

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Václav Linzmayer

Význačné hranice v okolí Marsu: magnetopauza a rázová vlna

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

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

Studijní program: Fyzika povrchů a plazmatu

Praha 2023

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

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

V Praze dne 17.4.2023



Podpis autora

Chtěl bych především poděkovat mému vedoucímu diplomové práce doc. RNDr. Františku Němcovi, Ph.D. za odborné vedení a hlavně za ochotu a trpělivost, kterou vynaložil.

Název práce: Význačné hranice v okolí Marsu: magnetopauza a rázová vlna

Autor: Bc. Václav Linzmayer

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

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

Abstrakt: Hlavním cílem této diplomové práce je využití dat měřených družicí MAVEN a metod strojového učení k vytvoření modelu polohy rázové vlny a magnetopauzy. Charakteristické hodnoty koncentrace, rychlosti a velikosti magnetického pole v oblasti slunečního větru, magnetosheathu a magnetosféry umožňují automatickou klasifikaci měřených dat do příslušných oblastí pomocí metody SVM a identifikaci přesečení obou hranic. Pro obě uvažované hranice jsou dále vytvořeny modely založené na vícevrstvých neuronových sítích. Jsou využity dva odlišné přístupy: i) model založený přímo na klasifikaci do jednotlivých oblastí, ii) model využívající pouze identifikovaná přesečení hranic mezi oblastmi. Přesnost vytvořených modelů je ověřena jak pomocí nalezených přesečení hranic, tak porovnáním s předchozími empirickými modely.

Klíčová slova: družice MAVEN, sluneční vítr, Mars, rázová vlna, magnetopauza, vícevrstvé neuronové sítě, support vector machine

Title: Significant boundaries around Mars: magnetic pileup boundary and bow shock

Author: Bc. Václav Linzmayer

Department: Department of Surface and Plasma Science

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

Abstract: The main objective of this thesis is to use the data measured by the MAVEN spacecraft and machine learning methods to develop models of the locations of bow shock and magnetic pileup boundary. Characteristic values of density, flow speed, and magnetic field magnitude in solar wind, magnetosheath, and magnetosphere allows an automatic classification of measured data into respective regions using the SVM method, as well as the identification of the boundary crossings. Models of the two boundaries based on multilayer neural networks are then developed. Two different approaches are used: i) model based directly on the classification of individual regions, and ii) model using only the identified boundary crossings. The accuracy of the developed models is validated both by using individual boundary crossings and by a comparison with former empirical models.

Keywords: MAVEN spacecraft, solar wind, Mars, bow shock, magnetic pile-up boundary, multi-layer neural networks, support vector machine

Obsah

Úvod	2
1 Magnetopauza a rázová vlna	3
1.1 Sluneční vítr	3
1.1.1 Sluneční vítr očima Eugena Parkera	4
1.1.2 Zamrznání magnetického pole	5
1.1.3 Typické parametry slunečního větru	6
1.2 Interakce slunečního větru s Marsem	6
1.2.1 Magnetické pole Marsu	7
1.2.2 Význačné hranice a regiony v okolí Marsu	8
1.3 Existující empirické modely	9
1.3.1 Modely založené na fitování přesečení	10
1.3.2 Model založený na identifikaci regionů	11
2 Použitá data	12
2.1 Družice MAVEN	12
2.1.1 Přístroj SWIA	12
2.1.2 Přístroj MAG	12
2.1.3 Přístroj EUV	13
2.2 Databáze OMNI	13
2.3 F10.7 index	13
3 Cíle práce	15
4 Strojové učení	16
4.1 Vícevrstvé neuronové sítě	16
4.2 Klasifikace dat pomocí metody podpurných vektorů	18
5 Získané výsledky	21
5.1 Propagace slunečního větru k Marsu	21
5.2 Identifikace oblastí a hranic mezi nimi	24
5.3 Modely rázové vlny a magnetopauzy	29
5.3.1 Model založený na klasifikaci jednotlivých oblastí	30
5.3.2 Model založený na identifikovaných přesečeních hranic	32
5.3.3 Porovnání představených modelů	34
6 Diskuze	35
Závěr	39
Seznam použité literatury	40

Úvod

Slunce neustále vrhá velké množství materiálu do svého okolí ve formě elektronů a iontů. Tomuto jevu se říká sluneční vítr, který má velký vliv na dynamiku okolí planet. Sluneční vítr sebou unáší magnetické pole, které je v něm „zamrzlé“. V případě Země sluneční vítr interaguje s magnetickým polem Země a je nucen Zemi obtéct. Mars nemá, na rozdíl od Země, globální přibližně dipólové magnetické pole, ale pouze slabá zbytková povrchová magnetická pole, která by samotná k odstínění slunečního větru nestačila. Díky ionizujícímu toku slunečního záření a přítomnosti atmosféry však dochází k formování vodivé ionosféry, do níž magnetické pole zamrzlé ve slunečním větru nemůže pronikat a dochází tak — podobně jako v případě Země — k jeho obtékání okolo překážky.

