



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jakub Podgorný

**Možné přírodní emise detekované
družicí Mars Express**

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

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

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2017

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

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

V Praze dne 28. dubna 2017

Podpis autora Jakub Podgorný

Název práce: Možné přírodní emise detekované družicí Mars Express

Autor: Jakub Podgorný

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

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

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá detekcemi přírodních emisí přístrojem MARSIS na družici Mars Express. Jsou zpracovávány frekvenční a časové údaje o radarových intenzitách měřených tímto přístrojem, tzv. ionogramy. V těchto ionogramech jsou stanoveny význačné oblasti, které neodpovídají žádným fyzikálně opodstatněným zvýšením intenzit při radarovém snímání ionosféry Marsu. V rámci nich jsou na základě pevně stanovené prahové podmínky vybrány ionogramy s možnou detekcí bleskových výbojů. Ty jsou posléze porovnávány s relevantními údaji o prachových bouřích v atmosféře Marsu. Následně je proveden detailní rozbor průměrných intenzit ze všech ionogramů a jejich závislosti na relevantních parametrech. Po odstranění primární závislosti na výšce družice jsou studovány efekty dlouhodobějšího charakteru, jako je závislost na solární délce L_s , solárním zenitním úhlu, velikosti povrchových magnetických polí a parametru $F10.7$.

Klíčová slova: ionosféra Marsu, detekce bleskových výbojů, radarové sondování, ionogram

Title: Possible natural emissions detected by the Mars Express spacecraft

Author: Jakub Podgorný

Department: Department of Surface and Plasma Science

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

Abstract: The presented thesis deals with detections of natural emissions by the MARSIS instrument on the Mars Express spacecraft. Frequency and time delay data of the radar intensities measured by this instrument (“ionograms”) are analysed. We identify specific regions of these ionograms that do not correspond to any intensity increases related to the radar sounding of the Martian ionosphere. Within these intervals we select ionograms with a possible detection of lightning emissions based on a predefined threshold criterion. These ionograms are then juxtaposed with relevant information on dust storms in the Martian atmosphere. We further perform a detailed analysis of the dependence of mean ionogram intensities from all ionograms on relevant parameters. After the elimination of the principal dependence on the spacecraft altitude, we study long-term effects, such as the dependence on the solar longitude Ls , the solar zenith angle, the magnitude of crustal magnetic fields, and the $F10.7$ parameter.

Keywords: Martian ionosphere, lightning emission detection, radar sounding, ionogram

Rád bych poděkoval svému vedoucímu RNDr. Františku Němcovi, Ph.D. za výměnu vyčerpávajících 133 mailů a ochotu poskytovat další osobní konzultace. Původně zápočtový projekt tak dal vzniknout rozsáhlejší analýze a následně celé bakalářské práci. Dále bych rád poděkoval mým nejbližším za umožnění vynikajících podmínek pro studium.

Obsah

Úvod a cíle práce	2
1 Důležité planetární jevy a kosmické počasí	3
2 Přístroj MARSIS a principy radarového pozorování	5
2.1 Družice Mars Express	5
2.2 Přístroj MARSIS	5
2.3 Šíření signálu v plazmatu	6
2.4 Analýza typického ionogramu	7
3 Studium výjimečně impulzivních událostí	10
3.1 Identifikace intervalů a výběr ionogramů	10
3.2 Vyhodnocení vybraných ionogramů	12
4 Analýza intenzit v závislosti na relevantních parametrech	17
4.1 Výška družice	17
4.2 Parametr L_s	19
4.3 Solární zenitní úhel	20
4.4 Magnetická pole	21
4.5 Parametr $F10.7$	23
5 Diskuze	26
Závěr	29
Seznam použité literatury	30

Úvod a cíle práce

Podnětem k sepsání práce byla nejnovější data nashromážděná družicí Mars Express (vyslanou Evropskou kosmickou agenturou ESA v roce 2003), která dosud nepodlehla širšímu zpracování. Všechna zpracovávaná data v této práci jsou tudíž aktuální k roku 2015. Text práce se zaměřuje především na analýzu dat získaných přístrojem MARSIS. Cíle práce jsou následující:

1. Seznámení se s přístrojem MARSIS a principem radarového pozorování ionosféry.
2. Identifikace intervalů (pravděpodobně) neovlivněných vysílaným signálem.
3. Analýza pozorovaných intenzit v závislosti na relevantních parametrech.
4. Studium výjimečně intenzivních impulzivních událostí.

V Kapitole 1 diskutujeme všechny podstatné fyzikální jevy, které budou vstupovat do detekce přírodních emisí ve vrchní oblasti ionosféry Marsu. Jedná se o rešerši dostupné literatury, která podstatné problémy stručně shrnuje, nikoli do detailu rozebírá. Splněním prvního cíle se pak zabývá Kapitola 2. Ta navazuje přehledem mise Mars Express a detailním popisem přístroje MARSIS na palubě této družice a vyhodnocením typických dat, která tento přístroj poskytuje.

V Kapitole 3 začíná vlastní zpracování dat vytvořených programem pro načítání a kreslení tzv. ionogramů měřených přístrojem MARSIS. Nejprve byla provedena identifikace intervalů (pravděpodobně) neovlivněných vysílaným signálem (tj. splnění druhého cíle). Následuje rozbor výjimečně intenzivních impulzivních událostí a jejich možná souvislost s případnými bleskovými výboji v průběhu prachových bouří na Marsu (tj. splnění čtvrtého cíle). Tato pasáž byla zpracována na základě Gurnett a kol. (2010), ovšem využívá inovativnějších postupů a obohacuje původní výsledky o nová data, která tehdy ještě nebyla k dispozici.

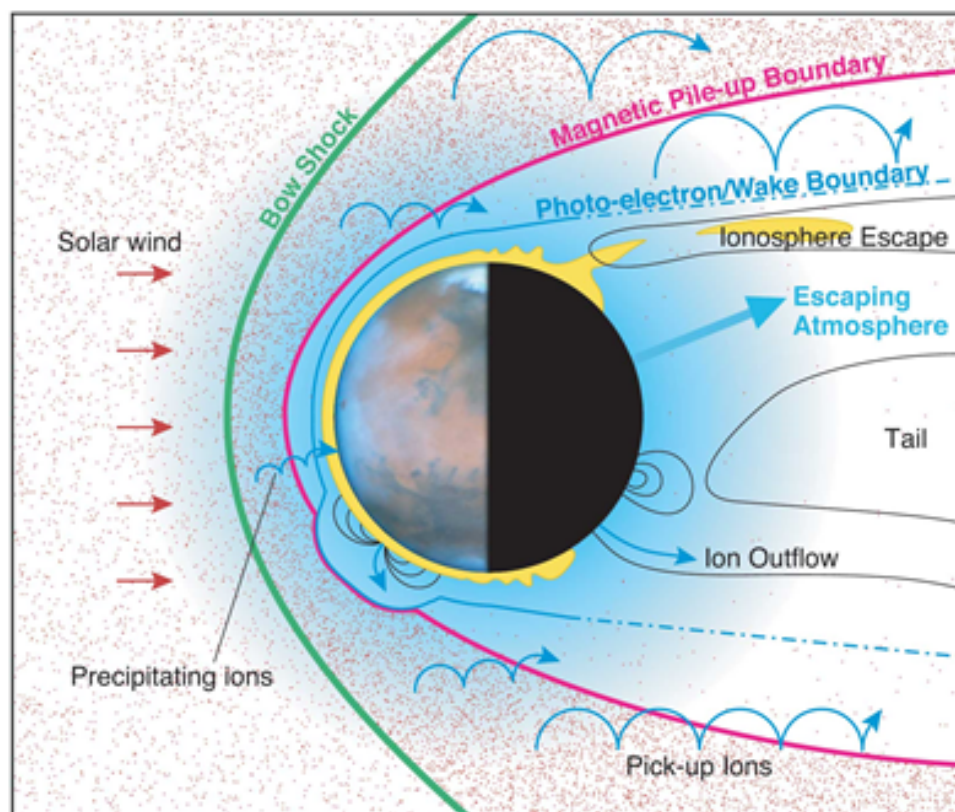
Třetí cíl pak zaštiťuje Kapitola 4. Po rozboru základní závislosti měřených intenzit na výšce družice jsou následně na základě této podkapitoly zpracovány závislosti i na dalších relevantních parametrech: ročním období, solárním zenitním úhlu, magnetických polích a intenzitě ionizujícího záření. Alternativy ve zpracování a možné systematické chyby způsobené přístrojem MARSIS jsou dále (a s odkazem na všechny předchozí kapitoly) rozebrány v Kapitole 5.

Veškeré zpracování dat v této práci proběhlo v programovacím jazyce a vývojovém prostředí IDL (Interactive Data Language), vč. vykreslení použitých závislostí (zbylé obrázky, které jsou převzaté, jsou v textu řádně vyznačeny).

1. Důležité planetární jevy a kosmické počasí

Studium jevů souvisejících s detekcí možných přírodních emisí družicí Mars Express lze vymezit na dvě nejdůležitější oblasti. Zaprvé je to studium propustnosti planetárních ionosfér, jakožto svrchních atmosférických oblastí, ve kterých se družice pohybuje. Zadruhé je to tzv. sluneční vítr a indukovaná magnetosféra Marsu, která se v důsledku jeho interakce s atmosférickým prostředím formuje.

O stručný úvod do této problematiky se pokusíme pomocí Obrázku 1.1. Nejprve je potřeba vymezit oblast, ve které výše zmíněné fyzikální jevy studujeme. Tou je vesmírný prostor počínající tam, kde atmosféra Marsu začíná být ionizovaná solární a kosmickou radiací, a končící tam, kde okolní prostředí již není ovlivněno existencí Marsu. Takto vymezená oblast je plna vysoce ionizovaného plazmatu, tedy „elektricky vodivého plynu s atomy disociovanými na kladné ionty a záporné elektrony,“ (Chen, 1984).



Obrázek 1.1: Blízký prostor Marsu. Slunce se nachází na levé straně obrázku. Červené tečky a šipky naznačují tzv. sluneční vítr v podobě nabitých částic. Zelená a růžová linka znázorňují podstatné hraniční oblasti, tzv. rázovou vlnu a hranici indukované magnetosféry. Žlutá oblast představuje ionosféru Marsu, modré stíny ilustrují průběh hustoty neutrální atmosféry Marsu. Černé křivky naznačují magnetické siločáry. Modré šipky značí pohyby iontů. Vpravo na obrázku můžeme vidět efekty tzv. planetární brázdy (anglicky „wake“). Převzato z <http://lasp.colorado.edu/home/mop/files/2012/04/14Mars.jpg>, F. Bagenal a S. Bartlett.

Největším zdrojem horkého (typicky $5 \times 10^4 - 5 \times 10^5$ K), zmagnetizovaného (v jednotkách nT) plazmatu s nízkou hustotou ($1-10$ částic/cm³) je Slunce. Tento tzv. sluneční vítr se pohybuje rychlostí 300 – 800 km/s. J. G. Luhmann v kapitole 8 Kivelson a kol. (1995) rozebírá, že v důsledku interakce slunečního větru s Marsovým prostředím vznikají dvě perzistentní plazmové hranice (viz Obrázek 1.1): indukovaná magnetosférická hranice (induced magnetosphere boundary, IMB) a rázová vlna (bow-shock), obojí ve tvaru eliptického paraboloidu ve výšce přibližně $0,3 R_m$ až $0,6 R_m$ nad povrchem, kde $R_m = 3396,2$ km je poloměr Marsu (Brož a Šolc, 2013). Hranicí zde máme na mysli strukturu, přes kterou vlastnosti prostředí vykazují výrazné změny. Tyto dvě hranice pak jasně vymezují tři odlišné regiony — ionosféru a magnetosféru, magnetický obal (magnetosheath) a meziplanetární prostor. V rámci těchto regionů se vlastnosti plazmatu mění pozvolna (více viz Kivelson a kol. (1995) v kapitole 8).

Pro družici Mars Express je nejpodstatnější oblast nejbliže povrchu planety — ionosféra. J. G. Luhmann v kapitole 7 Kivelson a kol. (1995) rozebírá vznik obecné ionosféry jako interakci solární radiace s elektricky neutrální atmosférou planety, do které přes indukovanou magnetosféru proniká záření od ultrafialového po tvrdé rentgenové (proniká až do nejspodnějších oblastí), dokud není absorbováno na konkrétních výškách tvořících vrstvy ionizovaného plynu. Kromě slunečního záření (tzv. fotoionizace) přispívá ke vzniku ionosféry i kosmické záření a tzv. částicová nárazová ionizace (nabitě částice o energiích ≥ 1 keV), a to především v nočních oblastech. Pro propagaci elektromagnetických vln a jejich detekci hraje klíčovou roli plazmová frekvence, o které bude pojednáno níže.

Popišme ještě podrobněji strukturu ionosféry Marsu. Typická je dvojrstvá struktura. Dominantní oblastí je fotochemicky kontrolovaná hlavní vrstva, nazývaná M2, produkovaná extrémně ultrafialovým zářením. Typická výška této vrstvy je přibližně 120 – 150 km a závisí na solárním zenitním úhlu (Withers, 2009). Pod vrstvou M2 se nachází vrstva s nižší hustotou plazmatu, nazývaná M1, tvořená primárně absorpcí měkkého rentgenového slunečního záření. Nad vrstvou M2 dochází k úbytku hustoty plazmatu s rostoucí výškou od povrchu, často s exponenciálním průběhem. Strukturou a původem indukované magnetosféry, magnetického obalu a rázové vlny se podrobněji zabývá např. Kivelson a kol. (1995).

