv AE indexu a dále postup a výsledky

korelační analýzy vlivu Dst indexu. V poslední kapitole jsou shrnuty výsledky našeho současného výzkumu a nastíněny další možné směry.

1 Sluneční vítr a jeho interakce s magnetickým polem Země

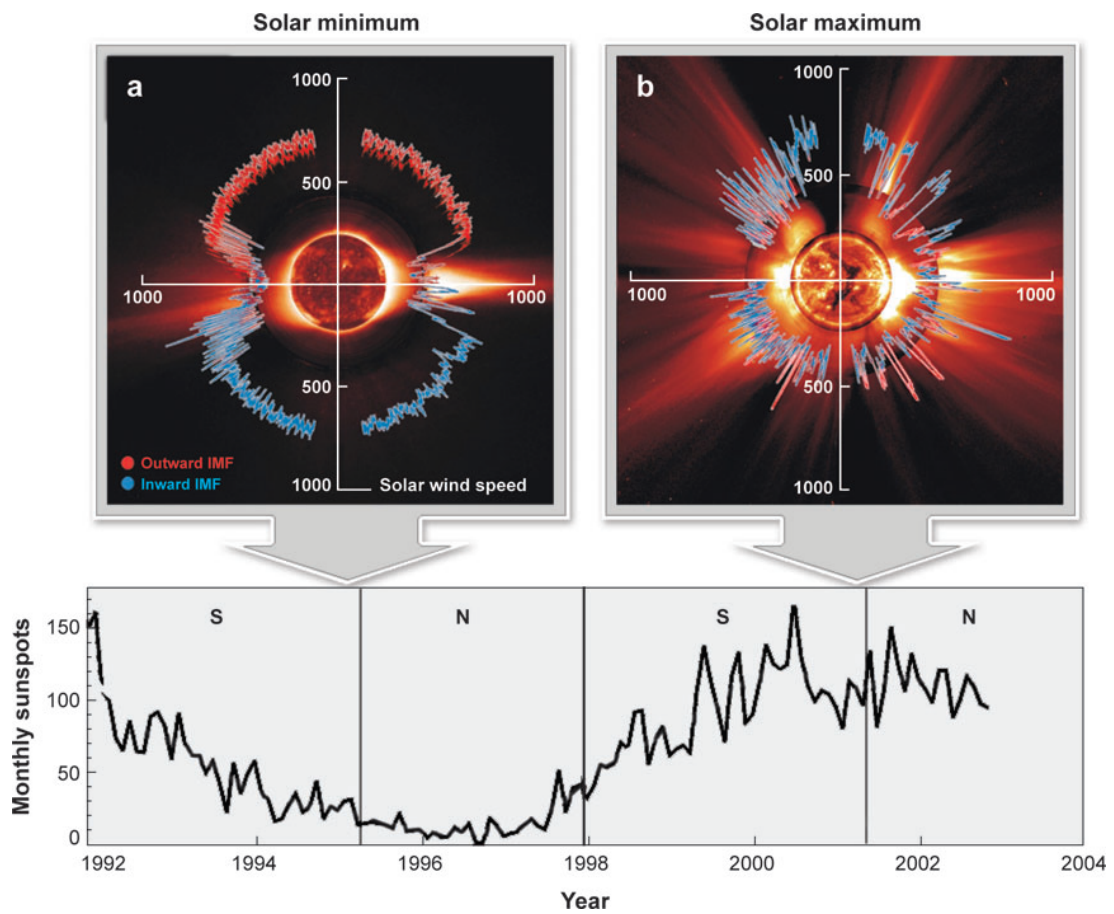
1.1 Vznik a šíření slunečního větru

Meziplanetární prostor je vyplněn řídkým plně ionizovaným plazmatem, které neustále proudí nadzvukovou rychlostí směrem od Slunce. Toto proudění se nazývá sluneční vítr. Vzniká expanzí vnějších vrstev sluneční koróny, podle Parker (1958) vychází tato expanze jako nezbytná pro mechanickou stabilitu koróny ohříváné na teploty, které v ní pozorujeme. Kopíruje složení plazmatu v místě svého vzniku, hlavní složkou je tedy vodík (protony) a další významnou složkou helium s podílem 0,5 až 12% (Němeček a kol., 2020a).

Sluneční vítr se obvykle dělí na dva základní typy, a to pomalý a rychlý sluneční vítr. V literatuře není shoda, jestli jsou ostře rozlišeny, nebo pouze představují dva extrémní kontinua možných vlastností slunečního větru; závěr závisí na zkoumaných vlastnostech, které jsou použity jako kritérium. Za místo vzniku rychlého slunečního větru jsou považovány koronální díry a za místo vzniku pomalého struktury s anglickým názvem streamers (populární překlad koronální paprsky). Ve slunečním minimu převažuje pomalý poblíž ekliptiky a rychlý mimo ekliptiku, zatímco v maximu jsou oba typy rozloženy ve všech šířkách (viz obrázek 1.1). Při pohledu napříč heliosférou je zřejmá existence těchto dvou typů lišících se rychlostí, zatímco ve statistikách rychlosti slunečního větru měřené poblíž ekliptiky toto rozlišení není vidět. (Turčičová, 2018)

Různé parametry slunečního větru se nemění nezávisle a statistické vlastnosti těchto parametrů se mění kromě jiného v závislosti na slunečním cyklu. Hustota a rychlost slunečního větru antikorelují, rychlejší sluneční vítr má obvykle nižší hustotu. Rychlost se pohybuje zhruba v rozmezí 270 až 750 km/s a hustota od 1 do 15 cm⁻³. Dynamický tlak a rychlost vykazují korelaci typicky kolem 0,6. (Němeček a kol., 2020a) Zastoupení helia v minimu roste s rychlostí slunečního větru, zatímco v maximu tato závislost mizí. (Kasper a kol., 2008) Korelace různých parametrů se také výrazně liší pro pomalý a rychlý sluneční vítr. (Turčičová, 2018) Pomalý

sluneční vítr je celkově proměnlivější (Zurbuchen, 2007) a hodnoty korelačních koeficientů mezi jednotlivými parametry (s výjimkou výše zmíněného zastoupení helia a rychlosti) jsou nižší. (Turčičová, 2018)



Obrázek 1.1: Rozložení rychlého a pomalého slunečního větru v heliografických šířkách ve slunečním minimu (a) a maximu (b) z měření sondy Ulysses. (Zurbuchen, 2007)

Díky své vysoké vodivosti unáší sluneční vítr „zamrzlé“ magnetické pole Slunce, pro které se ve větších vzdálenostech používá název meziplanetární magnetické pole (IMF). Na základě jeho unášení a samotného pohybu plazmatu se pomocí měření sondy umístěné blíže ke Slunci (typicky v libračním bodě L1, kam ji lze umístit stabilně) předpovídají parametry slunečního větru těsně před místem, kde chceme studovat jeho interakci s magnetosférou, tedy v místě, kde se zrovna žádná sonda vyskytovat nemusí. Obvyklá topologie IMF je taková, že unášený magnetický indukční tok je spojen (zhruba) s původní zdrojovou oblastí příslušného objemového elementu slunečního větru, čím vytváří tvar tzv. Parkerových spirál (Parker, 1958, Zurbuchen, 2007).

Spolu se slunečním větrem se občas pohybují i další struktury. Jednou z nich jsou výrony koronální hmoty (CME), které se vytvářejí na Slunci; ve větších vzdálenostech se pro ně používá název meziplanetární výron koronální hmoty (ICME). Další struktury se vytvářejí během šíření slunečního větru (níže). CME se pohybují rychlostmi od méně než 250 do 3000 km/s a nesou magnetické pole, obvykle silnější než okolní IMF. Během šíření od Slunce se rozpínají a při dosažení dráhy Země mohou mít rozměry až 1/4 au. Pokud se pohybují podstatně rychleji než okolní sluneční vítr, vytváří se před nimi (tzv. meziplanetární) rázová vlna. Ta se při měření sondou umístěnou ve slunečním větru projeví náhlým zvýšením hustoty a rychlosti plazmatu a velikosti IMF a do bodu L1 dorazí o 15 až 60 minut dříve než k Zemi, kde obvykle vyvolá geomagnetickou bouři (viz níže). (swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections)

Díky rotaci Slunce se zdrojové oblasti rychlého a pomalého slunečního větru přesouvají, takže do prostorového úhlu, kam byl emitován pomalý vítr, může být emitován vítr rychlý. Rychlý dohání ten pomalý a vytváří se tam oblast stlačeného slunečního větru zvaná CIR (corotating interaction region). Po nějaké době (hodiny až dny) se do stejného místa přesune zdrojová oblast pomalého větru, kterému se ten rychlý vzdaluje. Tím se mezi nimi vytváří oblast zředěného slunečního větru zvaná CRR (corotating rarefaction region). Pomalý a rychlý sluneční vítr nesou každý své magnetické pole, které je stlačeno, resp. zředěno (zeslabeno) spolu s plazmatem, protože jeho pohyb napříč magnetickým polem je díky jeho vysoké vodivosti omezen unášeným magnetickým indukčním tokem; a výše zmíněná topologie magnetického pole nedovoluje jejich mísení. Každý interagující tok si zachovává své složení a další vlastnosti, zatímco velikost rychlosti se napříč těmito interakčními oblastmi mění spojitě. Rozhraní je díky rotaci Slunce skloněné, což na něm vede ke skokové změně směru rychlosti (stříhu větru); konkrétně v případě CIR je dohánějící rychlý sluneční vítr odkláněn podél skloněného rozhraní.

1.2 Magnetosféra a její hranice

Země má převažující vliv na strukturu magnetického pole ve svém okolí, tato oblast se nazývá magnetosféra. Ta tvoří dutinu s výrazně nižší koncentrací plazmatu a sluneční vítr ji obtéká, protože je tvořen nabitými částicemi, které se mohou jen

velmi omezeně pohybovat napříč magnetickým polem. Magnetosféra má výrazně protáhlý tvar směrem od Slunce, což je způsobeno hybností předanou slunečním větrem, a její osa je orientována do směru slunečního větru. Ten se ve skutečnosti o několik stupňů odchyluje od směru od Slunce, protože orbitální pohyb Země způsobuje jeho aberaci.

Mezi magnetosférou a slunečním větrem se nachází dvě rozhraní. Vnější rozhraní je rázová vlna, vytvářená díky nadzvukové rychlosti slunečního větru. Současně s poklesem rychlosti (pod rychlost magnetozvukových vln, která určuje, kdy chování plazmatu odpovídá nadzvukové rychlosti) dochází i k růstu teploty a koncentrace plazmatu a velikosti magnetického pole. Výrazným bližším rozhraní je proudová vrstva zvaná magnetopauza, na které dochází ke skokové změně parametrů plazmatu (hustota, magnetická indukce, rychlost). Magnetopauza kontroluje a omezuje výměnu plazmatu mezi slunečním větrem a magnetosférou. Mezi těmito rozhraními se nachází přechodová oblast (magnetosheath), kde je plazma slunečního větru zbrzděno a stlačeno a vykazuje velké fluktuace všech parametrů. Střední magnetické pole je v této oblasti silnější než před rázovou vlnou (Jelínek a kol., 2012).

Protože celý systém sluneční vítr - rázová vlna - magnetopauza musí být z dlouhodobého hlediska v tlakové rovnováze, pohybují se zmíněné hranice v závislosti na změnách tlaku, kterým sluneční vítr na systém působí. Hlavní podíl na změnách dynamického i magnetického tlaku slunečního větru mají výše zmíněné struktury ve slunečním větru a lze čekat vysokou korelaci těchto složek tlaku slunečního větru. Dva předchozí cykly (23. a 24.) se liší v typických rychlostech a méně v typických hustotách slunečního větru, v obou veličinách stejným směrem (Turčičová, 2018); takže existují i dlouhodobé systematické změny dynamického tlaku.

1.3 Souřadné soustavy

Ve fyzice magnetosféry se používá řada souřadných systémů. V práci jsou použity dva – GSE a GSM.

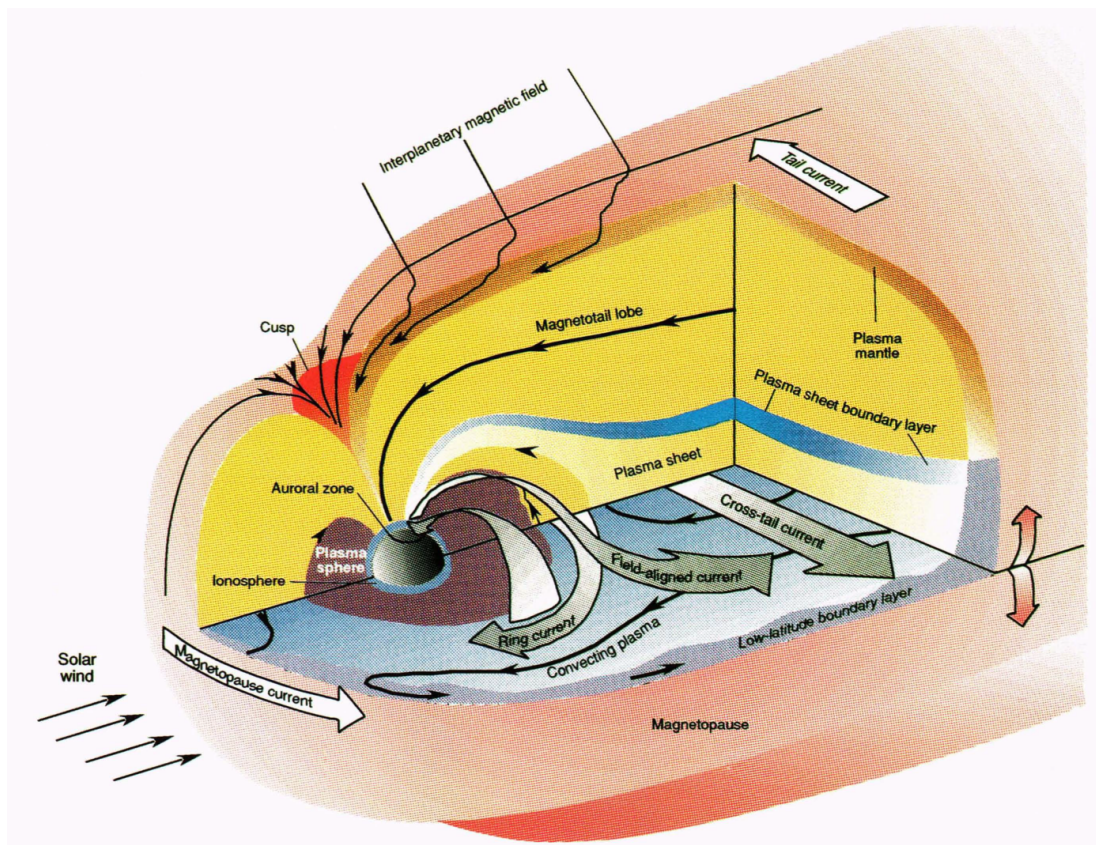
Systém GSE (Geocentric Solar Ecliptic) má počátek ve středu Země, osa X směřuje v každém okamžiku ke Slunci, osa Y leží v rovině ekliptiky a směřuje proti směru pohybu Země a osa Z doplňuje ortogonální systém a směřuje do poloprostoru, ve kterém se nachází severní pól. Tento systém je vhodný pro popis dějů, které souvisí s oběhem Země okolo Slunce.

