

Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Pavel Paloncý

Studium morfologie zemské magnetosféry

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí diplomové práce: Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Fyzika povrchů a ionizovaných prostředí

Zde bych chtěl poděkovat paní prof. Janě Šafránkové a panu prof. Zdeňku Němečkovi za obětavost a trpělivost, kterou se mnou v průběhu psaní této práce měli. Také bych chtěl poděkovat Mgr. Karlu Jelínkovi za poskytnutí programu na zpracování dat a cennou pomoc při práci s tímto programem.

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce.

V Praze dne 26. dubna 2009

Pavel Paloncý

Název práce: *Studium morfologie zemské magnetosféry*

Autor: *Pavel Paloncý*

Katedra (ústav): *Katedra fyziky povrchů a plazmatu*

Vedoucí diplomové práce: *Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.*

e-mail vedoucího: *jana.safrankova@mff.cuni.cz*

Abstrakt: V předložené práci studujeme vnější hranici magnetosféry, magnetopauzu, její tvar a polohu. Magnetopauza je místo, kde dochází k vyrovnání tlaků, především dynamického tlaku slunečního větru a tlaku magnetického pole Země. Při studiu vycházíme z experimentálních dat z družic Themis přecházejících přes magnetopauzu a vytváříme databázi průchodů družice magnetopauzou. Používáme data ze subsolární oblasti a z oblasti v blízkosti terminátoru. Tato data dále doplňujeme o parametry slunečního větru získané z monitorů slunečního větru. Experimentálně zjištěné polohy srovnáváme s existujícími modely magnetopauzy a hledáme příčiny odchylek mezi modelovými a reálnými polohami analýzou dalších parametrů. Na základě srovnání vyhodnocujeme nejvhodnější monitor slunečního větru, model magnetopauzy a diskutujeme závislost na dalších parametrech nezahrnutých v modelu. V poslední části pak diskutujeme možnosti, výhody a nevýhody užití některé z družic Themis jako blízkého monitoru slunečního větru.

Klíčová slova: *magnetopauza, modely magnetopauzy, monitor slunečního větru, THEMIS*

Title: *Morphology of terrestrial magnetosphere*

Author: *Pavel Paloncý*

Department: *Department of surface and plasma science*

Supervisor: *Prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.*

Supervisor's e-mail address: *jana.safrankova@mff.cuni.cz*

Abstract: In the present work, we study one of the outer boundary of the Earth's magnetosphere, the magnetopause, its shape and location. The magnetopause is a region, where balance of pressures takes place, in particular the dynamic pressure of the solar wind and the Earth's magnetic field pressure. Our study is based on experimental data from Themis spacecraft magnetopause crossings and we create a database of these crossings. We use data from the subsolar region and from the region close to terminator ($x_{GSE} = 0$). We further supply these data with parameters of the solar wind from solar wind monitors. Magnetopause locations identified by the spacecraft are then compared with existing magnetopause models and we are searching for the causes of deviations between model and real locations. The most suitable solar wind monitor and the magnetopause model are chosen based upon these comparisons, and possible relations to other parameters not included in the models are then discussed. In the last part, we discuss possibility, advantages, and disadvantages of using any of Themis spacecraft as a near-Earth solar wind monitor.

Keywords: *magnetopause, magnetopause models, solar wind monitors, THEMIS*

Obsah

1	Úvod	6
2	Současný stav problematiky	7
2.1	Zemská magnetosféra (magnetosphere)	7
2.2	Sluneční vítr (solar wind)	7
2.3	Rázová vlna (bow shock)	8
2.4	Přechodová oblast (magnetosheath)	8
2.5	Magnetopauza (magnetopause)	9
2.6	Další magnetosférické oblasti	9
2.7	Použité souřadnicové systémy	10
2.7.1	GSE – Geocentric Solar Ecliptic System	10
2.7.2	GSM – Geocentric Solar Magnetic System	10
2.7.3	Tilt úhel	11
2.8	Magnetopauza	11
3	Modely magnetopauzy	14
3.1	Petrinec a Russell (1996) [23]	15
3.2	Shue a kol. (1997) [30]	17
3.3	Shue a kol. (1998) [31]	18
4	Zdroje dat	20
4.1	Monitory slunečního větru	20
4.2	Projekt Wind	21
4.2.1	Přístroj MFI [47]	21
4.2.2	Přístroj SWE [48]	22
4.3	Družice ACE [34][18]	22
4.3.1	Přístroj SEPICA [20][18]	23
4.3.2	Přístroj MAG [34]	23
4.4	Databáze OMNI [42]	23
4.5	Projekt THEMIS [2]	25
4.5.1	Přístroj FGM [3]	26
4.5.2	Přístroj ESA [19]	27
4.5.3	Přístroj SST	27
4.6	Magnetosférické indexy	28
4.6.1	AE Index	28
4.6.2	DST Index	28
5	Cíl práce	30

6	Experimentální výsledky	32
6.1	Vytvoření databáze	32
6.2	Monitory slunečního větru	35
6.3	Vzájemné porovnání modelů.....	37
6.3.1	Porovnání odchylek od modelů v závislosti na p_{sw}	37
6.3.2	Porovnání odchylek v závislosti na B_z	39
6.3.3	Porovnání odchylek modelů v různých lokálních časech	40
6.3.4	Porovnání odchylek v závislosti na souřadnici X v terminátorové oblasti pro kladná a záporná X	43
6.4	Další parametry.....	44
6.4.1	Vliv tilt úhlu.....	44
6.4.2	Magnetosférické indexy	46
6.4.3	AE index	46
6.4.4	Index DST.....	47
6.5	Radiální pole a drift	48
6.6	Themis B jako monitor slunečního větru	54
7	Závěr.....	57
8	Literatura	59

1 Úvod

Předmětem diplomové práce je studium magnetosféry, konkrétně její vnější hranice – magnetopauzy. K dramatickému rozkvětu poznání zemské magnetosféry došlo s nástupem kosmického výzkumu. Magnetosféra se nejčastěji studuje pomocí umělých vědeckých družic. Poznatky získané o zemské magnetosféře nachází své uplatnění na Zemi ve fyzice plazmatu a také v telekomunikacích a satelitních technologiích. Studium magnetopauzy je však především základním výzkumem přispívajícím k lidskému poznání.

Práce je rozdělená do 8 kapitol. V úvodu se zmiňujeme o členění práce a o použité terminologii. Kapitola 2 se pak zabývá vznikem a strukturou zemské magnetosféry a stručným popisem oblastí magnetosféry, včetně magnetopauzy, a dále pak představuje používané systémy souřadnic. Třetí kapitola je věnovaná modelům magnetopauzy. Modelů existuje velké množství, podrobně se věnujeme jen těm, se kterými v práci srovnáváme svoje data.

Ve 4. kapitole se věnujeme zdrojům dat. Jednak se seznamujeme s družicemi Themis, ze kterých získáváme pozorovanou polohu magnetopauzy, také se však věnujeme popisu monitorů slunečního větru, ze kterých získáváme parametry slunečního větru. Také popisujeme přístroje, ze kterých čerpáme data. V druhé části kapitoly se seznamujeme se zdroji dat, které dále v práci analyzujeme. Následuje cíl práce (kapitola 5) a v 6. kapitole se nachází samotné experimentální výsledky. V závěru shrnujeme zjištěné experimentální výsledky a práci uzavírá seznam použité literatury.

Zde bych rád uvedl několik poznámek k použité terminologii. Přestože ve vědeckých kruzích často dochází k různému mísení češtiny, angličtiny a odborných termínů, snažil jsem se tuto práci psát česky a vyhýbat se anglicismům. Tam, kde český termín existuje, použil jsem český termín. Aby nedošlo k nedorozumění, uvedl jsem pro přehlednost anglický termín do závorky, např. přechodová oblast (magnetosheath). V některých případech by však úplný český překlad byl zavádějící, proto jsem v těchto případech použil zavedený pojem (např. tilt úhel).

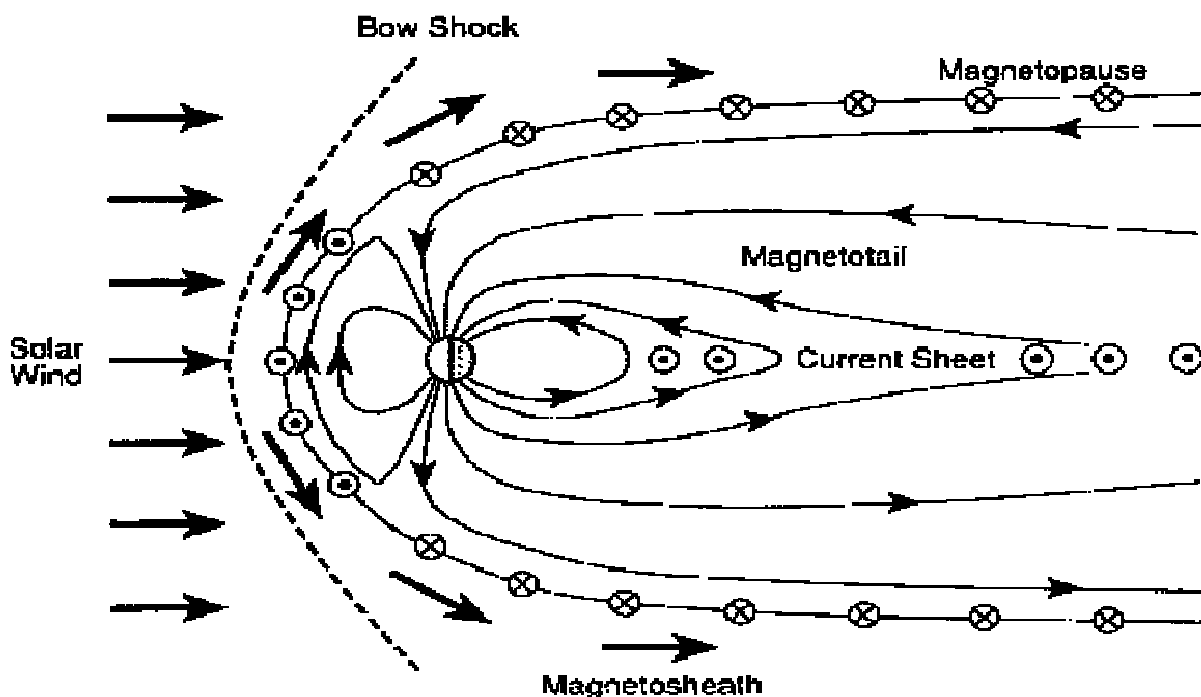
Protože v této oblasti v České republice pracuje poměrně malý počet lidí, terminologie není ustálená, vyvíjí se a často se ujme první překlad nového termínu, ačkoli není úplně přesný. V této práci jsem se nesnažil vytvářet nové termíny, raději jsem se držel termínů již zavedených.

2 Současný stav problematiky

2.1 Zemská magnetosféra (magnetosphere)

Zemskou magnetosférou se označuje oblast, kde jsou procesy řízeny magnetickým polem Země. Podle teorie o zemském dynamu vzniká magnetické pole díky rotaci elektricky vodivé tekutiny uvnitř Země (totéž platí i pro jiné planety). Kdyby neexistoval sluneční vítr, mělo by toto pole symetrický dipólový charakter. Avšak magnetické pole Země je vystaveno vlivu slunečního větru, pro který představuje překážku. Vlivem proudění slunečního větru se tak toto pole deformuje na silně protáhlý tvar s vhloubeními (kaspy). Výsledkem této interakce je zemská magnetosféra táhnoucí se několik desítek zemských poloměrů (R_e) za Zemi.

Magnetosféru můžeme rozdělit na několik struktur a oblastí (jak je ukázáno na Obrázku 1) a zmíněno dále.



Obrázek 1: Struktura zemské magnetosféry (převzato z [35]).

2.2 Sluneční vítr (solar wind)

Ze Slunce se uvolňuje ve všech směrech, tedy i směrem k Zemi, neustálý tok nabitých částic, který se nazývá sluneční vítr. Vzniká ve sluneční koruně a tvoří jej z 96% atomy H^+ (tj. protony), zhruba 4 % alfa částice (He^{2+}), těžších iontů je zanedbatelné množství, v průměru

netvoří více než 0,5 % částic. Koncentrace iontů se v průměru pohybuje v rozmezí 3–10 cm⁻³. Stejnou koncentraci mají také elektrony (kvazineutralita plazmy).

Díky existenci magnetického pole dipólového charakteru je Země chráněna před slunečním větrem. Sluneční vítr v blízkosti planety Země se pohybuje v průměru rychlostí 400 km/s. Jedná se o nadzvukové proudění, neboť jeho rychlost je vyšší než rychlost magnetozvukových vln, které v tomto prostředí nahrazují zvukové vlny (jejich rychlost je asi 40 km/s.) Kdyby neexistovala zemská magnetosféra, jedinou překážkou pro částice slunečního větru by představovala zemská atmosféra a zemský povrch by tak byl neustále vystaven bombardování nabitými částicemi slunečního větru. Obvyklé hodnoty parametrů slunečního větru ve vzdálenosti 1 AU (AU je astronomické jednotka) jsou v tabulce 1, kde však nerozlišujeme typ slunečního větru (rychlý a pomalý).

Rychlost částic	380-800 km/s
Koncentrace částic	3–10 cm ⁻³
Teplota elektronů	1,4 – 1,6 x 10 ⁵ K
Hodnoty IMF	+2 nT - 7 nT

Tabulka 1: Typické parametry slunečního větru ve vzdálenosti 1 AU.

2.3 Rázová vlna (bow shock)

První struktura, se kterou se sluneční vítr při svém pohybu směrem k Zemi setká, je rázová vlna. Jak již bylo řečeno, protože rychlost slunečního větru je vyšší, než rychlost, kterou se mohou šířit vlny směrem ke Slunci, vytvoří se při styku s překážkou rázová vlna. Okolozemní rázová vlna tak vzniká v důsledku obtékání zemské magnetosféry nadzvukovým prouděním slunečního větru. Tato rázová vlna má velmi malou šířku (~100 km) [6], při jejím překonávání velmi rychle klesá rychlost proudění z nadzvukového na podzvukové. Při této změně také prudce roste tlak, teplota a koncentrace částic. Rázová vlna je v současné době předmětem intenzivního studia [11].

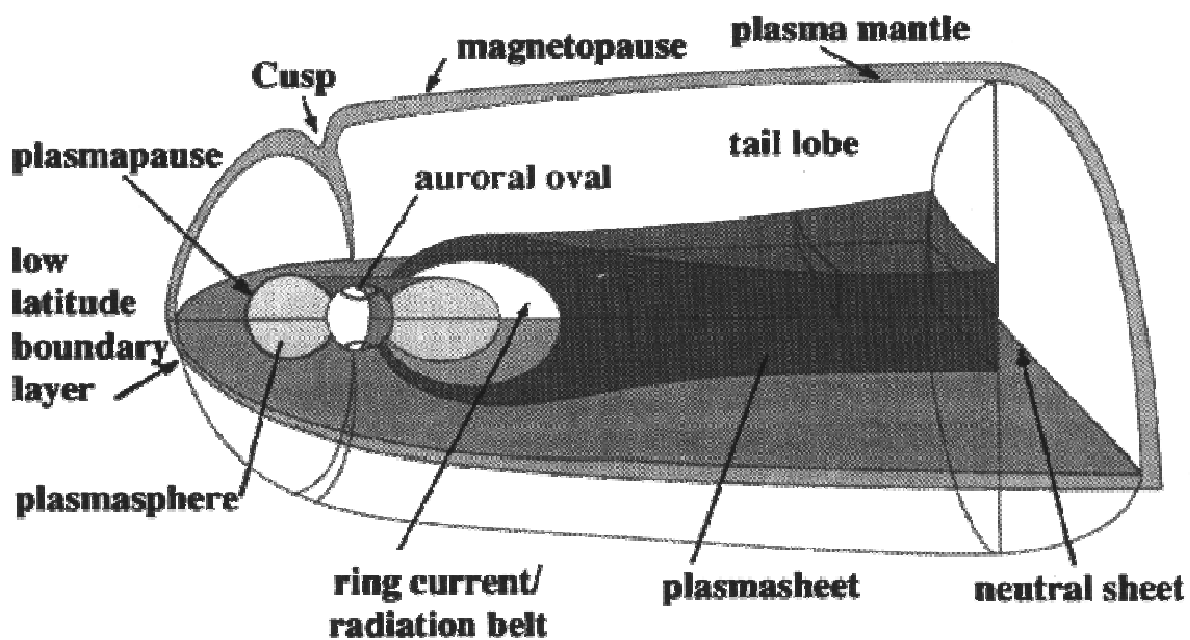
2.4 Přejímová oblast (magnetosheath)

Za rázovou vlnou se nalézá oblast zvaná přejímová oblast (někdy se také používá výraz magnetoobálka). Z geometrie plyne, že tloušťka této oblasti je dána vzdáleností rázové vlny od překážky – magnetopauzy, tudíž i tato tloušťka závisí na parametrech slunečního větru.

Dochází zde k dalším změnám parametrů plazmatu, obvykle k nárůstu koncentrace částic, roste teplota a tlak a klesá rychlost, ale tyto změny záleží na konkrétním místě pozorování.

2.5 Magnetopauza (*magnetopause*)

Magnetopauza tvoří hlavní překážku pro sluneční vítr, protože je to oblast, kde dochází k vyrovnání tlaků, a to především dynamického tlaku slunečního větru na vnější straně magnetopauzy a tlaku magnetického pole Země. Jde o velice důležitou hranici, jejíž struktura a dynamika je předmětem diplomové práce. Vzhledem k tomu, že magnetopauze se věnuji podrobněji dále, neuvádím zde další její vlastnosti a charakteristiky.



Obrázek 2: Další oblasti magnetosféry [35].

2.6 Další magnetosférické oblasti

Z dipólového modelu magnetického pole Země plyne existence dvou bodů v blízkosti magnetopauzy, kde je velikost magnetického pole Země nulová. Tyto body – magnetosférické kasy (magnetospheric cusps) - mají velice důležitou úlohu, protože podél nich mohou nabitě částice slunečního větru vstoupit do magnetosféry, aniž by se musely pohybovat napříč magnetickými siločarami.

Součástí složité struktury magnetosféry jsou ještě další oblasti - magnetický plášť (plasma mantle), magnetické laloky (lobes), plazmová a neutrální vrstva (plasmashet, neutral sheet), čelní hraniční vrstva (low-latitude boundary layer) aj., které vznikají v důsledku zmíněné interakce slunečního větru s magnetickým polem. Tyto oblasti však nejsou pro naši práci tak

důležité, proto se jim budeme věnovat jen okrajově, vystačíme s Obr. 2. Podrobně jsou popsány např. v [15].

2.7 Použité souřadnicové systémy

Při popisu pohybu v blízkosti Země používáme různé souřadnicové systémy. Každý z nich je vhodný pro studium jiné oblasti. V práci používáme dva systémy – GSE a GSM. Hlavním kritériem pro výběr systému je proces, který řídí pohyb částic. Je-li pohyb řízen gravitačním polem Země, bývá zpravidla vhodnější volbou systém GSE, řídí-li pohyb magnetické pole Země, používá se častěji GSM. Není-li v další části práce systém uveden, používáme systém GSE, přechod k systému GSM je označen.

2.7.1 GSE – Geocentric Solar Ecliptic System

GSE (Geocentrická Solárně-ekliptická) soustava souřadnic má osu x orientovanou od Země směrem ke Slunci a osa y směřuje proti planetárnímu pohybu. Osa z je stanovena rovnoběžně s pólem ekliptiky. Vzhledem k inerciální vztažné soustavě se soustava GSE pohybuje s roční rotací. V této soustavě souřadnic se zobrazují zpravidla dráhy družic, meziplanetární magnetické pole, rychlost slunečního větru atd. Dále se v ní popisují pohyby, které jsou řízené gravitačním polem země. Rychlost pohybu Země v této soustavě je přibližně 30 km/s ve směru $-y$. Výhodou této soustavy je lehká odstranitelnost aberace slunečního větru (tj. odklon vektoru směru rychlosti slunečního větru od spojnice Slunce-Země).

2.7.2 GSM – Geocentric Solar Magnetic System

GSM (Geocentrická Solárně-magnetická) soustava souřadnic má se soustavou GSE společnou osu x , která směřuje od Země směrem ke Slunci. Osa y je definovaná jako kolmice k ose zemského dipólu tak, že osa dipólu leží v rovině $x - z$. Kladný směr osy je stanoven souhlasně se směrem severního magnetického pólu. Soustava GSM je vůči soustavě GSE otočená kolem osy x . Soustava GSM je vhodná pro zobrazení polohy magnetopauzy i rázové vlny, magnetického pole a rychlosti slunečního větru v přechodové oblasti a magnetického pole v magnetickém chvostu. Obecně se v soustavě GSM zobrazují procesy řízené magnetickým polem Země. Soustava GSM redukuje trojrozměrný pohyb zemského dipólu na pohyb v rovině $x - z$. Pohyb soustavy GSM vůči inerciální vztažné soustavě je složitý – skládá se

z oběhu Země kolem Slunce s roční periodou, navíc se soustava GSM pohybuje kolem směru na Slunce s periodou 24 hodin.

2.7.3 Tilt úhel

Další pojem, který je třeba na tomto místě zmínit, je tzv. tilt úhel, což je úhel sklonu osy magnetického dipólu. Jinak řečeno, je to úhel, který svírá osa magnetického dipólu s osou z souřadného systému GSM. Tilt úhel nabývá kladných hodnot, je-li osa dipólu nakloněná směrem ke Slunci. Tilt úhel tak kromě roční periody způsobené oběhem země kolem se mění i s denní periodou způsobenou otáčením Země. V našem případě je nutné stanovit tilt úhel v době průchodu příslušné družice magnetopauzou, abychom mohli analyzovat vliv sklonu magnetického dipólu na polohu magnetopauzy. K tomuto účelu jsme využívali softwarový program GEOPACK v programovacím jazyce IDL.