V okolí Marsu tedy ve výsledku dochází, podobně jako u Země, k formování různých regionů s odlišnými vlastnostmi, kde dominují různé fyzikální procesy. Správné vymezení jednotlivých regionů a určení hranic mezi nimi přispívá ke správnému pochopení interakce slunečního větru s Marsem a pochopení elementárních procesů probíhajících v jeho atmosféře. Nejvýraznější regiony v okolí Marsu jsou magnetosféra, magnetosheath a sluneční vítr, které jsou odděleny magnetopauzou a rázovou vlnou. Magnetopauza odděluje magnetosféru od magnetosheathu a rázová vlna odděluje magnetosheath od neporušeného slunečního větru.

Tato práce se zaměřuje na určení poloh obou hranic v závislosti na relevantních parametrech (dynamický tlak slunečního větru, tok ionizujícího slunečního záření, velikost povrchových magnetických polí, Alfvénovo-Machovo číslo a velikost magnetického pole ve slunečním větru). Metoda, která je k tomuto účelu použita, je založena na automatické klasifikaci dat měřených družicí MAVEN do jednotlivých regionů. Na základě klasifikovaných družicových dat jsou poté vytvořeny modely rázové vlny a magnetopauzy založené na neuronových sítích. Na jednotlivých půl-orbitách jsou navíc nalezena jednotlivá přesečení rázové vlny a magnetopauzy.

V předkládané práci jsou vytvořeny celkem čtyři modely, dva modely pro rázovou vlnu a dva modely pro magnetopauzu. U každé hranice jsou použity dva odlišné přístupy. První přístup je založen na samotné klasifikaci měřených dat do jednotlivých regionů, kde vytvořený model předvídá, zda zadaný bod (definovaný polohovým vektorem družice a příslušnými relevantními parametry) leží „před“ nebo „za“ uvažovanou hranicí. Druhý přístup je založen na jednotlivých přesečích dané hranice. Vytvořený model pro příslušné parametry přímo předvídá radiální vzdálenost uvažované hranice od Marsu.

Práce se skládá z šesti kapitol. V kapitole 1 je krátký teoretický úvod do problematiky slunečního větru a jeho interakce s Marsem. V kapitole 2 je stručně popsána družice MAVEN, databáze OMNI a F10.7 index. V kapitole 3 jsou přehledně sepsány jednotlivé cíle práce. V kapitole 4 je stručné seznámení s použitými metodami strojového učení – vícevrstevnými neuronovými sítěmi a metodou podpurných vektorů. Získané výsledky jsou uvedeny v kapitole 5 a diskutovány v kapitole 6. Závěr nakonec obsahuje jejich stručné shrnutí.

1. Magnetopauza a rázová vlna

1.1 Sluneční vítr

První zmínky o existenci slunečního větru pochází z počátků 17-tého století od německého vědce Johannese Keplera. Johannes Kepler vycházel z pozorování komet, konkrétně z pozorování jejich ohonů. Zjistil, že ohon komet je orientován směrem od Slunce, a usoudil, že ohon je unášen takzvaným slunečním „vánkem“ (solar „breeze“). Další zmínka o slunečním větru pochází z roku 1859. Richard C. Carrington pozoroval, v té době ještě neznámou, sluneční erupci. Sluneční erupce je často doprovázena výronem koronální hmoty (coronal mass ejection, CME), při které dochází k uvolnění magnetického pole a velkého množství plazmatu ze sluneční korony do okolního prostoru (heliosféry). Když CME dorazí k Zemi, dochází často k takzvané geomagnetické bouři. Vliv takové geomagnetické bouře, resp. projevy proudů v kosmickém prostoru s ní spojené, lze měřit na povrchu Země jako změnu magnetického pole. Poté, co R. C. Carrington pozoroval CME na Slunci, naměřil výrazné variace v magnetickém poli na Zemi. Usoudil, že tyto dva jevy jsou navzájem propojené.