Systém GSM (Geocentric Solar Magnetic) je podobný systému GSE, ale reflektuje do jisté míry pohyb geomagnetického dipólu. Osa X opět směřuje ze středu Země ke Slunci, osa Z kopíruje směr projekce dipólu do roviny kolmé na osu X a osa Y doplňuje ortogonální systém. Tato soustava je vhodná pro popis interakce slunečního větru s magnetosférou.

Jako modifikace předchozích se také používají aberované souřadnice, pomocí kterých se standardně započítává vliv aberace slunečního větru na orientaci magnetosféry. Osa X je oproti neaberované soustavě otočená do směru slunečního větru, jak ho vidí pohybuje se Země, při tom se počítá jen s orbitálním pohybem Země a aktuální složkou v_x rychlosti slunečního větru. Z předchozích je pro tuto transformaci vhodnější systém GSM, kde má orbitální pohyb stále stejný směr.

1.4 Geomagnetické pole

Geomagnetické pole je spoluvytvářeno procesy probíhajícími uvnitř Země, které generují jeho dipólovou složku (příp. vyšší momenty), a proudy tekoucími v magnetosféře, které jsou schematicky naznačeny na obrázku 1.2. Zdrojem těchto proudů je potenciálový spád (cross-tail potential), vytvářený pohybem slunečního větru kolem magnetosféry a jím unášeným magnetickým polem. Tento potenciálový spád vytváří v ekvatoriální rovině příčný proud (cross-tail current). Tento proud se na noční straně uzavírá na magnetopauze (tail current). V závislosti na okamžité hodnotě vodivosti ionosféry se část příčného proudu odděluje a protéká podél magnetických siločar do ionosféry. Tato proudová větev se nazývá podélný aurorální proud (field-aligned currents). Všechny proudy se nakonec uzavírají přes magnetopauzu (magnetopause current or Chapman-Ferraro current). Proud tekoucí na magnetopauze je tvořen gyračním pohybem částic v nehomogenním magnetickém poli spolu s poklesem hustoty plazmatu přes rozhraní. Tento proud kompenzuje



Obrázek 1.2: Schéma systému elektrických proudů v magnetosféře. (Lopez, 1990) Překlad anglických popisů i popis vzájemného vztahu jednotlivých dílčích proudů je možno nalézt v textu výše.

zemské magnetické pole vně magnetopauzy a naopak IMF v magnetosféře, a modifikuje magnetické pole v magnetosféře způsobem, který závisí pouze na geometrii magnetopauzy. Důležitou složkou magnetosférických proudových systémů je i kruhový proud generovaný pohybem energetických částic v radičních pásích díky nehomogennímu magnetickému poli. (Daglis a kol., 1999)

1.5 Geomagnetická aktivita a magnetosférické proudy

Geomagnetická aktivita (změna magnetického pole Země oproti klidovému stavu) je projevem variací elektrických proudů v magnetosféře. Je vyjádřena geomagnetickými indexy, které jsou v pravidelných intervalech (typicky 1 hodina nebo 1 minuta) určovány z měření pozemní sítě geomagnetických observatoří a vyjadřují různé typy odchylek magnetického pole od klidového stavu. V práci jsou použity AE a Dst index. AE index vyjadřuje odchylku magnetického pole měřeného v daném okamžiku v polární oblasti od dlouhodobého průměru a je tedy převážně mírou intenzity aurorálních proudů, jeho velikost se pohybuje od jednotek do 1200

nT. Podélné proudy se mohou měnit relativně rychle, proto jsou běžně užívány minutové střední hodnoty. Dst index je získáván obdobným způsobem z měření v nízkých geomagnetických šířkách, jeho hodnoty jsou obvykle mezi +20 a -500 nT a je udáván jako hodinové průměry. Obvykle se předpokládá, že je mírou intenzity prstencového proudu. Proudů na magnetopauze se také promítají do Dst indexu ale z pozemních měření je nelze rozlišit. Dále existuje index SYM-H, který má na rozdíl od Dst indexu minutové rozlišení a jinak vyjadřuje totéž.

Zvýšená geomagnetická aktivita má charakteristický průběh geomagnetických bouří a subbouří. Při geomagnetické bouři především zesílí prstencový proud, který zeslabí magnetické pole na rovníku, což se projeví velkými zápornými hodnotami Dst indexu; zároveň zesílí magnetické pole ve větších vzdálenostech od Země. Při subbouři tečou v polárních oblastech proudy podél magnetických siločar (field-aligned currents), propojené elektrickými proudy v ionosféře (auroral electrojet). Zvýšení proudu v tomto systému se projeví velkými kladnými hodnotami AE indexu.

V průběhu subbouře obvykle rozlišujeme 3 fáze (a stejné názvy platí i pro bouři): počáteční, hlavní a doznívání (recovery) (Pudovkin, 1991). Hlavní fáze subbouří trvá 1 – 3 hodiny a za typický den jich může proběhnout i několik. (Akasofu, 1991) Hlavní fáze bouří trvá typicky 2 – 8 hodin a jejich doznívání od 8 hodin do 7 dní.

K subbouřím dochází v průběhu bouří i mimo ně, v průběhu bouří jsou častější a intenzivnější a během jedné bouře obvykle dojde k několika subbouřím. (Stern, 1991) Hodnoty AE indexu vykazují vysokou korelaci s tokem energie do oblastí prstencového proudu; v souladu s tím jsou nízké v době doznívání bouří. (Feldstein, 1991)

Vhodné podmínky pro vznik subbouře nastávají při záporné složce IMF BZ, kdy je magnetopauza díky efektu rekonexe (Dungey, 1961) propustnější pro plazma slunečního větru. Jeho průnik do magnetosféry je dále úměrný jeho hustotě a rychlosti. Plazma se pak akumuluje v magnetosféře a zvyšuje její vodivost, což spolu s výše zmíněným potenciálovým spádem (cross tail potential), který je při záporné složce IMF BZ obvykle silnější, vede k zesílení proudů v magnetosféře. Když je plazmatu příliš mnoho a proudy jsou příliš silné, rozvine se nějaká nestabilita plazmatu (je více možností, která by to mohla být) a magnetické pole změní

konfiguraci. Obvykle se uvádí, že změnou orientace složky IMF BZ na jižní začne počáteční fáze subbouře a zmíněná nestabilita vede k hlavní fázi.

Pro vznik bouře je třeba delší interval výrazně jižního IMF, a obvykle k ní dochází po interakci magnetosféry se strukturami ve slunečním větru jako jsou CIR nebo CME. Bouři často předchází příchod meziplanetární rázové vlny, při kterém se magnetopauza skokově posune směrem k Zemi, což se projeví okamžitým skokem Dst indexu do kladných hodnot, resp. prudkým nárůstem indexu SYM-H během jednotek minut. Tento průběh Dst indexu (resp. SYM-H) se nazývá storm sudden commencement (SSC) a po něm se obvykle po několika hodinách rozvine geomagnetická bouře. (Kivelson a Russel, 1996)

Elektrické proudy mění rozložení magnetického pole a jejich změny souvisí s transportem plazmatu, měly by tedy ovlivňovat polohu magnetopauzy. Vliv prstencového proudu byl zkoumán s nejasnými výsledky. Silnější prstencový proud způsobuje větší vzdálenost magnetopauzy, průměrná odchylka od modelu je v závislosti na Dst indexu až $0,8 R_E$ (poloměru Země, $1 R_E \approx 6\,400$ km) a závislost vykazuje nasycení při větších záporných hodnotách Dst indexu. Aurorální proudy mají opačný vliv, což komplikuje zkoumání vlivu geomagnetické aktivity (Machková a kol., 2019), a zřejmě proto ještě nebyl vytvořen empirický model magnetopauzy závislý také na geomagnetických indexech.

1.6 Modely magnetopauzy

Současné chápání formování magnetopauzy je založeno na rovnosti tlaků na obou stranách hranice. Do této bilance tedy vstupuje tlak plazmatu, dominující na vnější straně a tlak magnetického pole, který převažuje uvnitř magnetosféry. Protože tlak v přechodové oblasti je jen zřídka přístupný měření, je v úvahách o tlakové rovnováze nahrazován dynamickým tlakem slunečního větru. Tato zjednodušená představa vychází ze zákona zachování energie, neboť kinetická energie slunečního větru je procesy na rázové vlně a v přechodové oblasti konvertována do tepelné energie plazmatu v přechodové oblasti a energie magnetického pole. To platí poměrně přesně v subsolárním bodě, kde je unášivá rychlost plazmatu přechodové oblasti nulová, ve větších vzdálenostech od osy X je nutno brát v úvahu i nenulovou unášivou rychlost. Statistické studie ukazují, že dalším parametrem ovlivňujícím

polohu magnetopauzy je kromě dynamického tlaku slunečního větru p_{dyn} i velikost a orientace B_z složky meziplanetárního magnetického pole (její hodnota se obvykle bere v soustavě GSM).

Dynamický tlak slunečního větru je definován $p_{dyn} = \rho v^2$. Za ρ a v se obvykle dosazují hustota a rychlost protonů (vodíku) měřená některou ze sond, které se v daném okamžiku ve slunečním větru pohybují, protože měření ostatních druhů iontů jsou málo dostupná a jejich koncentrace je většinou případů zanedbatelná. Tlak

magnetického pole je definován $p_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0}$ a magnetické pole dipólu ubývá se vzdáleností jako $B \propto r^{-3}$. Z rovnováhy tlaků v subsolárním bodě při uvažování pouze dynamického tlaku slunečního větru a aproximaci magnetického pole Země dipólem

vychází mocninná závislost $r_0 \propto p_{dyn}^{-\frac{1}{6}}$. Při tomto odvození byl zanedbán tlak plazmatu uvnitř a tlak magnetického pole ve slunečním větru a nebyl uvažován vliv elektrických proudů uvnitř magnetosféry na magnetické pole na vnitřní straně. Také příspěvek těžších iontů, především helia, k dynamickému tlaku slunečního větru může být za určitých okolností (např. při CME) významný. Přesto je tento vztah široce využíván a je i základem několika modelů magnetopauzy.

Bylo navrženo více modelů pro predikci polohy magnetopauzy, většina z nich je empirických (tj. na základě naměřených dat). Při vývoji modelů je nejprve zvolena plocha závislá na parametrech, potom se na základě okamžiků průchodu magnetopauzou, pozorovaných in situ pomocí družic, určí závislost těchto parametrů na parametrech slunečního větru. Jedná se o statické modely – závisí pouze na okamžitém stavu slunečního větru.

1.6.1 Příklady empirických modelů magnetopauzy

Formisano a kol. (1979) – uvažují pouze vliv dynamického tlaku slunečního větru; je zvolena plocha druhého řádu ve 3D, nafitovaná na vzdálenosti průchodů magnetopauzou normalizované na stejný dynamický tlak.

Petrinec a Russel (1996) – tvar denní a noční strany je určen zvláště, závisí na dynamickém tlaku p_{dyn} a na složce IMF B_z ; tento a následující model jsou 2D, protože uvažují rotačně symetrickou plochu kolem směru ke Slunci.

V modelu Shue a kol. (1997), který budeme dále používat, je zvolena plocha daná vztahem:

$$r = r_0 \left(\frac{2}{1 + \cos \theta} \right)^\alpha \quad (1.1)$$

kde r je vzdálenost od středu Země a θ úhel (mezi) od směru ke Slunci (a...), tedy od osy X souřadnic GSE nebo GSM. Parametr r_0 udává vzdálenost magnetopauzy v subsolárním bodě a α rozevření ohonu magnetosféry, tyto parametry jsou dány vztahy:

$$r_0 = \begin{cases} (11.4 + 0.013 B_z) p_{dyn}^{-\frac{1}{6.6}} & \text{pro } B_z \geq 0 \\ (11.4 + 0.14 B_z) p_{dyn}^{-\frac{1}{6.6}} & \text{pro } B_z < 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

$$\alpha = (0.58 - 0.010 B_z)(1 + 0.010 p_{dyn}) \quad (1.3)$$

kde dynamický tlak p_{dyn} se dosazuje v nPa, B_z v nT a r_0 vychází v R_E .