2. Přístroj MARSIS a principy radarového pozorování

2.1 Družice Mars Express

Družice Mars Express, vyslaná 2. června 2003, je vůbec první družicí Evropské kosmické agentury k Marsu. Primárním cílem projektu je obohatit a zpřesnit předchozí studium Marsu americkými družicemi Mars Global Surveyor, Mars Odyssey a Mars Exploration Rovers. Původní součástí projektu byl i přistávací modul Beagle 2, ten však z technických důvodů svou misi nedokončil, více viz Chicarro a kol. (2004).

Mars Express je družice určená ke studiu nitra planety, jejího povrchu i atmosféry. Právě poslední zmiňovaná oblast je pro tuto práci klíčová. Družice byla umístěna na eliptickou dráhu s perigeem 250 km a apogeem 10 142 km nad povrchem planety, s kvazi-polární inklinací $86,35^\circ$ a periodou 6,75 h (Chicarro a kol., 2004). Vykona tak lehce přes 3 orbity za 1 sol (časová jednotka odpovídající střednímu slunečnímu dni na povrchu planety Mars, rovná se asi 1,025 středního slunečního dne na Zemi, Brož a Šolc (2013)) a zhruba 2293 orbitů za periodu oběhu Marsu kolem Slunce (tj. přibližně 687 středních slunečních dní, Brož a Šolc (2013)). Data z družice dostupná pro tuto práci jsou z let 2005 až 2015. Orbitální modul obsahuje celkem šest hlavních přístrojů, mezi nimi jsou ty sloužící k povrchovým a podpovrchovým studiím (HRSC high-resolution stereo barevná kamera, OMEGA IR spektrometr pro mineralogické mapování, MARSIS podpovrchový a ionosférický skenovací radar), a ty sloužící k výzkumu atmosféry Marsu (PFS planetární fourierovský spektrometr, SPICAM UV a IR atmosférický spektrometr, ASPERA analyzátor pro studium neutrálních atomů). Více o jednotlivých přístrojích a průběhu mise pojednává Chicarro a kol. (2004).

2.2 Přístroj MARSIS

Pro tuto práci je nejpodstatnější radarový nízko-frekvenční vysílač a přijímač MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding). Primární účely přístroje MARSIS jsou detekce vodních zdrojů v různě dostupných geologických prostředích, podpovrchové a povrchové topografické mapování a právě ionosferické sondování a výzkum horních vrstev atmosféry. Pro povrchová studia pracuje nadir-orientovaný vysílač s širokopásmovou škálou pulzů, které jsou schopny proniknout až pod povrch planety a které jsou reflektovány dielektrickými nespojitostmi při změnách struktury a složení povrchu (Picardi a kol., 2004). Při studiu ionosféry jsou využívány krátké pulzy v užších pásmech na různých frekvencích, které se odráží od plazmatu v závislosti na hustotě a výšce nad povrchem (bude pojednáno dále).

Podpovrchový radar pracuje se čtyřmi možnými frekvenčními pásmy o šířce 1 MHz při $250\mu\text{s}$ periodě vysílání pulzu. Obsahuje jak vysílač, tak přijímač, které sdílejí 40 m dlouhou dipólovou anténu (od špičky ke špičce, instalovanou horizontálně k povrchu planety) a sekundární 7 m dlouhou monopólovou anténu (pouze

přijímač pro izolaci podpovrchových odrazů, instalovaná vertikálně k povrchu planety – zaznamenává tak pouze šikmo odražené pulzy). Ionosférický radar využívá rovněž dipólovou anténu, ovšem operuje v jeden okamžik pouze na jednom úzkém pulzu. Během ionosférického sondovacího módu projde přístroj MARSIS 160 logaritmicky oddělených frekvencí f (platí $\Delta f/f \approx 2\%$) od 0,1 MHz do 5,5 MHz. Délka jednoho pulzu je 91 μs a intenzity detekovaných odezev jsou zaznamenány v 80 intervalech časových zpoždění přes celkový interval záznamu dat 7,31 ms. Celková délka jednoho ionosférického skenování je 1,76 s a opakuje se každých 7,54 s (Picardi a kol., 2004).

Tato ionosférická měření probíhají (na rozdíl od podpovrchových) rovnoměrně přes den i v noci a při výšce družice do 1400 km nad povrchem (v ojedinělých případech i výše). Družice následně digitalizuje zaznamenaná data a vysílá je kompaktně v rozsahu přibližně 1 až 6 Gbit za den do přijímače New Norcia, odkud jsou dále tříděny a distribuovány Evropskou kosmickou agenturou (Chicarro a kol., 2004). Přenos a zpětná digitalizace signálu probíhá na družici přes Radiový frekvenční subsystém (RFS, s jedním vysílacím kanálem a dvěma přijímacími kanály pro každou anténu) a Digitální elektronický subsystém (DES, obsahující generátor signálu, časovou a kontrolní jednotku a procesor). Podrobné technické specifikace těchto přístrojů jsou uvedeny v Picardi a kol. (2004).

2.3 Šíření signálu v plazmatu

Před analýzou dat získaných radarovým přístrojem MARSIS bude nutné provést seznámení s šířením elektromagnetických vln v ionosféře, ve které měření probíhají. Horizontálně stratifikovaná ionosféra představuje téměř perfektní odrazivé prostředí pro radarové sondování. Reflexe probíhá díky tomu, že elektromagnetické záření se nemůže šířit v plazmatu pod tzv. plazmovou frekvencí při absenci magnetického pole, což je v případě Marsu dobrá aproximace. F. Chen v podkapitole 4.3 (Chen, 1984) popisuje plazmové oscilace jako důsledek vychýlení lehkých elektronů prvotním impulzem vůči těžkým iontům, které má následně autoneutralizační charakter, a elektrony tak díky setrvačnosti mohou kolem takřka pevných iontů oscilovat s charakteristickou frekvencí. Dále pak na základě zjednodušujících předpokladů (nulové magnetické pole¹, žádný tepelný pohyb, homogenní rozložení v prostoru, jednosměrné oscilace a nekonečné pracovní pole) tuto frekvenci odvozuje jako

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1)$$

kde n_e je hustota elektronů v plazmatu, e je náboj elektronu, ε_0 je relativní permitivita vakua a m_e je hmotnost elektronu. Při numerickém výpočtu lze vztah 2.1 psát jako (Gurnett a kol., 2005)

$$\omega_p/2\pi = f_p = 8980\sqrt{n_e} \text{ Hz}, \quad (2.2)$$

kde n_e je v cm^{-3} . Podstatné zjištění tedy je, že plazmová frekvence závisí pouze na hustotě elektronů.

¹Kivelson a kol. (1995) k tomuto dodává, že přestože je magnetické pole téměř vždy ve vesmírném plazmatu přítomné, je většinou tento předpoklad ospravedlnitelný pro tento případ.

Zároveň odvozením disperzní relace lze ukázat (Kivelson a kol. (1995), podkapitola 12.3.1), že tato porucha se plazmatem nešíří, nebo jen mírně, pokud opustíme předpoklad chladného plazmatu. Kivelson a kol. (1995) v podkapitole 12.3.4 dále odvozuje disperzní relaci pro elektromagnetickou vlnu v nezmagnetizovaném plazmatu (samotná vlna s sebou magnetické pole nese):

$$\omega^2 = \omega_p^2 + k^2 c^2, \quad (2.3)$$

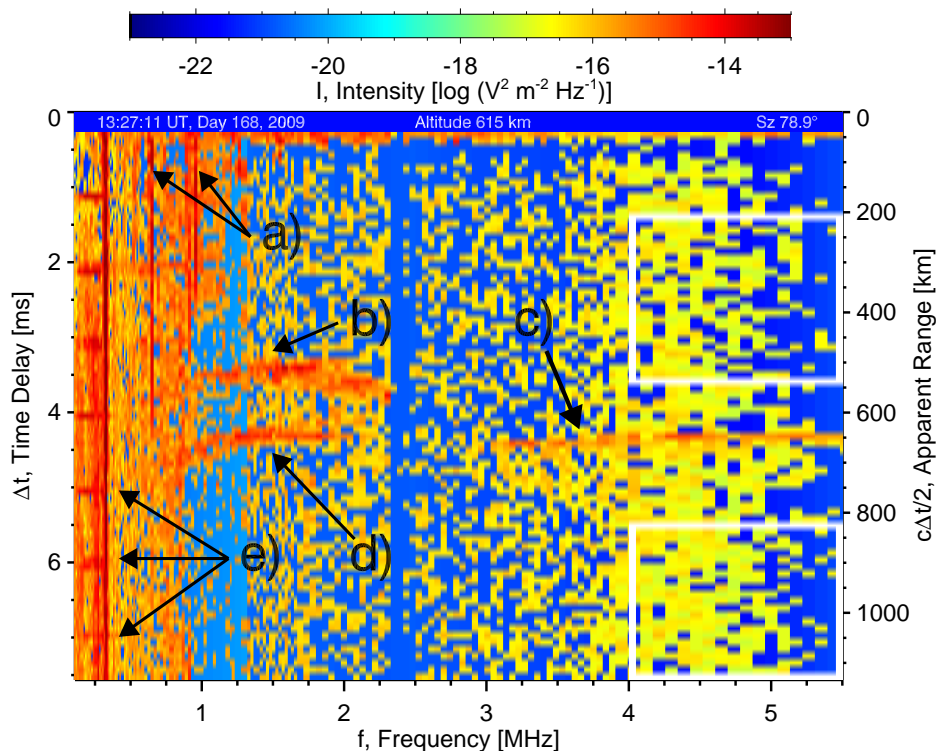
kde ω je frekvence vlny, k její vlnčet a c rychlost světla ve vakuu. Pro frekvence vysoko nad plazmovou frekvencí tedy probíhá šíření jako ve volném prostoru, naopak pro $\omega < \omega_p$ bude index lomu $n = ck/\omega$ imaginární, vlna se nešíří a zaniká. Na rozhraní $\omega = \omega_p$ pak dochází k odrazu vlny. Měřením mnoha různých frekvencí a jim příslušných možných zpoždění mezi vysláním signálu a návratem odražené vlny tak můžeme určit výškový profil plazmové frekvence (Morgan a kol., 2006) a díky 2.2 i výškový profil elektronové hustoty plazmatu. Výsledkem prováděných měření je primárně tzv. ionogram, tedy závislost intenzity I došlého záření jako funkce frekvence f a časových zpoždění Δt . Z něj pak můžeme mimo strukturu ionosféry pod družicí získat informace i o dalších jevech s ionosférou primárně nesouvisejících.

2.4 Analýza typického ionogramu

Kromě přístrojem změřených časových zpoždění Δt můžeme pro hrubý odhad dráhy signálu do bodu obratu použít výraz $c\Delta t/2$, a dostaneme tak údaj o pohybu vlny v ionosféře, která by se šířila stejně rychle jako ve vakuu. Ve skutečnosti je ale grupový index lomu n_g v plazmatu větší než 1, signál se tak obecně šíří podsvětelnou rychlostí. Uražená vzdálenost rovněž nemusí odpovídat přímo vertikálně uražené dráze svazku, neboť radar vysílá i šikmými směry, a může tak docházet k dodatečným šikmým odrazům. V ionogramech hodnotu $c\Delta t/2$ značíme jako „zdánlivý dosah“ (apparent range). Pohyb družice za dobu vyslání signálu je zanedbatelný a není nutné s ním pracovat (Picardi a kol., 2004).

Při vyhodnocování změřených intenzit pro různá časová zpoždění Δt a frekvence f můžeme zaznamenat tři typické oblasti se zvýšenou intenzitou (Gurnett a kol., 2005). První je tvořena velice intenzivními „hroty“ na násobcích lokální plazmové frekvence $f_{p,loc}$. Tato odezva je způsobena excitací elektrostatických oscilací na plazmové frekvenci (Duru a kol., 2008). Druhá oblast se zvýšenou intenzitou vzniká díky odrazu signálu od ionosféry, který nastává pro $f_{p,loc} < f < f_{p,max}$, kde $f_{p,max}$ je maximální plazmová frekvence v ionosféře pod družicí. Pro $f > f_{p,max}$ již může vyslaná radiová vlna proniknout skrze ionosféru až k povrchu. Tento odraz je pak důvodem pro třetí oblast zvýšené intenzity a můžeme ho pozorovat až po maximální měřené frekvence.

Uveďme nyní na Obrázku 2.1 příklad jednoho takového měření intenzit, tedy jeden typický ionogram, na kterém ukážeme všechny hlavní efekty, které je přístroj schopný zaznamenat. Nejprve si všimněme prvně zmiňované hlavní odezvy, v podobě úzce oddělených vertikálních čar v levém horním rohu, které se nacházejí na harmonických frekvencích lokální plazmové frekvence $f_{p,loc}$ ve výšce družice. Přestože je zde lokální plazmová frekvence pod dolním frekvenčním limitem přístroje MARSIS, můžeme ji i tak odhadnout na základě frekvenčních



Obrázek 2.1: Typický ionogram změřený přístrojem MARSIS pro výšku družice 615 km nad povrchem a solární zenitní úhel $78,9^\circ$. Vynášíme závislost intenzity I přijímaného signálu (logaritmicky v barevné škále nad obrázkem) na časových zpožděních Δt (lineární osa y, případně paralelní přepočten na zdánlivý dosah) a na frekvencích f (lineární osa x). Pozorujeme především a) vyšší harmonické frekvence elektronových plazmových oscilací, b) ionosférické echo a c) odraz od povrchu. Dalšími efekty jsou d) šikmé ionosférické echo a e) elektronová cyklotronová echa. V oblasti nad a pod povrchovým odrazem jsou bíle vyznačena pevně stanovená okna pro hledání bleskových výbojů.

rozestupů mezi jednotlivými vertikálními harmonikami. Na vyšších frekvencích od 1 do 2,3 MHz můžeme vidět druhý ze zmiňovaných hlavních efektů, a to ionosférické echo dané vertikálním odrazem od ionosféry. Na vyšších frekvencích od 3 MHz do měřeného maxima nalezneme v časových odezvách kolem 4,5 ms třetí z hlavních zpětně obdržených signálů – odraz od povrchu Marsu, kam proráží vlny jen na nejvyšších frekvencích. Tento odraz však není patrný na všech ionogramech. Jeho možné vymizení je dáno útlumem signálu v ionosféře a úzce souvisí se sluneční aktivitou a zenitním úhlem Slunce (Withers, 2011; Nielsen a kol., 2007).