Na začátku 20. století se znalosti o předpokládaných vlastnostech slunečního větru dále prohlubovaly. Kristian Birkeland ukázal, že variace magnetického pole u Země mohou být způsobeny bombardováním nabitými částicemi emitovanými Sluncem a vznikajícími proudy. V roce 1916 také navrhl, že materiál přicházející ze Slunce není výhradně kladný či záporný, ale sestává se z kladných i záporných částic (Birkeland (1916)). O tři roky později Frederick Lindemann obdobně navrhl, že ze Slunce přicházející částice jsou obou polarit, elektrony a protony (Lindemann (1919)). Ludvig Biermann v roce 1951 z pozorování komet usoudil, že pohyb jejich ohonu vyžaduje tok plynu směrem od Slunce, který je kontinuální a mírně variabilní (Biermann (1951)). Koncem padesátých let 20. století se k těmto úvahám založených na pozorování (případně pozemních měřeních) rovněž přidaly první matematicko-fyzikální modely (Chapman a Zirin (1957); Parker (1958)).

Přímé měření slunečního větru je z povrchu Země nemožné, protože je vlivem interakce s magnetickým polem Země odstíněn a Zemi obtéká takzvaným magnetosheatem. K přímému měření slunečního větru je tak nutno využít družice. První přímé měření slunečního větru provedla sovětská družice Luna 1 v roce 1959 a toto měření bylo záhy potvrzeno družicemi Luna 2, Luna 3, Venera 1 a mnoho dalšími.

Zmíněný model Eugena Parkera z roku 1958 se v dnešní době považuje — alespoň v základních obrysech — za správný a je široce používán. Základní princip vzniku slunečního větru podle Parkera je následující. Plazma nacházející se ve sluneční koruně je pod velmi vysokým tlakem a je neustále zahříváno na vysoké teploty. V moment, kdy je plazma tak energetické, že gravitační pole Slunce ho již neudrží, je vymrštěno ze sluneční korony do volného prostoru a šíří se radiálně od Slunce (Kivelson a Russell (1995)). Plazma ve sluneční koruně je vysoce ionizované a velmi dobře vodivé, díky čemuž v něm zamrzá magnetické pole Slunce. To je slunečním větrem unášeno pryč od Slunce a vytváří takzvané meziplanetární magnetické pole (interplanetary magnetic field — IMF). Sluneční

vítr je tedy zkráceně tok vysoce ionizovaného a téměř bezsrážkového plazmatu, které se šíří směrem od Slunce a unáší s sebou zamrzlé magnetické pole.

1.1.1 Sluneční vítr očima Eugena Parkera

Eugene Parker byl inspirován pracemi Biermanna, který poukázal na to, že pozorovaný pohyb ohonů komet vyžaduje konstantní tok plynu směrem od Slunce. V roce 1958 vydal článek, kde odvodil model vzniku slunečního větru ve sluneční koruně pomocí magnetohydrodynamiky. V této kapitole se podíváme na základy tohoto odvození (Parker (1958); Kivelson a Russell (1995)).

Předpokládáme-li, že řešený problém není závislý na čase, je sféricky symetrický (tedy prostorová závislost veškerých veličin lze vyjádřit pouze jako funkce radiální vzdálenosti od středu Slunce r) a vliv magnetického pole je zanedbatelný, tak můžeme přepsat rovnici kontinuity a momentovou rovnici v následujícím tvaru:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \rho u r^2 = 0, \quad (1.1)$$

$$\rho u \frac{du}{dr} = -\frac{dp}{dr} - \rho \frac{GM}{r^2}, \quad (1.2)$$

kde ρ je hustota plazmatu, u rychlost plazmatu, p tlak, G gravitační konstanta a M hmotnost Slunce. Pokud bychom nyní předpokládali situaci stojící sluneční atmosféry, tedy že rychlost je všude nulová ($u(r) = 0$), což se až do 50-tých let 20. století předpokládalo za správné, tak pro závislost tlaku na radiální vzdálenosti r platí:

$$p(r) = p_0 \exp \left\{ \frac{C}{T} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) \right\},$$

kde p_0 je hodnota tlaku plazmatu ve vzdálenosti R (tedy na hranici sluneční korony), C konstanta a T teplota (předpokládáme isotermickou situaci). Toto řešení však není správné, když spočteme hodnotu tlaku pro $r \rightarrow \infty$, tak dostaneme konečnou nenulovou hodnotu tlaku:

$$p_\infty = p_0 \exp \left\{ -\frac{C}{TR} \right\}.$$

Pro reálné hodnoty teplot sluneční korony (10^6 K) však p_∞ nesouhlasí s očekáváním a je o několik řádů vyšší, než odpovídá realitě.