1.6.2 Porovnání modelů

Přesnost modelů se liší nepatrně a rozdíly mezi predikcemi jsou menší než chyby předpovědi vstupních parametrů (Šafránková a kol., 2002) z měření vzdálené sondy ve slunečním větru a oscilace magnetopauzy kolem rovnovážné polohy, způsobené Rayleigh-Taylorovou nebo Kelvin-Helmholtzovou nestabilitou (Němeček a kol., 2020a) nebo hustotními vlnami vznikajícími v přechodové oblasti. Podle článku Šafránková a kol. (2002) nejlépe vychází model Petrinec a Russell (1996); poblíž roviny ekliptiky (kde máme data) skoro stejně dobře vychází i model Shue a kol. (1997). Model Petrinec a Russell (1996) vykazuje větší systematické chyby kolem $x=0$, kde se mění tvar modelové plochy. Pro započtení vlivu slunečního větru jsme v následující analýze zvolili model Shue a kol. (1997).

Jak jsme uvedli výše, teoreticky z rovnováhy tlaků pro zjednodušený model dipólového pole vychází mocninná závislost $r_0 \propto p_{dyn}^{-\frac{1}{6}}$. Některé modely předpokládají tuto mocninu, v jiných je exponent volným parametrem fitu a vychází různě v rozmezí -1/7.7 až -1/4.8. Menší hodnoty exponentu jsou nejspíše způsobeny orbitálním biasem – jednotlivá sonda se po většinu času nachází poblíž apogea a nikdy dále. Správná hodnota je tedy někde mezi -1/4.8 a -1/5.2 (Němeček a kol., 2020a) a pravděpodobně závisí i na parametrech slunečního větru.

Většina modelů magnetopauzy je vytvořena se započtením aberace pomocí aberovaných souřadnic. Jak vyplývá z porovnání přesnosti týchž modelů použitých v aberovaných i v neaberovaných souřadnicích v práci Šafránková a kol. (2002), použití aberovaných souřadnic vede k jejich mírnému zpřesnění, zatímco zlepšení při použití obdobyých souřadnic se započtením všech složek vektoru rychlosti slunečního větru je slabší. To je nejspíš způsobeno tím, že složky v_y a v_z pochází především z vln v plazmatu a nelze je na základě měření vzdálené sondy spolehlivě předpovídat. Starší, výše zmíněný model Formisano a kol. (1979) používá neaberované souřadnice a funkční tvar modelové plochy, který aberaci implicitně zahrnuje.

2 Cíle práce

Cílem práce je zkoumat vliv elektrických proudů v magnetosféře (reprezentovaných geomagnetickými indexy) na polohu magnetopauzy a objasnit, proč předchozí výzkum vedl k nejednoznačným výsledkům ohledně vlivu prstencového proudu. Do hodnoty Dst indexu se promítá jednak intenzita prstencového proudu, ale také proud na magnetopauze, chceme tedy rozlišit, jestli už zjištěná závislost polohy magnetopauzy na Dst indexu je dána vlivem prstencového proudu a s ním spojeného plazmatu, nebo je projevem samotné odchylky její polohy od modelu. Za tímto účelem zkoumáme, zda je tento vliv okamžitý, nebo opožděný. Změna polohy magnetopauzy při SSC by měla být zahrnutá v modelové závislosti na dynamickém tlaku slunečního větru; pokud to tak není, projeví se to závislostí na Dst indexu na časové škále SSC, tedy okamžitým vlivem. Na druhou stranu v případě vlivu plazmatu lze čekat zpoždění několika hodin.

Přesněji můžeme cíle formulovat takto:

1. Analýza vlivu geomagnetických indexů na polohu magnetopauzy se zohledněním různých oblastí magnetopauzy.
2. Zkoumání časové odezvy v interakci procesů promítajících se do Dst indexu s magnetopauzou.
3. Diskuze vlivu oběžných drah družic na spolehlivost závěrů.

3 Vstupní data

Předložená práce je založena na měření pěti družic projektu THEMIS (Angelopoulos, 2008), které byly v roce 2007 vypuštěny na silně eliptické oběžné dráhy. Hlavním cílem této mise, ze kterého vycházela konfigurace družic, bylo studium subbouří v ohonu. Jejich dráha byla několikrát upravována. Základní mise byla plánována na dva roky, ale v jiné podobě měří dodnes; v roce 2010 byly dvě z nich převedeny na oběžné dráhy kolem Měsíce a tato dvojice dostala jméno ARTEMIS. Data použitá v této práci pochází z období od roku 2007 do roku 2015.

Všechny sondy s výjimkou THEMIS A (TH-A) měly v hlavní fázi mise oběžné doby v násobcích siderického dne a pravidelně docházelo k jejich seřazení, když se všechny současně dostaly do apogea. Díky zákonům nebeské mechaniky během roku zkoumají různé oblasti: v zimě celá konfigurace měří v ohonu, na jaře na večerní straně, v létě na denní straně a na podzim na ranní straně. Optimální pro studium magnetopauzy byla konfigurace užívaná v letech 2007 – 2009. Sondy TH-D a TH-E měly oběžnou dobu 1 den a apogeum kolem $12 R_E$, TH-C 2 dny a $19 R_E$ a TH-B 4 dny a $30 R_E$. Sonda TH-A měnila oběžnou dobu od $3/4$ do $9/8$ dne a apogeum zhruba od 10 do $13 R_E$.

3.1 Pozorování magnetopauzy

Analýza variací polohy magnetopauzy je založena na seznamu asi 30 000 průchodů družic THEMIS přes tuto hranici, který už byl dříve použit např. v Němeček a kol., (2021). Datový soubor obsahuje čas průchodu, GSM souřadnice sondy v okamžiku průchodu přes hranici, velikost a složky vektoru magnetického pole, parametry plazmatu v oblastech přiléhajících k magnetopauze a hodnoty AE indexu. Dále jsou k jednotlivým průchodům přiřazeny rychlost v_{SW} slunečního větru jako vektor v GSE, vektor magnetické indukce v GSM a dynamický tlak slunečního větru p_{dyn} . Parametry slunečního větru a IMF jsou převzaty z databáze OMNI (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>), která obsahuje jejich předpokládané hodnoty na čele rázové vlny, a posunuty o očekávaný čas, za který by sluneční vítr došel do místa pozorovaného průchodu magnetopauzou. K tomuto datovému souboru jsme navíc přiřadili hodnotu Dst indexu ze samostatné databáze (World Data Center for

Geomagnetism, Kyoto, <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>) a tuto časovou řadu a jsme použili ke zkoumání časové odezvy. Průchody ve vzdálenostech $r > 80 R_E$ byly z analýzy vyloučeny. Některé další průchody magnetopauzou jsme zkontrolovali v původních datech z družic THEMIS (<http://themis.ssl.berkeley.edu>) a nalezené chybné detekce byly z analýzy vyloučeny.

3.2 Zpracování dat

Byly určeny aberované souřadnice pozorovaných průchodů magnetopauzou pomocí transformačních vztahů:

$$abx = x \cos \beta + y \sin \beta \quad (2.1)$$

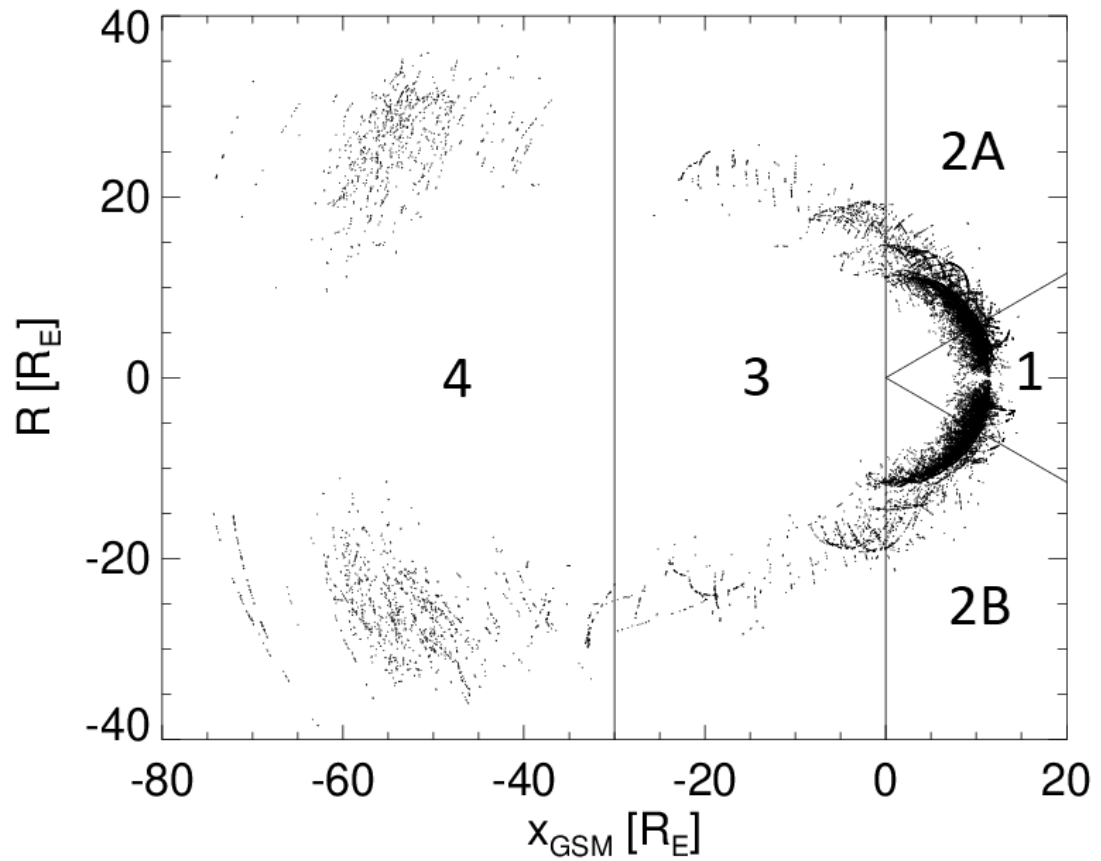
$$aby = -x \sin \beta + y \cos \beta \quad (2.2)$$

kde $\beta = \arctg(29.7/v_x)$ (< 0) a v_x je x-složka rychlosti slunečního větru z OMNI (v km/s); β vždy vychází záporné. Tyto vztahy platí v soustavě GSE, bylo tedy třeba napřed převést souřadnice do GSE a aberované byly převedeny zpět do GSM. Ve všech výsledcích jsou použity aberované souřadnice.

Protože lze čekat, že magnetopauza v různých částech jinak interaguje s geomagnetickou aktivitou, rozdělili jsme pozorované průchody magnetopauzou do 4 oblastí (viz obrázek 3.1):

1. subsolární (do 30° od subsolárního bodu)
2. po stranách vepředu
3. po stranách vzadu
4. kolem Měsíce ($x_{GSM} < -30$)

Oblast č. 2 jsme dále rozdělili podle znaménka y_{GSM} na 2A (dusk, večerní strana) a 2B (dawn, ranní strana). Hranici mezi oblastmi 3 a 4 jsme zvolili v místě, odkud máme relativně málo dat.



Obrázek 3.1: Rozmístění přesečení v prostoru (v aberovaných souřadnicích) a rozdělení zkoumaných oblastí. R je válcová souřadnice, definovaná vztahem $R^2 = y_{GSM}^2 + z_{GSM}^2$. Pro zobrazení oblasti kolem roviny ekliptiky do roviny je této souřadnici (pouze pro tento graf) přiřazeno znaménko podle y_{GSM} .

4 Výsledky analýzy

Předpokládá se, že poloha magnetopauzy je dána především stavem slunečního větru (jeho dynamickým tlakem a složkou IMF B_z) a zkoumaný vliv je mnohem menší. Pro další analýzy je proto pro odstranění tohoto hlavního vlivu použit rozdíl naměřených poloh oproti polohám vypočteným z modelu, který zahrnuje pouze vliv slunečního větru; konkrétně byl zvolen model Shue a kol. (1997). Pro vyjádření tohoto rozdílu používáme veličinu $Rdif$ definovanou jako kolmou vzdálenost naměřené polohy od modelové magnetopauzy, uvnitř modelové magnetopauzy ji bereme zápornou. Výjimkou je oblast 4, kde $Rdif$ definujeme jako vzdálenost kolmou k aberované ose X, tedy $Rdif=R-R_{mod}$, kde R_{mod} je válcová souřadnice R bodu na modelové magnetopauze, který se s naměřenou polohou shoduje v souřadnici x . Pomocí tohoto bodu také v oblasti 4 definujeme modelovou vzdálenost magnetopauzy r_{mod} odpovídající příslušnému průchodu magnetopauzou, kterou dále také použijeme; v ostatních oblastech ji v souladu s definicí $Rdif$ definujeme pomocí bodu na modelové magnetopauze nejbližšího naměřené poloze.