Na první pohled nečekaný jev představuje další oblast zvýšené intenzity v oblastech pod ionosférickým echem. Gurnett a kol. (2005) a Akalin a kol. (2010) detailně rozebírají původ této odezvy jako šikmý odraz vln, neboť zdánlivý dosah pro tento odraz je stejný nebo delší než vzdálenost družice od povrchu (615 km). Původem těchto ozvěn, jež se objevují jen pro vybrané ionogramy, jsou výdutě v ionosféře Marsu (Duru a kol., 2006), která ve vybraných místech zasahuje do vyšších výšek a skýtá tudíž možnost odrazu pro vlnu. Druhý méně čekaný jev představují intenzivní horizontální čáry v levé části Obrázku 2.1. Porovnáním s modelem magnetického pole Marsu (Cain a kol., 2003) odpovídají tato ekvi-

distantně oddělená echa lokální cyklotronové periodě T_c . Gurnett a kol. (2005) dále tyto ozvěny odůvodňuje jako důsledek elektronů urychlených silným elektrickým polem blízko antény při každém vyslání vlny. Cyklotronový pohyb elektronů při působení lokálního magnetického pole pak způsobí periodický návrat do blízkosti antény, kde tímto vznikne zpětný signál. Gurnett a kol. (2005) ještě provádí detailní rozbor ionosférického hustotního profilu na základě typického ionogramu a tzv. Chapmanova modelu (viz kapitola 7, Kivelson a kol. (1995)), nebudeme však tyto výsledky v dalším potřebovat.

Všimněme si ale jedné podstatné věci. Oblast „nad“ i „pod“ povrchovým echem v ionogramu (tj. na stejně vysokých frekvencích, ale na časových zpožděních menších a větších, viz Obrázek 2.1) neobsahuje žádné signifikantní jevy vedoucí na zvýšenou intenzitu. Detailní vymezení těchto oblastí specifikujeme a odůvodníme v dalším textu. Máme tak k dispozici ničím nerušenou vysokofrekvenční citlivou sondáž prostředí Marsu a je zde vysoký potenciál pro detekci bleskových výbojů, jejichž existence dosud nebyla na Marsu potvrzena (Gurnett a kol., 2010). Známým jevem jsou nicméně prachové bouře, jejichž fotografické záznamy jsou běžně dostupné (viz dále) a u nichž je možný předpoklad doprovodných bleskových výbojů (byť diskutabilní, Pavlu a kol. (2014); Ruf a kol. (2009)). Přístroj MARSIS operuje s detekčním prahem $1,1 \times 10^{-15} \text{ V}^2 \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$, tedy s prahem o několik řádů nižším, než je pozorovaná intenzita zemských bleskových výbojů ve srovnatelných výškách (Gurnett a kol., 2010).

Takto uvažuje i Gurnett a kol. (2010), ovšem pouze v oblastech nad povrchovým echem. My tedy tyto úvahy v následující kapitole rozšíříme na oblast pod povrchovým echem, provedeme efektivní analýzu všech dostupných dat a vezmeme v úvahu všechna měření do roku 2015 (tj. v součtu budeme pracovat s přibližně čtyřnásobně větším množstvím dat, než v uvedeném článku).

3. Studium výjimečně impulzivních událostí

3.1 Identifikace intervalů a výběr ionogramů

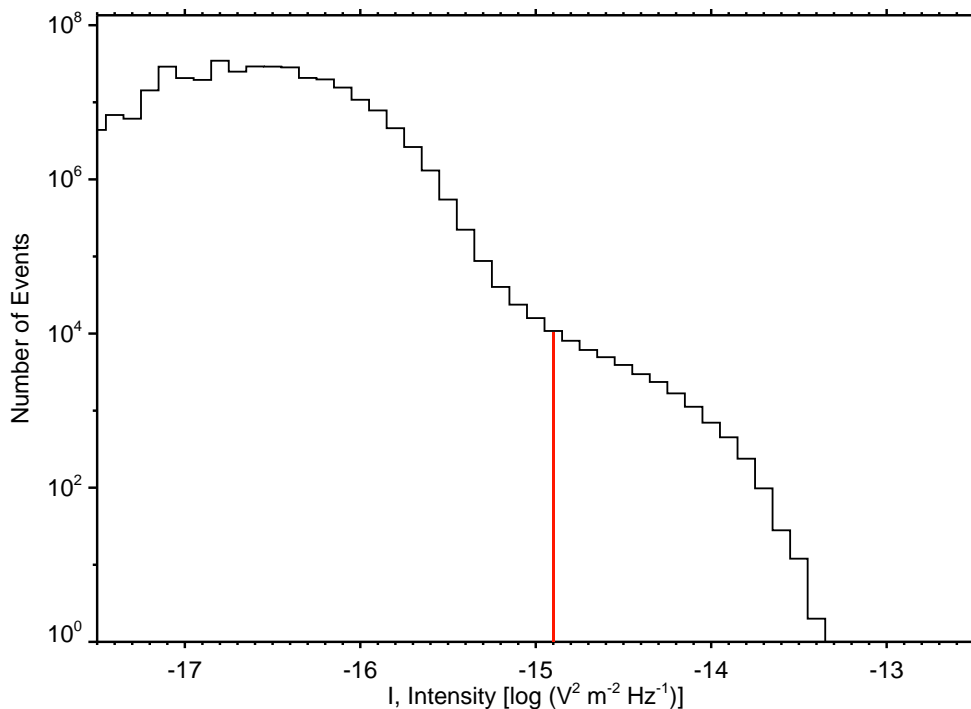
Provedme nejprve podrobnou identifikaci intervalů (pravděpodobně) neovlivněných vysílaným signálem (viz Obrázek 2.1). Jak již bylo řečeno, předzesilovač přístroje MARSIS operuje s extrémně nízkou hladinou šumu, tak nízkou, že šum je určen téměř výhradně galaktickým radiovým pozadím (Gurnett a kol., 2010). Na Zemi pozorujeme radiové impulzy z bleskových výbojů na frekvencích v rozsahu od pár kHz do desítek MHz, tedy takový výboj s frekvencí $f > f_{p,max}$ by byl snadno detekován v naznačených oblastech nad a pod povrchovým echem v ionogramu. Zaznamenali bychom ho pravděpodobně jako úzký vertikální impulz přes časová zpoždění v řádech ms. Vzhledem k množství dat, které máme z přístroje k dispozici, bude vhodné vymyslet efektivnější způsob na analýzu těchto událostí, než vizuální procházení jednotlivých ionogramů, kterých přes celé časové období čítáme na 1378672. Zvolíme proto vhodně fixní velikost oken, ve kterých můžeme nalézt bleskové výboje vysokých intenzit na ionogramu a pomocí pevně stanoveného prahu intenzit automaticky vyfiltrujeme v tomto smyslu výjimečné ionogramy.

Pro volbu důležitých intervalů budeme postupovat dle Gurnett a kol. (2010), to nám zároveň umožní i průběžnou kontrolu výsledků na datech obsažených v tomto článku. Abychom zaručili i pro frekvenci analyzovaných signálů $f > f_{p,max}$, zvolíme levou stranu hledacích oken pevně jako 4,0 MHz (rozumný odhad maximální plazmové frekvence v ionosféře). Zároveň se tak efektivně vyhneme frekvencím potenciálně ovlivněným cyklotronovými echy. Na pravé straně jsme omezeni pouze detekčním limitem přístroje, tj. 5,5 MHz. V otázce časových zpoždění představují omezení nežádoucí krátké impulzy a silný odraz původního signálu od povrchu. Jinak se mohou případné bleskové výboje objevit v kterýchkoli časových zpožděních a s vysílaným signálem nijak nesouvisí. Horní hranici prvního okna nad povrchovým echem volí Gurnett a kol. (2010) jako $\Delta t = 1,24$ ms, aby došlo k eliminaci přechodových jevů, které se mohou objevit ve zlomcích ms po vyslání signálu. Stejně tak chceme omezit výskyt elektronových plazmových oscilací, ty se však v některých ionogramech objevují i na takto vysokých frekvencích, a mohou tak stále představovat rušivé jevy (viz níže). Dolní hranici okna nad (resp. horní hranici okna pod) povrchovým echem zvolíme v časovém zpoždění 0,46 nad (resp. 1,46 ms pod¹) předpokládaným přímým odrazem od povrchu, což bude například $c\Delta t/2 = 615$ km pro ionogram na Obrázku 2.1. Tedy pevně od hodnoty odrazu od povrchu, ale obecně v závislosti na poloze družice. Dolní hranice okna pod povrchovým echem bude až do detekčního limitu časových zpoždění, tj. 7,56 ms.

V otázce detekčního prahu pro výběr výjimečných ionogramů budeme postupovat rovněž v rámci možností dle Gurnett a kol. (2010). Ten rozebírá dvě měření v apogeu družice, kde by jakýkoliv případný bleskový výboj měl značně snížený efekt díky velké vzdálenosti družice od povrchu planety. Pečlivým vylou-

¹S tímto oknem již Gurnett a kol. (2010) nepracuje.

čením radio-emisních jevů, jako jsou náhlé rádiové emise ze Slunce či Jupitera, byl naměřen šumový práh $3,7 \times 10^{-17} \text{ V}^2 \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$, který skutečně odpovídá galaktickému rádiovému pozadí na frekvencích 4,0 až 5,5 MHz (Dulk a kol., 2001). Můžeme také zobrazit histogram všech naměřených intenzit ve zvolených oknech, abychom lépe určili skutečný výběrový (nikoli šumový) práh pro automatické vyfiltrování důležitých ionogramů. Ten se nachází na Obrázku 3.1 a zahrnuje tedy i měření ve výškách nad 1400 km, kterých je však dle Podkapitoly 2.2 minimální množství.²



Obrázek 3.1: Histogram naměřených intenzit ze všech měření od roku 2005 do roku 2015, zahrnuje všechna časová zpoždění a frekvence z obou vyhledávacích oken ionogramů. Pro detailní profil rozdělení však uvádíme pouze nejvyšší intenzity. Červená kolmá linka pak značí zvolený práh. Pokud v některém z oken ionogramu překročily intenzity tento práh alespoň třikrát, byl tento ionogram označen jako výjimečný.

Šířka pozorovaného rozdělení ze všech polí dvou studovaných oken přes všechny studované ionogramy je poměrně velká. To je dáno velmi krátkým integračním časem jednoho měření ($91,4 \mu\text{s}$). Zobrazujeme jen podstatnou část rozdělení od $-17,5 \log(\text{V}^2 \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1})$ (nižší zaznamenané hodnoty nejsou pro tuto analýzu podstatné). Dle nejvyššího zaznamenaného pozadí pro měření v apogeu pak můžeme stanovit již zmíněný výběrový práh měření jako $-14,9 \log(\text{V}^2 \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1})$ (na Obrázku 3.1 vyznačen červenou čarou). Tento práh vezmeme jako klíčovou hodnotu pro filtraci ionogramů a řekneme, že pro vyhodnocení ionogramu jako výjimečného musí intenzita v alespoň třech měřených polích z jednoho z oken tuto hodnotu převýšit.

²Gurnett a kol. (2010) pak ukazuje, že se profil rozdělení od měření ve vysokých výškách nad povrchem příliš neliší.

Pro takto zvolené kritérium pak program vyhodnotil z původních 1 378 672 ionogramů (a 1 943 676 oken, ne vždy je odraz od povrchu v rámci rozsahu pevně zvolených časových zpoždění Δt) 1104 ionogramů jako potenciálně význačných. Tyto ionogramy byly následně vizuálně prohlíženy. Celkem 727 z nich vykazovalo nadměrný šum v celé oblasti ionogramu, a nebylo tak z nich možno vyčíst žádná podstatná zjištění.³ Dále bylo vyloučeno 354 ionogramů, kde docházelo ke zjevnému přesahu elektronových plazmových oscilací (jev *a*) na Obrázku 2.1) do horního výběrového okna, jež tak způsobily nežádoucí přesah vysokých intenzit. Zbylých 23 ionogramů, kde ani jeden z těchto případů nebyl zřejmý, bylo podrobeno detailnějšímu zkoumání. Přehledně je uvádí Tabulka 3.1.