2.8 Magnetopauza

Jak je již uvedeno v definici, magnetopauza je definována jako hraniční plocha, kde dochází k vyrovnání dynamického tlaku slunečního větru na jedné straně (tento tlak se skládá z kinetického tlaku částic a z tlaku meziplanetárního magnetického pole) s celkovým tlakem působícím ze strany Země (to je součet tlaku zemského magnetického pole a tlaku magnetosférického plazmatu). Tuto podmínku je možné matematicky zapsat jako

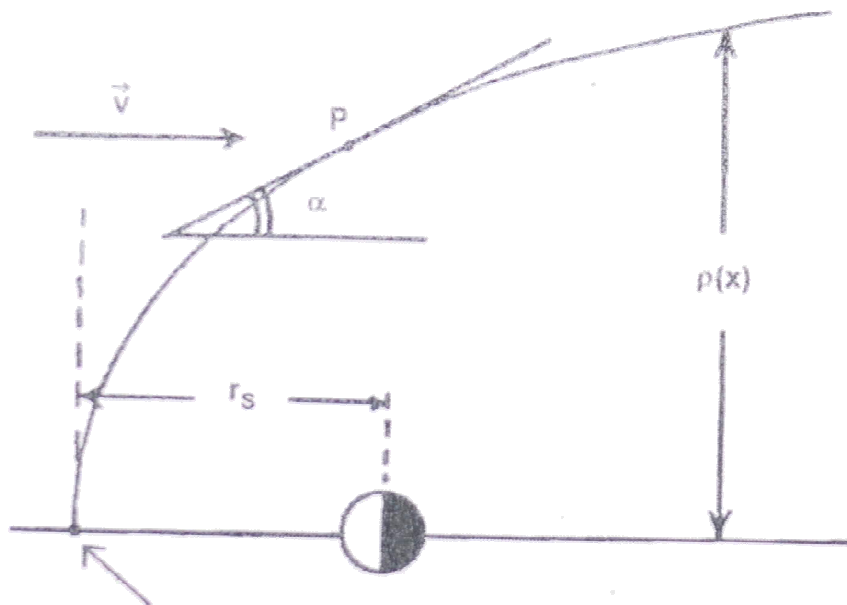
$$(p+B^2/2\mu_0)_{in} = (p+B^2/2\mu_0)_{out} \quad (1)$$

kde p označuje tlak částic, B je vektor magnetického pole, μ_0 označuje permeabilitu vakua a indexy $_{in}$ resp. $_{out}$ označují vnitřní resp. vnější stranu magnetopauzy. Tento obecný vztah bývá často dále zjednodušován. Zanedbává se tlak částic na vnitřní straně magnetopauzy a také tlak meziplanetárního magnetického pole, které je typicky o dva řády nižší než na vnitřní straně. Tím se rovnice redukuje na

$$(B^2/2\mu_0)_{in} = (p)_{out} \quad (2)$$

Z pozorování však vyplývá, že uvedený vztah není možné vždy použít. Může existovat vysoká hodnota IMF a také tlak částic na vnitřní straně magnetopauzy nemusí být malý,

hlavně v případech vysoké geomagnetické aktivity. Také není možné vždy tento vztah použít v oblasti kaspů a v chvostové oblasti, kde může být magnetické pole Země výrazně slabší a roste tak význam IMF. Pro další úvahy použijeme Newtonovu aproximaci [35]. Vychází z představy, že překážka - magnetopauza je pevná a neměnná a je obtékána plazmatem (sluneční vítr). Tato aproximace dává do souvislosti vnější tlak p v okolí bodu P (obrázek 3) a tzv. „flaring“ úhel - úhel, který svírá směr proudění slunečního větru s povrchem magnetopauzy v bodě P.



Obrázek 3: Tzv. „flaring“ úhel α (převzato z [35]).

$$(p)_{out} = k\rho v^2 \sin \alpha + p_0 \quad (3)$$

kde ρ je hustota slunečního větru, p_0 představuje termální tlak a v je rychlost proudění (slunečního větru). Parametr k mění velikost dynamického tlaku slunečního větru na velikost, která na magnetopauzu efektivně působí a lze ho určit výpočtem (jeho hodnota se pohybuje okolo hodnot 0,84-0,89 v závislosti na parametrech slunečního větru - zde jsme zanedbali vnější magnetické pole a položili je $(B^2)_{out} = 0$). Pro určení tvaru magnetopauzy musíme vypočítat polohu tzv. subsolárního bodu R_S (tj. bod na povrchu magnetopauzy ležící na spojnici Země-Slunce).

Jaká je však spojitost mezi magnetickým polem Země a vzdáleností magnetopauzy (resp. subsolárního bodu R_S)? Zanedbáme-li všechna vnitřní pole kromě dipólového momentu d , který je orientovaný ve směru osy z , pak bude magnetické pole mít dipólový tvar a jeho hodnota v místě $(R_S, 0, 0)$ bude $B_d = (0, 0, d/R_S^3)$. K tomuto poli ale přispívá vnitřní pole,

keré v sobě zahrnuje proudy na magnetopauze příspěvkem ve výši zhruba 1,4 B_d . Zanedbáme-li tlak p_0 a položíme $\sin \alpha$ rovný jedné, pak z rovnic (2) a (3) plyne

$$kp_{sw} = [(2,4p)2/2\mu_0]R_S^{-6} \quad (4)$$

Odkud je zřejmé, že R_S je úměrné $p_{sw}^{-1/6}$. Vzdálenost subsolárního bodu od Země je přibližně 10 R_e [10][23] pro průměrné parametry slunečního větru (viz Tab. 1). Následně můžeme vypočítat polohu celé magnetopauzy, ale je to náročné a díky zanedbáním v modelu nepřesné. Dále bylo pozorováno, že poloha magnetopauzy závisí nejen na tlaku slunečního větru, ale také na B_z složce IMF. Je-li komponenta B_z záporná (pole je orientováno jižně), může být magnetopauza až o několik málo R_e blíže k Zemi než při severní orientaci. Je to důsledek přepojování magnetických siločar v IMF a zemské magnetosféry [31].

3 Modely magnetopauzy

Analyticky popsat tvar a polohu magnetopauzy v celé své složitosti za různých podmínek ve slunečním větru není možné. Díky tomu existují zjednodušené modely magnetopauzy a je v podstatě možné rozdělit je na dva přístupy. Prvních z nich je počítačové modelování, kdy je magnetopauza reprezentována sítí bodů a tato síť se mění v závislosti na vstupních parametrech. Tento postup je díky zvyšující se výpočetní kapacitě možné použít se stále větší přesností, avšak potýká se s celou řadou problémů. Magnetopauza má v tomto přístupu určitý tvar, který nemá jeden funkční předpis, a tudíž při změně podmínek je nutné celý tvar přepočítat. Není tak možné na základě tohoto přístupu učinit žádnou předpověď. Problémem tohoto modelu je také nedostatek dat, protože družicová měření nám poskytují data z určitého konkrétního místa v konkrétním čase.

Druhým způsobem je vyjádření magnetopauzy přibližným analytickým vyjádření, které přijímá jako funkční hodnoty vstupní parametry (nejčastěji dynamický tlak slunečního větru a B_z složku meziplanetárního magnetického pole IMF) [23][13][31], některé modely zahrnují i další parametry, např. sklon zemské osy - tilt úhel [5][29]) a je možné tak učinit na jejich základě předpovědi tvaru a polohy magnetopauzy. Některé modely používají různé funkční předpisy pro subsolární a chvostovou oblast [23]. Většina modelů využívá empirická data získaná z družic. Kromě času (a tedy polohy) samotného průchodu magnetopauzou je tedy třeba znát i vstupní parametry modelů, tj. dynamický tlak slunečního větru a orientaci IMF. Ty se většinou získávají z tzv. monitorů slunečního větru - družic, které měří parametry umístěny dále ve slunečním větru, a data je tak nutné trasovat (o tom více v kapitole zdroje dat). Ve své práci používám data z družic THEMIS, Wind, ACE a databáze OMNI.

Autoři jednotlivých modelů neměli k dispozici identické soubory dat, ale každý "svůj" model vytvořil na základě jiného souboru dat. Data obecně pocházejí z různého období a různých družic, byla naměřena za různých podmínek a různých rychlostí odečítání dat, na použitý soubor dat tak může mít vliv fáze slunečního cyklu a také trajektorie družic, z níž byla data získána. Proto také autoři uvádějí platnost modelu jak ve smyslu rozsahu souřadnic, tak také pro rozsah dynamické slunečního větru a meziplanetárního magnetického pole.

První práce, které se zabývaly změnami tvaru a polohy magnetopauzy, byly věnovány hledání jejich odpovídajícího geometrického vyjádření. Tvar magnetopauzy postupně počítali např. [22][9][8] za předpokladu dipólového magnetického pole Země. Výpočty však vedly k velmi komplikovaným tvarům povrchu magnetopauzy, proto mnoho pokusů směřovalo k fitování

experimentálních dat. Výsledkem jsou různé modely popisující tvar i polohu magnetopauzy [12][23][30][31][29]. Z celého přehledu modelů se v této práci věnujeme hlavně těm, u kterých bylo prokázáno, že jejich předpovědi vykazují nejmenší odchylky od reálně naměřených dat, např. [26][27], a se kterými v této práci srovnáváme svoje data. O některých dalších se zmíníme jen letmo.

Jedním z prvních modelů magnetopauzy je model Formisano 1979 [10], který fituje magnetopauzu jako rotační elipsoid na základě jediného parametru – tlaku slunečního větru. Dalším modelem, který fituje magnetopauzu rotačním elipsoidem, je model Sibeck a kol. (1991) [32] a jeho zdokonalená verze Roelof a Sibeck (1993) [25]. V těchto modelech je již rotační elipsoid závislý na dvou parametrech – tlaku slunečního větru p_{sw} a B_z složky IMF.

Model Kuznetsov a Suvorova (1996) [16] byl získán i na základě dat z průchodů družic magnetopauzou na geostacionárních drahách, tj. při extrémních podmínkách. Magnetopauza je v modelu fitována dvěma parabolami. Speciální model připravil Boardsen a kol (2000) [5], ten popisuje polohu magnetopauzy ve vysokých magnetických šířkách a uvažuje tilt. Závislost na tiltu pozorovali v těchto šířkách i autoři práce [29], kteří se pokusili tuto závislost korigovat.

S následujícími modely srovnávám experimentální data.

3.1 *Petrinec a Russell (1996) [23]*

K vývoji tohoto modelu byly použity průchody magnetopauzou družicemi ISEE 2 a data ze slunečního větru a meziplanetárního magnetického pole z družice IMP 8. Celkem bylo zpracovááno 6273 průchodů. Model používá dvě funkční formy pro určení polohy magnetopauzy. První část popisuje denní část magnetopauzy ($X_{GSE} > 0$ Re), druhý předpis popisuje magnetopauzu v noční oblasti ($X_{GSE} < 0$ Re). K vývoji modelu byly použity jak magnetohydrodynamické výpočty, tak byly nafitovány získané funkce [23].

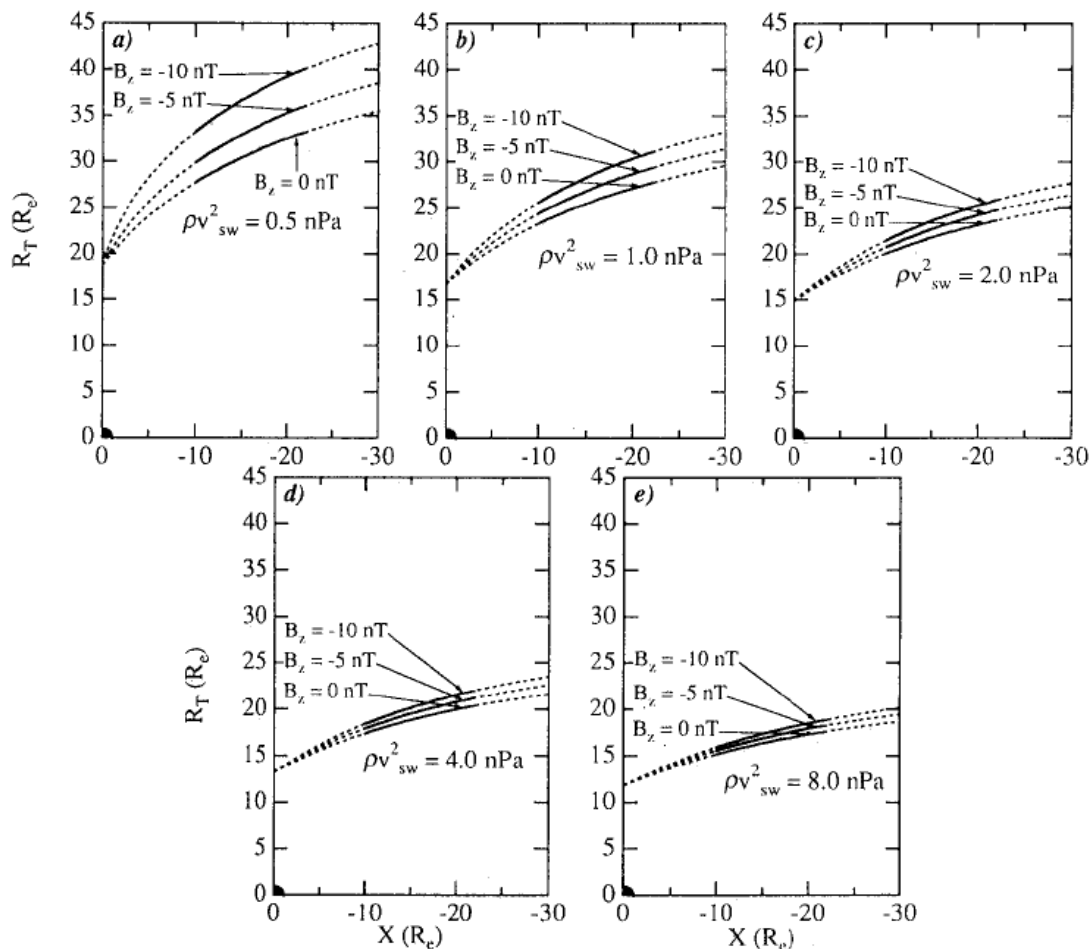
$$r(\Theta) = \frac{\frac{14,63}{\sqrt[6]{\frac{p_{sw}}{2,1}}}}{1 + \left(-1 + \frac{14,63}{10,3 + m_1 B_z} \right) \cos \Theta} \quad (5)$$

kde $m_1 = 0$ pro $B_z > 0$ a $m_1 = 0.16$ pro $B_z < 0$. Rovnice (5) je zapsána v polárních souřadnicích, vzdálenost $r(\Theta)$ označuje vzdálenost magnetopauzy ve směru úhlu Θ . Pro ($X_{GSE} > 0$ Re), má závislost funkční předpis

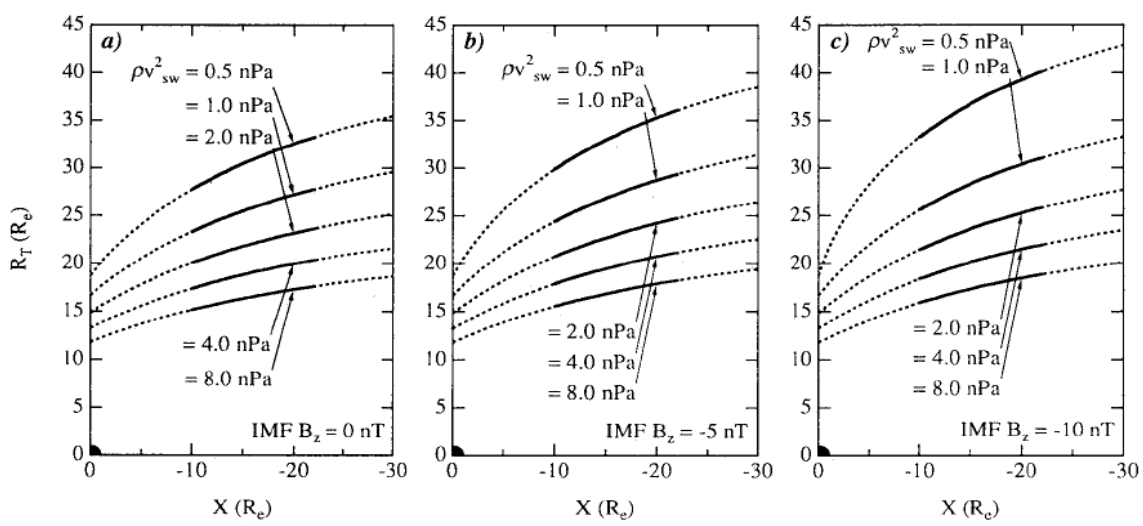
$$\rho(x) = \frac{-2}{0.085} \left[\arcsin \sqrt{\frac{2,98e^{0.085x} (0.152 + m_2 B_z)}{p_{sw}^{0.0524}}} - \arcsin \sqrt{\frac{2,98(0.152 + m_2 B_z)}{p_{sw}^{0.0524}}} \right] + \frac{14,63}{\sqrt[6]{2,1} p_{sw}} \quad (6)$$

kde $m_2 = -0,00137$ pro IMF $B_z > 0$ a $m_2 = -0,00644$ pro IMF $B_z < 0$. Platnost modelu je uvedená v rozsahu pro $-6 \text{ nT} < B_z < 6 \text{ nT}$ a $0,1 \text{ nPa} < p_{sw} < 6 \text{ nPa}$. V tomto rozsahu autoři ověřili platnost modelu. Podle studie [27], která porovnávala různé modely v oboru jejich platnosti pro stejný soubor dat, tento model vykazuje lepší shodu za terminátorem

PETRINEC AND RUSSELL: NEAR-EARTH MAGNETOTAIL SHAPE AND SIZE



Obrázek 4: Část ploch modelu Petrinec a Russell (1996) pro různé hodnoty tlaku slunečního větru.



Obrázek 5: Část ploch modelu Petrinec a Russell (1996) pro různé hodnoty IMF B_z .

3.2 Shue a kol. (1997) [30]

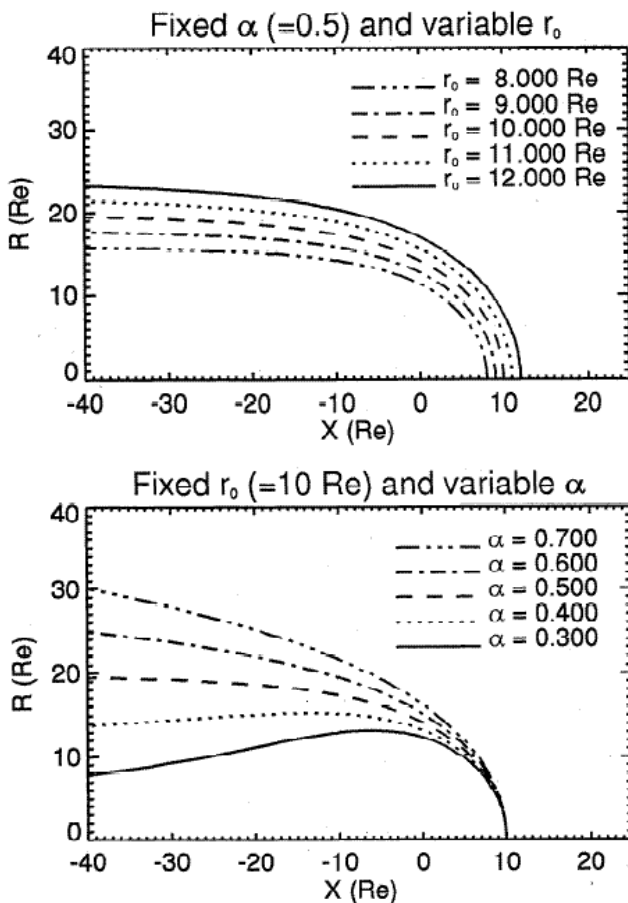
Model Shue a kol. (1997), popisuje magnetopauzu funkční formou ve tvaru:

$$r(\Theta) = r_0 \left(\frac{2}{1 + \cos \Theta} \right)^\alpha \quad (7)$$

Autoři pro tento model použili data z družic ISEE 1 a 2, AMPTE a IMP 8. Celkově použili 533 průchodů těchto družic magnetopauzou. Jejich funkční tvar je funkcí nezávislých proměnných p_{sw} a B_z složky IMF. Autoři fitovali data pomocí metody vícenásobného určení parametrů [30]. Výhodou modelu je to, že má pro denní i noční stranu magnetopauzy stejný

tvar. Funkční forma má také stejný tvar pro obě dvě orientace magnetického IMF B_z , avšak mírně se liší parametry této funkce.

Na rozdíl od jiných funkčních předpisů, které popisují magnetopauzu jako plochu rotačního elipsoidu [10][25][32], může tato forma popisovat magnetopauzu jako uzavřenou (pro $\alpha < 0,5$), otevřenou (pro $\alpha > 0,5$) nebo se asymptoticky blížící k chvostu (pro $\alpha = 0,5$). Důležitým rozdílem oproti jiným modelům i oproti teorii je závislost vzdálenosti subsolárního bodu r_0 jako 6,6. odmocnina tlaku slunečního větru (oproti 6. mocnině vyplývající z teorie). Tato mocnina nejlépe fitovala dostupná experimentální data použitá pro model.



Obrázek 6: Model Shue a kol. (1997) pro různé parametry R_0 a α .

Úplný předpis modelu Shue a kol. (1997) [30] tedy vypadá následovně:

$$r(\Theta) = r_0 \left(\frac{2}{1 + \cos \Theta} \right)^\alpha \quad (7)$$

$$\alpha = (0.58 - 0.01B_z)(1 + 0.01p_{sw}) \quad (8)$$

$$r_0 = \frac{11,4 + m_1 B_z}{\sqrt[6,6]{p_{sw}}} \quad (9)$$

Přitom pro $B_z > 0$ platí $m_1 = 0,13$ a pro $B_z < 0$ platí $m_1 = 0,14$.

Autoři uvádí platnost modelu v rozsahu $0,5 \text{ nPa} < p_{sw} < 8,5 \text{ nPa}$ v rozsahu tlaků a $-18 \text{ nT} < B_z < 18 \text{ nT}$ v rozsahu magnetického pole IMF. Tato omezení jsou dána hlavně malým množstvím dat, které autoři měli k dispozici mimo uvedené rozsahy. Tyto podmínky jsou však někdy nedostatečné, neboť nepokrývají extrémní případy.

3.3 Shue a kol. (1998) [31]

Tento model je zlepšením předchozího modelu, Shue a kol (1997) [30]. Používá data z průchodů družic LANL 1994-084, GMS, Interball 1 a Geotail magnetopauzou z doby kolem 11. ledna 1997 2:00 UT, kdy na konci události z 6.-11. ledna 1997 spojené s magnetickým oblakem byla magnetopauza stlačena pod geostacionární dráhu. Tento model používá dynamické tlaky slunečního větru p_{sw} až do velikosti 60 nPa a je tak rozšířením předchozího modelu pro extrémně vysoké tlaky slunečního větru. Model zavádí nelineární závislost parametrů na podmínkách ve slunečním větru, což reprezentuje saturaci vlivu dynamického tlaku slunečního větru na tzv. „flaring úhel“ magnetopauzy a saturaci vlivu tlaku slunečního větru na vzdálenost bodu r_0 .

V případě lineární extrapolace závislosti na B_z by model předpovídal nefyzikální, extrémně blízké hodnoty r_0 (až nulovou) pro silná jižní pole B_z , autoři tedy předpokládají nelineární závislost r_0 na p_{sw} a poté pomocí gradientové metody [4] určují parametry ve formě. Tyto parametry následně zpřesňují pomocí 200 iterací metody fitů více parametrů. Výsledná funkční forma vypadá následovně:

$$r_0 = \{10.22 + 1.29 \tanh[0.184(B_z + 8.14)]\} D_p^{-\frac{1}{6.6}} \quad (10)$$

$$\alpha = (0.58 - 0.007B_z)[1 + 0.024 \ln(Dp)] \quad (11)$$

Funkční předpis modelu, zůstává stejný jako vzorec (7), tedy,

$$r(\Theta) = r_0 \left(\frac{2}{1 + \cos \Theta} \right)^\alpha \quad (12)$$

Autoři modelu explicitně neuvádí rozsah platnosti modelu, model je však zlepšením modelu předchozího. Dá se tedy předpokládat, že pro magnetické pole B_z bude mít stejný obor platnosti jako model Shue a kol. (1997) [30], tedy $-18 \text{ nT} < p_{\text{sw}} < 18 \text{ nT}$ pro hodnoty B_z . Autoři neuvádí ani explicitní rozsah tlaků, pro které je model platný, avšak zmiňují [31], že pro odvození modelu používají tlaky až o velikostech 60 nPa, můžeme tedy předpokládat platnost modelu v rozsahu $0,5 \text{ nPa} < p_{\text{sw}} < 60 \text{ nPa}$.