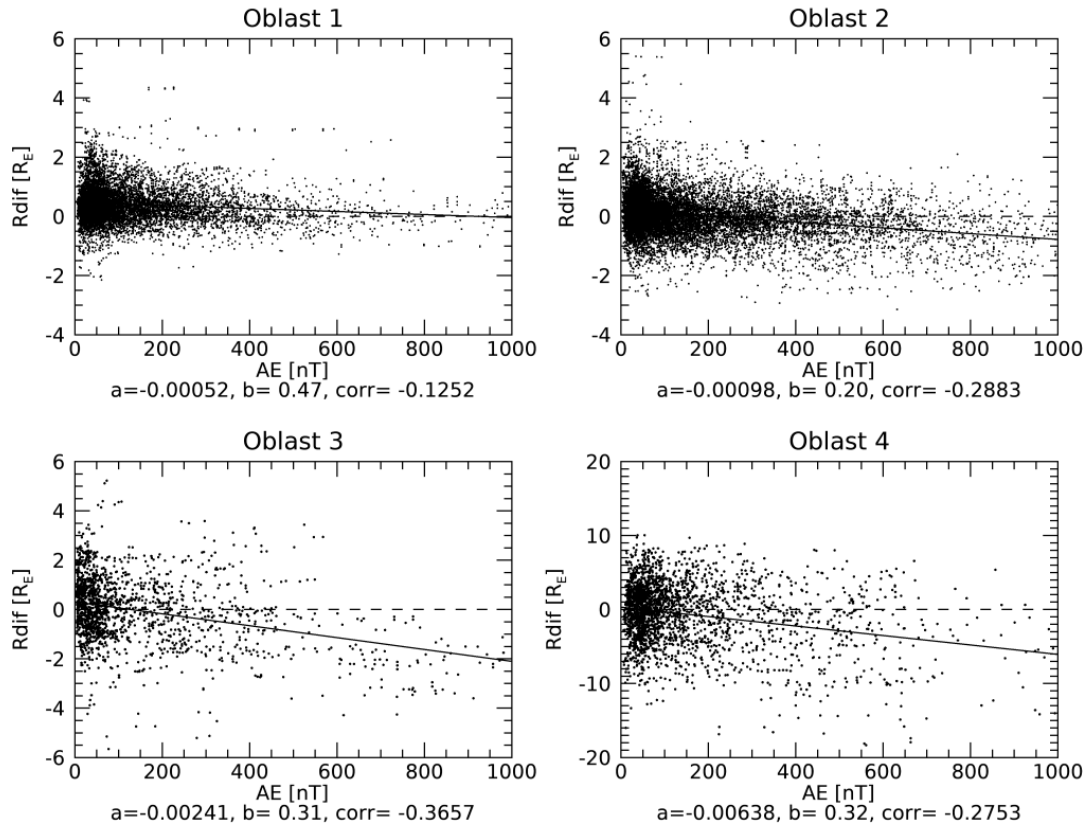
4.1 Závislost na AE indexu

Na obrázku 4.1 je závislost odchylek polohy průchodů magnetopauzou ($Rdif$) od modelu Shue a kol. (1997) na AE indexu, zvláště pro jednotlivé oblasti a spolu s lineární regresí:

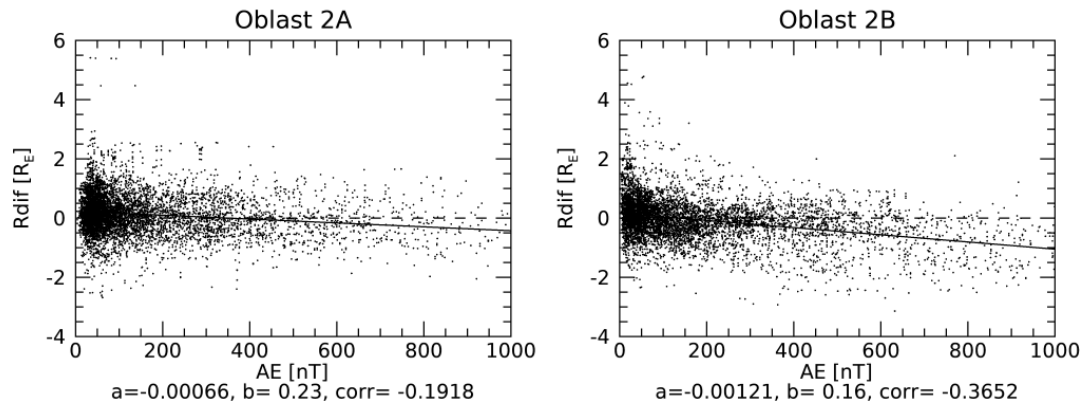
$$Rdif=a AE+b \tag{4.1}$$

Hodnoty koeficientů a a b a lineární korelace AE a $Rdif$ ($corr$) jsou uvedeny pod jednotlivými grafy. V datovém souboru se nachází malý počet průchodů magnetopauzou v době vysokých hodnot AE indexu až do 2000 nT; do výpočtu této i následujících regresí jsou zahrnuty, ale v grafech jsou pro větší názornost pouze hodnoty do 1000 nT. Ve všech oblastech je zřetelný lineární pokles vzdálenosti magnetopauzy s AE indexem. Magnetopauza se při $AE=1000$ oproti klidovému stavu posouvá směrem dovnitř v rozmezí od $0.7 R_E$ v oblasti 1 do $6.4 R_E$ v oblasti 4. Lineární koeficient roste s pořadím oblasti, což odpovídá rostoucí typické vzdálenosti magnetopauzy v těchto oblastech a lze čekat při změně pouze velikosti se

zachováním tvaru magnetopauzy. Rozdělením oblasti 2 na 2A a 2B bylo zjištěno, že se mezi nimi lineární koeficient liší (obrázek 4.2), v oblasti 2A je bližší hodnotě pro oblast 1 a v oblasti 2B je zhruba dvojnásobný, což tuto možnost vyvrací.



Obrázek 4.1: Závislost $Rdif$ na hodnotě AE indexu, databáze průchodů je podle polohy družice rozdělena do výše definovaných oblastí.



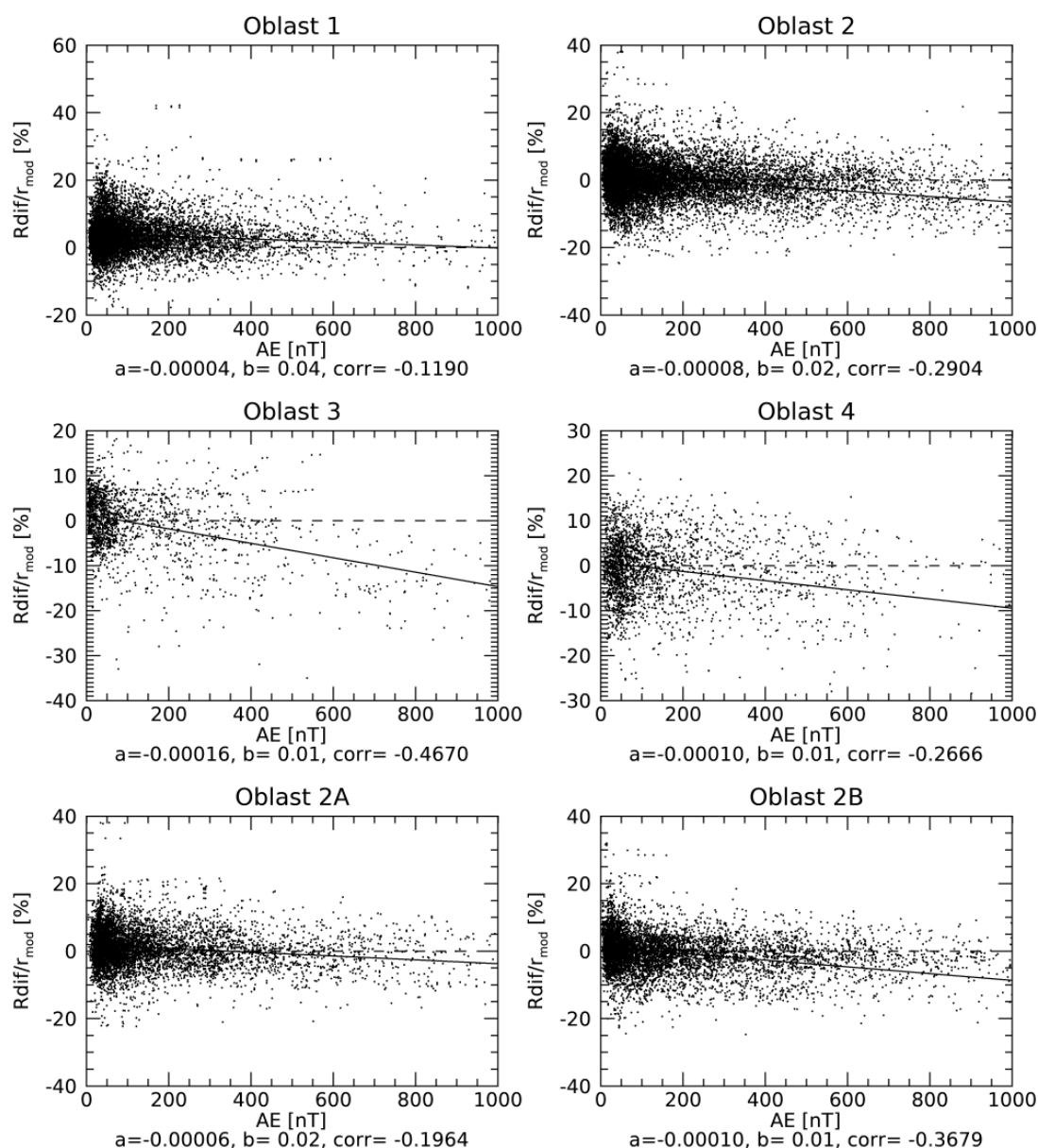
Obrázek 4.2: Totéž jako předchozí pro rozdělení oblasti 2 na 2A a 2B.

Pokud by šlo pouze o změnu velikosti, bude pro návrh opravy modelu vhodnější zkoumání odchylek normovaných modelovou vzdáleností $Rdif/r_{mod}$. Příslušné grafy jsou na obrázku 4.3 spolu s lineární regresí analogickou (4.1):

$$Rdif/r_{mod} = a AE + b \quad (4.2)$$

V oblastech 2 (i po částech 2A a 2B) a 3 vychází vyšší korelace než v případě absolutních odchylek $Rdif$. V případě absolutních odchylek $Rdif$ se lineární koeficient mezi oblastmi liší až o řád, zatímco pro normované odchylky $Rdif/r_{mod}$ jsou si jeho hodnoty navzájem bližší. Má tedy smysl se pokusit o návrh opravy použitého modelu a určit závislost (4.2) pro celý datový soubor. Tato závislost je na obrázku 4.4 a lineární regrese vychází:

$$Rdif/r_{mod} = (-9.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-5} AE + 0.0274 \pm 0.0005 \quad (4.3)$$



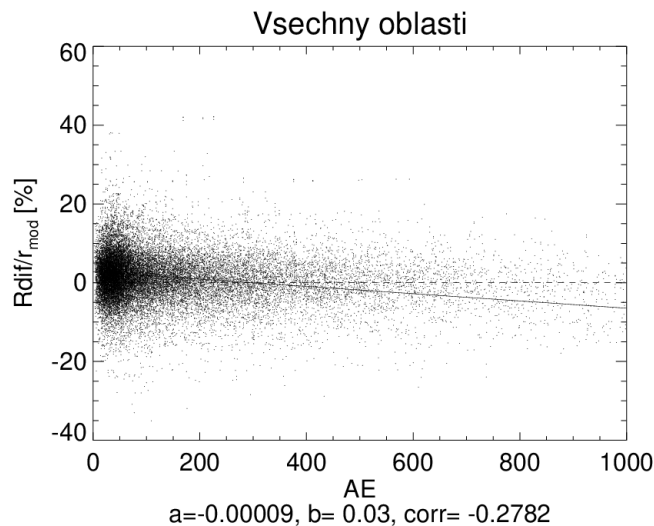
Obrázek 4.3: Závislost normovaných odchylek $Rdif/r_{mod}$ na AE indexu

Pro ověření, jaké zlepšení by přinesl model opravený o zjištěnou závislost (4.3), je na obrázku 4.5 zvlášť pro jednotlivé oblasti závislost absolutních odchylek $Rdif_{opr}$ od

opraveného modelu na AE indexu. Pro zjednodušení výpočtu nepřepočítáváme modelovou vzdálenost, ale pouze od $Rdif$ odečteme hodnotu předpovězenou vztahem (4.3):

$$Rdif_{opr} = Rdif - r(-1.0 \cdot 10^{-4} AE + 0.025) \quad (4.4)$$

Zajímá nás zbytková závislost na AE indexu oproti předpovědi takto opraveného modelu. Aby byla zřetelněji vidět, na obrázku 4.5 vynášíme všechny hodnoty až do $AE=2000$. V oblastech 2, 2B a 4 opravený model nevykazuje žádnou nápadnou systematickou chybu, zatímco v oblastech 1 a 2A přeceňuje vliv AE indexu. V oblasti 3 opravený model tento vliv výrazně podceňuje, tam je tedy silnější než v ostatních oblastech.