3.2 Vyhodnocení vybraných ionogramů

Jeden způsob vyhodnocení těchto 23 výjimečných ionogramů nabízejí údaje o prachu v atmosféře z Montabone a kol. (2015). Data pocházejí z měření spektrometru TES (Thermal Emission Spectrometer) na družici Mars Global Surveyor, emisního analyzátoru THEMIS (Thermal Emission Imaging System) na družici Mars Odyssey a radaru MCS (Mars Climate Sounder) na družici Mars Reconnaissance Orbiter. Dva způsoby vyhodnocení měřených údajů pak poskytují dvě podobná grafická znázornění prachové absorpce v rozsáhlém časovém období, které je rovněž volně k nahlédnutí na http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/dust_climatology/ a z kterého budeme dále vycházet. Barevné rozlišení zobrazuje denní mapy celkových sloupcových koncentrací prachových zrn (normalizovaných na referenční tlak 610 Pa). Nemusí tak jít nutně o údaje o prachových bouřích, přesto je z obou uvedených grafických znázornění vidět, že tato měření jsou silně sezónně závislá (tuto sezónní závislost vyjadřuje nejlépe parametr solární délky L_s , o kterém bude pojednáno dále v Podkapitole 4.2). Lze tedy očekávat, že prachové bouře vykazují podobnou závislost. Pro každý ionogram tak uvádíme ve sloupci IR absorpce Tabulky 3.1 příslušnou horní hodnotu absorpce z pravého (regulárního) grafu relevantního roku My (martian year) pro relevantní parametr L_s a severní (resp. jižní) šířku. Drtivá většina výjimečných ionogramů se tak nachází v obdobích alespoň mírné prachové elevace, ovšem jak bude dále diskutováno v Kapitole 5, přímou souvislost vybraných impulzivních událostí s prachovými bouřemi nelze v žádném případě tímto způsobem prokázat.

Vzhledem k tomu, že přístroj MARSIS měří každých 7,54 s, lze očekávat, že případná bouřková aktivita by mohla ovlivnit i časově blízké ionogramy těm vybraným, ačkoli nemusela nutně způsobit překročení stanoveného prahu. Byly tudíž prohlíženy všechny ionogramy v intervalu 15 minut před a po výjimečných ionogramech a jediná širší aktivita v tomto smyslu byla zaznamenána u ionogramu č. 3 z Tabulky 3.1, který je zobrazen na Obrázku 3.2.

Jestliže tedy tato analýza neposkytla uspokojivé výsledky, můžeme se pokusit o nadějnější nalezení spojitosti vybraných 23 ionogramů s bleskovými výboji na Marsu pomocí kamer na družicích, které jsou schopny bouřkovou aktivitu zaznamenat v podobě zachycení velkých prachových oblaků. V tomto ohledu se jeví nejpřirozenější přímo studium fotografií z HRSC kamery na družici Mars Express.

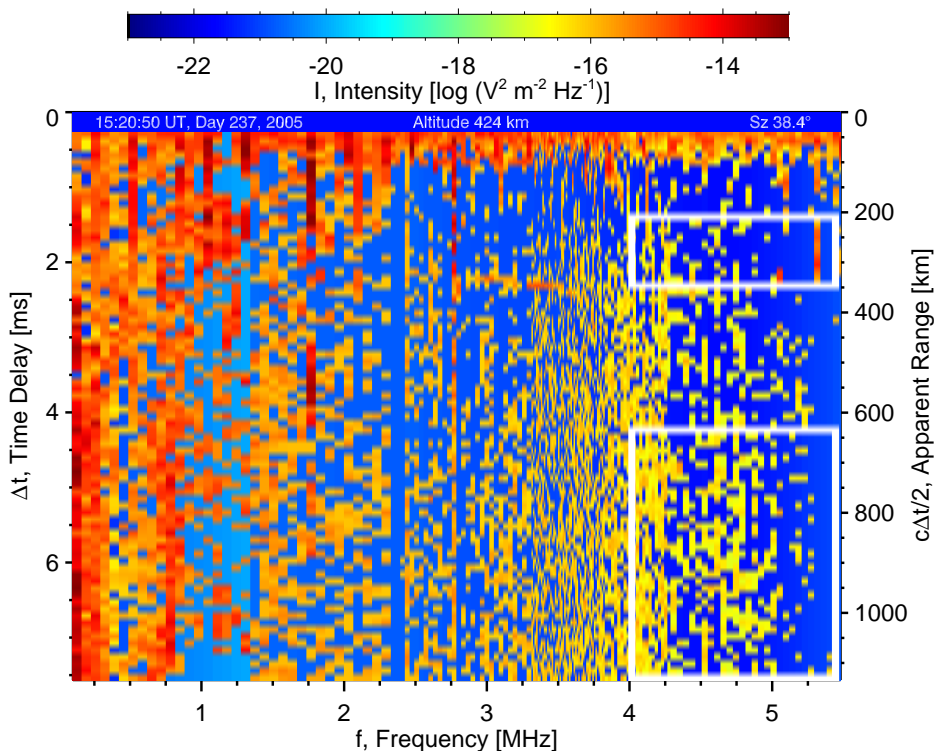
³Gurnett a kol. (2010) rozebírá možné příčiny nadměrně šumových ionogramů jako důsledek solárních radiových emisí typu III. a různých typů interferencí generovaných družicemi.

MARSIS ionogramy							Roční období	Fotografie			
#	Rok	Den	UT	Pozice		Události ^a	IR absorpce	UT	MOC data	UT	HRSC data
1	2005	208	19:40:30	65,8N	288,9W	6	0,075	20:31:06	příliš daleko	19:22:28	žádná prachová mračna
2	2005	235	03:06:09	22,3S	168,8W	3	0,300	02:27:51	příliš daleko	02:59:32	žádná prachová mračna
3	2005	237	15:20:50	30,8S	330,0W	7	0,300	06:26:22	příliš daleko	08:46:11	žádná prachová mračna
4	2005	238	04:45:26	37,1S	169,8W	3	0,300	16:48:45 ^c	příliš daleko	06:48:14	žádná prachová mračna
5	2005	258	15:13:34	42,8S	142,8W	3	0,225	12:37:13 ^b	příliš daleko	15:24:53	možná prachová mračna
6	2006	162	02:27:37	40,4N	226,0W	8	0,075	02:38:46	příliš daleko	02:15:42	žádná prachová mračna
7	2006	199	01:40:05	0,3N	237,4W	9	0,150	01:36:05	příliš daleko	12:14:41 ^b	žádná prachová mračna
8	2007	162	12:58:28	34,1S	141,8W	5	0,300	—	žádná data	12:48:32	možná prachová mračna
9	2009	79	12:00:34	72,5S	39,5W	7	0,225	—	žádná data	01:30:25 ^b	možná prachová mračna
10	2009	186	15:46:21	43,5S	14,1W	3	0,225	—	žádná data	—	žádná data
11	2009	242	02:13:25	43,4N	35,7W	6	0,225	—	žádná data	09:18:54	žádná prachová mračna
12	2009	252	17:33:21	0,7N	166,6W	3	0,300	—	žádná data	17:31:00	spíše žádná prachová mračna
13	2009	277	10:26:49	39,2N	199,1W	3	0,225	—	žádná data	03:38:21	žádná prachová mračna
14	2009	284	08:10:44	6,6S	99,8W	5	0,225	—	žádná data	08:01:31	žádná prachová mračna
15	2011	87	22:18:33	25,3N	169,0W	5	0,375	—	žádná data	04:37:44 ^b	možná prachová mračna
16	2011	92	00:06:58	50,4N	161,6W	6	0,075	—	žádná data	10:38:54 ^b	žádná prachová mračna
17	2011	110	01:53:19	80,5N	35,6W	5	0,075	—	žádná data	02:06:20	žádná prachová mračna
18	2011	189	15:21:30	49,4N	227,2W	3	0,150	—	žádná data	08:23:29	žádná prachová mračna
19	2013	129	13:02:00	84,5N	275,1W	3	0,075	—	žádná data	13:26:39	žádná prachová mračna
20	2013	303	22:48:39	11,7S	71,8W	21	0,150	—	žádná data	08:52:03	žádná prachová mračna
21	2014	190	05:14:42	3,2S	235,1W	4	0,150	—	žádná data	—	žádná data
22	2014	247	21:39:55	12,4N	320,7W	3	0,150	—	žádná data	13:47:06 ^c	žádná prachová mračna
23	2015	72	13:14:43	4,1N	92,2W	4	0,150	—	žádná data	—	žádná data

Pozn.: ^a Počet intenzit v obou oknech, které převyšovaly stanovený práh. ^b O den dříve. ^c O dva dny dříve.

Tabulka 3.1: Přehled výjimečných ionogramů a jejich porovnání s ročním obdobím a snímky z kamer.

Dále pak můžeme využít, podobně jako Gurnett a kol. (2010), obrázky z kamery MOC (Mars Orbiter Camera) z družice Mars Global Surveyor. Volně dostupná databáze <http://ode.rsl.wustl.edu/mars/> pak poskytuje snímky z těchto kamer v požadovaném období, pro družici Mars Global Surveyor ovšem pouze do roku 2006 (tj. zahrnuje pouze prvních 7 ionogramů z Tabulky 3.1), kdy družice ukončila svá měření. Možné studium obrázků z dalších družic a zpětná analýza ionogramů, které naopak odpovídají bouřkovým časům zaznamenaných kamerou HRSC, jsou nastíněny v Kapitole 5.



Obrázek 3.2: Vybraný ionogram č. 3 z 25. srpna 2005 (15:20:50 UT), v jehož horním oknu překročila intenzita stanovený práh sedmkrát. Podobné chování (bez překročení stanoveného prahu ve třech polích jednoho z oken) vykazovaly další ionogramy v intervalu 15 minut před a po měření. Žádný záznam z kamery však nepotvrdil přítomnost prachové bouře v tomto období v blízkosti družice.

Přestože interpretace takových fotografií je obtížná, lze z jiných zdrojů (např. Ruf a kol. (2009)) nalézt přesné časové a poziční údaje o tom, kdy došlo k výskytu některých prachových bouří. Záznam jedné vysoce aktivní bouře, rovněž uvedený v Gurnett a kol. (2010), se nachází na Obrázku 3.3a. Navzdory tomu, že jsou výsledné fotografie zachycovány v úzkém observačním pásmu⁴, lze v době prachových bouří pozorovat prachová mračna, neboť ty dosahují do výšek 60 – 80 km nad povrchem (Pavlu a kol., 2014) a při složení několika úzkopásmových obrázků jsou dobře rozpoznatelné. Fotografie těchto zřejmých prachových

⁴Kamera snímkuje v rozmezí přibližně tří minut, skládá pak jednotlivé snímky za sebe pro širší záběr. Tabulka 3.1 uvádí pouze střední čas snímku v databázi uvedený jako „observation time“. Jedna složená fotografie je schopna pokrýt tisíce čtverečních kilometrů s rozlišením v průměru 10 m px⁻¹ na povrchu Marsu (v závislosti na výšce družice). Podrobné specifikace snímkování lze nalézt v Neukum a kol. (2004).

bouří pak porovnáváme s fotografiemi týchž kamer v časech vybraných 23 ionogramů. Výsledky těchto šetření uvádí pravá polovina Tabulky 3.1. Typická lokální bouře může trvat 1 – 2 soly (střední sluneční den na povrchu Marsu, viz Podkapitola 2.1), větší regionální bouře trvají i několik solů (Ruf a kol., 2009). Pokud se v rozmezí 5 solů od pořízení ionogramu nevyskytoval snímek z kamer ve výše zmíněné databázi, byl výsledek označen jako „žádná data“. Neznamená to však, že snímek, a tedy potvrzení bouřkové aktivity, nemusí nutně existovat (viz Kapitola 5).



(a)



(b)

Obrázek 3.3: (a) Fotografie velmi aktivní bouře z HRSC kamery, přes kterou družice Mars Express přešla 27. června 2007. Fotografie je poskládaná z několika navazujících snímků v časovém rozmezí 2 minut a 47 sekund, čas uvedený na obrázku odpovídá středu tohoto intervalu. Střední výška družice nad povrchem v tomto období byla 298,6 km, střední západní délka obrázku je $345,2^\circ$, střední jižní šířka obrázku je $60,9^\circ$. Oblast pokrývá přibližně 4500 km^2 povrchu Marsu. Prachové oblaky jsou zřetelné. Podobné snímky hledáme i pro časy námi vybraných ionogramů. (b) Typický snímek z HRSC kamery bez známek prachových mračen. Pozorujeme ostré kontury. Většina záznamů z družice Mars Express je tohoto typu, tento snímek pochází z doby 6 minut a 23 sekund před měřením ionogramu č. 2. z Tabulky 3.1. Střední výška družice nad povrchem v tomto období byla 290,5 km, střední západní délka obrázku je $168,8^\circ$, střední jižní šířka obrázku je $6,4^\circ$. Oblast pokrývá přibližně 26500 km^2 povrchu Marsu.

Pro vyhodnocení obrázků z MOC kamery zvolíme kritérium vzdálenosti místa záznamu nejvýše 250 km od nadir-projekce pozice družice Mars Express. Příslušné souřadnice jsou uvedeny pro každý z 23 ionogramů ve sloupci Pozice v Tabulce 3.1. Na základě tohoto kritéria se nepodařilo pro žádný ze 7 ionogramů, v jejichž období kamera MOC snímky pořizovala, nalézt poziční shodu s družicí Mars Express.