4 Zdroje dat

K experimentálnímu ověření modelů polohy a tvaru magnetopauzy potřebujeme, jak jsme již zmínili, databázi reálně pozorovaných průchodů družice magnetopauzou a parametry slunečního větru a IMF. Dále potřebujeme parametry, se kterými porovnááme případné odchylky od modelů. Data, která jsme v práci používali, by se tak dala v principu rozdělit do tří skupin.

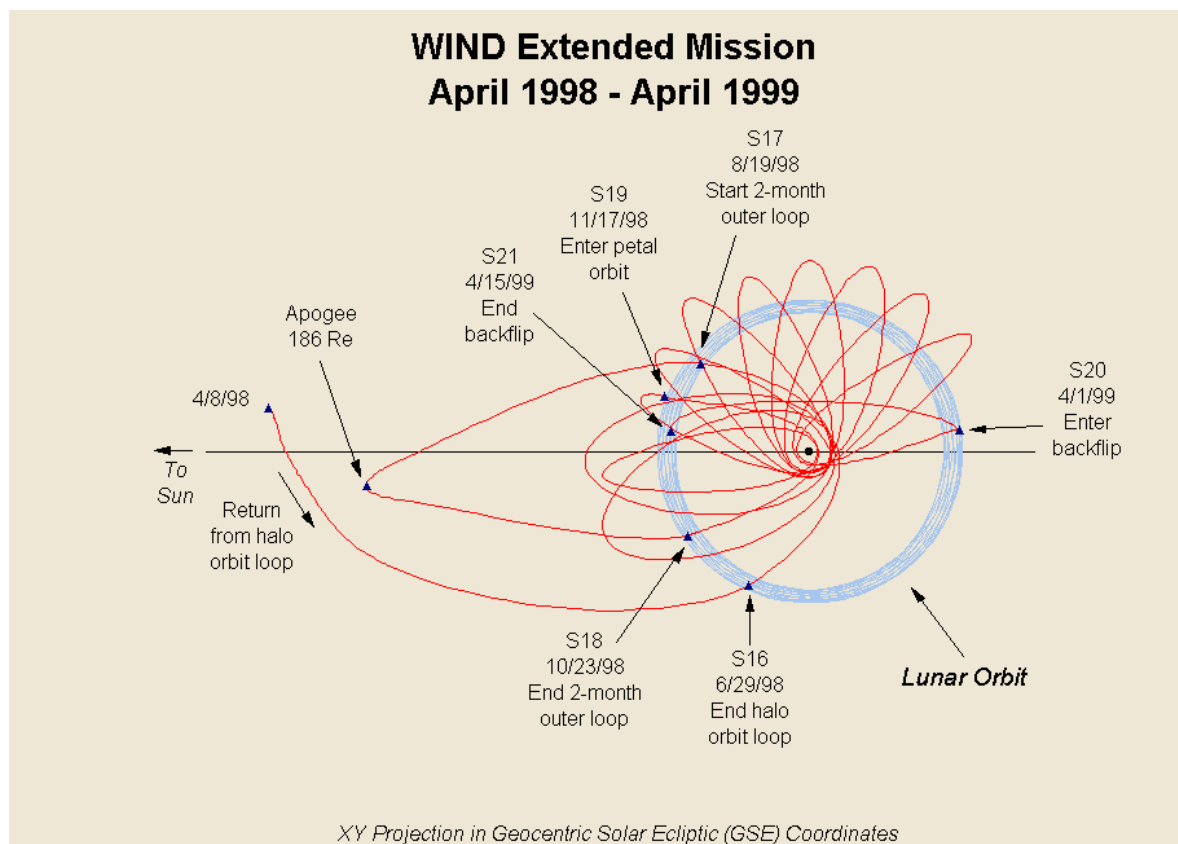
1. Data související se skutečnou polohou magnetopauzy, jedná se tedy o čas průchodu družice magnetopauzou a souřadnice družice (tedy i magnetopauzy) v daném okamžiku. Tato data jsem získával z družic THEMIS, jak bude popsáno dále.
2. Data použitá jako vstupní parametry pro výpočet předpokládané polohy magnetopauzy z modelů. Jedná se o podmínky ve slunečním větru, tj. jeho rychlost a koncentrace částic, ze které počítáme tlak a směr meziplanetárního magnetického pole IMF (resp. jeho B_z složku). Tato data jsem získával z více zdrojů – konkrétně z družic Wind, ACE a THEMIS B a databáze OMNI.
3. Parametry popisující stav vnitřní magnetosféry, se kterými jsem srovnával odchylky pozorované polohy magnetopauzy od modelové. Naše analýza odchylek tedy zahrnovala jak porovnání pro různé parametry slunečního větru, tak také vliv tilt úhlu a magnetosférických indexů AE a DST. Pro získání hodnot tilt úhlu jsme použili volně šiřitelný programový modul GEOPACK, indexy AE a DST jsou k dispozici na Internetu (více v kapitolách věnovaných těmto indexům).

4.1 *Monitory slunečního větru*

Družice, které monitorují podmínky ve slunečním větru, poskytují prakticky nepřetržité zpravodajství o tzv. kosmickém počasí téměř v reálném čase a poskytují varování (s předstihem asi jedné hodiny) o případně vznikajícím nebezpečí geomagnetických bouří, které mohou přetížít přenosové sítě, rušit komunikaci na zemi a představují nebezpečí pro astronauty [41].

4.2 Projekt Wind

Družice Wind byla vypuštěna 1. listopadu 1994 jako první ze dvou družic v rámci projektu GGS (Global Geospace Science) a je součástí projektu NASA ISTP. V první fázi družice Wind obíhala po značně komplikované trajektorii s maximálním apogee, $250 R_E$ (viz Obr.7). V době našich data se již družice Wind pohybuje v okolí Lagrangova bodu, tj. před Zemí. Družice obsahuje jak přístroje na měření vlastností nabitých částic, tak přístroje pro měření elektrického a magnetického pole. Většina empirických modelů magnetopauzy závisí na vlastnostech slunečního větru a meziplanetárním magnetickém poli. Použil jsem tak data z přístrojů MFI [17][47] a SWE [21][48]:



Obr. 7: Počáteční trajektorie družice Wind. V období, kdy jsme získávali data z družice Wind se družice vyskytovali v okolí bodu L1 (1 AU od Země).

4.2.1 Přístroj MFI [47]

MFI (Magnetic Field Investigation) měří ve velkém měřítku meziplanetární magnetické pole IMF a jeho fluktuační. IMF ovlivňuje přenos energie a zrychlení částic ve slunečním větru a dynamické procesy v zemské magnetosféře. Přístroj poskytuje široký dynamický rozsah měření od $\pm 0,004$ nT až do 65,536 nT v osmi diskretních rozsazích.

Přístroj MFI se skládá ze dvou trojosých kompenzačních magnetometrů umístěných na 12metrových anténách a jednotky pro zpracování signálu umístěné uvnitř družice.

Magnetometry jsou umístěny mimo družici kvůli minimalizaci vlivu magnetického generovaného ostatními přístroji na palubě. Měření může probíhat ve třech režimech: Jeden vektor za 92s pro klíčové parametry dat, 10.9 vektorů za sekundu a 44 vektorů za sekundu pro analýzu fluktuací. K naší analýze jsme používali 1minutová data.

4.2.2 Přístroj SWE [48]

Přístroj SWE (Solar Wind Experiment) měří vlastnosti elektronů a iontů v oblasti foreshocku (částice s energiemi v řádu kiloelektronvoltů) a oblastech slunečního větru. Z toho je možné odvodit rychlost slunečního větru, teplotu částic a jejich koncentraci. Přístroj poskytuje 3D distribuční funkci rychlosti iontů s energiemi 200 eV až 8 keV, 3D rozdělení rychlostí podzvukových toků plazmy včetně elektronů a difúzně odražených iontů v oblasti foreshocku s energiemi v rozsahu 7 eV až 22keV. Také postihuje úhlové rozdělení svazků elektronů slunečního větru ve směru a proti směru meziplanetárního magnetického pole v rozsahu energií 5 eV až 5 keV.

Přístroj SWE se skládá z pěti integrovaných senzorů a jednotky pro zpracování dat. Měření 3D distribuční funkce zajišťují dva Faradayovy válce, které poskytují široký úhel měření a měří charakteristiku toku částic během jedné otáčky družice. Měření 3D rozdělení iontů a elektronů v plazmě s Machovým číslem menším než 1 zajišťuje 6 válcových elektroměrů zvaných VEIS (Vector Elektron-Ion Spectrometers), které jsou uspořádány do dvou trojosých sad. 1 toroidální elektrostatický analyzátor měří rozdělení rychlosti elektronů. Použili jsme 1minutová data, z nichž jsme vytvořili 10 minutový medián.

4.3 Družice ACE [34][18]

Družice ACE (Advanced Composition Explorer) byla vypuštěna 25. srpna 1997 z Kennedy Space Center na Floridě [41]. Družice ACE obíhá okolo Lagrangeova bodu (bod vyrovnaní gravitační síly Země a Slunce) ve vzdálenosti 1,5 mil. km od Země. Na tomto místě má výborné podmínky pro sledování slunečního větru, meziplanetárního magnetického pole (IMF) a vysokoenergetických částic urychlených Sluncem, ale také urychlených část z heliosféry i oblastí mimo ni [41]. Družice ACE má na palubě celkem 9 přístrojů [20], které poskytují jak částicová měření, tak měření vlastností elektromagnetického vlnění. Ve své práci jsem používal data z přístrojů SEPICA (Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer) a MAG (Magnetometer).

4.3.1 Přístroj SEPICA [20][18]

Tento přístroj sbírá informace o částicích šířících se ze Slunce. Detekuje kinetickou energii částic a také náboj prolétávajících iontů. Je hlavním detekčním přístrojem na palubě ACE k určení distribuce náboje a energie. Měří iontový náboj, kinetickou energii a pro částice s energií vyšší než 0,2 MeV i náboj jádra iontů. U iontů s nižší atomovou hmotností také dokáže rozlišit izotopy – například ^3He a ^4He . Přístroj také dokáže rozlišit neutrální částice od iontů. Přístroj svým návrhem vychází z přístroje ULEZEQ (Ultra Low Energy Z E Q Analyser) z družice ISEE [11]. Senzor kombinuje určení elektrostatického odchylení přichozích iontů v sadě kolimátor-analyzátor pomocí měření pozice dopadu v rovině detektoru a pomocí určení dE/dx v elektrostatickém teleskopu s kombinací detektorů pevného stavu. [20]. Pro analýzu jsme používali minutová data a z nich vytvořili 10 minutový medián.

4.3.2 Přístroj MAG [34]

Až na drobné modifikace, je přístroj ACE/MAG z družice ACE s magnetometrem na družici Wind. Přístroj měří velikost a směr meziplanetárního magnetického pole (IMF). Experiment průběžně poskytuje data v rozlišení 3,4 nebo 6 vektorů magnetického pole za sekundu a také rychlou Fourierovu transformaci (FFT) založenou na 24 vektorech za sekundu, z nichž každý pracuje s blokem 512 vzorků. Z přístroje MAG jsme používali 1 vteřinová data.

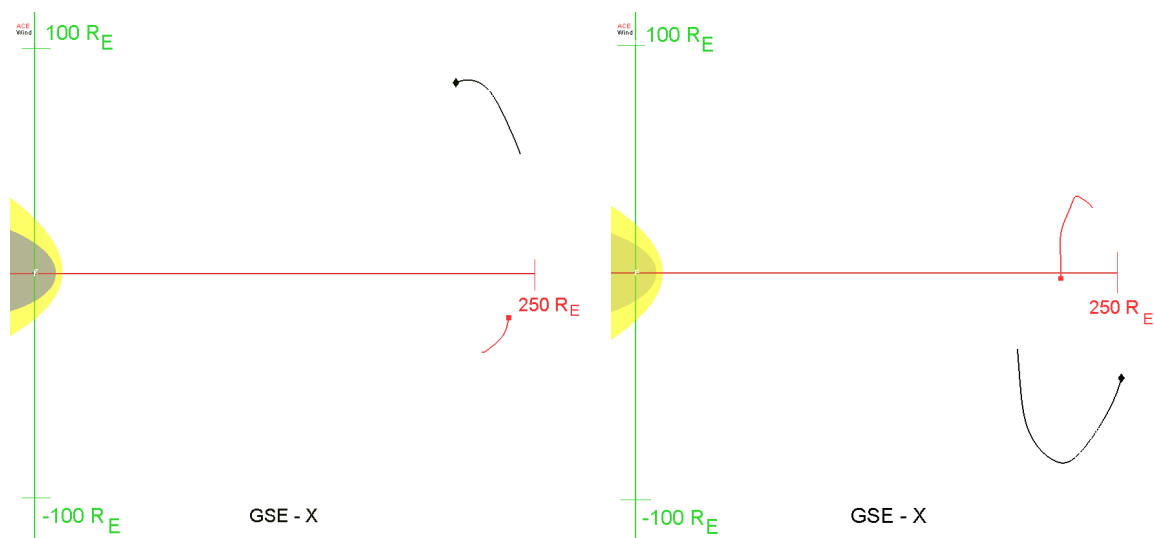
Přístroj je složen ze dvojic triaxiálních cívek. Každý ze dvou identických senzorů se nachází na anténě. Digitální procesor používá 12bitový A/D převodník, který zpracovává malé fluktuace pole. Přístroj má 8 dynamických rozsahů od 4 nT až po 65 536 nT, tomu odpovídá digitální (12 bitové) rozlišení 0,001 nT až 16 nT. Intrinsický posun nulové hodnoty se očekával méně 0,1 nT za dobu 6 měsíců.

4.4 Databáze OMNI [42]

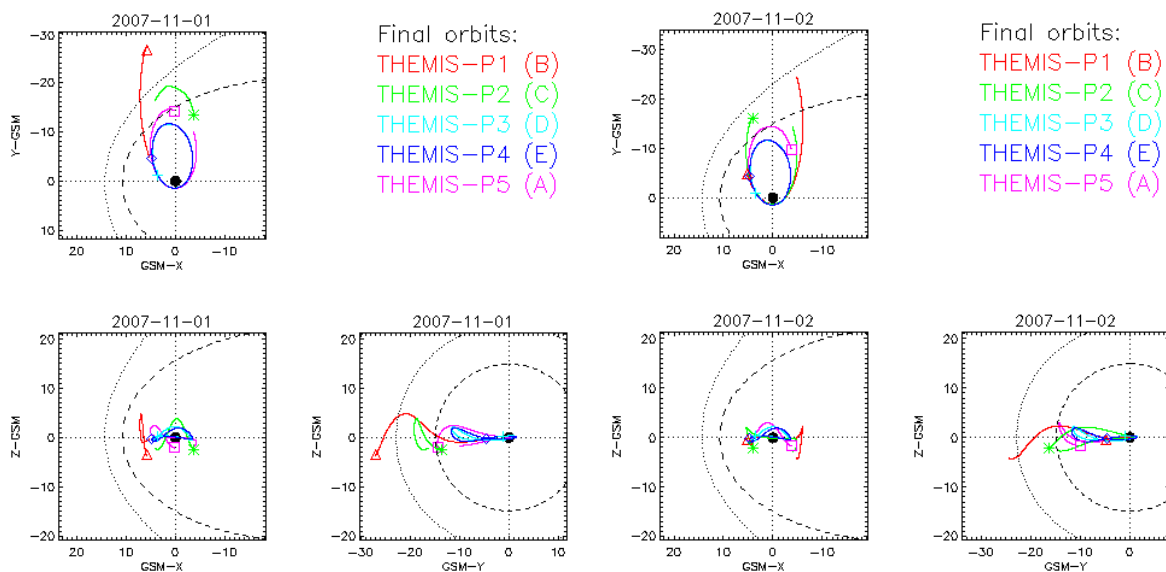
Databázi OMNI vytváří NASA a data jsou přístupná na adrese <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/hw.html>. Jedná se o jednotnou databázi vytvořenou z měření

z družic Wind, IMP 8, Geotail a ACE. Kromě této databáze je možné na této adrese také najít ohromné množství dat z jiných družic provozovaných NASA.

Data v databázi OMNI byla vždy trasována od polohy příslušné družice do místa subsolárního bodu. Databáze také obsahuje různé průměry dat, podle toho, která data jsou z dané doby k dispozici (družice se plně nepřekrývají v dobách, ze kterých poskytují data, družice se také nacházejí každá v jiné poloze. Často se také stává, že v určitém období má družice technické problémy a tak z daného období nejsou data). V práci jsme používali data z OMNI, která byla dostupná pro všechny případy, avšak nevýhodou těchto dat je skutečnost, že mají různou přesnost, neboť byla získána z různých družic.



Obr. 8: Trajektorie v souřadnicích GSE v rovině xy pro družice WIND (černá) a ACE (červená) v pozorovaném období tj. listopad 2007 (vlevo) a červenec-srpen 2008 (vpravo). Pro ilustraci je zobrazena modelová plocha magnetopauzy a rázové vlny (žlutě).



Obrázek 9 (vlevo) a 10 (vpravo): Zobrazení jednodenních trajektorií družic Themis ve dnech 1. listopadu 2007 (vlevo) a 2. listopadu 2007 (vpravo).. Družice Themis B (červeně) se 1. listopadu vrací ze slunečního větru, přechází přes rázovou vlnu, prolétává přechodovou oblastí, přechází přes magnetopauzu (čárkovaná čára) do magnetosféry. Celý den 2. listopadu 2007 stráví v magnetosféře a v přechodové oblasti, nelze ji tak použít jako monitor slunečního větru.

Na obrázku 8 jdou názorně vidět omezení, která existují při použití různých monitorů slunečního větru. Monitory ACE a WIND jsou velmi vzdálené od Země (družice WIND se nacházela v intervalu $202 \text{ Re} < X_{\text{GSE}} < 250 \text{ Re}$, družice ACE v intervalu $225 \text{ Re} < x < 240 \text{ Re}$). Díky takto velké vzdálenosti dochází k nepřesnostem při trasování slunečního větru. Dále si můžeme všimnout velkého vychýlení družice WIND ve směru osy Y_{GSE} (v listopadu 2007 60 až 97 Re, v období červenec-srpen 2008 -40 až -100 Re). Bohužel z družice ACE z velké části nejsou data dostupná (pro více než třetinu všech případů).

Naopak družice THEMIS B, je velmi blízký monitor slunečního větru, zde však velkou část své oběžné doby stráví uvnitř magnetosféry a v přechodové oblasti, jak je vidět z Obr. 9 a 10.

4.5 Projekt THEMIS [2]

Družice THEMIS neboli Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms byly vypuštěny 17. února 2007 z Kennedy Space Center na Floridě. Jedná se o pěti identických družic, které poskytují vícebodová měření s vysokým časovým rozlišením. Trajektorie družic se postupně mění. V prvotní fázi obíhají po stejné trajektorii s malou časovou odlehlostí (jakoby "za sebou"). V další fázi se jejich trajektorie liší (Obr. 11), každá

družice má různé apogeum ($6 R_E$ až $30 R_E$). Pro studium magnetopauzy to tak znamená unikátní možnost jak studovat drobné změny polohy, její lokální deformace podobné jevy. To byl důvod, proč naše studie zahrnuje data z roku 2007. Na druhou stranu, použili jsme i data z roku 2008, kdy jsme mohli využít nové dráhy družic THEMIS a použít družici B jako blízkého monitoru slunečního větru a porovnat výsledky se vzdáleným monitorem. Jak je vidět z Obr. 9 a 10, případů, kdy můžeme tento monitor slunečního větru plně využít, není mnoho, protože velkou část své oběžné doby stráví uvnitř magnetosféry a v přechodové oblasti.

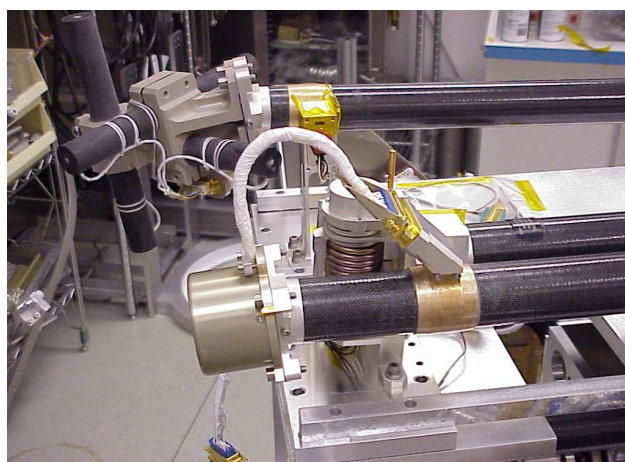
Družice má na palubě celou řadu přístrojů, v této diplomové práci jsem používal data především z přístroje FGM (Flux Gate Magnetometer) [3], ESA (Electrostatic Analyzer) [19] a SST (Solid State Telescope).



Obrázek 11: Trajektorie družic THEMIS. V prvotní fázi (vlevo) obíhají po stejné trajektorii s malou časovou odlehlostí. V dalších fázích (vpravo) se jejich trajektorie liší.

4.5.1 Přístroj FGM [3]

V principu se jedná o magnetometr, který pomocí třech navzájem na sebe kolmých cívek měří



tří komponenty meziplanetárního magnetického pole (IMF). Také měří vlny s nízkou frekvencí (do 64 Hz). Družice jsou identické, na každé družici je tak umístěn jeden přístroj FGM. Přístroj je velice citlivý – měří amplitudu pole v rozsahu od 0,1 nT do 30 nT a je schopen zaznamenat rozdíl v řádu 0,01. My jsme používali data s přesností na 0,01 nT.