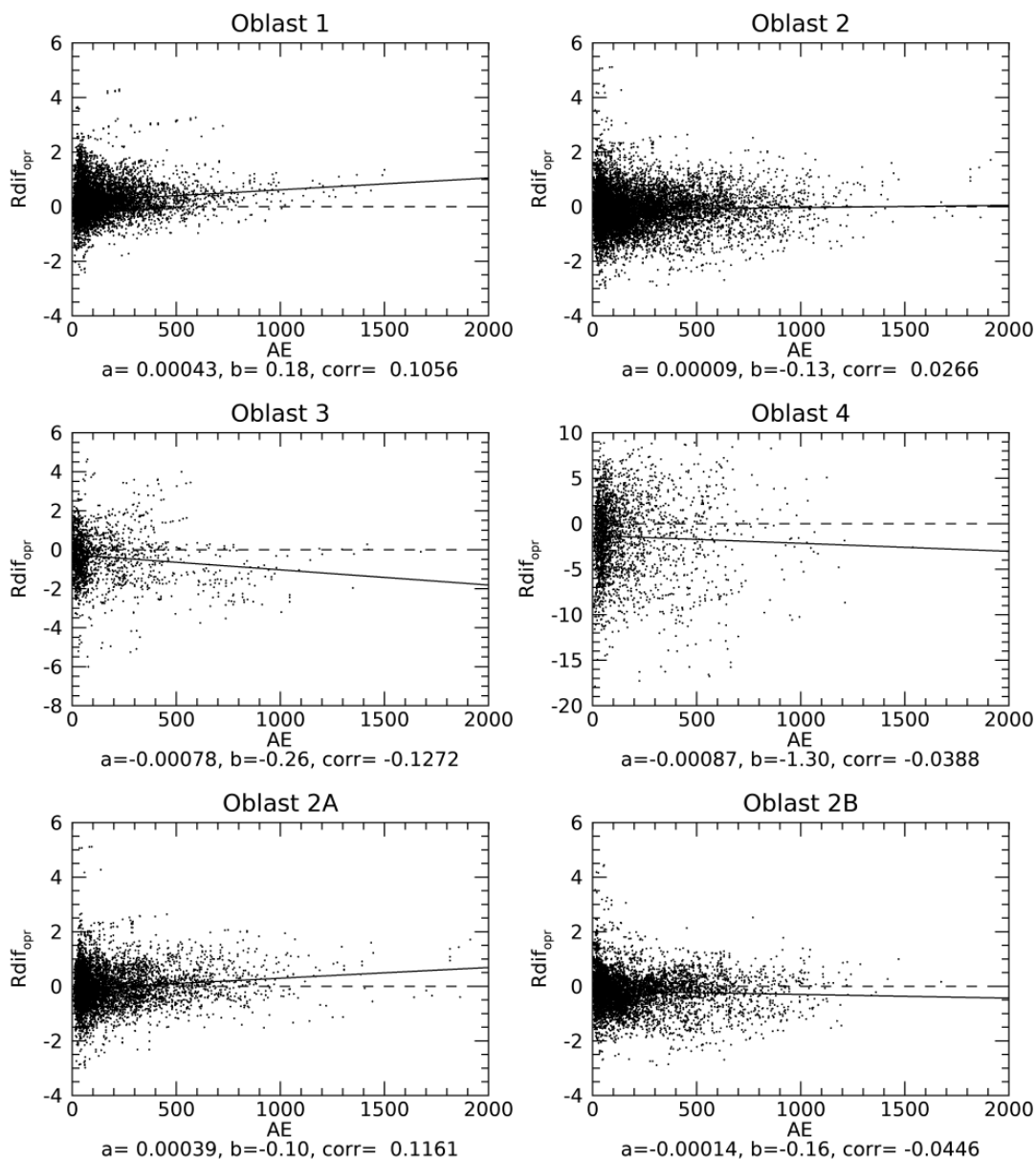


Obrázek 4.4: Totéž jako předchozí, ale bez rozlišení oblastí

4.2 Závislost na Dst indexu

V případě vlivu Dst indexu není tak zřetelný trend a rozptyl $Rdif$ je ve srovnání s ním výrazný. Na obojím může mít významný podíl už zjištěný vliv AE indexu a také se může lišit interakce prstencového proudu s magnetopauzou pro klidné a velmi aktivní podmínky. Z těchto důvodů jsme rozdělili data podle hodnoty AE indexu do třech binů: $AE < 30$ nT, $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT a $AE > 500$ nT.

Pro rozlišení, zda je vliv Dst indexu okamžitý, nebo opožděný, jsme zkoumali závislost korelace Dst a $Rdif$ na zpoždění, a to zvlášť pro jednotlivé oblasti a biny v AE. Za opožděný vliv prstencového proudu na polohu magnetopauzy považují,



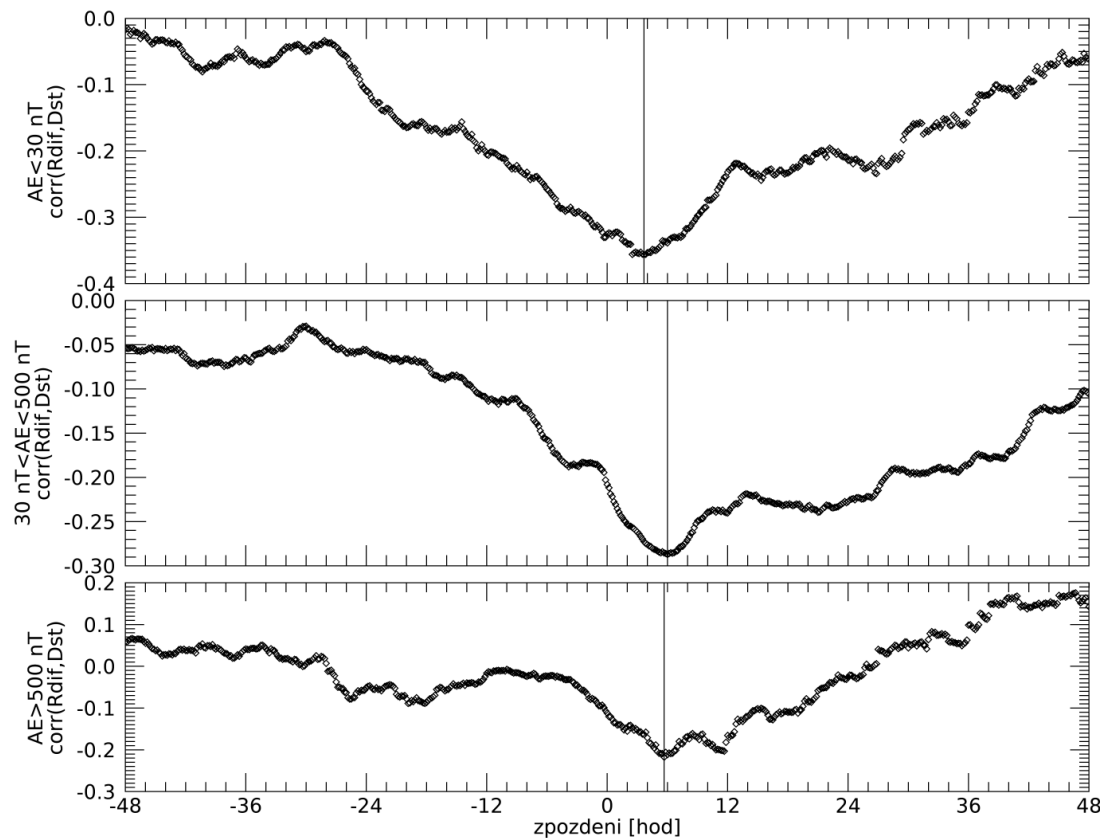
Obrázek 4.5: Systematické chyby modelu opraveného podle vztahu (4.3), resp. (4.4)

pokud je odchylka polohy magnetopauzy $Rdif$ určena dřívější hodnotou Dst indexu; pokud je určena pozdější hodnotou, zpoždění definujeme jako záporné. Očekávaná velikost zpoždění je zhruba do 6 hodin, ale závislost korelace jsme pro zobrazení trendu (zda se pro velká zpoždění korelace blíží k nule) zkoumali v rozsahu ± 48 hodin. Uvažovali jsme zpoždění s krokem 10 minut, přičemž hodnoty Dst a $Rdif$ jsme přiřadili tak, že jsme od času průchodu odečetli příslušné zpoždění a pro každý průchod určili hodinový interval odpovídající jedné hodnotě Dst indexu, do kterého vypočtený čas spadne.

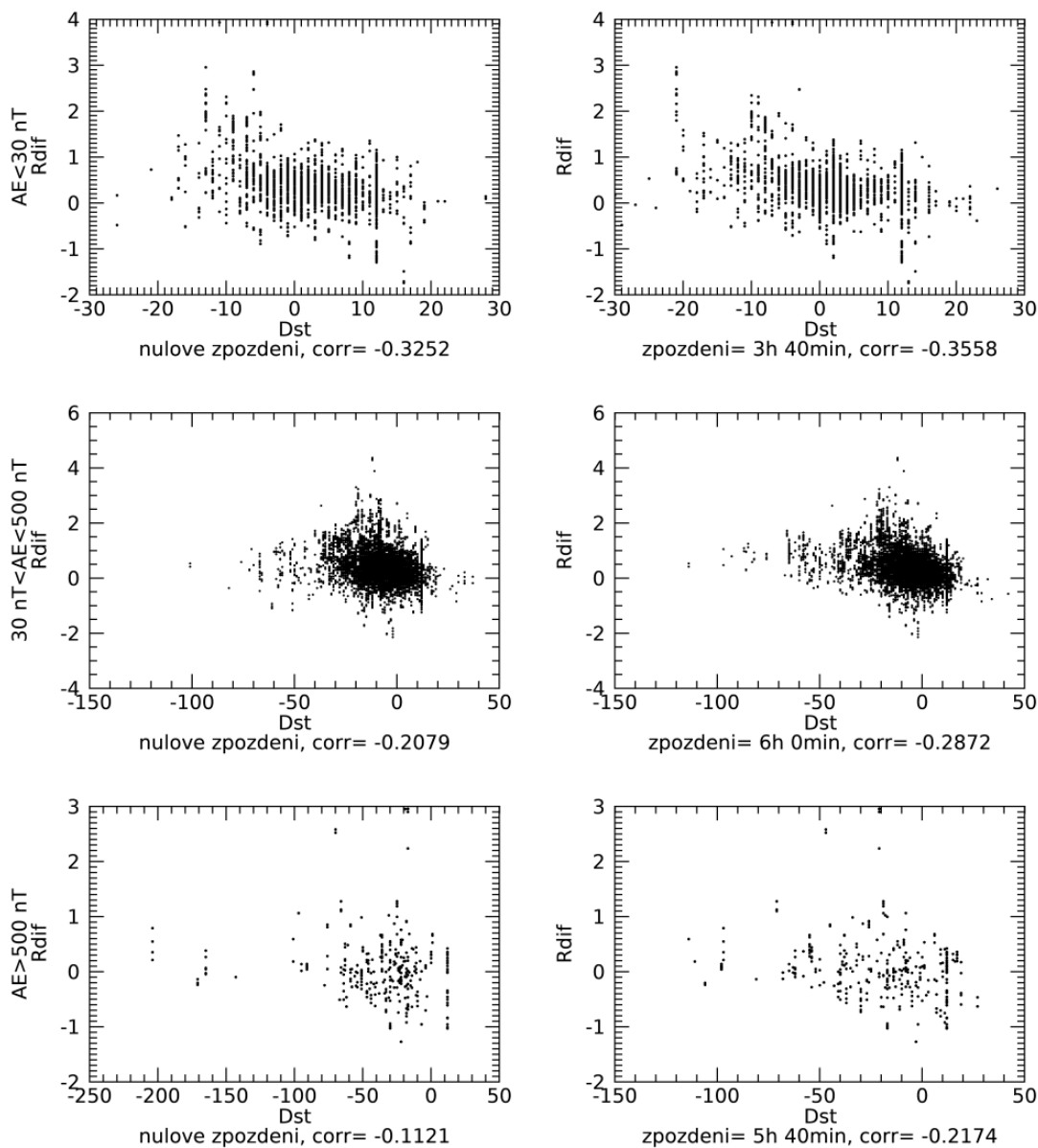
Tuto analýzu pro oblast 4 jsem do práce nezahrnul, protože je velmi citlivá na správné určení aberace a získanou závislost korelace na zpoždění je velmi těžké interpretovat.

4.2.1 Oblast 1 (subsolární)

V subsolární oblasti jsme zjistili vliv Dst indexu se zpožděním kolem 5 hodin a zápornou korelací, viz obrázek 4.6. Na obrázku 4.7 porovnávám pro jednotlivé biny v AE indexu závislost $Rdif$ na Dst při nulovém zpoždění a pro hlavní pík korelace. Tato závislost je nejbližší lineární pro $AE < 30$ nT. Pro $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT závislost vykazuje pro $Dst < -30$ nT nasycení s průměrným $Rdif = 0.8 R_E$ oproti 0.1 na okraji s kladným Dst, a kolem $Dst = -20$ nT asymetrické odchylky. Body, které ze závislosti vyčnívají směrem nahoru, jsme zkontrolovali v původních datech z THEMIS (<http://themis.ssl.berkeley.edu>) a ukázalo se, že se tam magnetopauza skutečně vyskytuje, jen pár výjimek byly chybné detekce. Bylo mezi nimi také mnoho opakovaných detekcí, což znamená, že magnetopauza kolem této polohy oscilovala.



Obrázek 4.6: Závislost korelace $Rdif$ a Dst indexu na zpoždění, pro oblast 1. Největší korelace je pro $AE < 30$ nT při zpoždění 3h 40min; pro $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT při zpoždění 6 hodin; a pro $AE > 500$ nT při zpoždění 5h 40min.

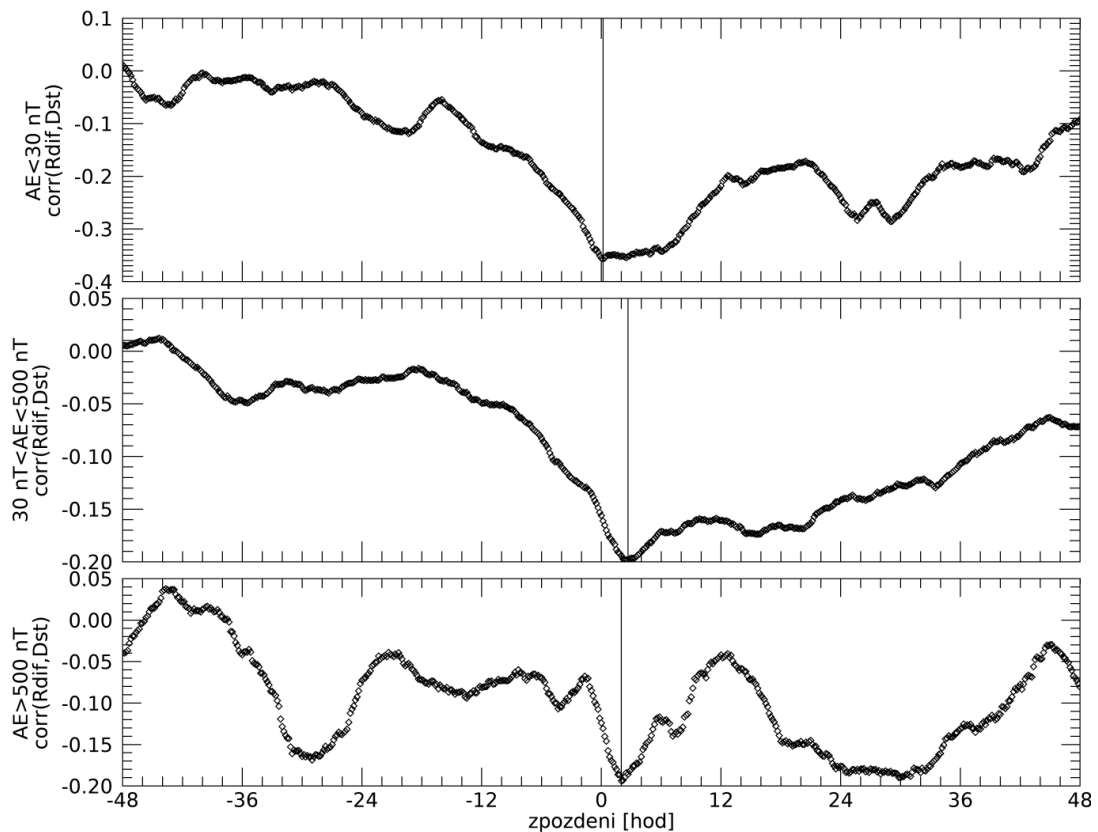


Obrázek 4.7: Závislost *Rdif* na hodnotě *Dst* indexu brané v okamžiku průchodu (levý sloupec), resp. pro zjištěné zpoždění s maximální korelací (pravý sloupec), a pro jednotlivé intervaly hodnot *AE* indexu (po řádcích), pro subsolární oblast