Uspokojivější se zdají být obrázky z kamery HRSC na družici Mars Express. Ta měří v běžném režimu několikrát denně (Neukum a kol., 2004), nevzniká ani obtíž s lokalizací pořízeného snímku. Jediným limitem mohou být dlouhodobější výpadky ve snímkování či absence požadovaného období ve výše zmíněné databázi (týká se ionogramů č. 10, 21 a 23). V 15 ionogramech byl zaznamenán ryze ostrý obraz povrchu Marsu, který zaznamenává družice v běžném období bez význačných prachových jevů. V takovém případě jsme snímek označili v Tabulce 3.1 jako „žádná prachová mračna“ a typická fotografie tohoto druhu je uvedena na Obrázku 3.3b. Pokud časově nejbližší snímek výjimečného ionogramu obsahoval znaky podobné prachovým mračenům na Obrázku 3.3a (stejně jako ostatní snímky v příslušném období), byl tento snímek označen jako „možná

prachová mračna“ (celkem 4 ionogramy). V jednom případě byl pozorován neostrý obraz povrchu a pouze náznak prachových oblaků, tuto nejistou interpretaci označujeme jako „spíše žádná prachová mračna“. Souhrn a rozbor výše uvedených způsobů vyhodnocování ionogramů se pak nachází v Kapitole 5.

4. Analýza intenzit v závislosti na relevantních parametrech

V předchozí kapitole jsme provedli detailní prahovou analýzu intenzit v pevně stanovených oknech ionogramu, do kterých nezasahovaly jiným způsobem významné impulzivní události. Zajímavý se však jeví ještě jeden způsob rozboru těchto ničím nerušených částí ionogramu. Lze též uvažovat o těchto (v Podkapitole 3.1 pevně stanovených) oknech jako o souboru měřených intenzit na velmi krátkých časových zpožděních pro velmi blízké frekvence, jejichž průměrná hodnota bude z dlouhodobého hlediska vypovídat o dalších fyzikálních jevech, které může být přístroj MARSIS schopný zaznamenat. Z každého okna tak můžeme stanovit jednu průměrnou hodnotu intenzity a studovat jejich závislosti na relevantních parametrech, již bez ambicí nalézt přímou souvislost událostí na vybraných ionogramech s prachovými bouřemi, kterým byla věnována předchozí kapitola.

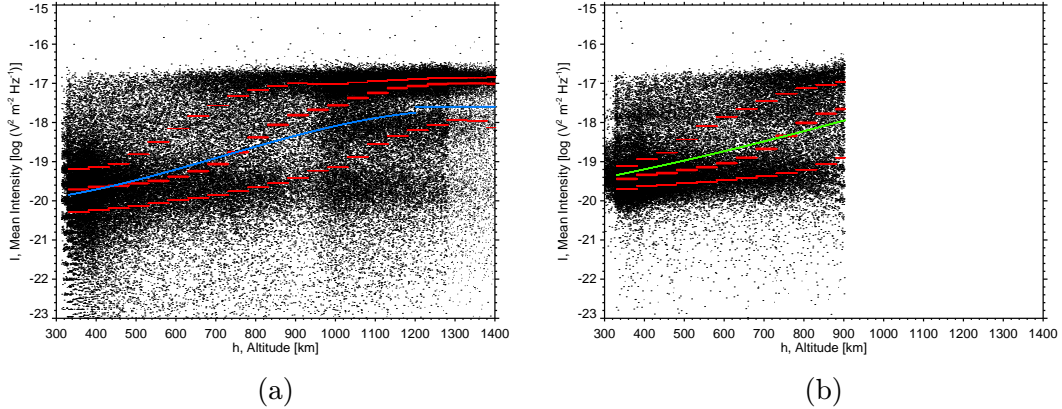
Tímto způsobem budeme moci například porovnat, zda se výrazněji liší data z oken pod povrchovým echem (která Gurnett a kol. (2010) ve svém článku neuvažuje) a nad ním. Při studiu dlouhodobých závislostí přes všechna dostupná měření tak vyloučíme krátkodobé nežádoucí efekty, jako byl zvýšený šum v prahové analýze. Do námi zvoleného rozsahu časových zpoždění a frekvencí, který zůstává stejný jako v předchozí kapitole, tak budou vstupovat tři možné hlavní efekty. Především to může být zaznamenání možných bleskových výbojů, jejichž výskyt se stále nepodařilo v předchozí kapitole potvrdit, nicméně lze v tomto smyslu lépe prošetřit dlouhodobé sezónní závislosti naznačené v Podkapitole 3.2. Dále to bude přítomnost kosmického záření, jež MARSIS zaznamenává na všech frekvencích a které tvoří „šumový podklad“ ionogramu. I zde bude hrát klíčovou roli sezónní závislost a solární efekty. V neposlední řadě pak stále přítomné elektronové plazmové oscilace, jejichž přítomnost ani v takto vymezených oknech nelze vyloučit (viz Podkapitola 3.1). Pro tyto oscilace, stejně jako pro zbylé efekty, bude klíčová analýza výšky družice nad povrchem v době měření. Provedeme tedy nejprve detailní rozbor této závislosti. Na jejím základě pak můžeme studovat možnou souvislost průměrných intenzit s dalšími relevantními parametry.

Pro velký rozptyl měřených intenzit budeme v této kapitole pracovat s logaritmickými hodnotami intenzit, tedy v jednotkách $\log(V^2 \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1})$. Zpracování proběhlo opět pomocí programu, který postupně načítal ionogramy přes všechna měřená období a pro každý vypočetl dvě průměrné intenzity: jednu pro všechna měřená pole z okna nad povrchovým odrazem, druhou pro všechna měřená pole z okna pod povrchovým odrazem. Tyto dvojice hodnot pak předal dalšímu programu, jež vyhodnocoval všechny níže uvedené závislosti.

4.1 Výška družice

Při studiu závislosti intenzit na výšce družice, kterou označíme h , vykreslíme v Obrázku 4.1 její průběh pro obě studovaná okna. Pro extrémní množství hodnot uvádíme jen každou desátou vypočtenou průměrnou intenzitu, kvalitativně

však nedochází k žádným změnám. Hodnoty pod povrchovým odrazem (Obrázek 4.1b), tj. na $c\Delta t/2 > h$, nezaznamenáváme pro $h \gtrsim 900$ km vzhledem k rozsahům stanoveným v Podkapitole 3.1. Přesto však pro snadné porovnání uvádíme obě závislosti ve stejném rozsahu. Vykreslujeme interval $300 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$, neboť na nižších a vyšších výškách družice měří již velmi zřídka (viz Podkapitola 2.2).



Obrázek 4.1: (a) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na výšce družice h nad povrchem. Tlusté (resp. tenké) červené linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na intervalech $\Delta h = 50$ km. Modrá křivka na intervalu $330 \text{ km} < h < 1200 \text{ km}$ uvádí polynomiální fit 5. řádu na tomto intervalu. Pokračující modrá konstantní hodnota na intervalu $1200 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$ uvádí aritmetický průměr na tomto intervalu. (b) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *pod* povrchovým odrazem na výšce družice h nad povrchem. Tlusté (resp. tenké) červené linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na intervalech $\Delta h = 50$ km. Zelená křivka na intervalu $330 \text{ km} < h < \max(h)$ uvádí polynomiální fit 5. řádu na tomto intervalu.

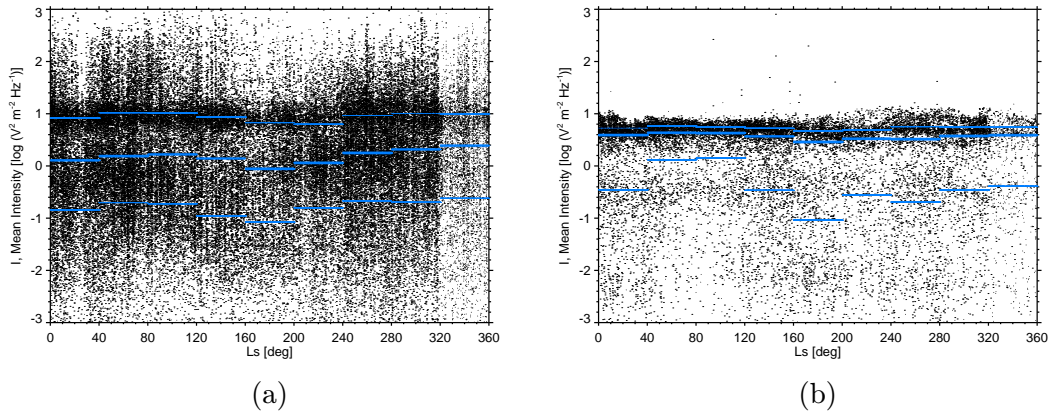
Oba grafy obsahují zároveň i průběh mediánových (resp. obou kvartilových) hodnot na intervalech $\Delta h = 50$ km v podobě tlustších (resp. tenčích) červených linek. Modrá křivka na Obrázku 4.1a představuje polynomiální fit 5. řádu na intervalu $330 \text{ km} < h < 1200 \text{ km}$, dále pokračuje jako striktně oddělený konstantní fit (tj. aritmetický průměr na daných hodnotách) na intervalu $1200 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$. Pro hodnoty na Obrázku 4.1b uvádíme zelenou křivkou pouze polynomiální fit 5. řádu na intervalu $330 \text{ km} < h < \max(h)$. Důvodem pro volbu těchto intervalů jsou pozorované závislosti na obou grafech. Jelikož do výšek přibližně 1200 km pozorujeme rostoucí průběh, ne však nutně lineární (volba 5. řádu se jevila optimální, neboť předpokládaný teoretický průběh není znám), bude vhodné pro zpracování dalších parametrů tento zjevný trend od měřených intenzit odečíst. Stejný, ale již konstantní odečet provedeme i pro hodnoty na Obrázku 4.1a na intervalu $1200 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$. Vzniknou tak tři různé možnosti pro vynášení zbylých závislostí v této kapitole, přičemž hodnoty z oken *nad* a *pod* povrchovým odrazem nemusí nutně vykazovat (a v tomto prvním přiblížení nevykazují) zcela stejný charakter.

Že bude závislost intenzit na výšce družice vstupovat do hry lze očekávat z více důvodů. V otázce možných bleskových výbojů lze zatím na základě Kapitoly 3 a relevantních zdrojů (Gurnett a kol., 2010; Pavlů a kol., 2014; Ruf a kol.,

2009) s jistotou říci, že jejich přítomnost nebude v žádném smyslu dominantní. Pokud by ale skutečně jejich výskyt byl reálný, zaznamenali bychom je signifikantněji blíže povrchu Marsu. Kosmické záření, jehož efekt bude jistě přítomný, je tlumeno při průchodu ionosférou Marsu. Z čehož můžeme usuzovat, že jeho efekt bude naopak dominantní ve vyšších výškách. Elektronové plazmové oscilace pak zaznamenáváme na násobcích f_p , která je úměrná odmocnině z hustoty elektronů. Na vyšších výškách lze očekávat nižší hustotu ionosféry (s přibližně exponenciálním průběhem viz Kivelson a kol. (1995)), tedy i nižší plazmovou frekvenci f_p . Její násobky, tj. intenzivní kolmé čáry, které zaznamenáváme, pak budou na ionogramech s přibližně logaritmickým škálováním frekvencí vykazovat hustší charakter. Předpokládáme tedy, a výše uvedené výsledky takové předpoklady potvrzují, že průměrná intenzita v pevně stanovených oknech bude celkově větší na vyšších výškách družice v době měření.

4.2 Parametr L_s

Možná sezónní závislost prachových bouří již byla zmíněna v Podkapitole 3.2 na základě Montabone a kol. (2015). Zbývá tak ověřit, zdali jsme skutečně schopni takový průběh *v dlouhodobém smyslu* pozorovat i na vybraných částech ionogramů, které měří přístroj MARSIS, tj. opět na námi zvolených oknech a hodnotách aritmetického průměru logaritmických intenzit z celého okna. Nejvhodnější nezávislou veličinou zde bude již zmíněný parametr L_s , tedy solární délka vyjadřující polohu Marsu vůči Slunci v průběhu jednoho My (martian year). Sezónní je v tomto smyslu i vzdálenost Marsu od Slunce, její vliv společně se sluneční aktivitou bude diskutován separátně v Podkapitole 4.5.



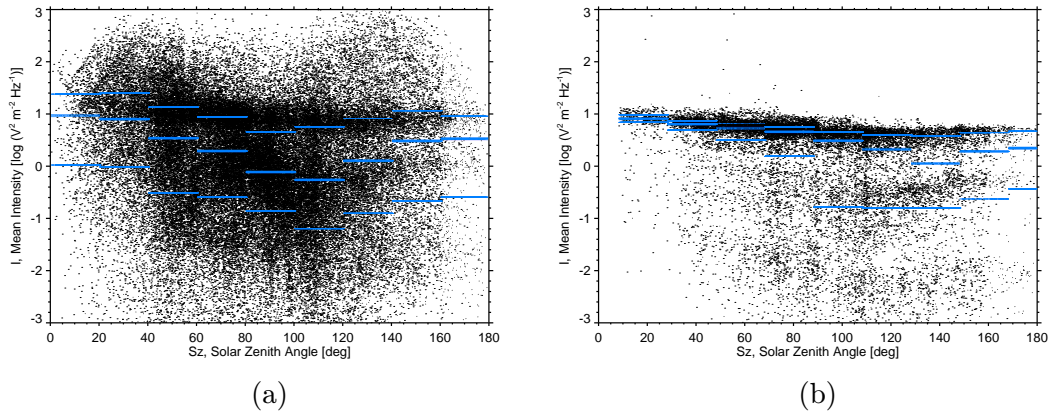
Obrázek 4.2: (a) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na solární délce L_s pro intenzity z $330 \text{ km} < h < 1200 \text{ km}$ po odečtení polynomiálního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na intervalech $\Delta L_s = 40^\circ$. (b) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na solární délce L_s pro intenzity z $1200 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$ po odečtení konstantního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na intervalech $\Delta L_s = 40^\circ$.