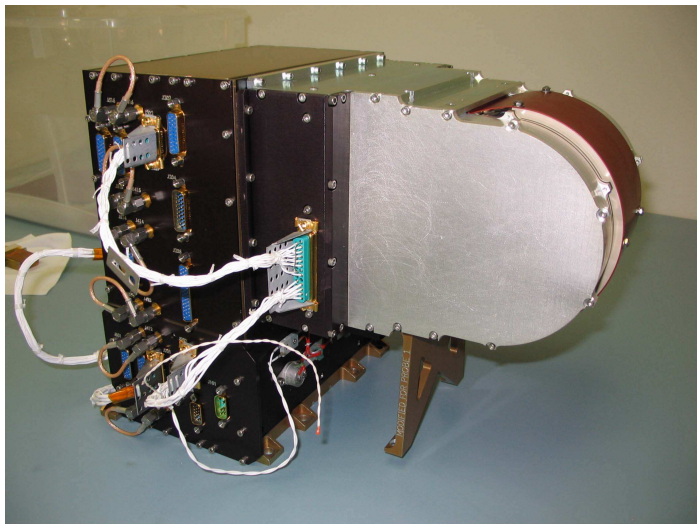
Obrázek 12: Přístroj FGM

4.5.2 Přístroj ESA [19]

Přístroj ESA (Electrostatic Analyzer) měří kolik elektronů a iontů s určitou energií projde z určitého směru v daném rozsahu energií (distribuční funkci částic) ~ 3 eV - 30 keV. Tyto elektrony a ionty jsou zodpovědné za vznik polární záře. Přístroj ESA umožňuje určit hustotu, teplotu a rychlost okolních částic (plazmatu) [45]. Přístroj měří částice v plném úhlu (360°).

Senzory přístroje ESA zabírají úhel 180°x5°. Jak ale družice rotuje (s periodou 3s), tak přístroj zabírá plný úhel. Celý přístroj se skládá ze dvou senzorů – pro elektrony a ionty.

Jedná se vlastně o hemisférický hmotnostní spektrometr, kdy nabitě částice vstupují do



spektrometru, avšak jen částice v určitém rozmezí energií jsou zakřiveny elektrickým polem přístroje tak, že dopadnou na senzor. Ten zaznamená počet dopadajících částic. Pomocí změny napětí (a tedy elektrické intenzity) ve přístroji můžete měnit rozsah energií, které dopadnou na senzor. Používali jsme data s periodou jedné otáčky, tj. 3s.

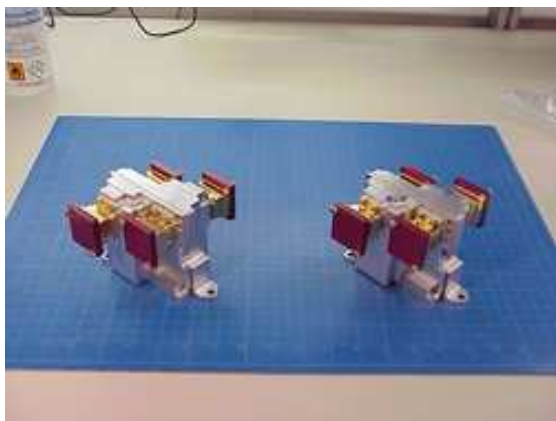
Obrázek 13: Přístroj ESA.

4.5.3 Přístroj SST

Cílem přístroje SST (Solid State Telescope) je přispět k určení distribuční funkce elektronů a iontů. Přístroj měří v rozsahu 25 keV až 6MeV, jeho cílem je tak doplnit distribuční funkci o informace o energetických částicích v uvedeném rozsahu energií.

Přístroj SST je tvořen dvěma jednotkami SST. Každá jednotka SST má tvar kvádrů a obsahuje v sobě tři křemíkové destičky detektorů. Na jedné jednotce je z boku umístěn magnet, který odchyluje kladné ionty a vpouští dovnitř pouze elektrony. Druhá jednotka SST obsahuje kousek fólie, která blokuje kladné ionty a propouští dovnitř jen elektrony. Přístroj má v sobě zabudovanou ochranu, která umožňuje jej ochránit před silnými "kruhovými proudy" (ring current), což zvyšuje životnost přístroje.

Na palubě jsou dva přístroje SST (každý se skládá ze dvou jednotek SST). Tyto přístroje jsou umístěny tak, že snímají vzájemně opačné výseče. Každý z nich zabírá výseč 74° x 360°, družice rotuje, společně tak zabírají 148° x 360° pro elektrony i ionty.



Obrázek 14: Přístroj SST.

4.6 Magnetosférické indexy

Vnitřní stav magnetosféry se často charakterizuje tzv. magnetosférickými indexy. Indexů je celá řada (např. AE, DST, K, Kp), liší se např. v tom, k jaké oblasti magnetosféry se vztahují (ekvatoriální, aurorální..) a také v časovém rozlišení, ve kterém jsou k dispozici. Následuje podrobný popis jen indexů AE a DST, se kterými jsme v práci srovnávali.

4.6.1 AE Index

AE Index neboli Auroral Electrojet Index je odvozen z odchylek horizontální složky geomagnetického pole v oblasti pólů na 10 - 13 observatořích. Data se normalizují tak, že každá observatoř zprůměruje svých 5 neklidnějších dní za poslední měsíc. Tato hodnota se odečte od každé hodnoty s rozlišením jedné minuty, poté se ze všech stanic vybere nejnižší a nejvyšší hodnota a tak se definují hodnoty AU a AL. Rozdíl mezi AU a AL se nazývá jako AE index a střední hodnota, tj. $(AU + AL)/2$ se nazývá AO index. Termínem AE indexy se obvykle myslí tyto 4 indexy (AU, AL, AE a AO). Data jsou k dispozici v minutových intervalech.

4.6.2 DST Index

DST Index neboli Disturbance Storm Time Index je měřítkem geomagnetické aktivity a používá se k určování magnetických bouří. Vyjadřuje se v nanotesla a vytváří se jako rozdíl mezi průměrnou horizontální složkou intenzity magnetického pole ve středních magnetických šířkách a na magnetickém rovníku. Záporná hodnota DST indexu signalizuje probíhající magnetickou bouří. Čím nižší je hodnota DST indexu, tím je bouře silnější.

Index DST je možné použít jako měřítko intenzity magnetické bouře, protože intenzita magnetického pole na povrchu Země v malých zeměpisných šířkách je nepřímo úměrná energii kruhového proudu proudícího z východu na západ (ring current), který v průběhu bouře stoupá. Nepřímá úměrnost mezi horizontální složkou magnetického pole a energií kruhového proudu se nazývá Dessler-Parker-Schopkeův vztah. K DST indexu přispívají i jiné proudy, nejvíce proud na magnetopauze.

DST index také souvisí s podmínkami ve slunečním větru. Pouze pokud v slunečním větru existuje elektrické pole s východní orientací (čemuž odpovídá meziplanetární magnetické pole IMF orientované na jih), dochází k posílení kruhového proudu, což se projeví jako snížení indexu DST.

Nejprve probíhaly pokusy o zavedení indexu [14][37], až jej nakonec zavedl Sugiura a Hendrieks [38]. Hodnoty indexu DST jsou k dispozici od roku 1957, sbírají se ze 4 geomagnetických observatoří, z nichž každá vypočte svůj vlastní index. Výsledný DST index se pak na základě těchto indexů přepočte na magnetický rovník a zveřejňuje je například organizace IAGA (International Association of Geomagnetism & Aeronomy). Index DST je k dispozici v minutových intervalech.

5 Cíl práce

Sluneční vítr a jeho interakce s magnetickým polem Země je předmětem řady mezinárodních výzkumných programů jako je Space Weather nebo International Living With the Star, na kterých se podílí i Katedra fyziky povrchů a plazmatu. 17. března 2007 bylo na oběžnou dráhu vypuštěno pět družic projektu Themis. Tyto družice měří na různých oběžných drahách parametry plazmatu, elektrická a magnetická pole, a tvoří tedy dokonalý komplex pro studium morfologie magnetosféry a jejích změn v důsledku sluneční činnosti. Představuje tak výbornou možnost studia magnetopauzy, kdy je možné používat data z více poloh a přím mít blízký monitor slunečního větru.

Jak vyplývá z přehledu v předchozí kapitole, magnetopauza je nejvýznamnější hranicí tvořící nejen překážku pro sluneční vítr, ale procesy, které se na ní odehrávají, ovlivňují i další děje v blízkosti Země. Dá se říci, že je v jistém smyslu rozhraním mezi vnějším kosmickým prostředím a Zemí (a jejím nejbližším okolím). Při studiu morfologie magnetosféry jsme se zaměřili hlavně na dynamiku jejího pohybu, a to nejen v důsledku změn parametrů slunečního větru, ale sledovali jsme i její vlastnosti při různém stavu vnitřní magnetosféry (reprezentovaném geomagnetickými indexy) a porovnávali i odlišnosti změn její polohy ve dvou lokálních časech.

Pro studii jsme zvolili družice projektu Themis, protože na denní straně nebylo doposud provedeno systematické pozorování polohy magnetopauzy a jejích změn. Všechna pozorování použitá například pro ověření modelů pocházejí z různých družic, jejichž data jsou jednak z přístrojů měřících na odlišných fyzikálních principech, tak s různým časovým rozlišením a zpracovaných různou metodikou. Od využití družic Themis vybavených identickými přístroji a řízeny stejným programovým vybavením jsme si slibovali získání dostatečného objemu dat o průchodu družic magnetopauzou v poměrně krátkém časovém období, což umožní kvalitní a systematickou studii. Navíc po změně konfigurace družic, kdy se zvýšila apogea sond Themis B a C, mohla být jako monitor slunečního větru použita i data z těchto sond (při zachování výhody stejných přístrojů měřících s podobným časovým rozlišením).

Konkrétně lze tento cíl rozdělit do několika dílčích úkolů:

- (1) Vybudovat dostatečně velkou databázi obsahující data o průchodech družic Themis magnetopauzou a doplnit tato pozorování o údaje z aktuálních monitorů slunečního větru a o stavu vnitřní magnetosféry.
- (2) Porovnat polohy magnetopauzy s modelovými daty (zde zvolit dva až tři nejvíce používané modely) a kvantifikovat odchylky mezi reálným pozorování a modelovou předpovědí.
- (3) Porovnat kvalitu monitorů slunečního větru, protože parametry plazmatu a B_z složka IMF z těchto monitorů se používají jako vstupní data modelů.
- (4) Vybrat nejlepší monitor slunečního větru a studovat změny polohy magnetopauzy v závislosti na dalších parametrech (ve dvou různých lokálních časech).

6 Experimentální výsledky

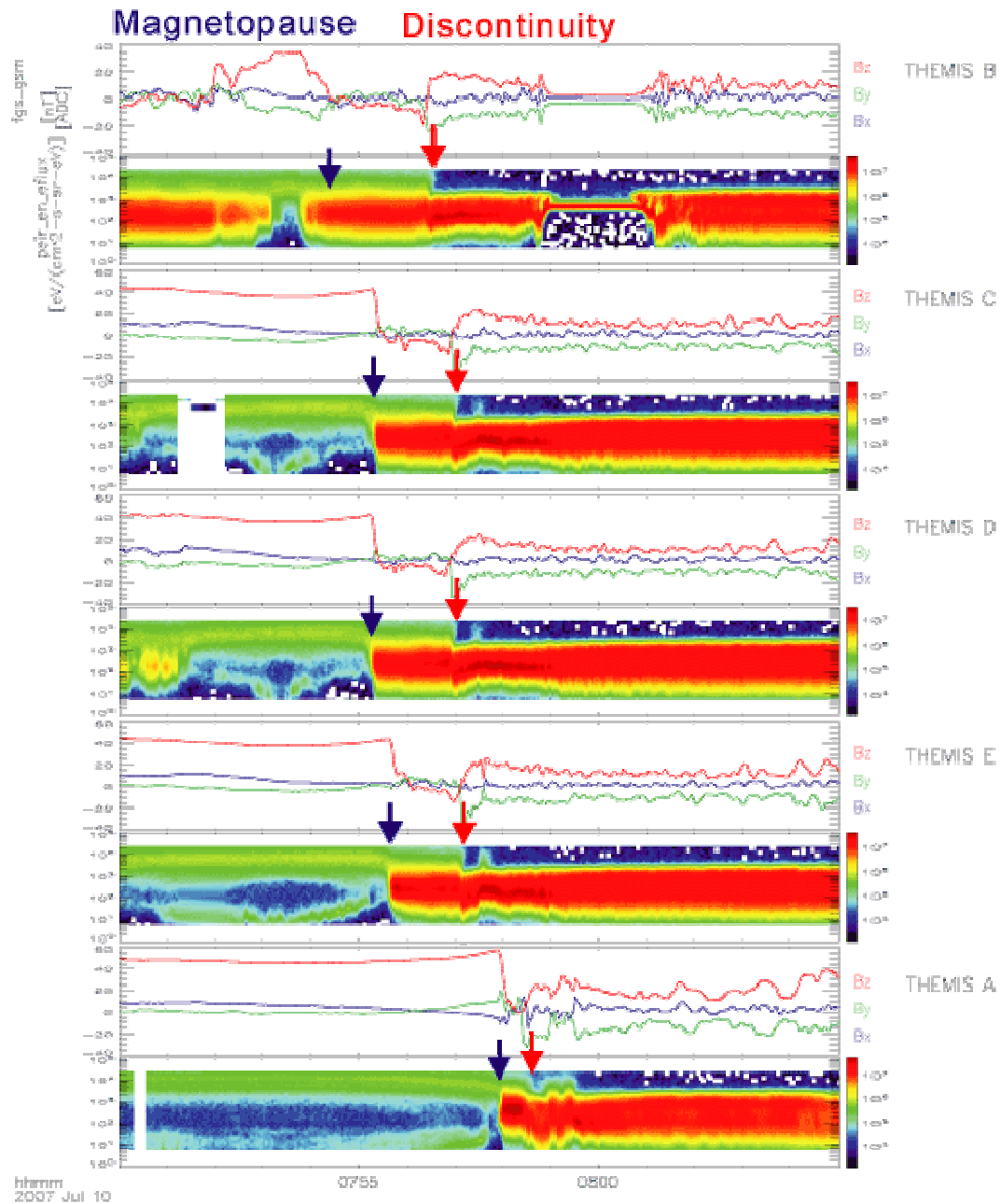
6.1 Vytvoření databáze

(1) Pro vytváření databáze průchodů magnetopauzou jsme použili měření všech pěti družic Themis. Soustředili jsme se na pozorování ve dvou obdobích - červenec-srpen 2008, to znamená ze subsolární oblasti ($XGSE > +5$) a z listopadu 2007, to je (vzhledem k časovému vývoji drah družic) z oblasti nad terminátorem, to je $XGSE$ v rozsahu (+5, až -12 Re). Porovnáním obou těchto souborů nám umožní porovnat mezi sebou i změny polohy magnetopauzy v různých místech podél magnetosféry, tj. v různých lokálních časech.

Průchod družice magnetopauzou jsme určovali na základě skokové změny magnetického pole, koncentrace částic, jejich rychlosti a změně energetického spektra elektronů i iontů. K identifikaci jsme používali data úrovně 2 (level 2), což jsou již kalibrovaná data ve fyzikálních jednotkách z následujících přístrojů: Electrostatic Analyzer (ESA), Solid State Telescope (SST), [2][19]. Pro zobrazení dat jsme používali program, který vytvořil Mgr. Karel Jelínek v jazyce IDL. Na obrázku 15 je příklad identifikace ze sond Themis ze dne 10 července 2007. V tomto případě přešlo přes magnetopauzu v krátkém sledu všech pět sond. Na obrázku vidíme záznam dat z družic Themis z 10. července z času 7:50 – 8:05 UT. První sonda, v tomto případě Themis B, přešla přes magnetopauzu v čase 7:54 UT (panel nejvíce nahoře), postupně přes ni přešly všechny družice, poslední přes magnetopauzu přešla družice Themis A v čase 7:58 UT (panel nejvíce dole). Družice se pohybovaly z vnitřní magnetosféry směrem do přechodové oblasti. Příklad ukazuje přechod více družic krátkém sledu přes magnetopauzu, přechod je označen modrými šipkami. Pro každou družici jsou zobrazeny dva panely – tři komponenty vektoru magnetického pole (horní panel) a energetické spektrum částic. Např. v horním panelu družice Themis B (tj. třetí shora) vidíme profil magnetického pole, které v čase 7:55 UT prudce klesá, současně s tím se prudce mění spektrum elektronů. Někdy také dochází k vícenásobným průchodům přes magnetopauzu v důsledku změn vnějších (sluneční vítr) nebo vnitřních (vnitřní stav magnetosféry) parametrů. V naší databázi muselo dva po sobě jdoucí průchody magnetopauzou dělit alespoň 15 vteřin. V případě, že družice přecházela přes magnetopauzu v kratších intervalech, vzali jsme v úvahu první a poslední průchod.

Při vzniku databáze je třeba určit čas (s přesností na vteřiny) a souřadnice, ve kterých průchod magnetopauzou byl pozorován. Takto jsme získali soubor 908 průchodů družic Themis

magnetopauzou za listopad 2007 (v práci dále označované jako oblast terminátoru, přestože toto označení není úplně přesné) a soubor obsahující 708 průchodů z období červenec-srpen 2008 (dále označovaném jako subsolární oblast). Tato data (časy a souřadnice v GSE soustavě) jsme doplnili o další údaje.



Obr. 15: Data z družic Themis. Na obrázku vidíme grafické znázornění dat ze všech pěti družic Themis z 10. července 2007 z období od 7:50 až 8:05 UT. Pro každou družici obrázek zobrazuje dva panely – v horním panelu jsou zobrazeny složky magnetického pole, ve spodním panelu pro každou družici je zobrazeno energetické spektrum částic. Na tomto obrázku přešly družice přes magnetopauzu v 7:54 až 7:58 UT. K dispozici jsme měli samozřejmě podrobnější data, mohli jsme tak určit průchod magnetopauzou s přesností na vteřiny.

(2) Pro porovnání experimentálně pozorované polohy magnetopauzy s modely potřebujeme určit jejich vstupní parametry, tj. dynamický tlak a B_z složku meziplanetárního magnetického pole. Jak jsme již předeslali, jako monitory slunečního větru jsme používali družice ACE, Wind, THEMIS B a databázi OMNI, přičemž pro získání odpovídajících parametrů v případě vzdálených monitorů (ACE [34][18] a Wind [47][48]) bylo třeba data propagovat do místa pozorování. Tato procedura spočívala ve dvou krocích. Nejprve jsme spočetli časovou odlehlost při předpokládané rychlosti šíření 400 km/s (průměrná rychlost slunečního větru) ve směru osy x podle vzorce

$$T = (X_{\text{WIND}} - X_{\text{obs}})/400, \quad (12)$$

kde X_{WIND} označuje x -ovou souřadnici družice Wind v okamžiku průchodu družice (Themis) magnetopauzou, X_{obs} x -ovou označuje souřadnici družice procházející magnetopauzou, 400 je předpokládaná rychlost slunečního větru v kilometrech za sekundu a T je hledaný čas šíření slunečního větru k magnetopauze. Tuto hodnotu jsme odečetli od času průchodu družice magnetopauzou a znovu získali nové parametry slunečního větru. Dále jsme spočetli desetiminutový medián rychlosti slunečního větru a koncentrace, abychom srovnali drobné odchylky parametrů a určili dynamický tlak p_{sw} . Tento tlak jsme spolu s velikostí a orientací B_z složky IMF [3] přiřadili k jednotlivým událostem do databáze.

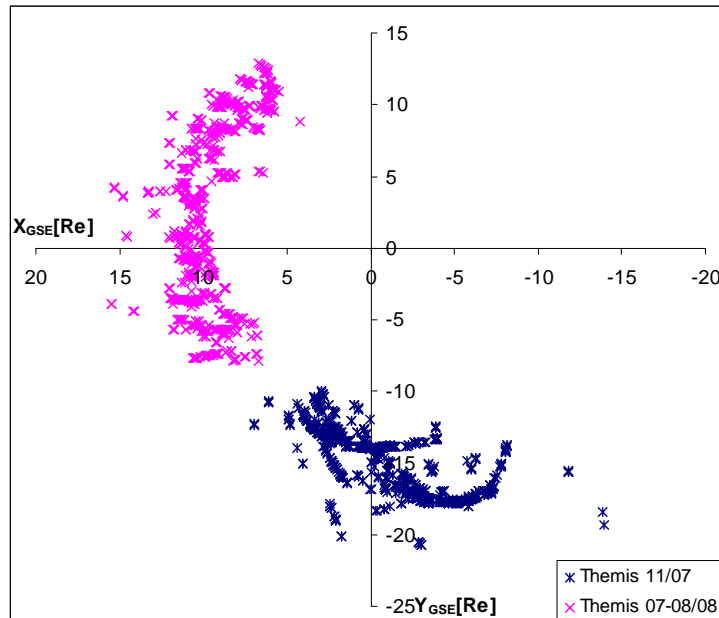
U dat z družice THEMIS B jsme trasování neprováděli, neboť časová odlehlost družice od průchodu magnetopauzou je v řádu minut. Ani pro databázi OMNI jsme neprováděli trasování, neboť data jsou již propagována do subsolárního bodu.

(3) V posledním kroku jsme do databáze zaznamenali pro každé pozorování magnetopauzy i další parametry: Tilt úhel, ostatní složky IMF a rychlosti slunečního větru a AE a DST indexy.

Při zpracování jsme museli některé průchody vyřadit kvůli nedostupnosti dat z monitoru slunečního větru (více v části Srovnání slunečních monitorů). Celkově jsme takhle vyřadili 18 průchodů, tím databáze obsahuje 890 bodů z oblasti terminátoru a 708 bodů ze subsolární oblasti.

Demonstrace výsledné databáze je na Obrázku 16, kde jsou všechny identifikované průchody zobrazeny v rovině XY_{GSE} ve dvou oblastech: Subsolární oblast a oblast terminátoru, které budeme porovnávat. Modré body pocházejí z oblasti terminátoru (tj. v blízkosti $X_{\text{GSE}} \sim 0$) a jsou jak na denní ($x > 0$), tak i na noční straně ($x < 0$), červené body reprezentují subsolární

oblast ($X_{GSE} > +5$). Pozorování v oblasti terminátoru jsou z ranní strany ($y < 0$). Naše případy zahrnují rozdílné podmínky ve slunečním větru, rychlost větru se pohybovala v rozmezí 300 – 700 km s⁻¹ a koncentrace částic od 1 do 35 cm⁻³. Je však třeba poznamenat, že naše databáze vznikala z měření v letech 2007 a 2008, tedy za slunečního minima, proto neobsahuje mnoho průchodů magnetopauzou za extrémních podmínek.