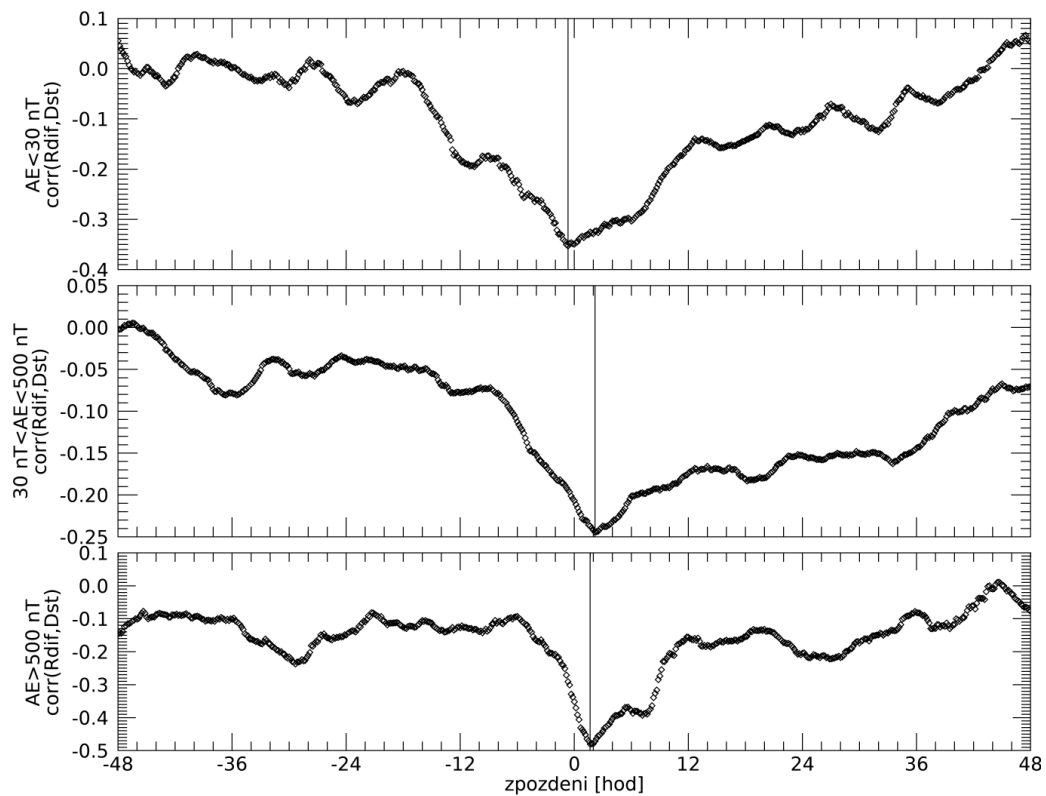
Rozdíl mezi touto závislostí při nulovém zpoždění a pro hlavní pík korelace je nepatrný.

4.2.2 Oblast 2 (po stranách vepředu)

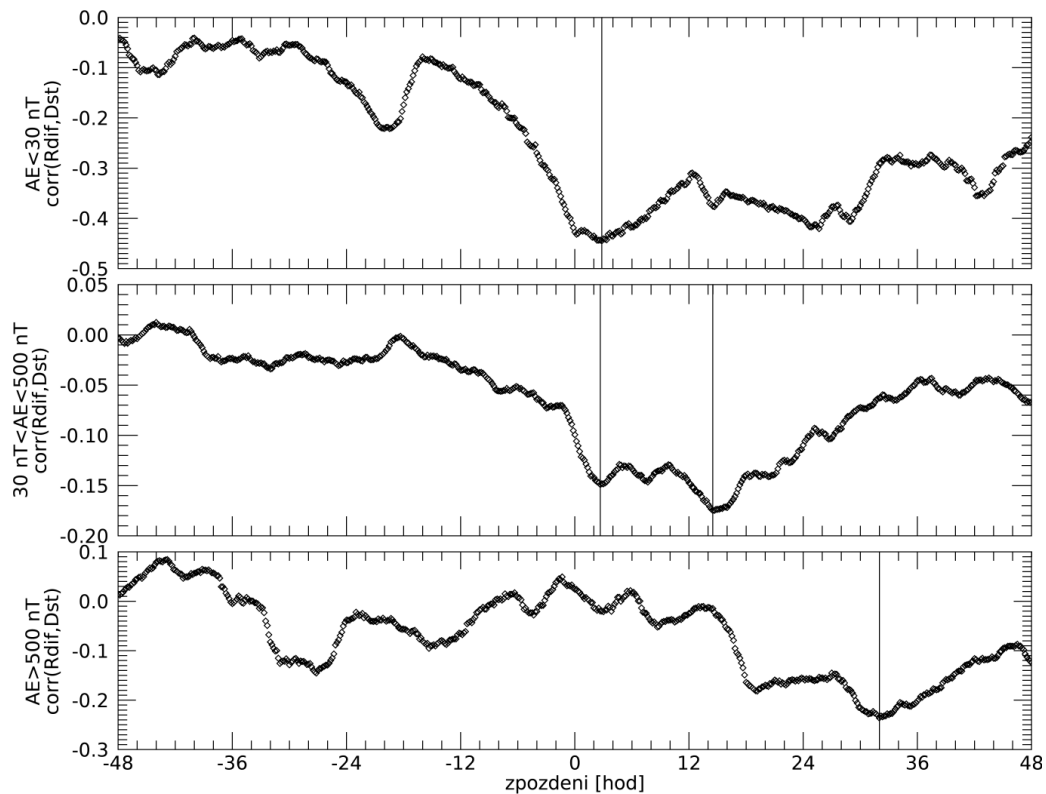
V oblasti 2 jsme zjistili vliv Dst indexu se zpožděním kolem 2 hodin, viz obrázek 4.8. Po rozdělení oblasti 2 na 2A a 2B se s tím oblast 2A (obrázek 4.9) shoduje, přičemž pro $AE > 500$ nT vychází mnohem větší korelace: -0.5 . V oblasti 2B (obrázek 4.10) se při $AE < 30$ nT a $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT vyskytuje pík při zpoždění 2h 50min, resp. 2h 40min, ale v druhém případě je další, výraznější pík při zpoždění 14h 30min. Při $AE > 500$ nT je dokonce kolem nulového zpoždění prakticky nulová korelace, zatímco výraznější korelace je mezi ± 24 a ± 36 hodinami a tyto dva píky se vyskytují bez rozdílu v oblastech 2, 2A i 2B s podobnou maximální korelací kolem -0.2 . Pro $AE < 30$ nT není vyvráceno nulové zpoždění v těchto oblastech. Závislost R_{dif} na Dst pro nulové zpoždění a pro hlavní píky korelace je pro oblast 2A na obrázku 4.11 a pro oblast 2B na obrázku 4.12. Na druhém zmíněném je vynechán interval $AE > 500$ nT kvůli výše zmíněné prakticky nulové korelaci kolem nulového zpoždění. Tyto



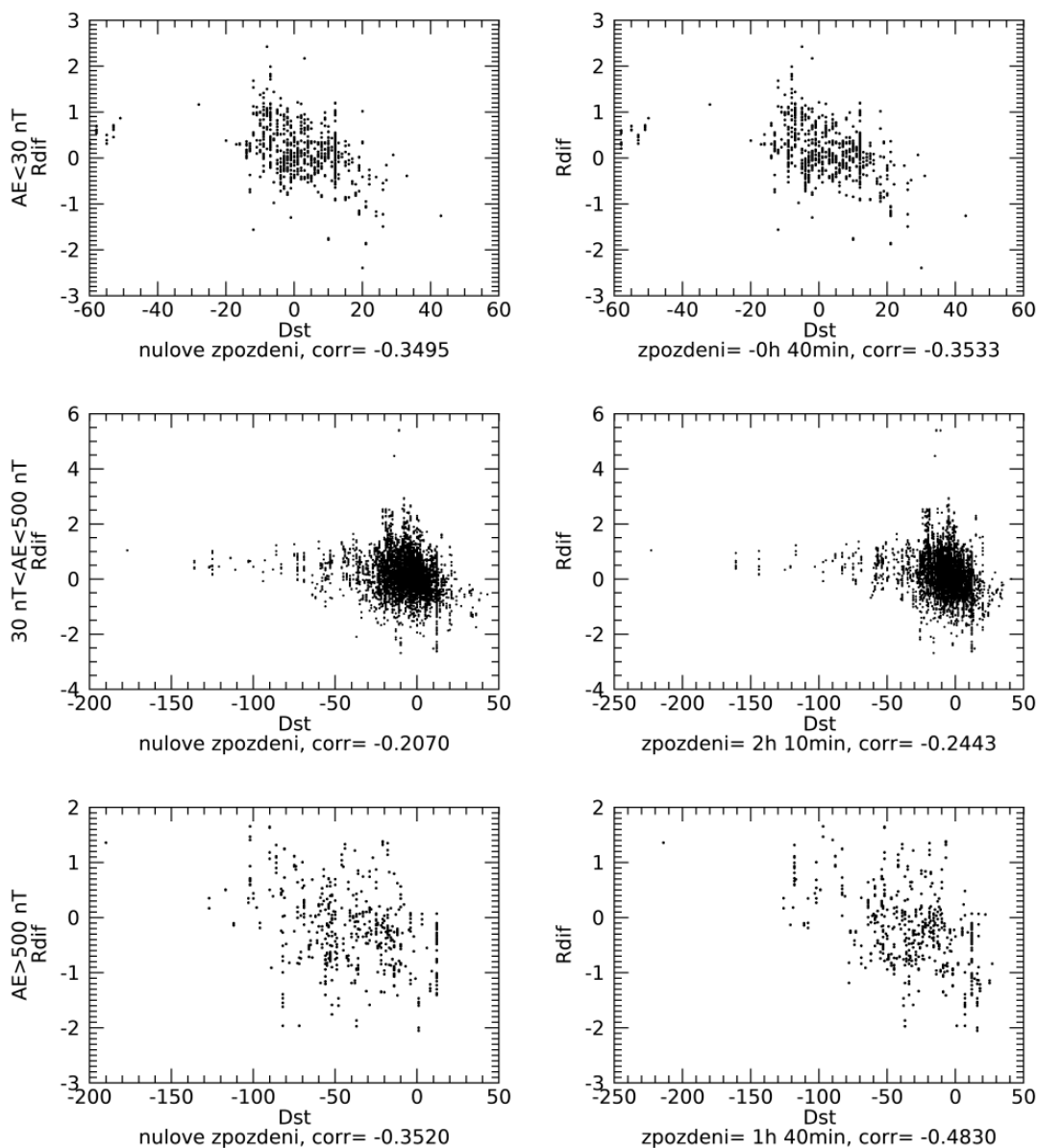
Obrázek 4.8: Závislost korelace R_{dif} a Dst indexu na zpoždění pro oblast 2. Největší korelace je pro $AE < 30$ nT při zpoždění 0h 10min; pro $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT při zpoždění 2h 40 min; a pro $AE > 500$ nT při zpoždění 2 hodiny.



Obrázek 4.9: Závislost korelace Rdif a Dst indexu na zpoždění pro oblast 2A. Největší korelace je pro $AE < 30$ nT při zpoždění -0h 40min; pro $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT při zpoždění 2h 40 min; a pro $AE > 500$ nT při zpoždění 2 hodiny.

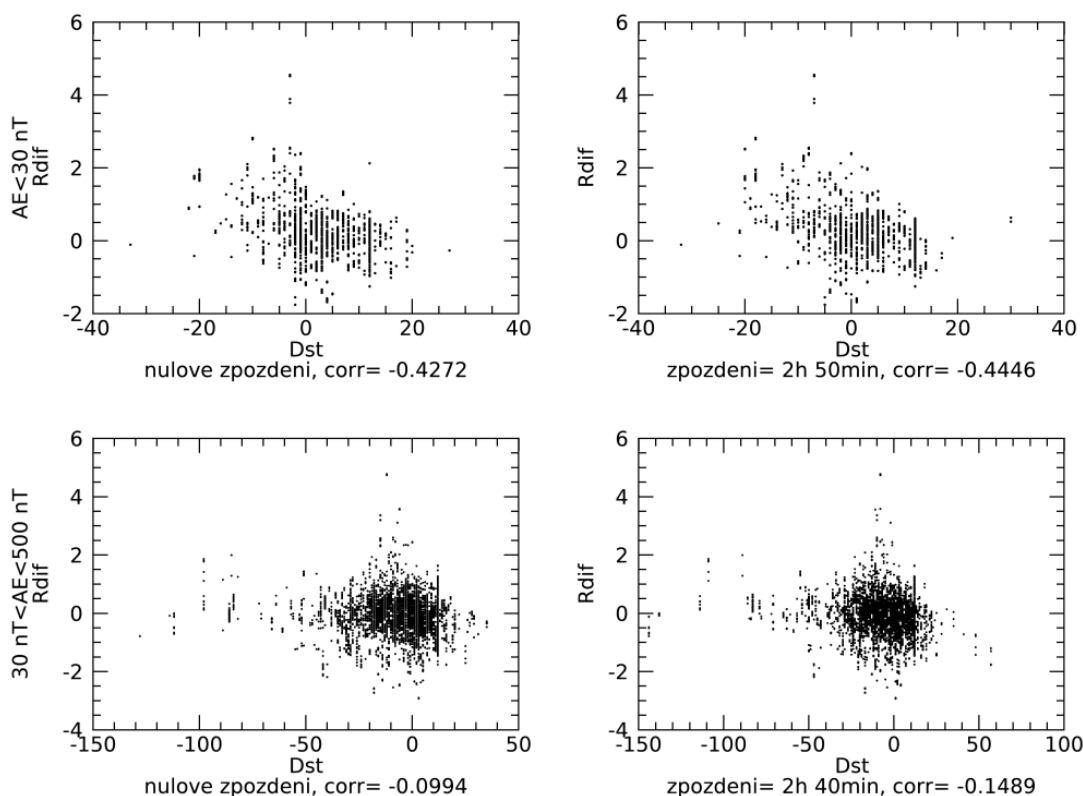


Obrázek 4.10: Závislost korelace Rdif a Dst indexu na zpoždění pro oblast 2B. Největší korelace pro $AE < 30$ nT je při zpoždění 2h 50min; pro $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT je největší pík při zpoždění 14h 30min a bližší pík při zpoždění 2h 40 min; a pro $AE > 500$ nT je největší pík při zpoždění 32 hodin.