Závislosti na parametru L_s přes všechna měření na intervalu

330 km < h < 1200 km z oken nad povrchovým odrazem představuje Obrázek 4.2a, ovšem již po odečtení polynomiálního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Podobně Obrázek 4.2b představuje tutéž závislost na intervalu 1200 km < h < 1400 km po odečtení konstantního fitu z Obrázku 4.1a. Pro velké množství hodnot uvádíme na obou obrázcích opět pouze každou desátou hodnotu. Zároveň jsme omezili interval intenzit na $-3 \log(\text{V}^2 \text{m}^{-2} \text{Hz}^{-1}) < I < 3 \log(\text{V}^2 \text{m}^{-2} \text{Hz}^{-1})$ po odečtení fitu, neboť na vzdálenějších hodnotách již bylo příliš málo hodnot pro pozorování jakýchkoli zvláštností. Modré tlustší (resp. tenčí) linky opět představují mediány (resp. oba kvartily) na intervalech $\Delta Ls = 40^\circ$. Grafické znázornění intenzit po odečtu polynomiálního fitu z oken pod povrchovým odrazem neuvádíme, neboť se jeho průběh kvalitativně neliší od průběhu na Obrázku 4.2a (tedy v tomto smyslu bylo podstatné rozlišit tato okna jen pro výšku družice).

Kromě drobného poklesu v oblastech kolem $Ls = 180^\circ$ nepozorujeme významnější jevy na ani jednom z Obrázků 4.2. Detailní rozbor a souvislost s Montabone a kol. (2015) budou uvedeny v Kapitole 5.

4.3 Solární zenitní úhel



Obrázek 4.3: (a) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na solárním zenitním úhlu Sz pro intenzity z 330 km < h < 1200 km po odečtení polynomiálního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na intervalech $\Delta Sz = 20^\circ$. (b) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na solárním zenitním úhlu Sz pro intenzity z 1200 km < h < 1400 km po odečtení konstantního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na intervalech $\Delta Sz = 20^\circ$.

V Kapitole 1 jsme nastínili souvislost tvorby ionosféry a solárního zenitního úhlu Sz . Chapmanův model pro fotoionizaci (Kivelson a kol., 1995) i současná měření ionosféry (Withers, 2009) ukazují klesající závislost hustoty elektronů v ionosféře na tomto úhlu. Dle 2.2 klesá i $f_{p,max}$. V blízkosti subsolárního bodu je $f_{p,max} \approx 3,5$ MHz a monotónně klesá až k $f_{p,max} < 1$ MHz pro $Sz \approx 90^\circ$.¹ O struk-

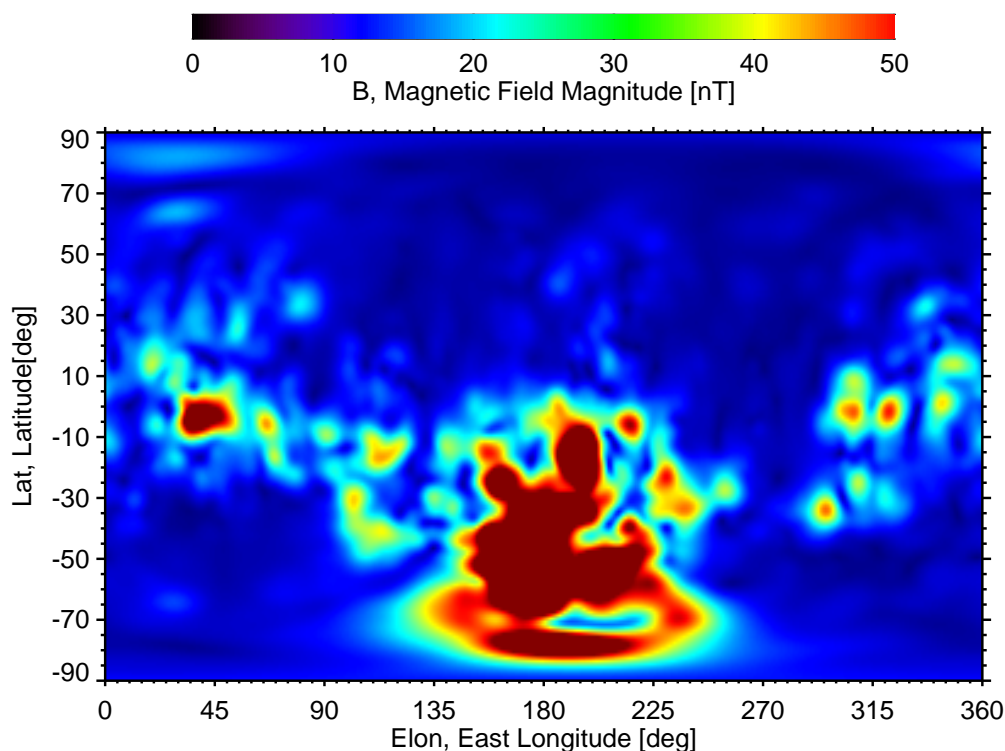
¹Ovšem vzápětí Withers (2009) dodává důležitou poznámku, že noční strana ionosféry ne-

tuře noční ionosféry Marsu toho není příliš známo, podstatnou roli pro její formování však hraje dopadová ionizace a na ne příliš velkých Sz i transport plazmatu z denní strany Němec a kol. (2010). Měření intenzit v těchto místech ale mohou být význačná pro další studium prachových bouří (více viz Kapitola 5), neboť nedochází k téměř žádnému útlumu signálu při šíření skrz ionosféru.

Při zpracování budeme postupovat stejně jako v předchozí podkapitole. Rovněž omezíme rozsah intenzit na podstatnou část, budeme vykreslovat pro velké množství každou desátou hodnotu a vyznačíme mediánové a kvartilové hodnoty na intervalech $\Delta Sz = 20^\circ$. Závislosti po polynomiálním a konstantním odečtu na stejných intervalech jako v předchozí kapitole pro intenzity v oknech nad povrchovým odrazem uvádíme na Obrázcích 4.3a a 4.3b. Závislost po polynomiálním odečtu pro okna pod povrchovým odrazem neuvádíme, neboť je podobná jako v případě Obrázku 4.3a.

Pozorujeme pokles intenzit kolem $Sz = 110^\circ$ pro polynomiální odečty a kolem $Sz = 140^\circ$ pro konstantní odečet. Podrobnější diskuze těchto závislostí bude uvedena v Kapitole 5.

4.4 Magnetická pole

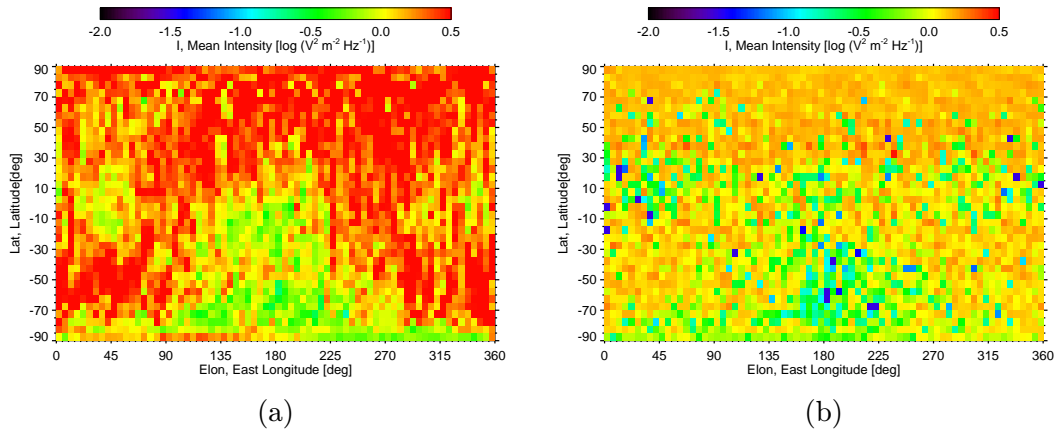


Obrázek 4.4: Velikost magnetické indukce B povrchových magnetických polí ve výšce 400 km nad povrchem podle modelu Cain a kol. (2003) v závislosti na severní (resp. jižní) šířce Lat a východní délce $Elon$.

Ačkoli Mars nemá dipólové magnetické pole jako např. Země, je jeho ionosféra začíná přesně na úhlech 90° (Sz je měřen pro $h = 0$ km), ale na úhlech větších než 105° pro $h \geq 120$ km.

výrazně ovlivňována povrchovými magnetickými poli (crustal magnetic fields). Ta byla podrobně zmapována družicí Mars Global Surveyor (družice Mars Express sama magnetometr nemá). Na základě nočních měření (prakticky neovlivněných magnetickými poli indukovanými v ionosféře) ve výškách 367 – 435 km nad povrchem v rámci tzv. MPO mapování (Mapping Phase Orbits) byl fitováním do multipólového rozvoje vytvořen model povrchových magnetických polí, který je již čistě funkcí polohy (Cain a kol., 2003). My zde využijeme pouze velikost magnetické indukce B z tohoto modelu ve výšce 400 km nad povrchem, jejíž vyobrazení v závislosti na poloze se nachází na Obrázku 4.4.

Pro zjištění vlivu těchto magnetických polí na naše měření v oknech stanovených v Podkapitole 3.1 vykreslíme stejnou mapu jako na Obrázku 4.4, ale pro intenzity měřené přístrojem MARSIS. Tedy podobně jako v předešlých podkapitolách budeme brát aritmetický průměr logaritmických hodnot z jednotlivých oken přes všechna dostupná měření a rozdělíme je do polí o velikosti 5° pro severní (resp. jižní) šířku Lat a východní délku $Elon$ na povrchu Marsu. Z nich pak vypočteme mediánovou hodnotu a na barevné škále budeme moci namapovat mediánové intenzity na celý povrch Marsu. Pro odstranění závislosti na výšce družice provedeme opět odečet nafitovaných hodnot z Obrázků 4.1a a 4.1b na uvedených intervalech Δh . Výsledné mapy intenzit jsou uvedeny na Obrázcích 4.5a a 4.5b pro odečet prvního polynomiálního a konstantního fitu (tj. pro výsledky z oken nad povrchovým odrazem v ionogramu), výsledek po odečtu polynomiálního fitu z oken pod povrchovým odrazem neuvádíme, neboť se opět kvalitativně neliší od výsledku na Obrázku 4.5a.

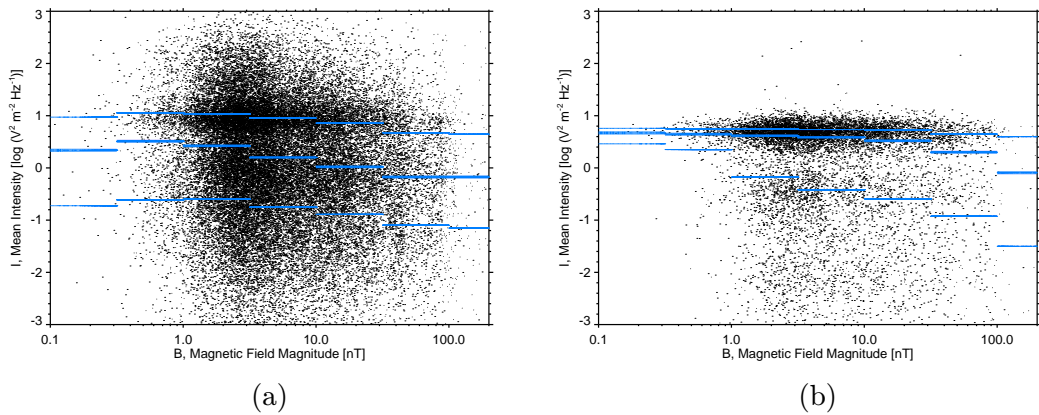


Obrázek 4.5: (a) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na severní (resp. jižní) šířce Lat a východní délce $Elon$ pro intenzity z $330 \text{ km} < h < 1200 \text{ km}$ po odečtení polynomiálního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Barevně rozlišené hodnoty udávají medián přes interval $\Delta Lat = 5^\circ$, $\Delta Elon = 5^\circ$ (tedy velikost jednoho pole na mapě). (b) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na severní (resp. jižní) šířce Lat a východní délce $Elon$ pro intenzity z $1200 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$ po odečtení konstantního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Opět barevně rozlišené hodnoty udávají medián přes interval $\Delta Lat = 5^\circ$, $\Delta Elon = 5^\circ$.

Nejnižší počet dat je dle předpokladu v oblastech blízkých pólům pro hodnoty konstantního odečtu, kde jsme navíc omezeni malým intervalem měření pro výšku družice, a to s minimem 13 hodnot. Naopak největší počet dat pro výpočet

mediánů obsahoval 100 – 300 hodnot pro konstantní (resp. polynomiální) odečet z oken nad (resp. pod) povrchovým odrazem a 500 – 700 hodnot pro polynomiální odečet z oken nad povrchovým odrazem, a to pro většinu polí.