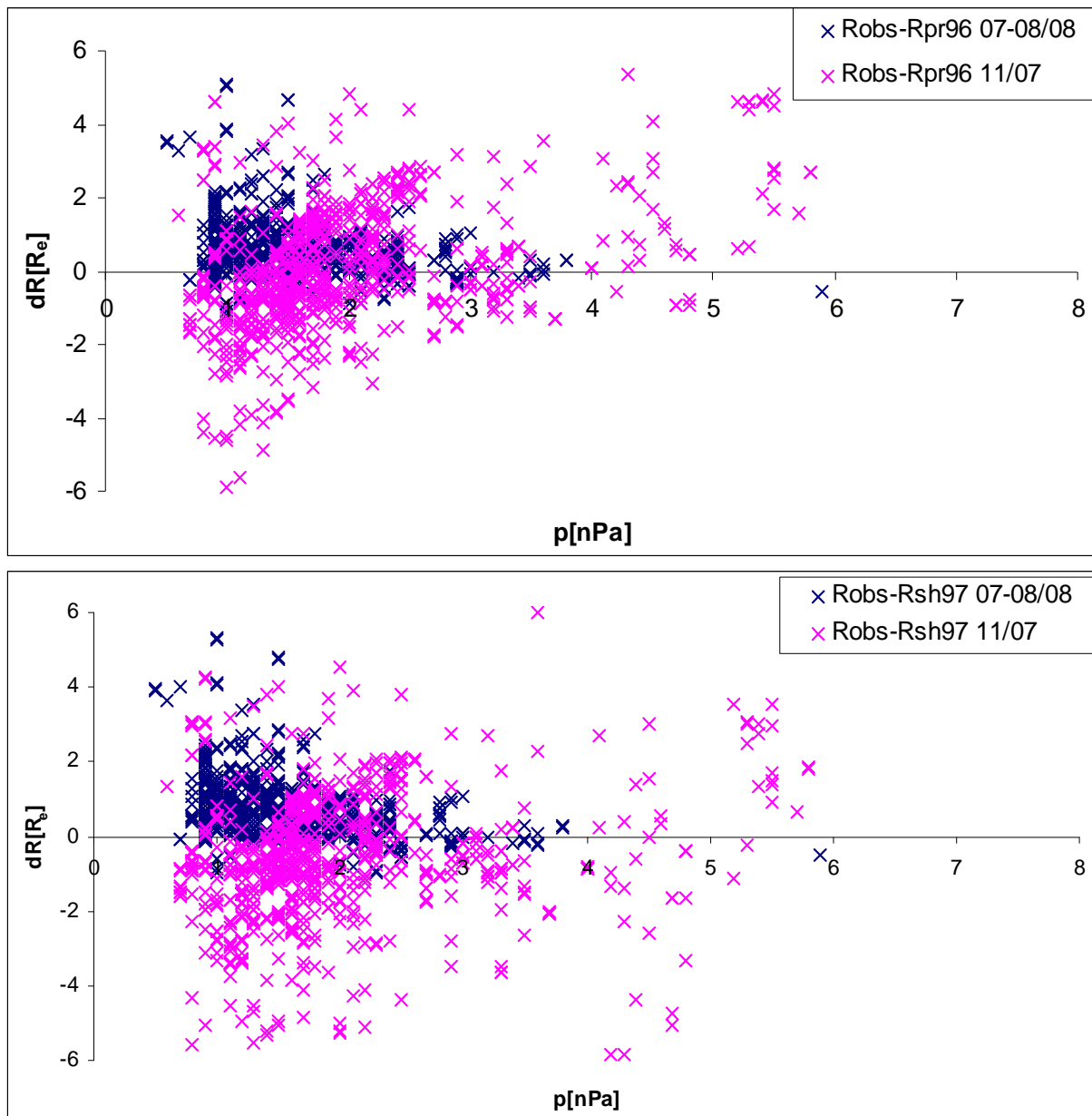
Obrázek 16: Polohy průchodů družic Themis magnetopauzou.

6.2 Monitor slunečního větru

Na první pohled se zdá, že máme dostatek vstupních dat, a to hned z několika monitorů slunečního větru. Vybrali jsme si pro naše srovnání družice Wind [47][48], ACE [34][18], databázi OMNI a družici THEMIS B. Bohužel se ukázalo, že pro všechny případy nejsou k dispozici parametry slunečního větru z těchto vybraných monitorů slunečního větru. Při vytváření databáze jsme zjistili, že v databázi OMNI jsou dostupná data pro všechny naše průchody magnetopauzou (to byl jeden z důvodů, proč ji někdy upřednostňujeme, přes její některé nevýhody, které budeme diskutovat v dalších kapitolách), u družice Wind nejsou dostupná data jen pro několik málo případů (< 10), avšak u družice ACE se již jedná o velkou část dat. Pro tuto družici jsou ze subsolární oblasti k dispozici data pouze pro 465 ze 708 případů a v oblasti terminátoru se jedná jen o 515 případů z 890.

Družice Themis (obvykle Themis B, v některých případech i Themis C) bylo možné použít vzhledem ke koncepci projektu Themis jako monitoru jen v souboru z oblasti terminátoru. Zde jsme pro porovnání s ostatními vzdálenými monitory měli jen 365 případů.

Abychom ověřili, je-li výhodnější ve statistických studiích používat družici Wind nebo data z OMNI (družici ACE v podstatě vylučujeme), porovnávali jsme všechny tři monitory současně pro tři vybrané modely magnetopauzy. Tím jsme zároveň částečně ověřovali i kvalitu předpovědí modelů pro námi vytvořený soubor dat, protože modely Petrinec a Russell (1996) a Shue a kol. (1997) mají jinou závislost na tlaku slunečního větru, jak vyplývá z Kapitoly 3 (6. vs 6,6. odmocnina tlaku).



Obr.17: Závislost odchylek polohy magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) (nahore) a Shue a kol (1997) (dole) v závislosti na tlaku. Údaje o tlaku jsme v obou případech získali z databáze OMNI.

Zkoumali jsme tedy jak modely odpovídají reálně pozorovaným průchodům magnetopauzou v závislosti na tlaku slunečního větru. Příklad statistického zpracování, ze kterého vycházíme,

je na obrázku 17, kde pro modely Petrinec a Russell (1996) a Shue a kol. (1997) jsou vyneseny rozdíly mezi pozorováním a modelovou předpovědí pro oba zvolené soubory dat, při použití OMNI jako monitoru slunečního větru. Zde je třeba poznamenat, že v celé práci vždy, když mluvíme o odchylkách od modelů, máme na mysli **rozdíl pozorovaná poloha (R_{obs}) – předpovězená poloha (R_{mod})**.

Na základě podobného závislostí jsme zpracovali histogramy odchylek a sledovali jsme dva ukazatele, medián (ze kterého jsme zjistili, na kterou stranu je model vychýlený) a průměrnou odchylku (tj. průměr absolutních hodnot odchylek, který nám určuje rozptyl odchylek).

6.3 Vzájemné porovnání modelů

6.3.1 Porovnání odchylek od modelů v závislosti na p_{sw}

Výsledky v celém oboru tlaků pro 3 modely a 3 monitory jsou přehledně shrnuty v Tabulce 2.

Model	Družice Wind				Databáze OMNI				Družice ACE			
	11/2007		07-08/2008		11/2007		07-08/2008		11/2007		07-08/2008	
	Med.	Odch.	Med.	Odch.	Med.	Odch.	Med.	Odch.	Med.	Odch.	Med.	Odch.
PR96	-0,02	0,99	0,60	0,58	-0,76	1,21	0,59	0,54	-0,40	1,01	0,49	0,66
SH97	-0,51	0,94	0,74	0,59	-0,48	1,17	0,74	0,57	-0,04	1,00	0,60	0,67
SH98	-0,29	1,00	0,87	0,59	-0,48	0,52	0,88	0,56	-0,61	0,67	0,97	0,66

Tab. 2: Srovnání monitorů slunečního větru podle tlaku.

Z Tabulky 2 vidíme, že nejlepší shodu s pozorovanými průchody magnetopauzou v listopadu 2007 prokázal model Petrinec a Russell (1996) při použití hodnot tlaku z družice Wind. Velmi se mu přiblížil model Shue a kol. (1997) s družicí ACE jako monitorem slunečního větru, avšak výsledky při použití družice ACE nejsou úplně srovnatelné, protože soubor dat z družice ACE obsahuje výrazně méně případů (515 oproti 890 případům v listopadu 2007).

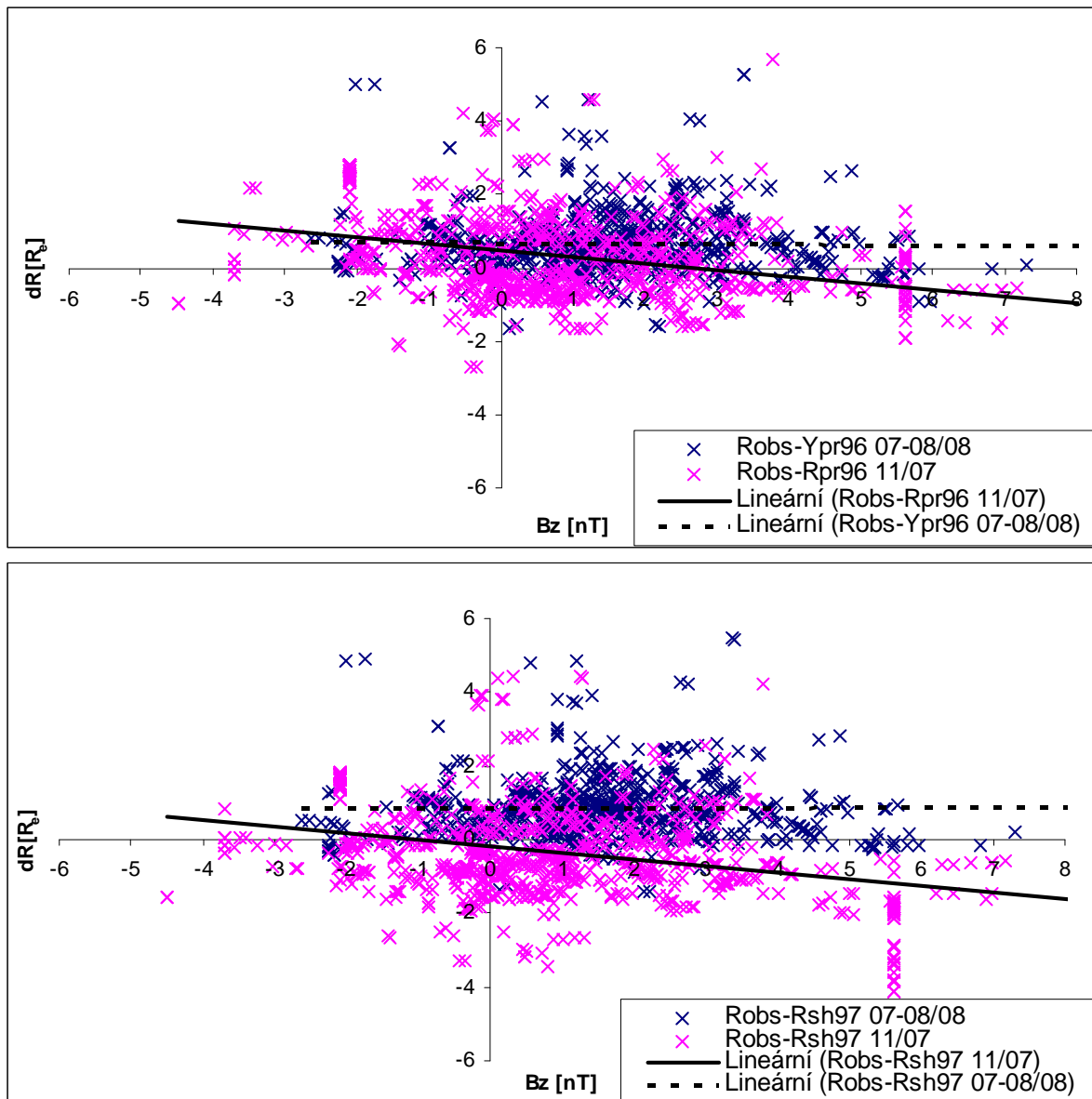
Při použití modelu Petrinec a Russell (1996) pro hodnoty tlaku v subsolární oblasti z družice Wind je rozdíl výrazný (medián odchylek $-0,02 R_e$ z družice Wind oproti $-0,76 R_e$ pro databázi OMNI a $-0,40 R_e$ pro družici ACE), naproti tomu v průchodech v oblasti terminátoru je situace jiná.

Mírně nejlepší výsledky prokazuje družice ACE, ovšem opět na menším souboru dat (465 průchodů oproti 708), družice Wind a databáze OMNI poskytují srovnatelné výsledky (medián $0,60 R_e$ oproti $0,59 R_e$, střední odchylka $0,58 R_e$ oproti $0,54 R_e$).

Další modely poskytují celkově horší výsledky než model Petrinec a Russell (1996). Dobrých výsledků dosáhl také model Shue a kol. (1997) při použití družice ACE jako monitoru slunečního větru v datech z terminátorové oblasti, ale opět se jedná o redukovaný soubor dat. Výsledky družice Wind ve srovnání s databází OMNI jsou ve shodě s předpoklady – data v databázi OMNI jsou trasována vzhledem k subsolárnímu bodu a tam poskytuje databáze OMNI s družicí Wind téměř shodné výsledky (průchody z července a srpna pocházejí ze subsolární oblasti). Naproti tomu průchodům magnetopauzou v okolí terminátoru lépe odpovídají data z družice Wind, neboť ta jsou trasována na konkrétní vzdálenost ve směru osy X. Data z databáze OMNI jsme nijak dále netrasovali.

S ohledem na tuto analýzu tedy budeme v dalších analýzách používat jako monitor slunečního větru družici Wind (nejlepší shoda s pozorováním pro data z oblasti terminátoru a srovnatelné výsledky s databází OMNI s daty z července a srpna 2008). Jako vhodný model pro předpovědi polohy magnetopauzy se jeví model Petrinec a Russell (1996), který ukázal nejlepší výsledky ze srovnávaných modelů, to však podrobněji prověříme ještě v následujících částí této kapitoly.

6.3.2 Porovnání odchylek v závislosti na B_z



Obr. 18: Závislost odchylek pozorované magnetopauzy od polohy předpovězené modelem Petrinec a Russell (1996) (horní obrázek) a modelem Shue a kol. (1997) (dolní obrázek) na IMF B_z . Použili jsme hodnoty IMF B_z získané z družice Wind.

B_z komponenta meziplanetárního magnetického pole je další parametr implicitně zahrnutý ve zkoumaných modelech, proto jsme se věnovali i této závislosti. Na obrázku 18 jsou rozdíly mezi pozorováním polohy magnetopauzy a její modelovou předpovědí v závislosti na B_z IMF pro případ, kdy pro modely Petrinec a Russell (1996) a Shue a kol. (1997) byly použity vstupní parametry z družice Wind. V těchto závislostech jsme proložili přímky pomocí metody nejmenších čtverců. Prokládali jsme každý soubor zvlášť kvůli jejich různé poloze (viz Obrázek 16). Navíc model Petrinec a Russell (1996) používá dva funkční předpisy B_z pro

různé hodnoty souřadnice X_{GSE} . V případě odchylek od modelu Petrinec a Russell (1996) jsme obdrželi následující dva vztahy:

$$dR[Re] = -0,0122Bz[nT] + 0,6987[Re] \quad (13)$$

$$dR[Re] = -0,1775Bz[nT] + 0,4754[Re] \quad (14)$$

Vztah (13) platí pro oblast terminátoru, vztah (14) jsme obdrželi pro subsolární oblast. Stejně fity jsme provedli i pro odchylky od modelu Shue a kol. (1997) a získali následující vztahy:

$$dR[Re] = -0,0044Bz[nT] + 0,8243[Re] \quad (15)$$

$$dR[Re] = -0,1798Bz[nT] - 0,1780[Re] \quad (16)$$

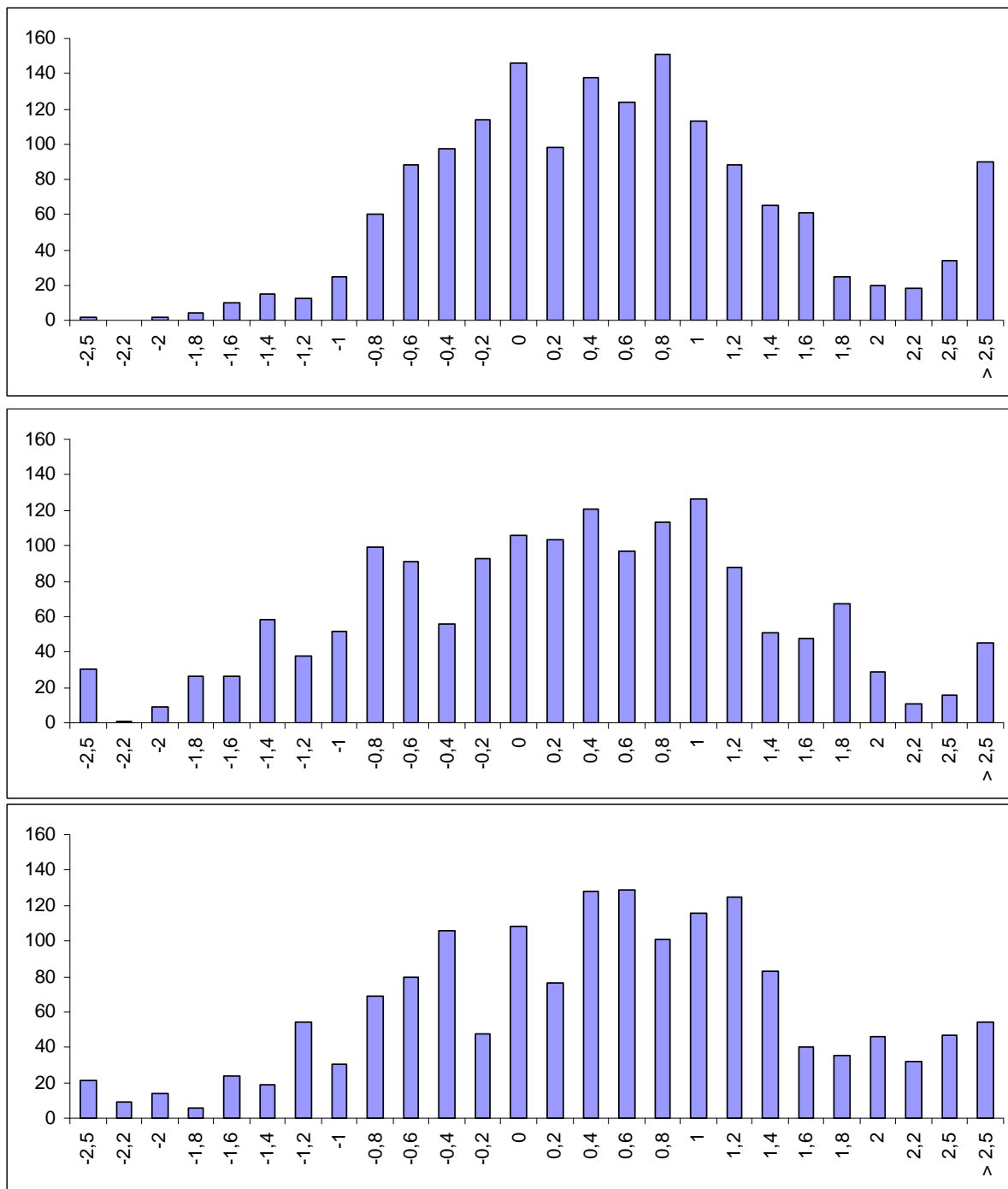
Vztah (15) jsme obdrželi pro subsolární oblast, zatímco vztah (16) je výsledkem fitování dat z oblasti terminátoru. Porovnáním koeficientu před členem Bz vidíme, že výraznější závislost se projevuje v oblasti terminátoru. Rozdíly pro oba modely nejsou sice výrazné, lepší přesnost však podle našeho názoru vykazuje model Petrinec a Russell (1996), což je další důvod k jeho použití.

6.3.3 Porovnání odchylek modelů v různých lokálních časech

Předchozí dvě části této kapitoly ukázaly, že pro modelové předpovědi je nejpřesnější model Petrinec a Russell (1996) se vstupními parametry z družice Wind. Jako další test modelů jsme zvolili sledování jejich úspěšnosti pro různé lokální časy, v práci reprezentované souřadnicí X_{GSE} . Histogram odchylek všech 3 modelů pro celkový soubor dat bez ohledu na lokální čas je na obrázku 19 a výsledky jsou pak shrnuty v tabulce 3 (při použití družice Wind jako sluneční monitor). Pro snadnější porovnání jsme odchylky kvantifikovali jejich rozdělením do tří skupin: na menší než $1 R_e$, v rozmezí 1 až $2 R_e$ a větší odchylky. Z tabulky 3 je patrné, že lepší shodu pro všechna data vykazuje model Petrinec a Russell (1996).

Odchylka [%]	< 1 R_e	1 – 2 R_e	> 2 R_e
PR96	67,1	21,1	11,8
SH97	60,4	25,2	14,4
SH98	59,8	27,4	12,8

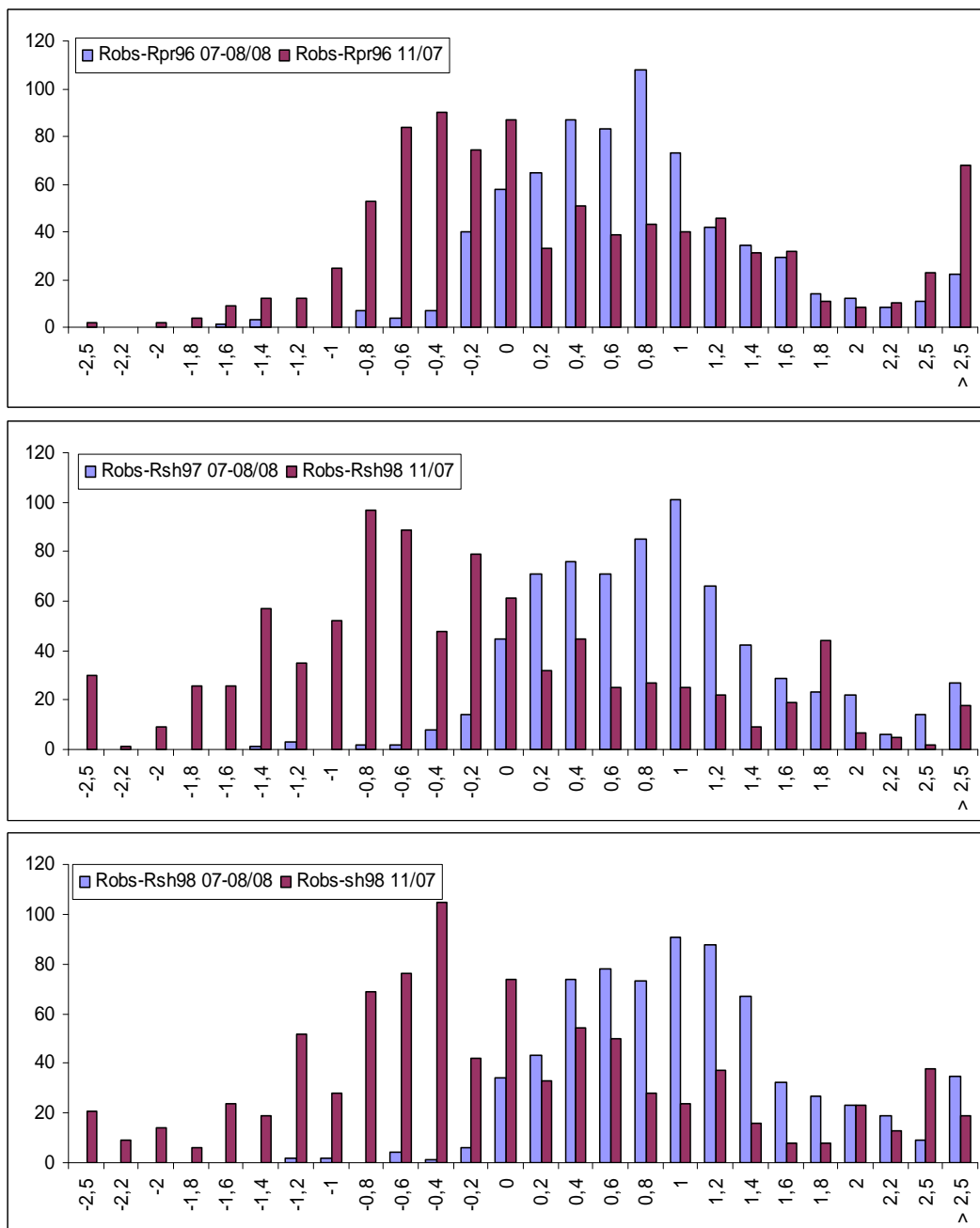
Tab. 3: Porovnání rozložení odchylek pozorované polohy magnetopauzy od modelů Petrinec a Russell (1996), Shue a kol. (1997), Shue a kol. (1998).