Obrázek 4.11: Závislost *Rdif* na hodnotě Dst indexu brané v okamžiku průchodu (levý sloupec), resp. pro zjištění zpoždění s maximální korelací (pravý sloupec), a pro jednotlivé intervaly hodnot AE indexu (po řádcích), pro oblast 2A.

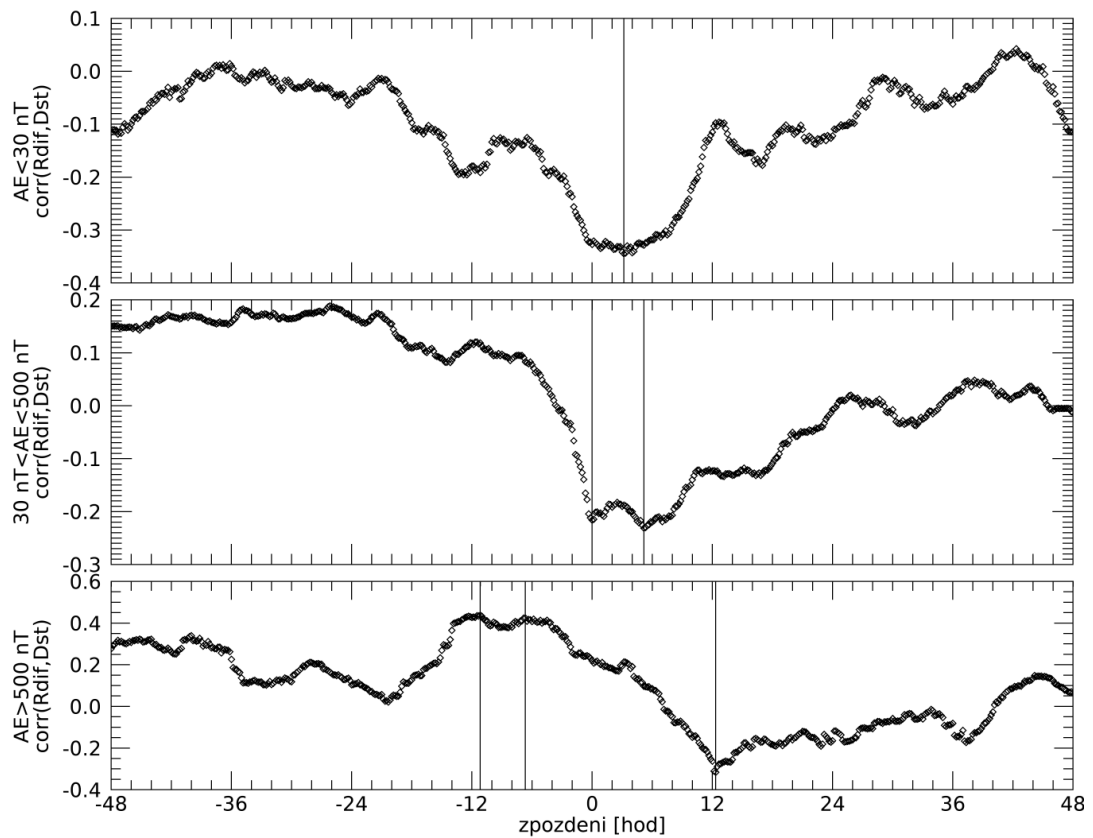
grafy vypadají podobně, jen méně zřetelně než obdobné grafy pro oblast 1. V oblasti 2A pro AE > 500 nT lineární závislost pokračuje napříč celým příslušným rozsahem Dst indexu, přinejmenším do Dst = -100 nT. Obdobné grafy společně pro celou oblast 2 vzhledem k velmi odlišnému průběhu korelace v oblastech 2A a 2B nejsou ukázány.



Obrázek 4.12: Totéž jako předchozí, ale pro oblast 2B; interval AE>500 nT je vynechán, protože tam je kolem nulového zpoždění prakticky nulová korelace.

4.2.3 Oblast 3 (po stranách vzadu)

Příslušná závislost korelace Dst a *Rdif* na zpoždění je na obrázku 4.13. Pro AE<30 nT vychází poněkud plochý pík v rozmezí zhruba od nulového zpoždění do 8 hodin, největší korelace je při zpoždění 3h 10min. Pro 30 nT<AE<500 nT vychází hlavní pík při zpoždění 5h 10min a druhý při nulovém zpoždění, ale nejsou ostře rozlišeny. Při AE>500 nT vychází hlavní pík se zápornou korelací při zpoždění 12h 20min a dva větší, navzájem podobně velké píky s kladnou korelací při záporném zpoždění -11h 20min a -6h 40min; při nulovém zpoždění je kladná korelace 0.22. Prohlížením příslušných grafů odpovídajících jednotlivým píkům zřejmě nezjistíme příčinu takto složitého průběhu korelace, tímto tedy můžeme uzavřít tuto kapitolu.



Obrázek 4.13: Závislost korelace Rdif a Dst indexu na zpoždění pro oblast 3. Největší korelace pro $AE < 30$ nT je při zpoždění 3h 10min; pro $30 \text{ nT} < AE < 500$ nT je největší pík při zpoždění 5h 10min a druhý pík při nulovém zpoždění; pro $AE > 500$ nT je největší pík se zápornou korelací při zpoždění 12h 20min a dva větší, navzájem podobně velké píky s kladnou korelací, větší je při zpoždění -11h 20min a druhý -6h 40min.

5 Diskuze získaných výsledků a závěr

5.1 Závislost na AE indexu

Byla zjištěna lineárně klesající závislost polohy magnetopauzy na AE indexu a navržena oprava modelu o tuto závislost. V práci je v jednotlivých oblastech a pro obě metody zkoumání této závislosti (tedy pomocí absolutních a normovaných odchylek, $Rdif$, resp. $Rdif/r_{mod}$) uvedena lineární korelace. Ta vychází v rozmezí od -12% (v oblasti 1 s počtem měření 10 160) do -47% (v oblasti 3 s počtem měření 1743), zřejmě se tedy jedná o reálný jev.

Nabízí se více způsobů, jak hodnotit přesnost modelů polohy magnetopauzy, resp. jejich zpřesnění zahrnutím dalšího parametru, jedním z nich je např. určení střední hodnoty a standardní odchylky rozdílů mezi naměřenou a modelovou polohou magnetopauzy (resp. jejich podílů). (Němeček a kol., 2020a) Zkusíme tedy tento postup (aplikujeme ho na $Rdif$) zvlášť pro jednotlivé oblasti a vzhledem ke zjištěným systematickým odchylkám od navrženého opraveného modelu také pro opravu určenou pro každou oblast zvlášť. Zjištěné střední hodnoty μ a standardní odchylky σ před opravou i po opravě oběma metodami jsou v tabulce 5.1. Tato metoda dává velmi odlišný výsledek oproti určení korelace – téměř žádné zlepšení. (Při opravě 1, určené z absolutních odchylek $Rdif$ vychází střední hodnota z definice nulová, zatímco malá nenulová střední hodnota při opravě 2 je způsobena přenásobením modelovou vzdáleností r_{mod} , která se v rámci souboru liší.) Příčina tohoto velkého rozdílu je zjevná, když se podíváme na grafy na obrázcích 4.1, 4.2 a 4.3 – drtivá většina dat je při $AE < 100$, zatímco za velkou korelaci jsou zodpovědná data při velkých hodnotách AE indexu, u kterých se výrazně projevuje jeho vliv, ale je jich tak málo, že mají zanedbatelný vliv na rozdělení $Rdif$. Němeček a kol. (2020a) poznamenali, že střední hodnota a standardní odchylka vypovídají o přesnosti modelu více než pouze střední kvadratická chyba (RMS error, Root-Mean-Square); na tomto případě vidíme, že ani tyto dva parametry nemusí stačit a spolehlivější je určení korelace spolu s vizuální kontrolou příslušné závislosti. Na základě toho můžeme shrnout, že zjištěný lineární pokles vzdálenosti magnetopauzy v závislosti na AE indexu je i přes jen zanedbatelné snížení standardní odchylky reálný.

Oblast	Původní model		Oprava 1		Oprava 2	
	$\mu [R_E]$	$\sigma [R_E]$	$\mu [R_E]$	$\sigma [R_E]$	$\mu [R_E]$	$\sigma [R_E]$
1	0.41	0.60	0.00	0.60	0.00	0.60
2	0.02	0.71	0.00	0.68	-0.01	0.68
2A	0.12	0.69	0.00	0.68	-0.01	0.68
2B	-0.08	0.72	0.00	0.67	-0.01	0.67
3	-0.07	1.38	0.00	1.28	0.10	1.31
4	-0.72	4.32	0.00	4.15	-0.16	4.12

Tabulka 5.1: Srovnání středních hodnot μ a standardních odchylek σ veličiny $Rdif$ před opravou a po ní. Oprava 1 znamená odečtení závislosti (4.1) $Rdif=a AE+b$ nařítované na data z příslušné oblasti. Oprava 2 je určena způsobem analogickým vztahu (4.4) $Rdif_{opr} = Rdif - r (a AE + b)$, kde koeficienty a a b pochází ze závislosti (4.2) $Rdif/r_{mod}=a AE+b$ nařítované také pro každou oblast zvlášť.

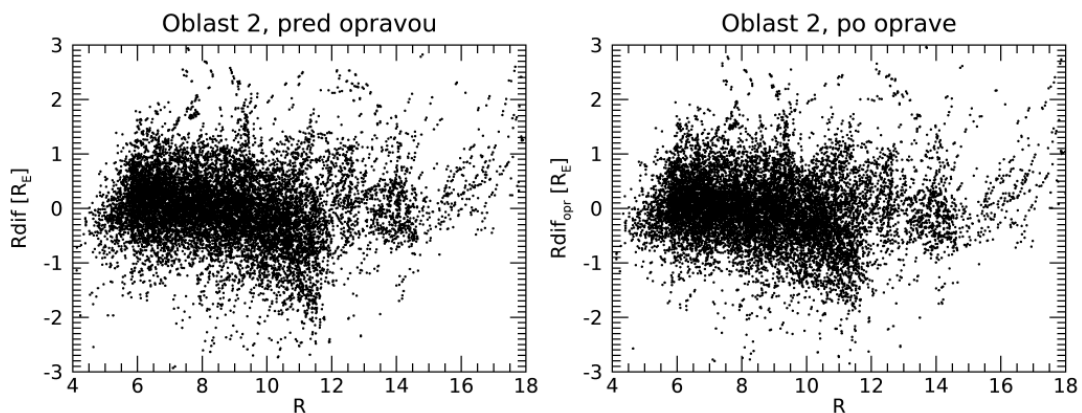
Zjistili jsme, že odezva magnetopauzy na hodnotu AE indexu v různých oblastech je blízká změně velikosti se zachováním tvaru. Proto jsme dále zkoumali závislost normovaných odchylek $Rdif/r$ na AE indexu. Rozdělením oblasti 2 a porovnáním závislosti (4.1) v oblastech 2A a 2B (obrázek 4.2) to bylo vyvráceno, tedy s geomagnetickou aktivitou představovanou AE indexem se mění i tvar magnetopauzy. V každém případě očekáváme, že se odezva magnetopauzy na geomagnetickou aktivitu mění spíše spojitě než skokově přes hranice oblastí, které byly zvoleny libovolně. To je v souladu s tím, že s výjimkou oblastí 1 a 4 vychází větší korelace v případě normovaných odchylek $Rdif/r$. Nižší korelace v oblasti 4 je nejspíš způsobena definicí veličiny $Rdif$, protože už nelze použít aproximaci, že ji měříme podél spojnice Země a naměřené polohy, a očekáváme její slabší závislost na vzdálenosti od Země. Největší odezva magnetopauzy na AE index byla zjištěna v oblasti 3.

Protože většina dat pochází ze sond s nízkým apogeeem kolem $12 R_E$, jsou tato data velmi nevhodná k vytvoření modelu magnetopauzy závislého na parametrech slunečního větru, viz oblast 2 na obrázku 2.1, ale zároveň právě větší množství dat při záporných $Rdif$ v této oblasti vede k lepšímu zastoupení větších hodnot AE indexu, což se hodí ke zkoumání jeho vlivu.

Na základě zjištěné závislosti normovaných odchylek $Rdif/r_{mod}$ na AE indexu jsme navrhli způsob vytvoření opraveného modelu, který zahrnuje kromě parametrů slunečního větru i AE index. V rámci navazujícího výzkumu by bylo vhodné tuto opravu zahrnout přímo do funkčního tvaru modelu (případně v dalším kroku se

nabízí hledat způsob, jakým se s AE indexem mění tvar magnetopauzy) a spolu s ní znovu nafitovat celý model, protože tato oprava sníží i systematickou chybu určení tvaru magnetopauzy způsobenou oběžnými dráhami družic.