S řešením tohoto problému přišel právě Parker, který uvažoval nenulovou rychlost plazmatu v rovnicích (1.1) a (1.2). Rovnice 1.1 je splněna, pokud se zachovává hodnota $\rho u r^2$. Všimneme-li si, že ρu je rychlost, s jakou je hmota unášena jednotkovou plochou pryč, můžeme napsat:

$$4\pi r^2 \rho u = I, \quad (1.3)$$

kde $4\pi r^2$ je plocha sféry o poloměru r a I je tok hmoty celou plochou sféry. Dále předpokládáme platnost rovnice ideálního plynu pro dvousložkový systém (ionty a elektrony) se stejnou teplotou elektronů a iontů T (a opět uvažujeme teplotu nezávislou na radiální vzdálenosti od Slunce):

$$p = 2nk_b T, \quad (1.4)$$

kde n je koncentrace a k_b Boltzmannova konstanta. Nyní dosazením rovnice (1.3) a (1.4) do rovnice (1.2), s využitím $\rho = mn$, získáme:

$$\left(u^2 - \frac{2k_b T}{m}\right) \frac{1}{u} \frac{du}{dr} = \frac{4k_b T}{mr} - \frac{GM}{r^2}. \quad (1.5)$$

Tato rovnice, jak si jako první všiml Parker (1958), popisuje radiální evoluci slunečního větru. Rovnice (1.5) má mnoho řešení, zaměříme se proto na řešení, které popisuje právě evoluci slunečního větru. Pokud se nacházíme uvnitř korony, tak pro realistické hodnoty teploty je pravá strana rovnice záporná, a to až do takzvané kritické radiální vzdálenosti r_c , pro kterou platí:

$$r_c = \frac{GMm}{4k_b T}.$$

Na této vzdálenosti je pravá strana nulová, tím pádem je nulová i levá strana. Ve speciálním případě, kdy pro $r = r_c$ je $u^2 - 2k_b T/m$ nulové, může dojít k tomu, že plazma začínající na vzdálenostech $r < r_c$ projde kritickou radiální vzdáleností r_c a zachová si $\frac{du}{dr}$ kladné. V tomto případě je nutná změna znaménka na levé straně rovnice (1.5) při průchodu r_c zajištěna změnou znaménka u $u^2 - 2k_b T/m$ (a tedy přechodem slunečního větru z podzvukového na nadzvukový). Plazma se tedy i po průchodu kritickou vzdáleností může urychlovat a šířit do meziplanetárního prostoru. Toto speciální řešení rovnice (1.5) odpovídá pozorováním, kde rychlost slunečního větru dosahuje nadzvukových rychlostí v řádu stovek km/s.

1.1.2 Zamrznání magnetického pole

V úvodu kapitoly 1.1 je uvedeno, že sluneční vítr je vysoce vodivé médium. Ve vysoce vodivém prostředí dochází k tomu, že tok magnetického pole skrz určitou oblast plazmatu se při jejím libovolném pohybu nemění. Tomuto jevu se říká „zamrznání magnetického pole“. Pro odvození zamrznání magnetického pole ve vysoce vodivém plazmatu vyjdeme z Faradayova zákona elektromagnetické indukce (rovnice (1.6)) a Ohmova zákona ve tvaru rovnice (1.7), kde \mathbf{E} je vektor elektrické intenzity, \mathbf{B} vektor magnetické indukce, \mathbf{J} proudová hustota, γ elektrická vodivost a \mathbf{u} je rychlost.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.6)$$

$$\mathbf{J} = \gamma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad (1.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} \quad (1.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.9)$$

Z rovnice (1.7) vyjádříme \mathbf{E} , a to dosadíme do rovnice (1.6). Dále za proudovou hustotu dosadíme z Ampérova zákona (1.8), kde μ je permeabilita, a využijeme neexistence magnetických monopolů (rovnice 1.9). Pro časový vývoj magnetického pole pak platí:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{1}{\gamma \mu} \nabla^2 \mathbf{B} + \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}).$$

V případě slunečního větru je vodivost γ tak vysoká, že první člen je zanedbatelný a pro časový vývoj magnetického pole ve slunečním větru platí:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (1.10)$$

Nakonec využijeme rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

a dostaneme:

$$\frac{d \mathbf{B}}{dt} \frac{1}{\rho} = \left(\frac{\mathbf{B}}{\rho} \cdot \nabla \right) \mathbf{u}. \quad (1.11)$$

Rovnice (1.11) je rovnice proudnice a vývoj magnetického pole se tedy řídí časovým vývojem plazmatu. Z důvodu zamrznání magnetického pole se sluneční vítr, který pochází z jednoho místa na Slunci, nalézá na stejné magnetické siločáře, která se nachází na daném místě na Slunci.