Obr. 19: Histogram odchylek (dR) skutečné polohy magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) (nahore), od modelu Shue a kol. (1997) (uprostřed) a Shue a kol. (1998) (dole) – Wind jako společný monitor pro celý soubor dat.

V dalším kroku nás zajímalo, jestli toto zjištění je platné pro všechny lokální časy, proto jsme soubor rozdělili na dva pod-soubory: polohy magnetopauzy naměřené v červenci a srpnu 2008 (blízko subsolární oblasti, tj. lokální časy 9-15 hodin) a polohy magnetopauzy naměřené v listopadu 2007 (v okolí terminátoru, tj. lokální časy 3-9 hodin). Výsledky porovnání modelů jsou na obrázku 20 a přehledně sumarizované v Tabulce 4.

Mezi oběma soubory dat existuje výrazný rozdíl. Všechny porovnávané modely vykazují výrazně lepší shodu s daty s nižšími lokálními časy, v oblasti magnetopauzy o souřadnicích $X_{GSE} +8$ až $-14 R_e$ a $Y_{GSE} -10$ až $-20 R_e$. Z toho můžeme usoudit, že modely lépe popisují magnetopauzu v uvedených oblastech než pro vyšší lokální časy (subsolární oblast). Rozdílné chování modelů vzhledem k souborům dat jsme pozorovali i kvalitativně, jak ukazuje tabulka 4. Soubor dat ze subsolární oblasti vykazoval celkově menší rozptyl odchylek, ale byl výrazně více vychýlený. Modely shodně vzdálenost magnetopauzy podhodnocovaly pro vyšší lokální časy, pro nižší lokální časy vzdálenost magnetopauzy naopak nadhodnocovaly.



Obr. 20: Obrázek 20: Histogram odchylek pro subsolární oblast i oblast terminátoru pro všechny tři porovnávané modely.

	Subsolární oblast		Oblast terminátoru	
	Medián [Re]	Prům. odchylka [Re]	Medián [Re]	Prům. odchylka [Re]
PR96	0,59	0,54	-0,03	0,99
SH97	0,74	0,57	-0,52	0,94
SH98	0,88	0,56	-0,29	1,00

Tabulka 4: Porovnání rozložení odchylek (dR) pozorované polohy magnetopauzy od modelů Petrinec a Russell (1996), Shue a kol. (1997), Shue a kol. (1998) pro dva lokální rozsahy časů.

Pokud se týká vzájemného porovnání modelů, nejlepší shodu vykazují pro oba rozsahy lokálních časů model Petrinec a Russell (1996). Tento model také vykazují pro data z blízkosti terminátoru dobrou symetrii. Dalším efektem, který pozorujeme, jsou celkově vyšší odchylky v oblasti terminátoru (průměr odchylek 0,94 – 1,00 naproti 0,54 – 0,56 Re). Vidíme, že modely mají v rámci stejného souboru dat velmi podobnou průměrnou odchylku. Můžeme tedy říci, že mají velmi podobný rozptyl, jen se liší ve vychýlení na určitou stranu. Podíváme-li se na histogramy odchylek (Obr. 19), vidíme, že odchylky mají podobný rozptyl pro všechny tři modely, jen se liší umístěním středu gaussovského píku. Při podrobnějším studiu histogramu si však lze všimnout, že rozložení odchylek nemá úplně gaussovské rozdělení. To je způsobeno tím, že se skládá ze dvou souborů dat z různých oblastí (subsolární oblasti a oblasti terminátoru), viz obrázek 20. Tuto část můžeme proto uzavřít konstatováním, že model Petrinec a Russell (1996) je nejvhodnější.

6.3.4 Porovnání odchylek v závislosti na souřadnici X v terminátorové oblasti pro kladná a záporná X

Vzhledem k tomu, že model Petrinec a Russell (1996) používá dvě různé funkční formy pro kladné a záporné souřadnice x , chtěli jsme v poslední fázi ověřit, pro která X_{GSE} vykazují lepší shodu a porovnat jeho výsledky s ostatními modely pro tuto oblast. Pro toto porovnání jsme použili pouze soubor dat z listopadu 2007, a pro ten jsme porovnávali odchylky od modelů s ohledem na souřadnici X_{GSE} . Tabulku 5 jsme získali stejným způsobem jako tabulky 2, 3 a 4, jen data jsme rozdělili na část s kladnou (380 případů) a část se zápornou (510 případů) souřadnicí X_{GSE} .

	Kladná x		Záporná x	
	Medián [Re]	Prům. odchylka [Re]	Medián [Re]	Prům. odchylka [Re]
PR96	-0,34	0,64	0,67	1,00
SH97	-0,65	0,66	-0,19	1,12
SH98	-0,47	0,67	0,12	1,19

Tabulka 5: Porovnání modelů v různých místech magnetopauzy.

Také zde pozorujeme nadhodnocování vzdálenosti magnetopauzy pro kladná X_{GSE} , naopak pro záporné X_{GSE} je situace rozdílná. Shue a kol. (1997) polohu nadhodnocuje, avšak nijak výrazně, k výraznému podhodnocení dochází u modelu Petrinec a Russell (1996). Celkově tento model měl mírně nejnižší odchylky, ačkoli pro záporná X_{GSE} poskytuje nejméně symetrické výsledky.

Shrneme-li závěrem dílčí studie srovnání modelů pro různé parametry provedené v této kapitole, můžeme říci, že nejlépe předpovídá polohu magnetopauzy model Petrinec a Russell (1996) při použití vstupních dat pro model z družice Wind, proto ho budeme používat v další části práce.

6.4 Další parametry

Jak jsme viděli v předchozích kapitolách, modely mívají od pozorovaných poloh odchylky až několik R_e . V teoretické části jsme zmínili, že poloha magnetopauzy závisí na podmínkách ve slunečním větru (tj. jeho parametrech) a vnitřním stavu zemské magnetosféry. Avšak v modelech vystupují pouze parametry slunečního větru (IMF B_z a p_{sw}), parametry spojené s vnitřním stavem magnetosféry v modelech nejsou zahrnuty. Chtěli jsme tedy prověřit, závislosti na parametrech magnetického pole země. Vliv tilt úhlu je již zahrnut do některých novějších modelů [29]. My jsme se rozhodli prověřit kromě tilt úhlu i geomagnetické indexy popisující vnitřní stav magnetopauzy, konkrétně jsme srovnávali vliv změn indexů DST a AE.

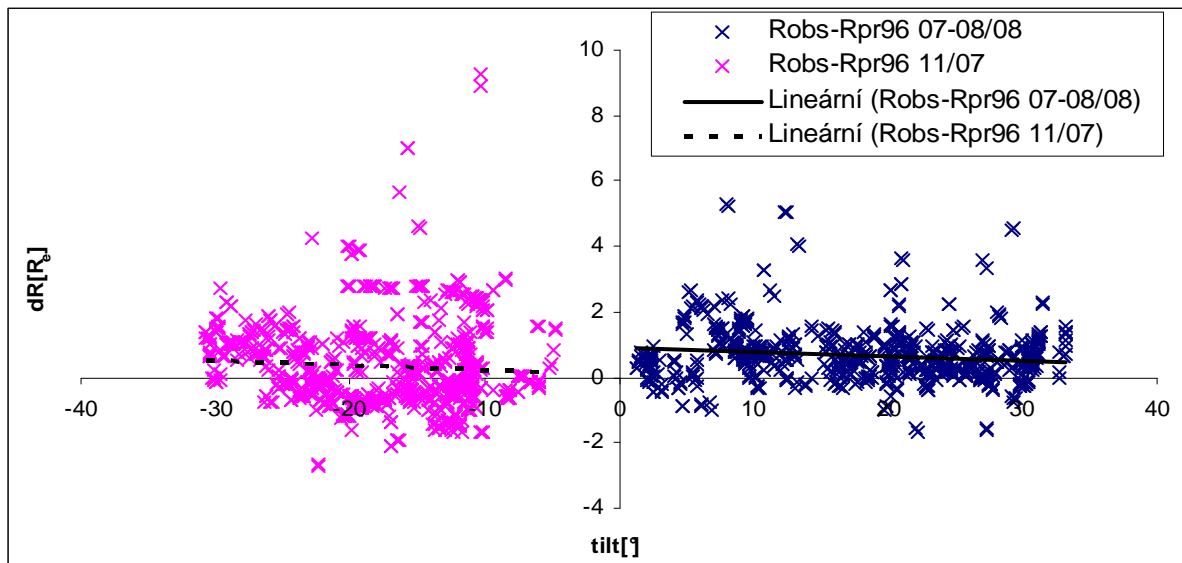
6.4.1 Vliv tilt úhlu

Tilt úhel se mění s periodou ročního oběhu kolem Slunce a také s periodou rotace Země kolem své osy. Protože máme data ze dvou různých období (subsolární a terminátorovou oblast), máme také dva různé rozsahy tiltu, jak ukazuje obrázek 21, kde jsou odchylky znázorněny jako funkce tilt úhlu. Pro subsolární oblast se hodnoty tilt úhlu pohybovaly v rozsahu 2° až 33° , pro oblast terminátoru se tilt úhly nacházely v rozsahu -32° až -4° . Změřená data jsme proložili přímkami pomocí metody nejmenších čtverců (viz Obr. 21.), a získali tak závislosti

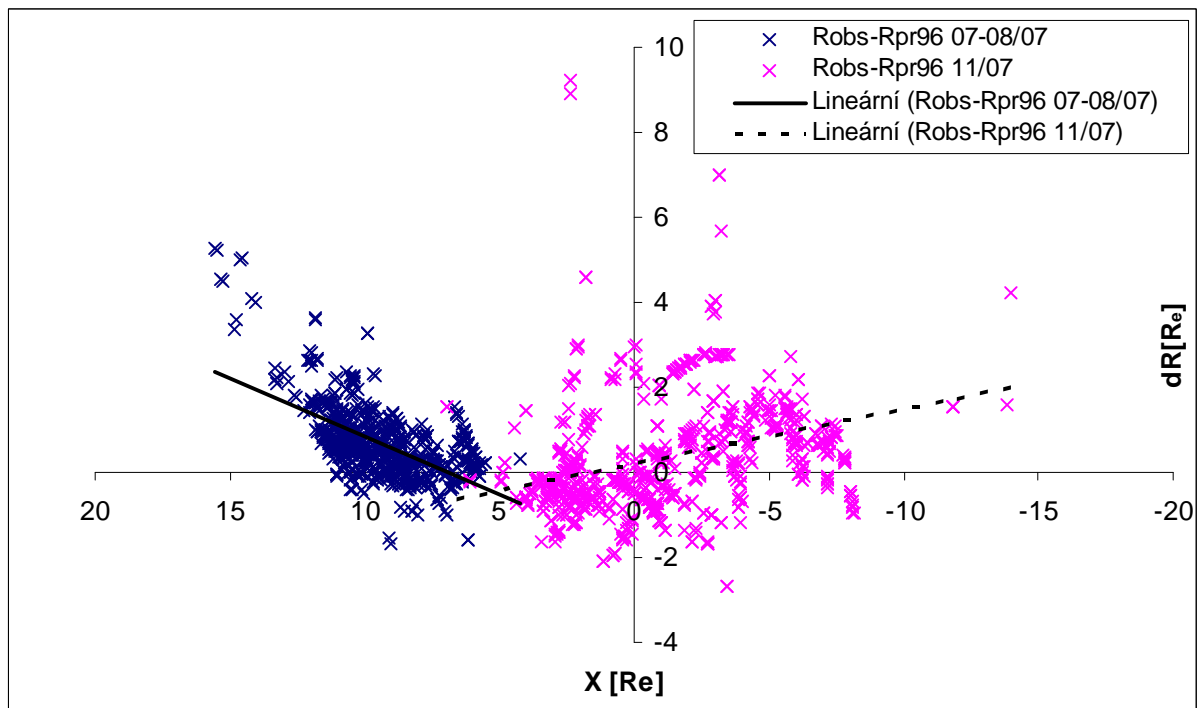
$$dR[Re] = -0,0122T[^\circ] + 0,1213[Re] \quad (17)$$

$$dR[Re] = -0,0133T[^\circ] + 0,9132[Re] \quad (18)$$

kde dR označuje odchylku pozorované polohy od modelu Petrinec a Russell (1996), T označuje úhel tilt ve stupních. Pozorovali jsme tak mírně klesající závislosti odchylek s podobným sklonem přímky od modelu v závislosti na úhlu tilt.



Obr 21: Závislost odchylek pozorovaných poloh magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na tilt úhlu.



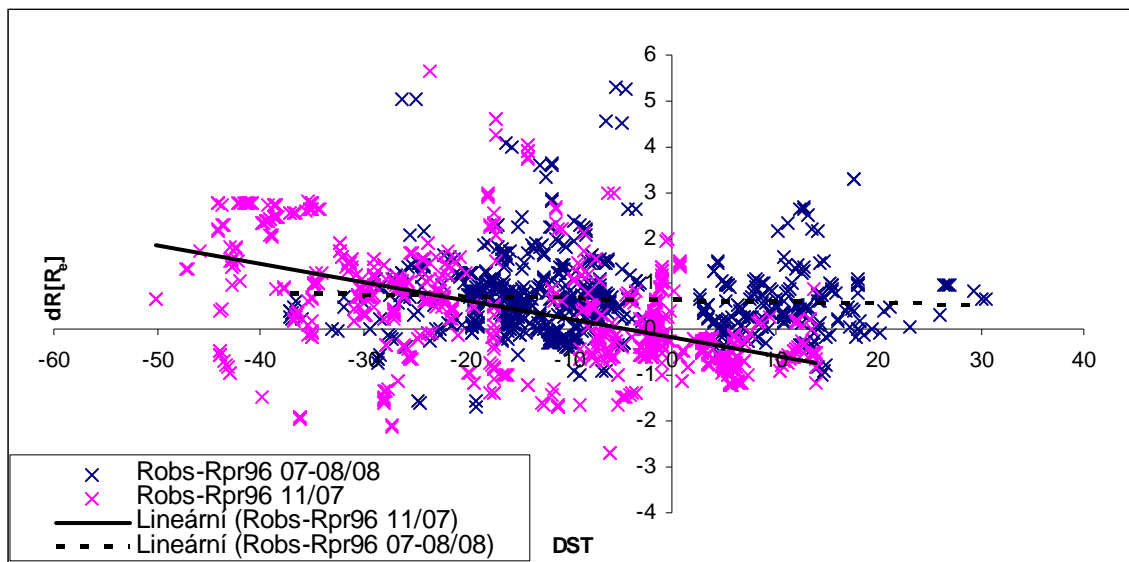
Obr 22: Závislost odchylek pozorované polohy magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na souřadnici X_{GSE} .

Úhel sklonu magnetického dipólu není ovšem nezávislá veličina, mění se v čase stejně jako se v čase vyvíjí dráha družice, a tím i oblast, kde může být magnetopauza pozorována. Z našeho hlediska je asi nejdůležitější, že podobně jako se mění tento úhel, mění se i souřadnice X_{GSE}

pozorování a tento vliv může převážit, proto na obrázku 22 je závislost odchylek od modelu také na $-X_{GSE}$. Porovnáním obrázků 21 a 22 vidíme, že opravdu primární je závislost na souřadnici a závislost na tilt úhlu ve vztazích 17 a 18 je zřejmě pouze produktem rozložení naší databáze pozorování magnetopauzy podél osy X. Tento výsledek je v souladu s prací [29], kde pro jiný soubor dat také nebyl prokázán vliv tilt úhlu v oblasti nízkých geomagnetických šířek, ze kterých pochází náš soubor.

6.4.2 Magnetosférické indexy

Dále jsme srovnávali odchylky od modelu Petrínek a Russell (1996) s magnetosférickými indexy AE a DST. Vzhledem k tomu, že naše data pocházela především z oblasti ekvatoriálních magnetických šířek, zajímala nás hlavně závislost na DST indexu, protože ten souvisí s magnetickým polem v oblasti ekvatoriálních magnetických šířek.



Obr 22: Závislost odchylek pozorované polohy magnetopauzy od modelu Petrínek a Russell (1996) na souřadnici X_{GSE} .

6.4.3 AE index

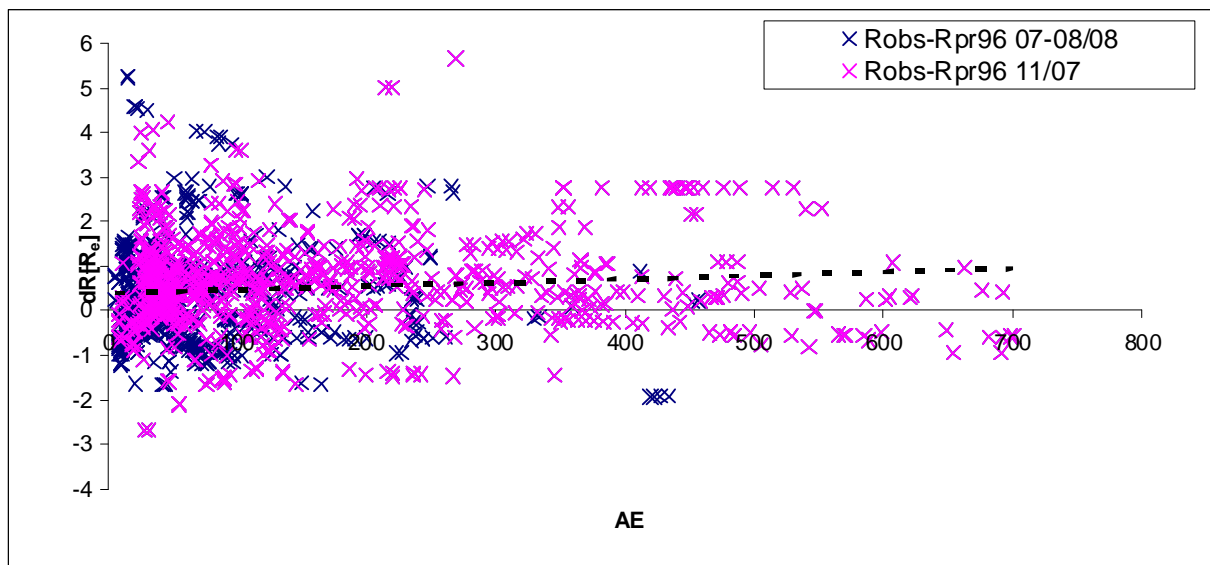
Závislost odchylek pozorovaných poloh magnetopauzy od modelu Petrínek a Russell (1996) na indexu AE jsme proložili lineární závislostí pomocí metody nejmenších čtverců (Obrázek 23). Tímto fitováním jsme obdrželi závislost

$$dR[Re] = 0,0008AE + 0,3941[Re] \quad (19)$$

kde dR opět označuje odchylku pozorované polohy od modelu Petrínek a Russell (1996), AE označuje index AE . K fitování jsme použili celý soubor, tj. jak subsolární oblast, tak oblast

terminátoru. Většina hodnot indexu AE se nacházela v nižších hodnotách (z 1598 případů se 1020 bodů pocházelo z rozsahu menších než 100, 1291 menších než 200).

Získaný koeficient je tak nízký, že můžeme prohlásit, že jsme nepozorovali závislost odchylek na indexu AE. To není příliš překvapivý výsledek, neboť, jak jsme konstatovali výše, AE index se odvozuje z měření magnetického pole země v aurorálních oblastech, naproti tomu naše data pochází z oblasti ekvatoriálních magnetických šířek.



Obrázek 23: Závislost odchylek pozorovaných poloh magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na indexu AE.

6.4.4 Index DST

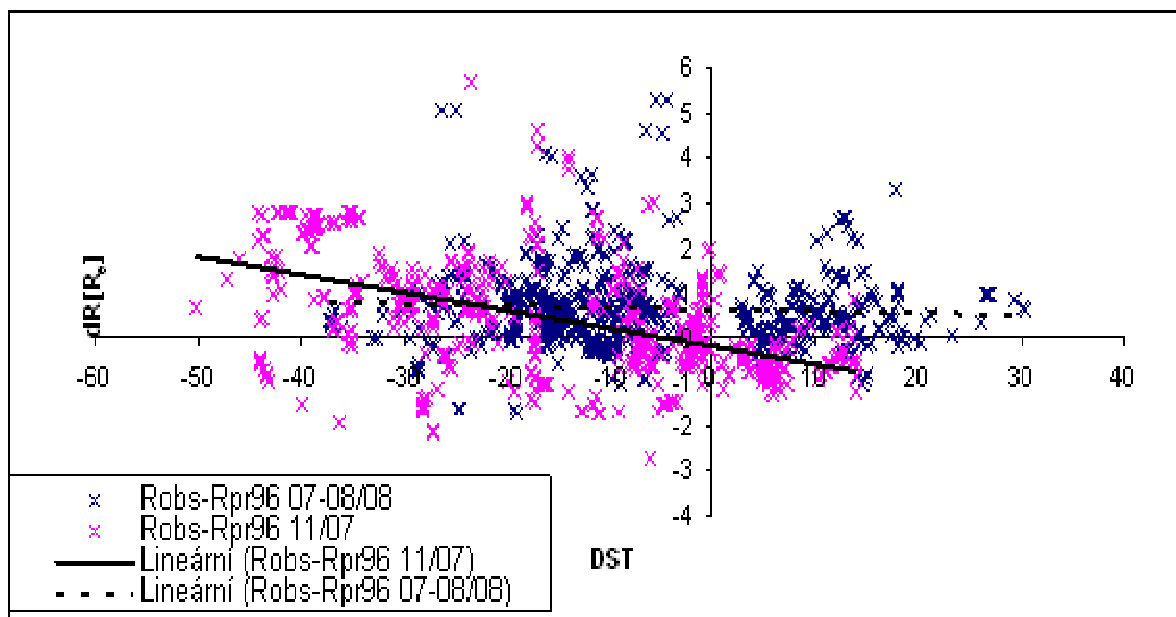
Druhým indexem, se kterým jsme srovnávali odchylky od modelů je DST index. Opět jsme proložili soubor dat (každý zvlášť) lineární závislostí pomocí metody nejmenších čtverců. Převažovaly záporné hodnoty indexu DST (1273 případů z 1598), většina hodnot pocházela z oblasti z intervalu -20 až 20 (1161 z 1598 případů). Významné množství hodnot větších než 30 se vyskytovalo pouze v souboru z terminátorové oblasti (zřejmě z Obrázku 24). Fitováním jsme získali závislosti:

$$dR[Re] = -0,0036DST + 0,6538[Re] \quad (20)$$

$$dR[Re] = -0,0403DST - 0,1798[Re] \quad (21)$$

kde dR opět označuje odchylku pozorované polohy od modelu Petrinec a Russell (1996), DST označuje hodnotu indexu DST . Vztah (20) jsme získali pro subsolární oblast, vztah (21) je výsledkem fitování pro oblast terminátorů. Vidíme, že pozorujeme dvě různá chování pro dva soubory dat. Zatímco pro subsolární oblast je lineární člen velmi malý a závislost na indexu ST se téměř neprojevuje, pro oblast terminátoru pozorujeme klesající závislost na indexu

DST. Závislost na indexu DST bychom instinktivně předpokládali, neboť index DST souvisí s magnetickým polem v ekvatoriální oblasti, přitom v modelech není jeho vliv na stav magnetopauzy zahrnutý. Ve sledovaném období byly hodnoty DST poměrně malé, proto jsme nebyli schopni dostatečně přesně ověřit závislost na indexu DST mimo uvedený rozsah hodnot. Rozdílné chování může být způsobeno tím, že jsme porovnávali data z různých oblastí magnetopauzy. Pro lepší ověření bychom potřebovali více hodnot < -30 , hlavně pro subsolární oblast, neboť v našem souboru jich máme velmi málo. Výsledek naší analýzy ovšem neodpovídá výsledku práce Hayosh a kol. (2005) [28], kteří získali závislost opačnou. Toto může být způsobeno nejen odlišným souborem dat o průchodu magnetopauzou (s větším počtem průchodů v subsolární oblasti), ale částečně i tím, že naše měření pochází z období slunečního minima, na rozdíl od souboru ve zmiňované práci, kde byla data shromažďována v průběhu celého slunečního cyklu.