Pozorujeme systematicky nižší intenzity v oblastech se silnějšími povrchovými magnetickými poli. Dále tedy studujeme přímo závislost průměrných logaritmických intenzit z jednotlivých oken na velikosti magnetické indukce B (v logaritmické škále, neboť se jedná o velký rozptyl hodnot). Tyto závislosti přes všechna dostupná měření po odečtu fitů z Obrázku 4.1a uvádí Obrázky 4.6a a 4.6b (odečet polynomiálního fitu z Obrázku 4.1b opět neuvádíme, neboť výsledná závislost je kvalitativně stejná jako na Obrázku 4.6a), ve stejném formátu jako v předchozích podkapitolách se zobrazením mediánových a obou kvartilových hodnot na daných intervalech.



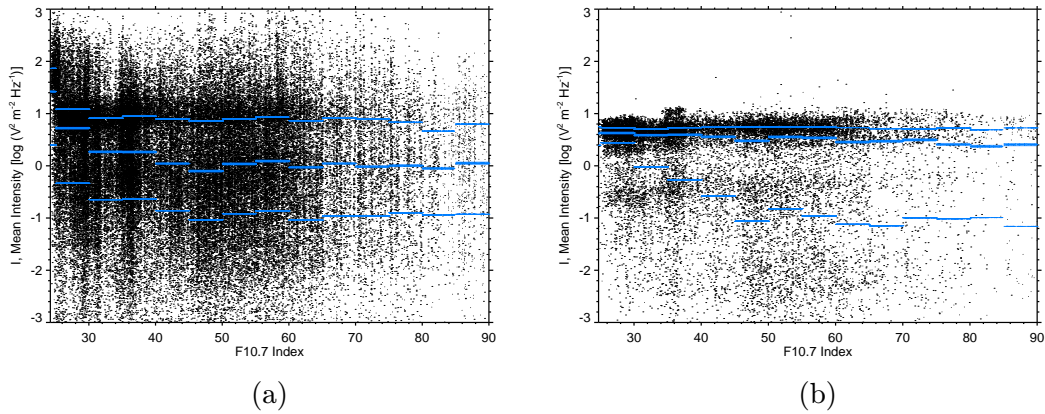
Obrázek 4.6: (a) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na velikosti magnetické indukce B ve výšce 400 km nad povrchem z modelu Cain a kol. (2003) pro intenzity z $330 \text{ km} < h < 1200 \text{ km}$ po odečtení polynomiálního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na daných intervalech. (b) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na velikosti magnetické indukce B pro intenzity z $1200 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$ po odečtení konstantního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na daných intervalech.

Pokles pozorovaných intenzit s rostoucím magnetickým polem je v této reprezentaci dobře patrný.

4.5 Parametr $F10.7$

Jak již bylo naznačeno, struktura ionosféry je sezónně závislá, neboť ve vši obecnosti intenzita záření I se vzdáleností r od zdroje klesá jako $I \sim \frac{1}{r^2}$. Tato závislost se projevuje zejména při oběhu Marsu kolem Slunce díky význačné excentricitě jeho dráhy, a tedy v otázce vlivu slunečního záření na tvorbu ionosféry v různých fázích oběhu. Vzdálenost R_M Marsu a Slunce osciluje mezi 1,38 AU a 1,67 AU, a je tedy podstatně variabilnější, než např. vzdálenost R_Z Země a Slunce (Brož a Šolc, 2013). Zároveň se projevuje silná dlouhodobější závislost měření díky

tzv. slunečnímu cyklu. Zvýšená aktivita, kterou Slunce vykazuje v periodě přibližně 11 let (Brož a Šolc, 2013), má tak také vliv na ionizaci atmosféry Marsu (viz Kapitola 1), a tedy potenciálně způsobuje větší útlum kosmického záření, jež pochází primárně z jiných zdrojů než ze sluneční soustavy. Závislost tohoto útlumu na výšce h samotného měření odstraníme opět odečtením fitů vypočtených v Podkapitole 4.1. Výše zmíněné dlouhodobé jevy poté vhodně kombinuje tzv. parametr $F10.7$, na němž budeme celkovou závislost měřených intenzit vynášet (a vyhneme se tak kolizi těchto efektů při závislosti čistě na vzdálenosti Marsu od Slunce R_M a na velikosti sluneční aktivity resp. přímo závislosti na čase t , s níž lze porovnávat např. počet slunečních skvrn v rámci 11letého cyklu).



Obrázek 4.7: (a) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na indexu $F10.7$ po přenásobení aktuální hodnotou $\frac{R_Z^2}{R_M^2}$ pro intenzity z $330 \text{ km} < h < 1200 \text{ km}$ po odečtení polynomiálního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na daných intervalech. (b) Závislost průměrných logaritmických hodnot intenzit z jednotlivých oken *nad* povrchovým odrazem na indexu $F10.7$ po přenásobení aktuální hodnotou $\frac{R_Z^2}{R_M^2}$ pro intenzity z $1200 \text{ km} < h < 1400 \text{ km}$ po odečtení konstantního fitu z Obrázku 4.1a na tomto intervalu. Tlusté (resp. tenké) modré linky značí hodnoty mediánů (resp. obou kvartilů) na daných intervalech.

Parametr $F10.7$ se počítá z hodnot intenzit slunečního záření na Zemi na infračervených vlnových délkách $\lambda = 10,7 \text{ cm}$ a uvádí se v jednotkách sfu (solar flux units, $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). Tyto intenzity pak velmi dobře korelují s výše zmíněnou sluneční aktivitou danou slunečním cyklem. Ukazuje se, že rovněž existuje dobrá korelace s intenzitou záření na ultrafialových vlnových délkách, které způsobuje ionizaci atmosféry (Withers, 2009). Vzhledem k tomu, že měření probíhají na Zemi a závislost intenzit na vzdálenosti od zdroje je zde klíčová, budeme muset hodnoty indexu $F10.7$ pro daná období (jež jsou volně k dispozici např. na <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices>) přenásobit aktuální hodnotou $\frac{R_Z^2}{R_M^2}$. Dostaneme tak efektivní hodnotu intenzity slunečního záření, která do značné míry formuje ionosféru Marsu, a může tak způsobit výrazný útlum kosmického záření. Výsledné závislosti pro měřené průměrné logaritmické hodnoty intenzit z námi stanovených oken ionogramů a jim příslušných měření indexů $F10.7$ uvádí Obrázky 4.7a a 4.7b po odečtu fitů z Obrázku 4.1a (odečet polynomiálního fitu z Obrázku 4.1b opět neuvádíme, neboť výsledná závislost je kvalitativně stejná

jako na Obrázku 4.6a). Oba obrázky jsou ve stejném formátu jako v předchozích podkapitolách se zobrazením mediánových a obou kvartilových hodnot na daných intervalech.

Patrná je mírně klesající závislost, zejména pro nižší hodnoty indexu $F10.7$.

5. Diskuze

Máme-li detailněji rozebrat úskalí prahové analýzy provedené v Kapitole 3, bude nezbytné znovu kriticky nahlédnout na podmínku uskutečněného výběru, neboť uvedený semi-automatizovaný postup již nelze provést vzhledem k množství dat, které máme k dispozici, o mnoho efektivněji. Oproti podmínce z článku Gurnett a kol. (2010) byla nastavena silnější podmínka, tedy nutnost překročit týž práh alespoň ve *třech* polích jednoho z oken. Volbou slabší podmínky bychom dospěli k většímu počtu vybraných ionogramů a nutnosti tyto vizuálně prohlížet. Vzhledem k očekávané době trvání případných bleskových emisí a povaze identifikovaných ionogramů se však naše volba jeví jako vcelku vhodná.

Na místě je také diskuze, zdali máme skutečně vidět úzké a oddělené vertikální impulzivní události na ionogramech, nebo zda případná blesková aktivita může mít neurčitý průběh v podobě nadměrného šumu ve zkoumané frekvenční a časové oblasti. To řeší částečně analýza sezónního vývoje průměrné intenzity v Podkapitole 4.2, která ale žádným výrazným způsobem takové úvahy nepodkládá. Stejně tak byly rámcově zkoumány obrázky z HRSC a MOC kamer pro nadměrně šumové ionogramy, které prošly automatickým výběrem na základě podmínky výše, nebyla však zaznamenána žádná výraznější souvislost s bouřkovými událostmi.

Pokud bychom posunuli prahovou podmínku v rozdělení na Obrázku 3.1 výše, dostali bychom právě jen nadměrně šumové ionogramy v celé měřící oblasti. Podle Gurnett a kol. (2010) by podobný prahový výběr pro zemské bleskové výboje byl jasně úspěšný, jak demonstruje na měřeních družice Cassini v blízkosti Země (Gurnett a kol., 2001).

Nakonec se nabízí ještě kritické zhodnocení výběru hranic oken v ionogramech. Ty byly zvoleny stejně jako v článku (Gurnett a kol., 2010) a vzhledem k vybraným 1104 ionogramům se nezdá pravděpodobné, že by jakékoli další významné efekty rozebírané v Podkapitole 2.4 (kromě rozšířených elektronových plazmových oscilací, na jejichž základě jsme dalších 354 ionogramů vyloučili) zasahovaly do zvolených oken. A to ani do oken pod povrchovým odrazem, která Gurnett a kol. (2010) neuvažuje a jejichž vyhodnocení dávají podobné výsledky jako údaje z oken nad povrchovým odrazem, jak naznačuje Kapitola 4. Naopak tato okna ještě významným způsobem (téměř dvojnásobně) rozšiřují zkoumanou oblast dat. Ta by se dala dále rozšířit např. pro oblasti nočních měření, jak naznačuje Podkapitola 4.3, neboť pro taková měření můžeme rozšířit frekvenční oblast do nižších frekvencí (díky nižší $f_{p,max}$). Co navíc volbou frekvencí 4,0 – 5,5 MHz nevylučujeme, je možnost existence radiových výbojů, které silně září na podstatně nižších frekvencích, jako např. nadoblačné blesky (Farrell a kol., 1999), a naopak výbojů zářících na vyšších (přístrojem MARSIS již neměřitelných) frekvencích, jako např. korónové výboje (Zarka a kol., 2004).

V otázce vyhodnocování vybraných ionogramů se ukazují nejvěrohodnější data z kamer, které jsou schopny poměrně přesně identifikovat, zda se družice nachází nad prachovou bouří či nikoli. Nabízí se tak ještě prozkoumání záznamů z kamer na družici Mars Reconnaissance Orbiter, jež také nabízí zmíněná volně přístupná databáze. Jejich vyhodnocení však vyžaduje větší pozorovatelskou zkušenost a není pravděpodobné, stejně jako u Mars Global Surveyor, že by trajektorie družice vhodně odpovídala tak malému množství vybraných ionogramů.

Překvapivý může být také výsledek, že se vyjma jednoho ionogramu (č. 3, uvedený na Obrázku 3.2) nepodařilo nalézt vizuálně podobné impulzivní události na ionogramech časově blízkých těm vybraným. Vzhledem k tomu, že v letních obdobích mohou prachové bouře trvat i několik měsíců a zabírat podstatnou oblast (Ruf a kol., 2009), je velmi pravděpodobné, že by podobné události byly zaznamenány i na okolních ionogramech. Na druhou stranu vzhledem k nastavení přístroje MARSIS nelze zkoumat sousední ionogramy v intervalu kratším než 7,54 s. Tato analýza tak společně s kamerovými záznamy působí rovněž negativně vypovídajícím dojmem.

Nakonec se nabízí ještě zpětná analýza ionogramů na základě jednoznačně potvrzených prachových bouří pod prolétávající družicí. Pro tu nebyly zjištěny žádné zajímavé vizuální události na příslušných ionogramech, ani detailnější analýza, kterou provádí Gurnett a kol. (2010), ničemu takovému nenasvědčuje. Tento přístup ale rovněž není možné v plném rozsahu provádět manuálně, a nabízí se tak otázka možného semi-automatizovaného přístupu jako v Podkapitole 3.2. Taková analýza však již přesahuje rámec předkládané bakalářské práce.

V Kapitole 4 bylo potřeba nejprve odstranit závislost měřených intenzit na výšce družice pro zkoumání jakýchkoli jiných relevantních parametrů. Konexe mezi těmito veličinami je zřejmá z Obrázků 4.1a a 4.1b. Jak již bylo řečeno, jejím původcem jsou dva hlavní efekty: kosmické záření a vliv elektronových plazmových oscilací. Pokud by docházelo i k detekci bleskových výbojů, pak by byl tento efekt dlouhodobě marginální (jak naznačují i výsledky Kapitoly 3, neboť klesající průběh nepozorujeme). Zbývá tedy určit, který ze dvou výše zmíněných efektů má na pozorovanou výškovou závislost větší vliv. To by mělo být patrnější, ne však zcela průkazné, pokud bychom stejnou závislost vynesli z průměrovaných hodnot nikoli z výběrových oken, ale z celých ionogramů, kde mají již elektronové plazmové oscilace dominantní efekt (viz Obrázek 2.1). Jejich případná souvislost s výškou měření h (způsobená větším počtem viditelných harmonik pro nižší $f_{p,max}$, tj. na vyšších výškách s nižší koncentrací ionosféry) by tak byla zaznamenána.¹ Výsledek takového znázornění je podobný Obrázku 4.1a, ale pochopitelně vstupují do závislostí vyšší intenzity. Takový průběh pak skutečně nasvědčuje většímu vlivu elektronových plazmových oscilací.

V otázce sezónní závislosti intenzit, tedy na relevantním parametru L_s , se nepodařilo zjistit výraznější souvislosti. Na všech vynesených závislostech je patrný drobný útlum pro hodnoty blízké $L_s = 180^\circ$. Sezónní závislost prachu v atmosféře uvedená v Montabone a kol. (2015) ale uvádí větší výskyt prachu pro období kolem $L_s = 250^\circ$ (přestože se tyto hodnoty drobně liší rok od roku). Další možná souvislost s detekcí prachových bouří tak není pravděpodobná.