1.1.3 Typické parametry slunečního větru

Sluneční vítr sestává z iontů a elektronů. Podle Bame a kol. (1968) je zastoupení iontů velmi pestré, převážně se jedná o ionty H^+ a He^{++} , ale vyskytují se zde i další vysoce ionizované prvky, jako například $^{16}\text{O}^{6+}$. Důležité parametry pro tuto práci jsou koncentrace plazmatu n , unášivá rychlost plazmatu v a velikost magnetického pole unášeného slunečním větrem B_{SW} . Koncentrace plazmatu ve slunečním větru v okolí Země je přibližně 7 cm^{-3} (Kivelson a Russell (1995)) a klesá s druhou mocninou radiální vzdálenosti od Slunce r . V okolí Marsu je koncentrace plazmatu přibližně 4 cm^{-3} , jak lze získat přímo z měření družice MAVEN nebo odhadnout z poklesu průměrné koncentrace částic u Země. Unášivá rychlost plazmatu je v prvním přiblížení konstantní a pohybuje se ve stovkách km/s (300 – 700 km/s). Velikost magnetického pole unášeného slunečním větrem klesá přibližně s první mocninou radiální vzdálenosti od Slunce. U Země dosahuje velikosti přibližně 6 nT a u Marsu přibližně 4 nT, jak lze opět získat přímo z měření družice MAVEN nebo odhadnout z velikosti u Země. Přehled typických parametrů slunečního větru u Země a Marsu je uveden v tabulce 1.1.

Tabulka 1.1: Typické hodnoty parametrů slunečního větru v okolí Země a Marsu.

Parametr	u Země	u Marsu	
Hustota plazmatu	7 cm^{-3}	4 cm^{-3}	$\sim r^{-2}$
Unášivá rychlost	$450 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$	$450 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$	$\sim r^0$
Velikost magnetického pole	6 nT	4 nT	$\sim r^{-1}$

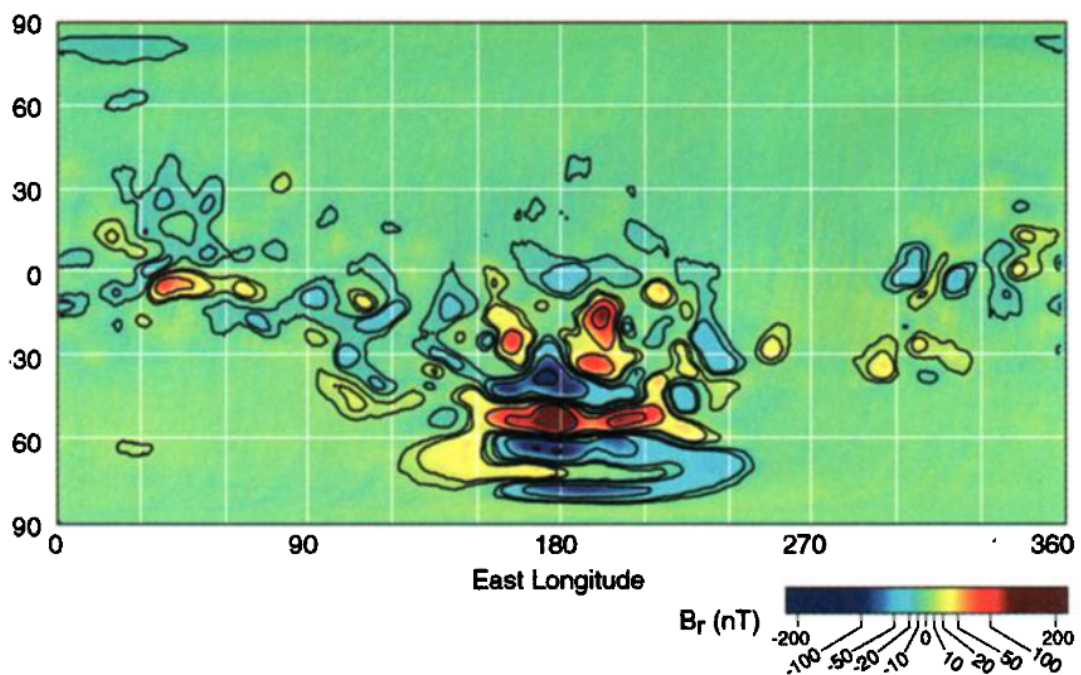
1.2 Interakce slunečního větru s Marsem

Interakce slunečního větru s vesmírnou překážkou významně závisí na vlastnostech dané překážky. Nejvýznamnější faktory překážky ovlivňující interakci se