Obrázek 24: Závislost odchylek pozorovaných poloh magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na indexu DST.

6.5 Radiální pole a drift

V této kapitole jsme chtěli prověřit, zda polohu magnetopauzy výrazně ovlivňuje elektrické pole indukované pohybem slunečního větru a v něm zamrzlého magnetického pole. Toto pole (dané vztahem 17) a s ním spojený drift (vztah 18) nadteplných částic urychlených v oblasti před rázovou vlnou (tzv. foreshocku) nebo případně uniklých z magnetosféry může měnit tlakové poměry na magnetopauze. Také situace, kdy vektor IMF je kolmý k magnetopauze, tj.

tzv. radiální pole IMF, může tlakové poměry na magnetopauze podstatně změnit. V tomto případě totiž nedochází na rázové vlně ke kompresi magnetického pole a transformace kinetické energie slunečního větru je méně efektivní. Výsledkem by měl být pokles tlaku působícího na magnetopauzu a její expanze, i když tento teoretický závěr se zatím statisticky nepodařilo prokázat.

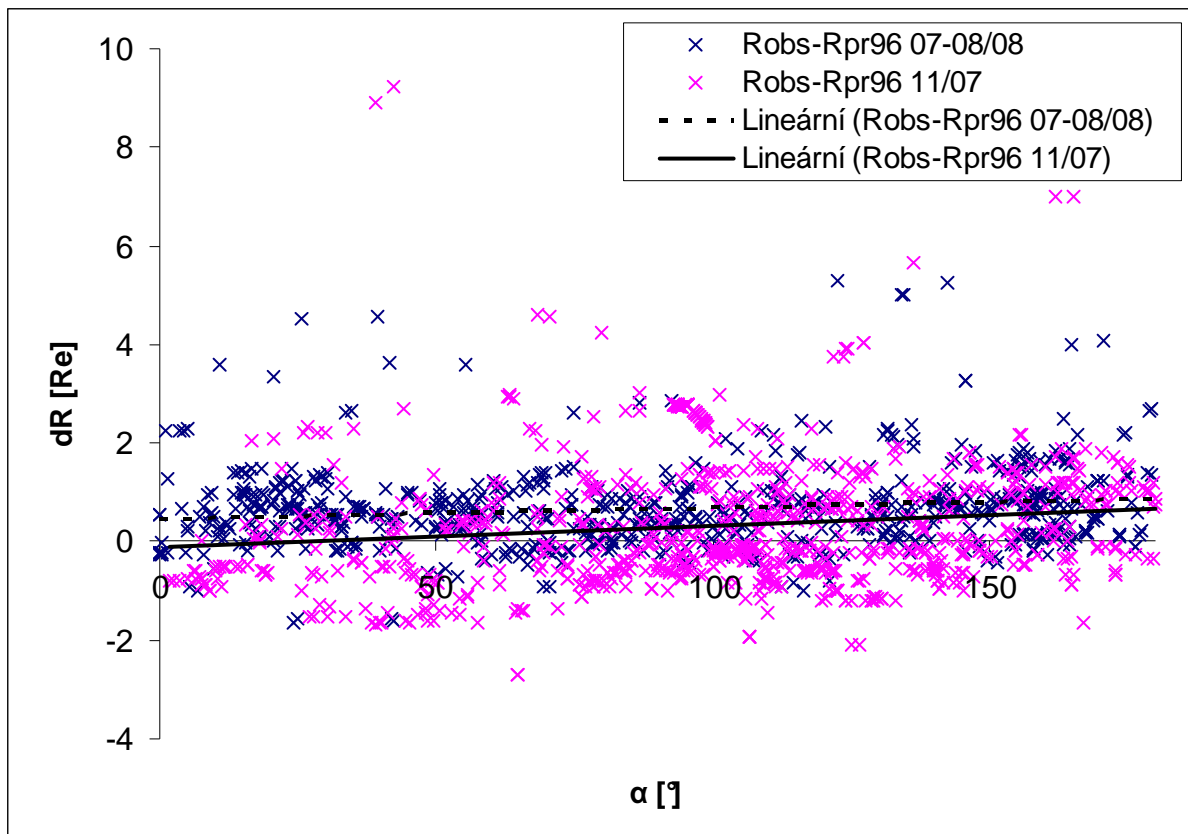
Tyto případy jsme zkoumali ve dvou variantách - pro úplné, trojrozměrné vektory (nazvěme tuto variantu „3D“) a také pro průměty vektorů do roviny x-y (varianta „2D“), protože v modelech je zahrnuta složka IMF B_z a varianta „3D“ by tak mohla být z velké míry ovlivněna vlivem složky IMF B_z , která je již v modelech zahrnuta. Nakonec se výsledky ukázaly jako velmi podobné, proto v práci prezentujeme jen variantu 2D.

Vztahy pro elektrické pole E a drift V_E zmiňované v úvodu kapitoly vypadají následovně:

$$E = v \times B \quad (17)$$

$$v_E = \frac{E \times B}{|B|^2} \quad (18)$$

Při závislostech na úhlu sevřeném vektory \mathbf{R} a \mathbf{B} , resp. \mathbf{R} a v_E nerozlišujeme kladný a záporný směr, proto grafy zobrazují závislost na úhlu od 0 do 180 stupňů. Dále zavádíme úhel α , kterým označujeme průmět úhlu mezi polohovým vektorem \mathbf{R} a vektorem magnetické indukce \mathbf{B} do roviny X- Y_{GSE} , úhel β , kterým označujeme průmět úhlu mezi rychlostí a $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ driftem do roviny X- Y_{GSE} , a úhel γ , kterým označujeme průmět úhlu mezi polohovým vektorem \mathbf{R} a $(\mathbf{E} \times \mathbf{B})$ driftem do roviny X- Y_{GSE} .

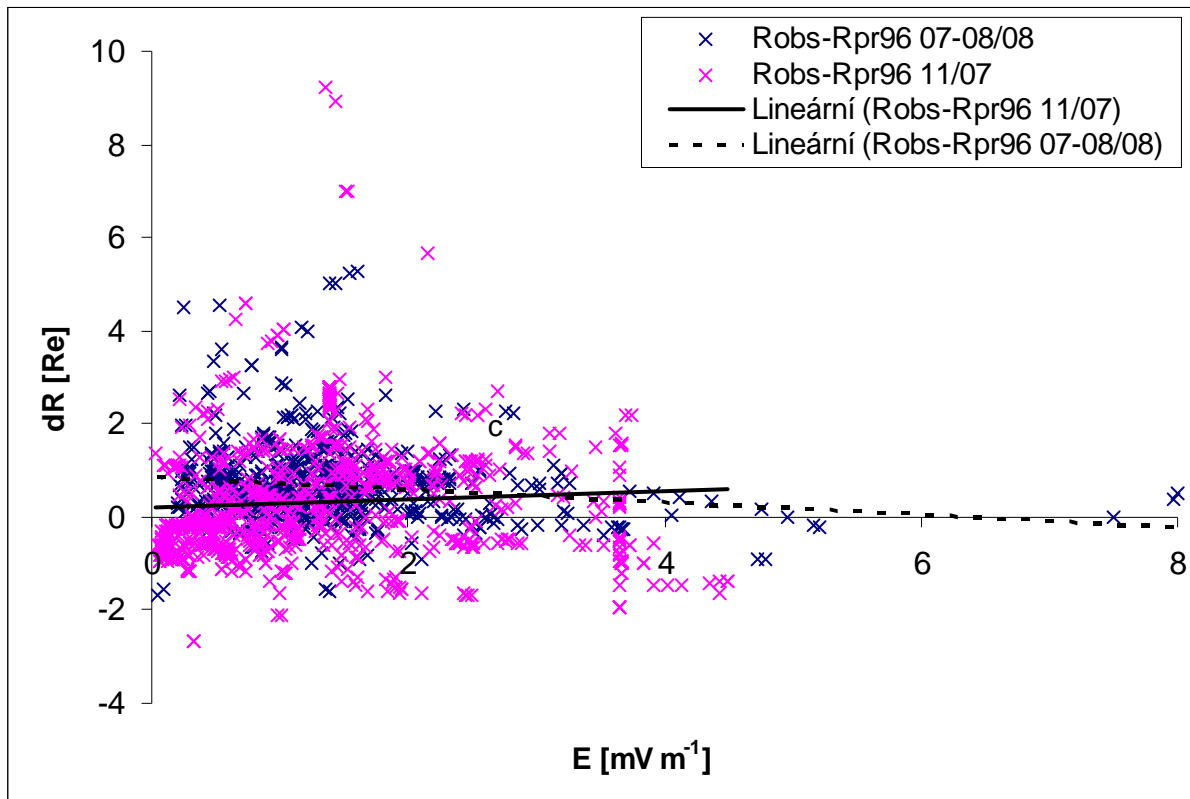


Obrázek 25: Závislost odchylek pozorované magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na průmětu úhlu mezi polohovým vektorem R a vektorem magnetické indukce B do roviny x - y .

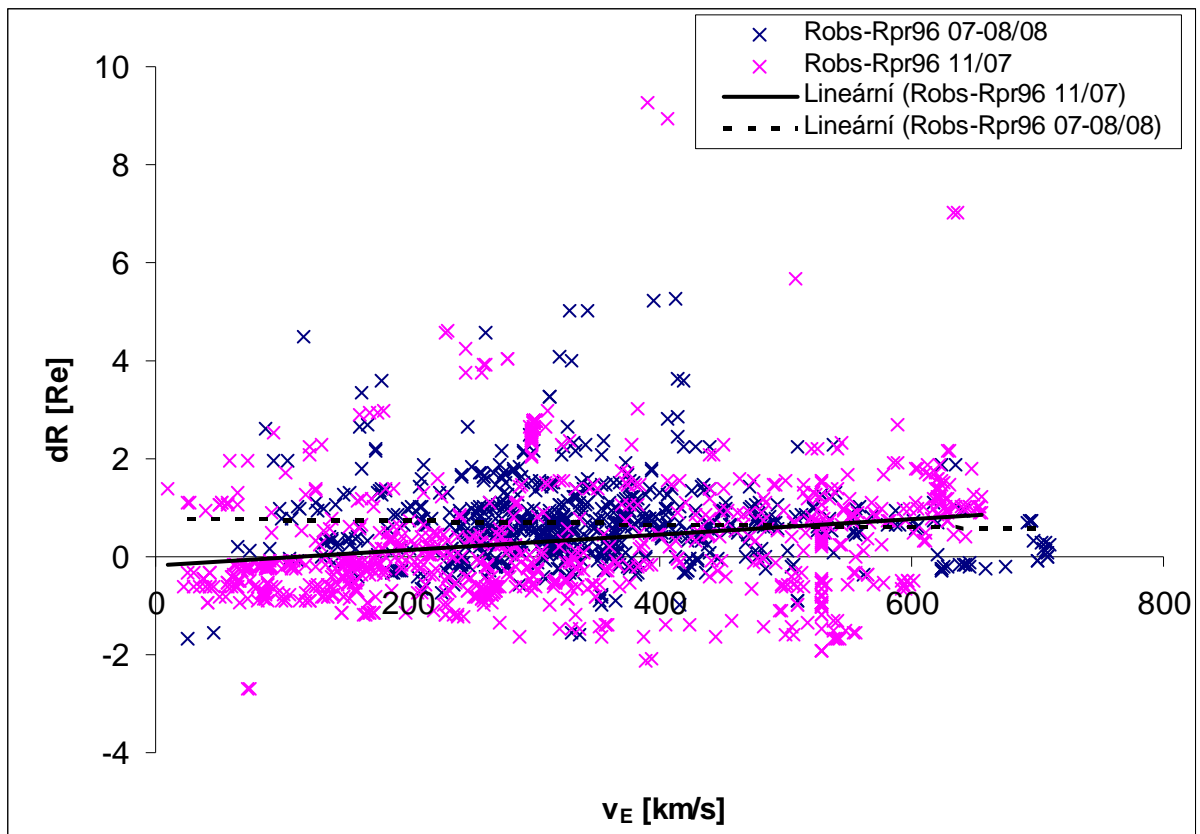
Obrázek 25 ukazuje vliv směru meziplanetárního magnetického pole na polohu magnetopauzy. Směr polohového vektoru přibližně odpovídá směru normály k rázové vlně v oblasti pozorovaného průchodu magnetopauzou. Úhel α tedy přibližně nahrazuje úhel mezi směrem magnetického pole a touto normálou, který je pro klasifikaci typu rázové vlny používán nejčastěji. Přes značný rozptyl bodů ukazuje obrázek 25 překvapivou závislost. Všeobecně se předpokládá, že procesy na rázové vlně jsou ovlivňovány pouze úhlem mezi normálou a magnetickým polem a nikoli orientací tohoto pole. Očekávali bychom tedy odchylky stejné pro úhly 0 a 180° , ale obrázek ukazuje, že odchylka je minimální (blízko 0) pro úhly v okolí nuly, ale naopak maximální (okolo $+1 R_e$) pro úhly blízké 180° . Je tedy zřejmé, že zde musí působit další, obvykle neuvažovaný mechanismus ovlivňující polohu magnetopauzy. Tento mechanismus by mohl být spojen s indukovaným elektrickým polem, které má vliv na pohyb částic odražených od rázové vlny. Komplexní studie vlivu elektrického pole a jím vyvolaného driftu částic přesahuje rozsah diplomové práce, proto zde uvádíme jen několik základních souvislostí.

Obrázek 26 (odchylky od modelu pro různé hodnoty elektrického pole podle vztahu (17)) ukazuje, že samotná velikost indukovaného elektrického pole zřejmě polohu magnetopauzy

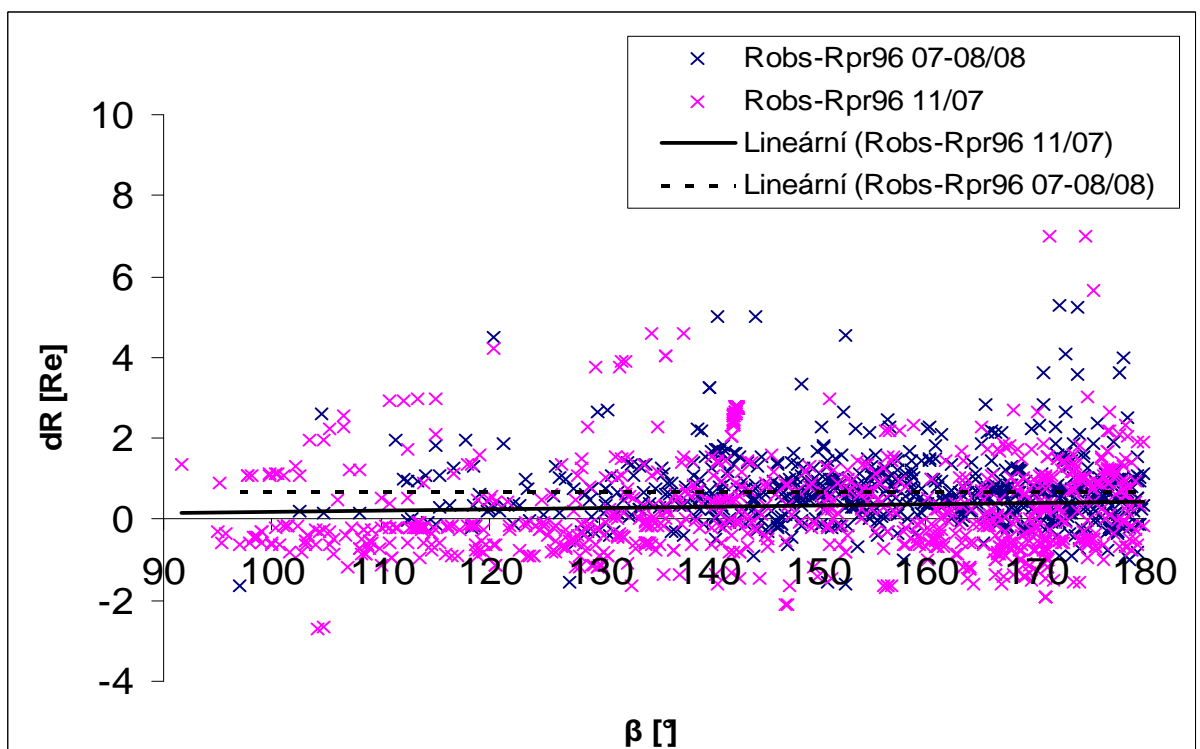
výrazně neovlivňuje. Jistou závislost je možno pozorovat pro oblast terminátoru (plná přímka v obr. 26), ale i ta je zřetelně v rámci statistické chyby. Analogická přímka v obrázku 27, který představuje závislost polohy magnetopauzy na driftové rychlosti v_E , je podstatně věrohodnější a indikuje změnu polohy magnetopauzy o zhruba 1 Re v analyzovaném rozsahu driftových rychlostí. Je zajímavé, že závislost na driftové rychlosti byla pozorována jen pro soubor odpovídající oblasti terminátoru, kdežto subsolární oblast je na tomto parametru nezávislá.



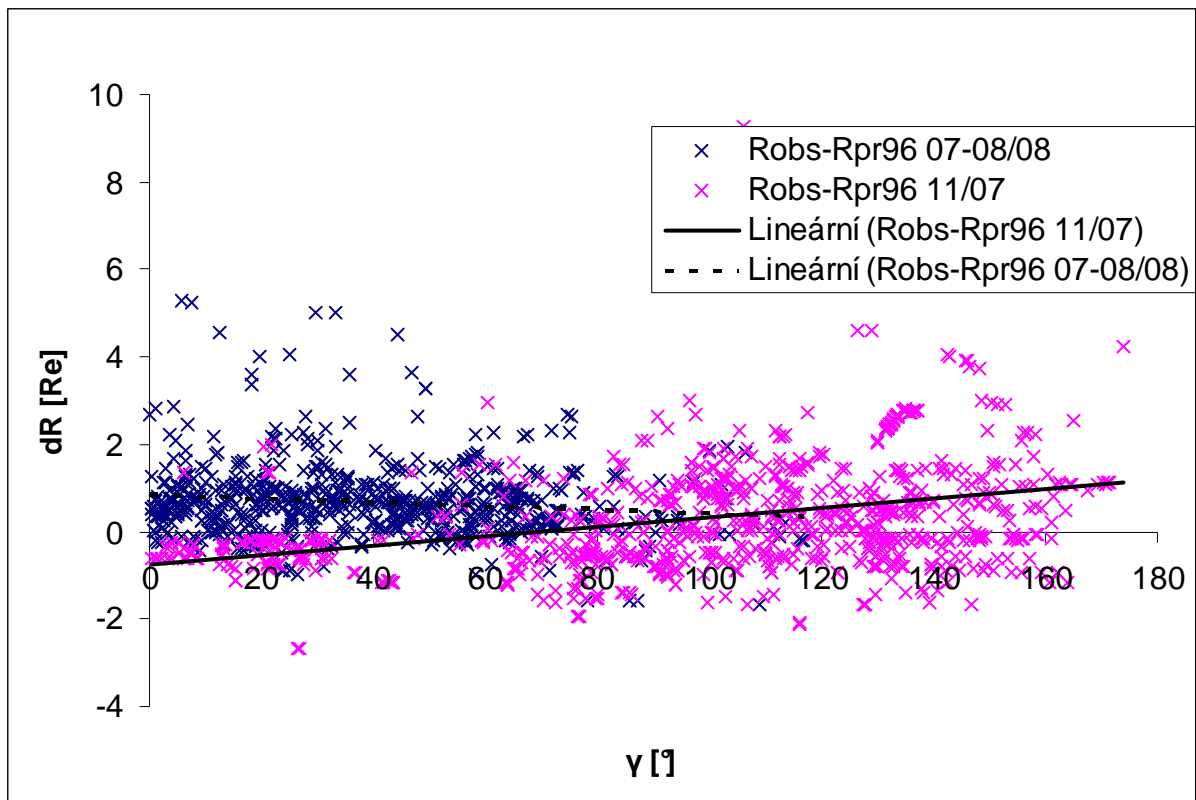
Obr 26: Závislost odchylek pozorované polohy magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na velikosti indukovaného el. pole.



Obr 27: Závislost odchylek pozorované magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na velikosti driftové rychlosti v_E .



Obr 28: Závislost odchylek pozorované magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na průmětu úhlu mezi polohovým vektorem R a $E \times B$ driftem v_E do roviny X-Y.



Obr 29: Závislost odchylek pozorované magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) na průmětu úhlu mezi polohovým vektorem R a vektorem driftové rychlosti v_E do roviny X-Y.