Naopak sezónní závislost ve smyslu tlumení kosmické radiace ionosférou v tomto ohledu podporuje vynesená závislost na indexu $F10.7$. Klesající průběh (pozorovaný zejména pro nižší indexy) dokládá možný větší útlum tohoto záření při zvýšené tvorbě ionosféry. Parametr $F10.7$ vhodně kombinuje všechny podstatné efekty, a je v této souvislosti proto často používán jako proxy ionizujícího toku slunečního záření (Withers, 2009).

Pro povrchová magnetická pole byla prokázána rovněž úzká konexe mezi hod-

¹Za předpokladu, že ostatní podstatné události zmíněné v Podkapitole 2.4 se s výškou příliš nemění (podíl ionosférického a povrchového echa je v tomto smyslu diskutabilní).

notou velikosti indukce B a intenzitou měřenou přístrojem MARSIS. Průměrné hodnoty pozorovaných intenzit jsou nižší v oblastech se silnějšími povrchovými magnetickými poli. To dobře odpovídá obecně vyšším elektronovým koncentracím očekávaných v těchto oblastech ve vyšších výškách (Andrews a kol., 2015; Němec a kol., 2016) a výdutím v ionosféře (Gurnett a kol., 2005), které způsobí tlumení procházejícího signálu.

Všechny měřené jevy úzce souvisí se solárním zenitním úhlem Sz . Sluneční efekty jsou pro ionosféru a její strukturu klíčové (viz Kapitola 1 a Podkapitola 4.5). Větší měrou může Sz ovlivňovat např. mapování na Obrázcích 4.5a a 4.5b, jelikož v polárních oblastech (jež na těchto mapách i tak zahrnují menší množství dat) se díky sklonu rotační osy Marsu nevyskytují nízké zenitní úhly. Bylo by tedy na místě (podobně jako pro závislosti na výšce) vliv tohoto faktoru odečítat. Interpretace takových výsledků by ale již byla značně komplikovaná, jelikož jednotlivé parametry nejsou nezávislé, ale svázané daným orbitem družice.

Rovněž je na místě otázka správného fitování pro již použité regrese na Obrázcích 4.1a a 4.1b. Všechny dále vynesené závislosti nicméně vykazovaly stejný charakter pro oba polynomiální fity a jejich odečet. Tedy možný rozdíl v obou typech oken, jako větší zásah elektronových plazmových oscilací do horních oken a případný větší zásah šikmých odrazů do dolních oken, se zde nikde neprojevil.

Závěr

Pro úspěšnou analýzu dat z družice Mars Express byly nejprve nastíněny fyzikální okolnosti radarového měření planetárních ionosfér. Dále byl shrnut princip měření s přístrojem MARSIS a na základě relevantních zdrojů byl analyzován typický ionogram generovaný tímto přístrojem. Po zvážení všech standardně zaznamenávaných výjimečně impulzivních událostí byl stanoven pevný rozsah frekvencí a časových zpoždění (vymezení dvou oken v ionogramu), v rámci kterých může probíhat ničím nerušená detekce bleskových výbojů z prachových bouří.

Tyto možné přírodní emise byly hledány pomocí semi-automatizovaného procesu. Nejprve byla pevně stanovena prahová podmínka měřených intenzit. Po výběru 1104 takto potenciálně význačných ionogramů následovalo jejich vizuální prohlížení. Na základě relevantních fyzikálních předpokladů bylo vybráno 23 ionogramů, u nichž byl proveden detailnější rozbor. U jednoho ionogramu byla zjištěna přítomnost podobných úzkofrekvenčních signálů i na sousedních ionogramech v intervalu 15 minut před a po měření. Většina z 23 vybraných ionogramů spadala do předpokládaných bouřkových období daných sezónním zvýšením prachu v atmosféře. Po vizuálním prohlížení relevantních snímků z kamer na družicích Mars Express a Mars Global Surveyor však u většiny z těchto měření nebyla bouřková aktivita potvrzena. Přestože byla analýza dat prováděna na téměř čtyřnásobném rozsahu, než uvádí Gurnett a kol. (2010), nepodařilo se dosáhnout žádných výraznějších výsledků v otázce přímé detekce bleskových výbojů přístrojem MARSIS.

Při zpracování dat se můžeme rovněž zaměřit na jevy dlouhodobého charakteru. Nejprve byla odstraněna a diskutována podstatná závislost detekovaných elektrických intenzit na výšce družice nad povrchem. Následně byly studovány závislosti průměrných intenzit z dříve stanovených frekvenčních a časových rozsahů v ionogramech na solární délce L_s , solárním zenitním úhlu S_z , velikosti magnetické indukce B a indexu $F10.7$. Sezónní závislost na parametru L_s není příliš patrná a nepotvrdila se ani zvýšená intenzita v období vyššího výskytu prachu v atmosféře v souvislosti s možným výskytem bleskových výbojů. Velký vliv na měřené intenzity má však sluneční aktivita, potažmo vzdálenost planety od Slunce, neboť je tak ovlivněno formování ionosféry a následně i detekce kosmického záření. To dokládá klesající průběh měřených intenzit v závislosti na indexu $F10.7$. Rozdílné vlastnosti nočních planetárních ionosfér oproti denním jsou dobře fyzikálně opodstatněné a jistá závislost na solárním zenitním úhlu S_z je pozorovatelná, nenachází však snadnou interpretaci pro naše měření. Měřené intenzity dobře korelují s velikostí magnetické indukce B dané povrchovými magnetickými poli. Pozorujeme klesající závislost danou větším útlumem signálu při propagaci ionosférou s vyšší elektronovou koncentrací, která je očekávána v oblastech se silnějšími magnetickými poli.

Seznam použité literatury

- AKALIN, F., MORGAN, D. D., GURNETT, D. A., KIRCHNER, D. L., BRAIN, D. A., MODOLO, R., ACUNA, M. H. a ESPLEY, J. R. (2010). Dayside induced magnetic field in the ionosphere of Mars. *Elsevier: Icarus*, **206**, 104–111. doi: 10.1016/j.icarus.2009.03.021.
- ANDREWS, D. J., EDBERG, N. J. T., ERIKSSON, A. I., GURNETT, D. A., MORGAN, D., NĚMEC, F. a OPGENOORTH, H. J. (2015). Control of the topside Martian ionosphere by crustal magnetic fields. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **120**, 3042–3058. doi: 10.1002/2014JA020703.
- BROŽ, M. a ŠOLC, M. (2013). *Fyzika sluneční soustavy*. Matfyzpress, Praha. ISBN 978-80-7378-236-8.
- CAIN, J. C., FERGUSON, B. B. a MOZZONI, D. (2003). An $n = 90$ internal potential function of the Martian crustal magnetic field. *Geophysical Research Letters*, **108**(E2), 2156–2202. doi: 10.1029/2000JE001487.
- CHEN, F. F. (1984). *Úvod do fyziky plazmatu*. Academia, Praha.
- CHICARRO, A., MARTIN, P. a TRAUTNER, R. (2004). The Mars Express Mission: An Overview. *ESA Special Publication*.
- DULK, G. A., ERICKSON, W. C., MANNING, R. a BOUGERET, J.-L. (2001). Calibration of low-frequency radio telescopes using the galactic background radiation. *Astronomy & Astrophysics*, **365**, 294–300. doi: 10.1051/0004-6361:20000006.
- DURU, F., GURNETT, D. A., AVERKAMP, T. F., KIRCHNER, D. L., HUFF, R. L., PERSON, A. M., PLAUT, J. J. a PICARDI, G. (2006). Magnetically controlled structures in the ionosphere of Mars. *Journal of Geophysical Research*, **111**(A12204). doi: 10.1029/2006JA011975.
- DURU, F., GURNETT, D. A., MORGAN, D. D., MODOLO, R., NAGY, A. F. a NAJIB, D. (2008). Electron densities in the upper ionosphere of Mars from the excitation of electron plasma oscillations. *Journal of Geophysical Research*, **113**(A07302). doi: 10.1029/2008JA013073.
- FARRELL, W. M., KAISER, M. L., DESCH, M. D., HOUSER, J. G., CUMMER, S. A., WILT, D. M. a LANDIS, G. A. (1999). Detecting electrical activity from Martian dust storms. *Journal of Geophysical Research*, **104**(E2), 3795–3801. doi: 10.1029/98JE02821.
- GURNETT, D. A., ZARKA, P., MANNING, R., KURTH, W. S., HOSPODARSKY, G. B., AVERKAMP, T. F., KAISER, M. L. a FARRELL, W. M. (2001). Non-detection at Venus of high-frequency radio signals characteristic of terrestrial lightning. *Nature*, **409**, 313–315. doi: 10.1038/35053009.
- GURNETT, D. A., KIRCHNER, D. L., HUFF, R. L., MORGAN, D. D., PERSON, A. M., AVERKAMP, T. F., DURU, F., NIELSEN, E., SAFAEINILI, A.,

- PLAUT, J. J. a PICARDI, G. (2005). Radar Soundings of the Ionosphere of Mars. *Science*, **310**, 1929–1933. doi: 10.1126/science.1121868.
- GURNETT, D. A., MORGAN, D. D., GRANROTH, L. J., CANTOR, B. A., FARRELL, W. M. a ESLEY, J. R. (2010). Non-detection of impulsive radio signals from lightning in Martian dust storms using the radar receiver on the Mars Express spacecraft. *Geophysical Research Letters*, **37**(L17802). doi: 10.1029/2010GL044368.
- KIVELSON, M. G., RUSSELL, C. T., PRIEST, E. R., HUNDHAUSEN, A. J., BURGESS, D., WALKER, R. J., LUHMANN, J. G., HUGHES, W. J., WOLF, R. A., STRANGWAY, R. J., GOERTZ, C. K., MCPHERRON, R. L., EGELAND, A. a CARLSON, H. C. (1995). *Introduction to Space Physics*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 0-521-45104-3.
- MONTABONE, L., FORGET, F., MILLOUR, E., WILSON, R. J., LEWIS, S. R., CANTOR, B., KASS, D., KLEINBÖHL, A., LEMMON, M. T., SMITH, M. D. a WOLFF, M. J. (2015). Eight-year climatology of dust optical depth on Mars. *Elsevier: Icarus*, **251**, 65–95. doi: 10.1016/j.icarus.2014.12.034.
- MORGAN, D. D., GURNETT, D. A., KIRCHNER, D. L., HUFF, R. L., BRAIN, D. A., BOYNTON, W. V., ACUÑA, M. H., PLAUT, J. J. a PICARDI, G. (2006). Solar control of radar wave absorption by the Martian ionosphere. *Geophysical Research Letters*, **33**(L13202). doi: 10.1029/2006GL026637.
- NEUKUM, G., JAUMANN, R., CO-INVESTIGATOR, H. a TEAM, E. (2004). HRSC: the High Resolution Stereo Camera of Mars Express. *ESA Special Publication*.
- NIELSEN, E., MORGAN, D. D., KIRCHNER, D. L., PLAUT, J. a PICARDI, G. (2007). Absorption and reflection of radio waves in the Martian ionosphere. *Planetary and Space Science*, **55**, 864–870. doi: 10.1016/j.pss.2006.10.005.
- NĚMEC, F., MORGAN, D. D., GURNETT, D. A. a DURU, F. (2010). Nightside ionosphere of Mars: Radar soundings by the Mars Express spacecraft. *Journal of Geophysical Research*, **115**(E12009). doi: 10.1029/2010JE003663.
- NĚMEC, F., MORGAN, D. D., GURNETT, D. A. a ANDREWS, D. J. (2016). Empirical model of the Martian dayside ionosphere: Effects of crustal magnetic fields and solar ionizing flux at higher altitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **121**, 1760–1771. doi: 10.1002/2015JA022060.
- PAVLŮ, J., BERÁNEK, M., VAVERKA, J., ŠAFRÁNKOVÁ, J., NĚMEČEK, Z. a RICHTEROVÁ, I. (2014). Secondary electron emission from Martian soil simulant. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **119**, 199–209. doi: 10.1002/2013JE004522.
- PICARDI, G., BICCARI, D., SEU, R., PLAUT, J., JOHNSON, W. T. K., JORDAN, R. L., SAFAELINI, A., GURNETT, D. A., HUFF, R., OROSEI, R., BOMBACI, O., CALABRESE, D. a ZAMPOLINI, E. (2004). MARSIS: Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding. *ESA Special Publication*.

- RUF, C., RENNO, N. O., KOK, J. F., BANDELIER, E., SANDER, M. J., GROSS, S., SKJERVE, L. a CANTOR, B. (2009). Emission of non-thermal microwave radiation by a Martian dust storm. *Geophysical Research Letters*, **36**(L13202). doi: 10.1029/2009GL038715.
- WITHERS, P. (2009). A review of observed variability in the dayside ionosphere of Mars. *Elsevier: Advances in Space Research*, **44**, 277–307. doi: 10.1016/j.asr.2009.04.027.
- WITHERS, P. (2011). Attenuation of radio signals by the ionosphere of Mars: Theoretical development and application to MARSIS observations. *Radio Science*, **46**(RS2004). doi: 10.1029/2010RS004450.
- ZARKA, P., FARRELL, W. M., KAISER, M. L., BLANC, E. a KURTH, W. S. (2004). Study of solar system planetary lightning with LOFAR. *Elsevier: Planetary and Space Science*, **52**, 1435–1447. doi: 10.1016/j.pss.2004.09.011.