slunečním větrem jsou: existence vlastního magnetického pole a existence vlastní atmosféry překážky. U Země, které má silné globální dipólové magnetické pole, je dominantním efektem způsobujícím odklánění slunečního větru právě silné magnetické pole. Jak je uvedeno v kapitole 1.2.1, tak Mars nemá magnetické pole globálního dipólového charakteru. Má pouze takzvaná zbytková povrchová magnetická pole, a to především na jižní polokouli. Tato zbytková magnetická pole jsou však velmi slabá, a již nepředstavují dominantní efekt v odklánění slunečního větru okolo Marsu. V tomto případě hraje dominantní roli přítomnost atmosféry Marsu. Atmosféra Marsu je tvořena především oxidem uhličitým, který se vlivem ionizujícího slunečního záření ionizuje, a ve svrchních vrstvách atmosféry vzniká vodivá oblast, které se říká ionosféra. Magnetické pole zamrzlé ve slunečním větru nemůže do vodivého prostředí ionosféry pronikat, v ionosféře Marsu dochází v důsledku interakce se slunečním větrem ke vzniku proudů a odpovídajících indukovaných magnetických polí a sluneční vítr je nucen, podobně jako v případě Země, obtékat okolo. Vzniká tzv. indukovaná magnetosféra. V této kapitole jsou podrobněji rozebrána zbytková magnetická pole Marsu a popsán vznik významných hranic a regionů v jeho okolí.

1.2.1 Magnetické pole Marsu

Až do devadesátých let 20. století nebylo jisté, zda Mars disponuje globálním dipólovým magnetickým polem či nikoli. Měření provedená družicí Mars Global Surveyor (MGS) (experiment MAG/ER), vypuštěné v roce 1996, prokázaly pravou podstatu magnetického pole Marsu – tedy že globální dipólové magnetické pole Mars nemá (Acuña a kol. (1998, 1999)). Na obrázku 1.1 je znázorněno rozlo-

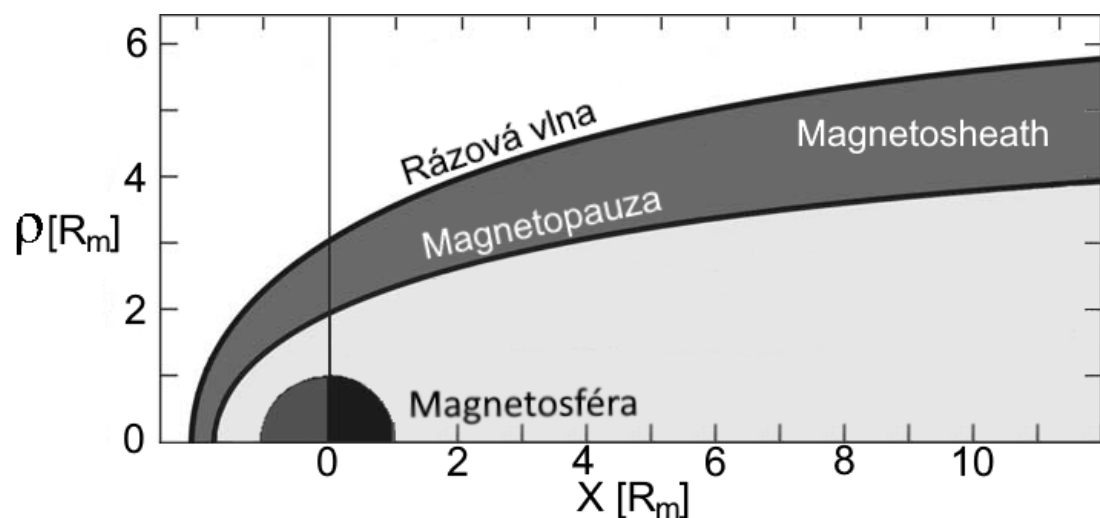


Obrázek 1.1: Mapa povrchu Marsu s barevně vyznačenou radiální složkou magnetického pole B_r ve výšce 400 km. Data byla získána na základě experimentu MAG/ER na družici MGS. Obrázek je převzatý z Connerney a kol. (2001).