Obě výše analyzované veličiny (tj. indukované elektrické pole a driftová rychlost) jsou vektory, proto jsme kromě jejich velikostí zkusili porovnat i vliv jejich směrů. Obrázky 28 a 29 ukazují výsledky této studie pomocí úhlů β a γ definovaných v začátku této kapitoly. Z obrázku 28 je patrné, že úhel mezi rychlostí slunečního větru a driftovou rychlostí v_E nemá na polohu magnetopauzy prokazatelný vliv (podobně jako velikost elektrického pole na obr. 26). Úhel mezi driftovou rychlostí v_E a polohovým vektorem naopak polohu magnetopauzy v oblasti terminátoru ovlivňuje podstatným způsobem. Největší odchylky byly pozorovány v oblasti úhlů blízkých 180° , to znamená tehdy, když driftová rychlost směřuje do magnetopauzy. To by bylo možno očekávat, ale tyto odchylky jsou kladné, takže není možné je přičíst zvýšení tlaku na magnetopauzu a celý mechanismus ovlivnění její polohy bude komplikovanější. Pro jeho pochopení by bylo nutno provést obdobnou studii i v oblasti komplementárních (večerních) lokálních časů, aby bylo možno rozhodnout, zda se jedná o kompresi magnetopauzy jako celku nebo její lokálnější deformaci.

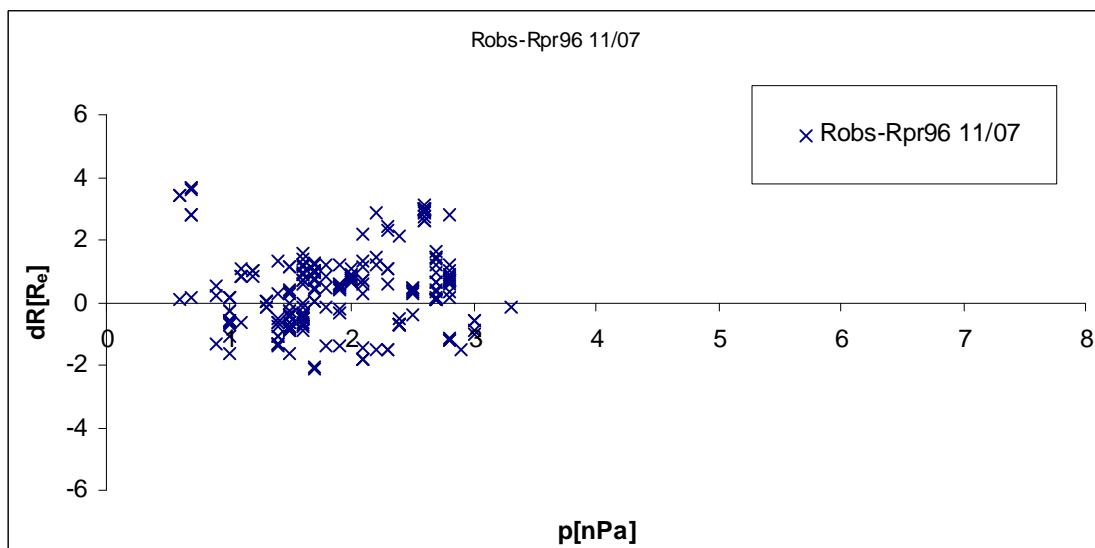
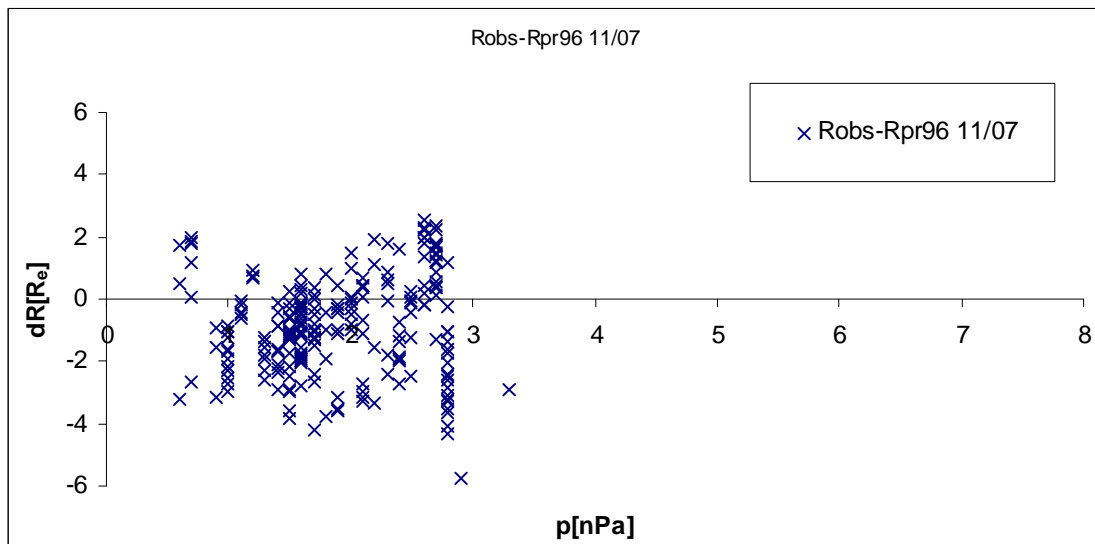
6.6 Themis B jako monitor slunečního větru

V předchozích kapitolách jsme viděli problémy, se kterými se potýkáme při používání vzdáleného monitoru slunečního větru, proto jsme v závěrečné fázi ještě zkusili využít družici Themis B jako blízký monitor slunečního větru. U vzdálených monitorů jsou jejich pozorování zatížena chybou způsobenou trasováním ve směru osy x (rychlost aproximujeme iterativně a používáme medián z určitého časového intervalu) a díky poloze monitoru (tj. často kvůli rozdílným souřadnicím y , z) není možné zaručit, že budeme trasovat sluneční vítr ze správného místa. Výsledkem tak jsou různé soubory dat s různou přesností, získané obecně různými metodami. Použití družice Themis B jako monitoru slunečního větru by mohlo odstranit mnoho z těchto potíží (proto jsme také volili období listopad 2007, kdy trajektorie družice Themis B zasahuje z velké části do oblasti slunečního větru). Družice Themis B v daném období obíhala po trajektorii s apogee 30 R_e a s oběžnou dobou 4 dny. Můžeme tak družici použít jako blízký monitor slunečního větru a tak výrazně snížit chybu způsobenou trasováním. Nevýhodou však bylo, že takto získaných dat bylo poměrně málo, protože náš soubor se zredukoval na 233 případů (z 890).

Z obrázku 30, kde jsou vyneseny odchylky od modelu Petrinec a Russell (1996) pro dva monitory slunečního větru – Themis B a Wind, je vidět lepší shoda s modelem při použití družice Wind a výrazné nadhodnocení polohy magnetopauzy modelem. Podrobněji je to vidět v histogramech odchylek. Tato rozdělení jsme proložili normálním rozdělením a získali jsme tak následující hodnoty: Střed normálního rozdělení se nachází v hodnotě $-0,94 R_e$ pro družici Themis B a $0,40 R_e$ pro družici Wind. Model při použití družice Wind vykazuje menší rozptyl než při použití družice Themis B jako monitoru slunečního větru (směrodatná odchylka $1,24 R_e$ pro družici Wind oproti $1,91 R_e$ pro družici Themis B).

Z hlediska vyhodnocení kvality monitoru není podstatná střední hodnota odchylek, protože ta může být dána nepřesností v kalibraci detektorů jednotlivých družic projektu Themis. Daleko důležitější je rozptyl, který naznačuje, že určení tlaku slunečního větru z dat vzdáleného monitoru je spolehlivější i přes všechny nedostatky zmíněné v úvodu kapitoly.

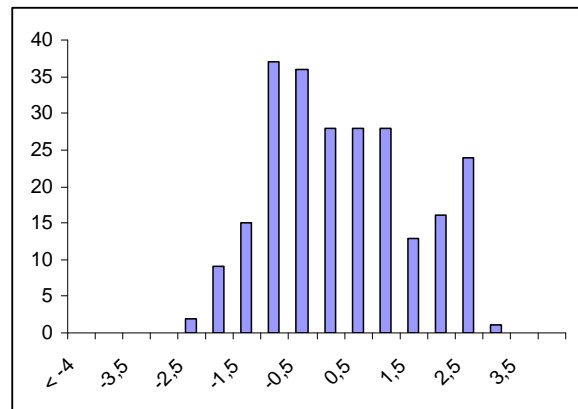
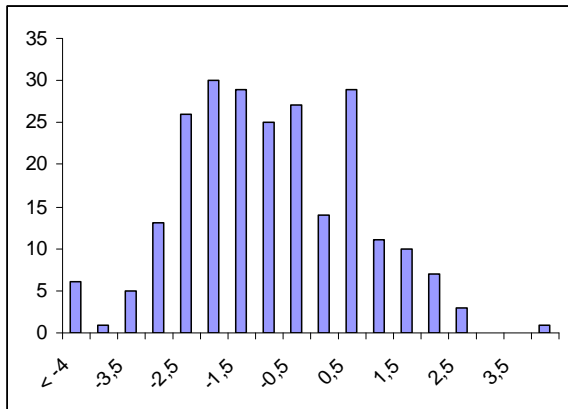
Grafy závislosti odchylek od modelu na IMF Bz pro družici Themis B a Wind zde nezobrazujeme, neboť jsou téměř identické.



Obr. 30: Odchylky pozorované polohy magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996) při použití parametrů slunečního větru z družice Themis B (horní obrázek) a družice Wind (spodní obrázek).

Celkově pro nás použití družice Themis B jako monitoru slunečního větru představuje zklamání. Díky trajektorii družice jsme museli většinu průchodů vyřadit, protože se družice nenacházela ve slunečním větru. Zbýlá data však vykazovala výrazně horší shodu s modelem než družice Wind. Jednou z možných příčin může být, že družici Themis B jsme netrasovali, což mohlo způsobit jistou chybu v časování. Dále se domníváme, a to jsme i částečně očekávali, že měření družice Themis B bylo v podstatné míře ovlivněno oblastí před rázovou vlnou – foreshockem – protože všechna pozorování pocházejí z ranní strany. Na této straně je možno díky střední orientaci meziplanetárního magnetického pole očekávat s vysokou pravděpodobností paralelní rázovou vlnu a tudíž i modifikaci parametrů slunečního větru v oblasti před rázovou vlnou. Pro ověření této hypotézy by bylo žádoucí vyhledat ještě

pozorování polohy magnetopauzy z jarních měsíců roku 2008, kdy se družice Themis nacházely v odpoledních a večerních lokálních časech.



Obr. 31: Histogram odchylek pozorované polohy magnetopauzy od modelu Petrinec a Russell (1996). Vlevo za použití družice Themis B jako monitoru slunečního větru, vpravo při použití družice Wind.

7 Závěr

Cílem diplomové práce bylo statistické studium polohy magnetopauzy a jejích změn, hlavně na základě experimentálních dat z družic Themis, doplněných o data z monitorů slunečního větru, družic Wind., ACE, databáze OMNI a také dalších parametrů, jako jsou magnetosférické indexy a úhel tilt. Při studiu polohy magnetopauzy jsem srovnávali výsledky získané za použití parametrů slunečního větru z těchto monitorů a také jsme používali modely magnetopauzy, konkrétně Petrinec a Russell (1996), Shue a kol. (1997), Shue a kol. (1998). Modelů existuje daleko více, tyto jsou však nejpoužívanější. Dále jsem studovali polohu magnetopauzy s ohledem na další parametry (indexy AE a DST, úhel tilt) a také s ohledem na polohu průchodů družic magnetopauzou. K tomu jsme využili dvou souborů dat z různých oblastí – ze subsolární oblasti a z oblastí terminátoru. Výsledky, kterých jsme dosáhli, můžeme shrnout do následujících bodů:

1. U družic Wind a ACE jsme museli parametry slunečního větru trasovat z polohy monitoru do místa průchodu magnetopauzou. U databáze OMNI tento postup nebyl možný. Z družice ACE zase nebyly pro více než třetinu případů dostupné parametry slunečního větru. Při porovnávání monitorů slunečního větru jsme nejlepšími výsledky dosahovali při použití parametrů ze slunečního větru (tlaku a IMF B_z) z družice Wind. Při použití parametrů slunečního větru z družice Wind vykazoval soubor odchylek od modelů terminátorové oblasti lepší symetrii (polohu mediánu) a odchylky měly nejmenší rozptyl (průměrnou odchylku), v subsolární oblasti byly srovnatelné s databází Wind (z družice ACE chybělo mnoho dat). Z tohoto důvodu jsme vyhodnotili jako nevhodnější monitor družici Wind a používali parametry, které registrovala, jako vstupní hodnoty pro modely dále v práci.
2. Modely byly vytvořeny za podobných podmínek ve slunečním větru (krom modelu Shue a kol. 1998, který zahrnuje i extrémní hodnoty p_{sw}) a v podobných oblastech ($-20 < X_{GSE} < 12 R_E$, $0.5 \text{ nPa} < p_{sw} < 6 \text{ nPa}$, $-7 \text{ nT} < B_z < 7 \text{ nT}$) jako naše soubory dat. Z modelů vykazoval nejpřesnější výsledky model Petrinec a Russell (1996). Modely se mezi sebou lišily symetrií (polohou mediánu – až o $0,5 R_E$), naopak vykazovaly velmi podobný rozptyl odchylek. Celkově můžeme říci, že modely poskytovaly velmi podobné výsledky, ale model Petrinec a Russell (1996) prokázal největší přesnost v obou souborech průchodů - jak v subsolární oblasti, tak v oblasti terminátoru.

Pravděpodobně je to dáno tím, že používá dva různé předpisy pro denní a pro noční stranu magnetopauzy. Tento model jsme používali dále pro svoji analýzu.

3. Z této analýzy vyplývá, že významná závislost na indexu AE nebyla pozorována. Jiná situace panovala u indexu DST, pro subsolární oblast jsme také nepozorovali významnou závislost, naopak pro oblast terminátoru jsme metodou nejmenších čtverců získali klesající lineární závislost na indexu DST. Toto rozdílné chování může být způsobené rozdílnou geometrií a také skutečností, že pro subsolární oblast nám chyběl dostatek hodnot $DST < -30$.
4. Při úvahách, zda polohu magnetopauzy ovlivňuje elektrické pole indukované pohybem slunečního větru a v něm zamrzlého magnetického pole jsme ukázali, že největší vliv má úhel mezi driftovou rychlostí v_E a polohovým vektorem R , a to hlavně v oblasti terminátoru. Největší odchylky byly pozorovány v oblasti úhlů blízkých 180° , což znamená, že driftová rychlost směřuje do magnetopauzy. To by bylo možno očekávat, ale tyto odchylky jsou kladné, takže není možné je přičíst zvýšení tlaku na magnetopauzu a celý mechanismus ovlivnění její polohy bude komplikovanější.
5. Použití družice Themis B jako monitoru slunečního větru nesplnilo naše očekávání, jednak kvůli malému počtu případů, jednak, podle očekávání, že měření družice Themis B bylo v podstatné míře ovlivněno oblastí před rázovou vlnou, protože všechna pozorování pocházejí z ranní strany, kde obvykle je registrována paralelní rázová vlna.

Závěrem několik poznámek. Společnou vlastností porovnávaných modelů je to, že fitují magnetopauzu plochou druhého řádu za pomoci dvou nezávislých parametrů (IMF B_z a p_{sw}). Magnetopauza je však složitější struktura a není možné ji plně popsat plochou druhého řádu (zejména oblastí kaspů), v ekvatoriální oblasti s plochou druhého řádu vystačíme. Naproti tomu vliv na polohu a tvar magnetopauzy mají i jiné parametry. Novější modely [27][29] zahrnují vliv úhlu tilt. Zatím však žádný model neobsahuje parametry popisující další vlivy na procesy probíhající na magnetopauze. Naše práce přináší několik podnětů pro další studie.

8 Literatura

- [1] Alexeev I.K., Kalgaev V.V., Lyutov Yu.G., The parabolic magnetopause form and location versus solar wind pressure and IMF, 9th Scientific Assembly of IAGA, Birmingham, July 19-24, A343, 1999
- [2] Angelopoulos, V., The THEMIS mission, *Space Sci. Rev.* 141, 5, 2000
- [3] Auster, H. U., et al., The THEMIS Fluxgate Magnetometer, *Space Sci. Rev.*, 141, 235, 2008
- [4] Bevington, P.R., *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, McGraw-Hill, New York, 1969
- [5] Boardsen S.A., Eastman T.E., Sotirelis T., Green J.L., An empirical model of the high-latitude magnetopause, *J. Geophys. Res.*, 105, 23193-23219, 2000
- [6] Chen F.F., *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Springer, New York, 2004.
- [7] Chiu N.C., *Ace Spacecraft*, *Space Science Reviews* 86, 257–284, 1998.
- [8] Choe J.Y., Beard D.B., Sullivan E.C., Precise calculation of the magnetosphere surface for a tilted dipole, *Planetary and Space Science*, Vol. 21, 3, 485-493, 1973,
- [9] Fairfield D.J., Average and unusual locations of the earth's magnetopause and bow shock *J. Geophys. Res.*, 76, 6700-6716, 1971
- [10] Formisano V., Domingo V., Wenzel K.-P., The three-dimensional shape of the magnetopause, *Planet. Space Sci.*, 27, 1137-1149, 1979
- [11] Jelinek, K., Nemecek, Z., Safrankova, J., Merka, J., Influence of the tilt angle on the bow shock shape and location. (*J. Geophys. Res-Space Phys.*), A05220, 2008
- [12] Kawano H., Petrinec S.M., Russell C.T. and Higuchi T., Magnetopause shape determinations from measured position and estimated flaring angle, *J. Geophys. Res.*, 104, 247, 1999
- [13] Kertz, W., Ein neues Mass für die Feldstärke des erdmagnetischen äquatorialen Ringstroms, *Abh. Akad. Wiss. Göttingen Math. Phys.*, 2, 83pp, 1958.
- [14] Kertz, W., Ring current variations during the IGY, *Ann. Int. Geophys. Year*, 35, 49, 1964.
- [15] Kivelson M.G., Russell C.T. *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press, 1995

- [16] Kuzentsov S.N., Suvorova A.V., Empirical model of the dayside magnetopause INP MSU Preprint 96-37/444, 1996.
- [17] Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F., Farrell W.M., Slavin J.A., Schtten K.H., Mariani F., Ness N.F., Neubauer F.M., Whang Y.C., The WIND magnetic field investigation, *Space. Sci. Rev.*, 71, 207, 1995
- [18] McComas, D. J., Bame, S. J., Barker, P., et al.: Solar Wind Elektron Proton Alpha Monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer, *Space Sci. Rev.*, 86(1–4), 563–612, 1998.
- [19] McFadden, J. P., C. W. Carlson, D. Larson, M. Ludlam, R. Abiad, B. Elliott, P. Turin, M. Marckwordt, and V. Angelopoulos, The THEMIS ESA plasma instrument and in-flight calibration, *Space Sci. Rev.*, 141, 277, 2008
- [20] Möbius, E., et al., The Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer (SEPICA) and the Data Processing Unit (S3DPU) for SWICS, SWIMS and SEPICA, *Space Science Reviews*, 86, 447, 1998
- [21] Ogilvie K.W. et al., SWE, a comprehensive plasma instrument for the Wind spacecraft, *Space Sci. Rev.*, 71, 41-54, 1995
- [22] Olson W.P., The shape of the tilted magnetopause, *J. Geophys. Res.* 74. 5642-5651, 1969
- [23] Petrinec S.M., Russell C.T., Near-Earth magnetotail shape and size as determined from the magnetopause flaring angle, *G. Geophys. Res.*, 101, 137-152, 1996.
- [24] Petrinec S.M., Russell C.T., A test of empirical magnetopause models during CME event of January 10-11, spring 1997 American Geophysical Union Poster, 1997.
- [25] Roelof E.C., Sibeck D.G., Magnetopause shape as a bivariate function of interplanetary magnetic field B_z and solar wind dynamic pressure, *J. Geophys. Res.*, 98, 21421-21450, 1993.
- [26] Safrankova J., Nemecek Z., Borodkova N., Dusik S., Borak M., Karac M., Magnetopause and bow shock location and their comparison with models, *Geophys Res. Abstracts*, 2, 951, 2000.
- [27] Safrankova J., Nemecek Z., Dusik S., Prech L., Sibeck D.G., Borodkova N., The magnetopause shape and location: A comparison of the INTERBALL and GEOTAIL observation with models, *Annales Geophysicae* 20, No. 3, 301-309, 2002.
- [28] Hayosh, M, Nemecek, Z, Safrankova, J, Zastenker, GN Variations of the magnetosheath ion flux and geomagnetic activity *Adv. Space Res.*, 36 (12): 2417–2422, 2005.
- [29] Safrankova, J; Dusik, S; Nemecek, Z, The shape and location of the high-latitude magnetopause, *Adv. Space Res.*, 36 (10): 1934–1939, 2005.

- [30] Shue J.-H., Chao J.K., Fu. H.C., Russell C.T., Song P., Khurana K.K., Singer H.J., A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape, *J. Geophys. Res.*, 102, 9497-9511, 1997
- [31] Shue J.-H., Chao J.K., Fu. H.C., Khurana K.K., Russell C.T., Singer H.J. and Song P., Magnetopause location under extreme solar wind conditions, *J. Geophys. Res.*, 103, 17691, 1998
- [32] Sibeck D.G., Lopez R.E., Roelof E.C., Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion, *J. Geophys. Res.*, 96, 5489-5495, 1991.
- [33] Smith Charles W., The ACE Magnetic Fields Experiment, *Space Science Reviews* 86, Nos 1-4, 1998
- [34] Smith, C. W., L'Heureux, J., Ness, N. F., et al.: The ACE magnetic fields experiment, *Space Sci. Rev.*, 86(1-4), 613-632, 1998.
- [35] Stern D.P., Modeling the field of the global magnetopause, *Physics of the Magnetopause*, *Geophys. Monograph* 90, 45-51, 1995
- [36] Hamilton, D. Hovestadt, B. Klecker, R. A. Mewaldt, M. Scholer, E. C. Stone, and T. T. von Rosenvinge, *AIP Conf. Proc.* 203, 44, 1990
- [37] Sugiura, M., Hourly values of equatorial Dst for the IGY, *Ann. Int. Geophys. Year*, 35, 9, Pergamon Press, Oxford, 1964.
- [38] Sugiura, M., and S. Hendricks, Provisional hourly values of equatorial Dst for 1961, 1962 and 1963, *NASA Tech. note D-4047*, 1967.
- [39] Domovská stránka Projektu Wind, <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/wind>
- [40] Domovská stránka NASA, <http://wind.nasa.gov/>
- [41] Domovská stránka družice ACE, <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>
- [42] Domovská stránka databáze OMNI, <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>
- [43] Domovská stránka projektu Themis,
http://www.nasa.gov/mission_pages/themis/main/index.html
- [44] Domovská stránka přístroje FGM,
http://www.nasa.gov/mission_pages/themis/spacecraft/FGM.html
- [45] Domovská stránka přístroje ESA,
http://www.nasa.gov/mission_pages/themis/spacecraft/ESA.html
- [46] Domovská stránka univerzity v Kjótu <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/index.html>