Tento postřeh můžeme ilustrovat vlivem opravy na graf závislosti $Rdif$ na R (obrázek 5.1). Z porovnání s obrázkem 3.1 vyplývá, že výčnělek při R mezi 10 a 12 R_E pochází z oblasti, kde sondy mohly zaznamenat magnetopauzu pouze při větším záporném $Rdif$, což jak jsme zjistili nastává především při vysokých hodnotách AE indexu. V pravém panelu na obrázku 5.1 je tento výčnělek asi o polovinu menší, tedy vliv oběžných drah družic tím byl částečně potlačen.



Obrázek 5.1: Vlevo – závislost $Rdif$ na R , (ve všech směrech je několik málo bodů vně zobrazené oblasti, ty byly pro větší názornost vynechány); vpravo – totéž po opravě analogické vztahu (4.4) $Rdif_{opr} = Rdif - r(-8 \cdot 10^{-5} AE + 0.017)$

5.2 Vliv Dst indexu

V subsolární oblasti je závislost korelace poměrně jednoduchá s jedním hlavním píkem pro kladné zpoždění kolem 5 hodin. Tím je vyloučeno, že by za větší část této korelace mohl přichod meziplanetární rázové vlny a SSC, jde tedy o vliv prstencového proudu nebo plazmatu souvisejícího s geomagnetickou bouří. $Rdif$ vykazuje zhruba lineární klesající závislost až do $Dst = -30$ nT, což znamená, že pro silnější prstencový proud je magnetopauza dál, jde tedy o opačný vliv než v případě AE indexu. Pro větší záporné hodnoty Dst indexu závislost vykazuje nasycení (pro $30 \text{ nT} < AE < 500 \text{ nT}$; pro $AE < 30$ už takové hodnoty nejsou a pro $AE > 500$ je málo dat pro jakékoli závěry). Machková a kol. (2019) našli pro oblast, která se zhruba kryje se subsolární oblastí definovanou v této práci, stejný tvar závislosti pro opravený Dst^* index se zlomem při $Dst^* = -12$ nT. Vzhledem k jeho definici se i tato hodnota shoduje s hodnotou nalezenou v této práci. Kolem $Dst = -20$ nT se vyskytují

asymetrické odchylky přednostně s kladným R_{dif} ; ty budou předmětem dalšího výzkumu.

V oblasti 2 pro $30 \text{ nT} < AE < 500 \text{ nT}$ tato závislost vypadá v podstatě stejně, jen je méně zřetelná. V oblasti 2A pro $AE > 500 \text{ nT}$ zmíněná lineární závislost pokračuje nejméně do $Dst = -100 \text{ nT}$, což naznačuje, že by poloha zlomu, při kterém dojde k nasycení, mohla záviset také na AE indexu.

Vliv Dst indexu v oblastech 2A a 2B je pro $AE < 500 \text{ nT}$ navzájem podobný, ale v oblasti 2B je komplikován neočekávaným podobně velkým píkem při větším kladném zpoždění. Pro $AE > 500 \text{ nT}$ kolem nulového zpoždění v oblasti 2B korelace mizí a naopak v oblasti 2A je výrazně větší.

Velké korelace se náhodně mohou objevit v malém souboru dat, proto v tabulce 5.5 porovnávám počty bodů v použitých částech datového souboru. Ve všech oblastech má největší zastoupení interval $30 \text{ nT} < AE < 500 \text{ nT}$. Ve zmíněné oblasti 2B se složitějším průběhem korelace je v intervalu $30 \text{ nT} < AE < 500 \text{ nT}$ 5007 bodů a pro $AE > 500 \text{ nT}$ jich je 692, zatímco v oblasti 1 s jen 315 body v intervalu $AE > 500$ se průběh korelace v tomto intervalu shoduje s jejím průběhem v ostatních intervalech. V oblastech 2 a 3 se časová odezva může měnit i napříč příslušnou oblastí a nerovnoměrné pokrytí daty při různých geomagnetických podmínkách by také mohlo být zdrojem fiktivních trendů.

interval AE indexu oblast	$AE < 30 \text{ nT}$	$30 \text{ nT} < AE < 500 \text{ nT}$	$AE > 500 \text{ nT}$
1	1824	8021	315
2	1956	10840	1208
2A	763	5833	516
2B	1193	5007	692
3	441	1183	119

Tabulka 5.2: Počty bodů v částech datového souboru, pro které byla provedena korelační analýza

Zmíněný rozdíl mezi oblastí 2A (večerní strana) a 2B (ranní strana) by mohl souviset s výronem nízkoenergetického plazmatu z plazmasféry (plasmapheric plume) při subbouři, ke kterému dochází na večerní straně, toto plazma poté putuje do subsolární oblasti a jen při dostatečně silné subbouři se dostane až na ranní stranu. To se shoduje s menším zpožděním kolem 2 hodin v oblasti 2A oproti 5 hodinám v

subsolární oblasti, ale odporuje tomu přítomnost píku v oblasti 2B při zhruba stejném zpoždění jako v oblasti 2A a s korelací klesající s hodnotou AE indexu. Tento jev by ještě mohl vést v oblasti 2B k dalšímu píku při větším zpoždění. Toto plazma zvýší vodivost magnetosféry, což by mohlo vést při další subbouři k rozdílné odezvě magnetopauzy v oblastech 2A a 2B na AE index, ale pozorován byl opačný rozdíl, než k jakému by to vedlo.

V oblasti 2 se dále pro $AE > 500$ nT vyskytují píky při zpoždění něco málo přes ± 24 hodin. To je příliš velká časová škála na skutečnou interakci prstencového proudu s magnetopauzou. V částech této oblasti 2A a 2B jsou zhruba stejně velké, což vylučuje jejich původ jen z malého množství dat. Mohly by souviset s oběžnou dobou sond – většina dat v oblastech 1 a 2 pochází ze sond s periodou zhruba 1 den a zrovna v intervalu $AE > 500$ nT v oblasti 2 je zastoupení dat ze sond s delší periodou nejmenší. Také může jít o výběrový efekt, protože vlastně zkoumáme vliv prstencového proudu na polohu magnetopauzy ve speciálním okamžiku (podle času průchodu magnetopauzou), kdy probíhá subbouře, která má mnohem kratší časovou škálu. Další možností je souvislost s opakováním subbouří – mezi náhodně se opakujícími subbouřemi byla nalezena také populace přibližně periodicky se opakujících subbouří s periodou 2 – 4 hodin. (Borovsky a Yakymenko, 2017) Podle Huang a kol. (2003) se vyskytují během bouří, v intervalu trvale jižního IMF, ale zmíněných 24 hodin je zhruba horní hranice trvání série periodicky se opakujících subbouří. Jako příčinu jejich opakování určili oscilace magnetosféry, které mohou být vybudeny na těchto periodách, lze tedy čekat jejich vliv na polohu magnetopauzy; pozorovali také pokračování těchto oscilací i po skončení série periodických subbouří. Ovšem od takového periodického jevu bychom pík korelace čekali spíše na jeho periodě nebo jejím malém celočíselném násobku než na takto velké časové škále. Tu by mohla vytvořit jeho kombinace s předchozími zmíněnými možnostmi – tedy s výběrovým efektem na periodu oběhu sond a současně na právě probíhající subbouři. Subbouře se projevují v AE indexu, zatímco tato korelační analýza byla provedena pro Dst index, takže je třeba ještě nějaká souvislost s Dst indexem – tou je vysoká korelace AE indexu s tokem energie do prstencového proudu (Feldstein, 1991), který vede k jeho zesílení. Tento scénář ovšem obsahuje několik nejasných bodů, takže bude třeba další výzkum k objasnění původu těchto píků při zpoždění něco málo přes ± 24 hodin.

V oblasti 3 se při $AE < 30$ nT vyskytuje plochý pík zhruba v rozmezí zpoždění od 0 do 8 hodin. To by mohlo být dáno různou časovou odezvou napříč touto oblastí. Při $30 \text{ nT} < AE < 500 \text{ nT}$ se vyskytují dva podobně velké píky při nulovém zpoždění a 5h 10min. To by mohlo naznačovat kombinaci SSC a vlivu prstencového proudu, ale tyto píky nejsou ostře rozděleny a průběh korelace se oproti předchozímu liší nepatrně. Spíše půjde jen o jednu z těchto možností pro oba intervaly AE indexu. Pro $AE > 500$ nT je průběh korelace složitější a jako pík, který nejvíce odpovídá realitě vypadá ten s kladnou korelací při záporném zpoždění -6h 40min.

V oblasti 3 (a ještě více v oblasti 4, pro kterou tato analýza nebyla zahrnuta) jsou výsledky velmi citlivé na správné provedení aberace, včetně vlivu složky v_y rychlosti slunečního větru. Náhodné chyby způsobené tímto jevem pouze sníží korelaci a neměly by výrazně změnit zjištěný trend, ale tato složka má také malou systematickou část, která závisí na rychlosti slunečního větru (Němeček a kol., 2020b), a také se strukturami CIR a CRR je spojen charakteristický průběh této složky.

Aby se už známý vliv AE indexu tolik nepromítal do zkoumané závislosti na Dst indexu, rozdělili jsme data podle hodnoty AE indexu, ale je možné, že tato metoda byla pro velké hodnoty AE indexu zdrojem fiktivních trendů v korelační analýze. Vzhledem k jednoduché lineární závislosti na AE indexu by pravděpodobně vhodnější metodou bylo odečtení této závislosti. Taková analýza mírně přesahuje rámec této práce a bude předmětem dalšího výzkumu. Vzhledem k přítomnosti stále významných systematických chyb bude spíše než použití navržené opravy modelu vhodnější odvodit ekvivalentní korekci pro každou oblast zvlášť.

Na závěr je třeba zdůraznit, že studujeme polohu magnetopauzy v oblastech blízkých rovině ekliptiky, resp. rovníku, ale přesto vychází výraznější závislost na AE indexu, který měří elektrické proudy v polárních oblastech, než na Dst, který měří prstencový proud v oblasti rovníku. Při zkoumání vlivu Dst indexu bylo zjištěno několik jevů (zmiňovaných výše), jejichž objasnění bude předmětem dalšího výzkumu; kromě nich také vytvoření modelu magnetopauzy, který zahrnuje kromě parametrů slunečního větru i AE index. Závislost na AE indexu se zdá být základnější a pro pochopení vlivu prstencového proudu reprezentovaného Dst indexem bude třeba napřed vytvořit model magnetopauzy, který kromě parametrů slunečního větru

zahrnuje i AE index, zkoumat odchylky od takového modelu a přitom stále jeho vliv brát v úvahu.

Seznam použité literatury

- Akasofu, S. -I., Development of Magnetospheric Physics, in: Magnetospheric Substorms, ed. by J.R. Kan, T.A. Potemra, S. Kokubun and T. Iijima, Geophysical Monograph, vol. 64, 1991
- Angelopoulos, V., The THEMIS mission. *Space Sci. Rev.*, **141**, 5–34, 2008
- Borovsky, J. E. a Yakymenko, K., Substorm occurrence rates, substorm recurrence times, and solar wind structure. *J. Geophys. Res. Space Physics*, **122**, 2973-2998, 2017
- Daglis, I.A., et al., The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Rev. Geophys.*, **37**, 407-438, 1999.
- Dungey, J. W. (1961), Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. *Physical Review Letters*, 6 (2): 47–48. doi:10.1103/physrevlett.6.47.
- Feldstein, Y. I., Substorm current systems and auroral dynamics, in: Magnetospheric Substorms, ed. by J.R. Kan, T.A. Potemra, S. Kokubun and T. Iijima, Geophysical Monograph, vol. 64, 1991
- Jelínek, K. et al., A new approach to magnetopause and bow shock modeling based on automated region identification. *J. Geophys. Res.*, **117**, A05208, 2012
- Kivelson, M. G. a Russell, Ch. T., 1996. *Introduction to space Physics*. Cambridge University Press.
- Lopez, R. E., Magnetospheric Substorms. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, Volume 11, Numbers 3 and 4, 1990
- Machková, A., et al., On the Influence of the Earth's Magnetic Dipole Eccentricity and Magnetospheric Ring Current on the Magnetopause Location. *J. Geophys. Res. Space Physics*, **124**, 905–914, 2019
- Němeček, Z., et al., An Examination of the Magnetopause Position and Shape Based Upon New Observations. *Geophysical Monograph Series*, **248**, 135–151, 2020a
- Němeček, Z., et al., (Non)radial Solar Wind Propagation through the Heliosphere. *Astrophys. J. Letters*, **897**, L39, 2020b
- Němeček, Z; Grygorov, K; Šafránková, J; Šimůnek, J; Pi, G, Magnetic Field Gradient Across the Flank Magnetopause. *Front. Astron. Space Sci.*, 8: Art. No. 778234, 2021.
- Pudovkin, M. I., Physics of Magnetospheric Substorms: A Review, in: Magnetospheric Substorms, ed. by J.R. Kan, T.A. Potemra, S. Kokubun and T. Iijima, Geophysical Monograph, vol. 64, 1991

Shue, J.-H., et al., A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape. *J. Geophys. Res.*, **102**, 9497, 1997.

Stern, D. P., The beginning of substorm research, in: Magnetospheric Substorms, ed. by J.R. Kan, T.A. Potemra, S. Kokubun and T. Iijima, Geophysical Monograph, vol. 64, 1991

Šafránková, J., et al., The magnetopause shape and location: a comparison of the Interball and Geotail observations with models. *Ann. Geophys.*, **20**, 301, 2002

Turčičová, M., *Změny parametrů slunečního větru v průběhu slunečního cyklu*, Bakalářská práce, MFF UK, Praha, 2018

Zurbuchen, T. H., A new view of the coupling of the sun and the heliosphere. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **45**, 297–338, 2007