žení povrchových magnetických polí Marsu. Je vidět, že tato zbytková magnetická pole jsou především na jižní polokouli a radiální složka magnetického pole Marsu ve výšce 400 km nad povrchem nabývá hodnot přibližně od -200 do 200 nT. Předpokládá se, že Mars kdysi dávno magnetické pole podobného charakteru jako má dnes Země měl, ale přibližně před 4 miliardami let došlo k zastavení jeho vnitřního dynamu, což způsobilo postupný zánik globálního magnetického pole. V dnešní době jsou na Marsu pouze lokální povrchová magnetická pole, která ke stínění slunečního větru přispívají jen velmi málo a tento efekt lze v prvním přiblížení zanedbat. I přesto, že je vliv magnetických polí Marsu na globální interakci Marsu se slunečním větrem velmi malý, polohu a tvar rázové vlny a magnetopauzy stále ovlivňuje (Edberg a kol. (2008)).

1.2.2 Význačné hranice a regiony v okolí Marsu

Na obrázku 1.2 je znázorněna prostorová struktura hlavních oblastí plazmatu v okolí Marsu; x a ρ jsou souřadnice válcové soustavy s osou x směřující ve směru přicházejícího slunečního větru. V důsledku interakce slunečního větru s Marskem dochází ke vzniku rázové vlny a magnetopauzy, které od sebe oddělují: oblast neporušeného slunečního větru od magnetosheathu a magnetosheath od magnetosféry.



Obrázek 1.2: Schématické znázornění prostorové struktury hlavních oblastí plazmatu v okolí Marsu, vyobrazené jsou hranice a regiony důležité pro tuto práci. Osy jsou v jednotkách poloměrů Marsu. Převzato z Nagy a kol. (2004).

Sluneční vítr se v meziplanetárním prostoru pohybuje nadzvukovou rychlostí, resp. rychlostí vyšší než je rychlost šíření magnetozvukových vln. Typické rychlosti šíření magnetozvukových vln ve slunečním větru se pohybují řádově v desítkách km/s a rychlost slunečního větru řádově ve stovkách km/s. V důsledku interakce slunečního větru s překážkou tedy vzniká rázová vlna, kde dochází ke skokovým změnám vlastností plazmatu. Pro účely této práce nás zajímá, jak se mění rychlost částic, koncentrace částic a velikost magnetického pole. Při průchodu slunečního větru rázovou vlnou dochází ke snížení rychlosti částic, která se stává podzvukovou. K částicím tak může doputovat informace o přítomnosti

překážky, dochází ke změně jejich směru a překážku obtékají. Na základě rovnice kontinuity je zachován součin $\rho_m v$, kde ρ_m je koncentrace částic a v je jejich rychlost. Z toho vyplývá, že při průchodu rázovou vlnou se musí zvýšit koncentrace částic. Zároveň dochází ke zvýšení velikosti magnetického pole (jedná se o tzv. „rychlý“ šok související s rychlou magnetozvukovou vlnou, kdy jsou změny velikosti magnetického pole a hustoty ve fázi).

Zpomalený sluneční vítr, který prošel rázovou vlnou, se nachází v oblasti magnetosheathu. Touto oblastí, z jedné strany ohraničenou rázovou vlnou a z druhé strany magnetopauzou, obtéká sluneční vítr Mars. Jedná se tedy o oblast obsahující plazma původem ze slunečního větru, které je nicméně výrazně hustší, má vyšší teplotu a nese s sebou silnější magnetické pole, než neporušený sluneční vítr.

Po průchodu rázovou vlnou a magnetosheathem směrem na menší radiální vzdálenosti se dostáváme k magnetopauze. Tato hranice představuje efektivní překážku slunečnímu větru. V prvním přiblížení to je hranice, za kterou se již nedostanou částice slunečního větru. Vyrovnávají se zde tlaky působící z obou stran hranice. Obecně je celkový tlak na každé straně hranice součtem tří složek, a to dynamického tlaku (ρv^2), magnetického tlaku ($B^2/2\mu_0$) a tepelného tlaku (nk_bT). Ve slunečním větru výrazně dominuje dynamický tlak. S ohledem na to, že rázová vlna musí být — stejně jako magnetopauza — v tlakové rovnováze, lze pak předpokládat, že celkový tlak u magnetopauzy na straně magnetosheathu odpovídá právě dynamickému tlaku slunečního větru. V případě planet s globálním magnetickým polem je celkový tlak u magnetopauzy na magnetosférické straně dominován magnetickým tlakem planetárního magnetického pole a tlakovou rovnováhu na magnetopauze lze tedy přibližně vyjádřit jako:

$$\rho_{SW} v_{SW}^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (1.12)$$

kde ρ_{SW} je hustota slunečního větru, v_{SW} unášivá rychlost slunečního větru, B velikost indukovaných magnetických polí a μ_0 je permeabilita vakua. V případě planet bez globálního magnetického pole, ale disponujících ionosférou, je situace obecně výrazně komplikovanější, neboť koncentrace částic na magnetosférické straně magnetopauzy není zanedbatelná a výrazným způsobem se uplatňuje při udržení rovnováhy (Xu a kol. (2016)). V družicových datech je průchod magnetopauzou, podobně jako průchod rázovou vlnou, dobře identifikovatelný na základě skokových změn měřených veličin. Plazma v oblasti indukované magnetosféry/ionosféry má obecně výrazně nižší rychlost a vyšší koncentraci než plazma v oblasti magnetosheathu. Stejně tak je vyšší velikost magnetického pole.

1.3 Existující empirické modely

První mise, které umožnily systematický výzkum rázové vlny a magnetopauzy u Marsu jsou Mars 2, 3, 5, Phobos 2 (1988), Mars Global Surveyor (MGS, 1996) a další — více informací lze nalézt např. v Siddiqi (2018). V naměřených datech těchto družic byla nalezena řada přesečení rázové vlny a magnetopauzy, která byla následně fitována křivkou odpovídající předepsanému očekávanému tvaru hranice (Trotignon a kol. (1993, 1996, 2006); Vignes a kol. (2000)). V následujících letech byly vypuštěny další družice (především Mars Express — MEX a MAVEN), které

poskytují značné množství přesečení, díky kterým lze vytvářet komplikovanější modely a odhalovat variace těchto hranic v závislosti na relevantních parametrech (Edberg a kol. (2008, 2010); Ramstad a kol. (2017); Hall a kol. (2016, 2019)). Družice MAVEN — díky vhodné orbitě a vhodným měřicím přístrojům na palubě — navíc umožňuje tvorbu modelů na základě identifikace regionů (Němec a kol. (2020)). V následujících dvou kapitolách jsou představeny modely rázové vlny a magnetopauzy založené na fitování individuálních přesečení a na automatické identifikaci regionů.

1.3.1 Modely založené na fitování přesečení

Tradiční způsob modelování rázové vlny a magnetopauzy je následující. V družicových datech jsou nalezena přesečení dané hranice, která jsou poté proložena vhodně zvolenou závislostí. Standardní fitovací technika byla představena a použita ve Slavin a Holzer (1981b). U této metody se předpokládá válcová symetrie podél význačného směru (směr přicházejícího slunečního větru, osa x) a jako fitovací křivka se používá kuželosečka, kde pro radiální vzdálenost hranice od centra planety r , pro daný úhel θ (úhel odklonu od osy x) platí:

$$r = \frac{L}{1 + \varepsilon \cos \theta}, \quad (1.13)$$

kde L je takzvaný poloparametr a ε excentricita.

Tato metoda byla mnohokrát úspěšně aplikována jak na modelování rázové vlny, tak na modelování magnetopauzy. První studie (Slavin a Holzer (1981a); Trotignon a kol. (1993, 1996, 2006); Vignes a kol. (2000)) se zabývaly především obecným tvarem hranic s využitím různých misí (a tedy různých přesečení). Pozdější studie se zabývají výzkumem různých vlivů na polohu a tvar rázové vlny a magnetopauzy. Edberg a kol. (2008) ukazují vliv zbytkového povrchového magnetického pole Marsu na polohu rázové vlny a magnetopauzy. Edberg a kol. (2010) se zaměřují na vliv Alfvénova-Machova čísla na polohu rázové vlny u Marsu. Vlivu vzdálenosti Marsu od Slunce se věnují Hall a kol. (2016) a vliv ionizujícího slunečního záření/slunečního cyklu je rozebrán v Ramstad a kol. (2017) a Hall a kol. (2019). V tabulce 1.2 je uveden přehled misí a počtu použitých přesečení pro odvození jednotlivých modelů rázové vlny a magnetopauzy.

Tabulka 1.2: Přehled misí a počtu přesečení použitých různými studiemi pro modelování rázové vlny a magnetopauzy.

Studie	Mise	BS	MP
Slavin a Holzer (1981a)	Mars 2–3–5	14	—
Trotignon a kol. (1993)	Phobos 2	126	—
Trotignon a kol. (1996)	Phobos 2	—	37
Vignes a kol. (2000)	MGS	450	488
Trotignon a kol. (2006)	MGS a Phobos 2	700	901
Edberg a kol. (2008)	MGS	619	993
Hall a kol. (2016)	MEX	12091	—
Hall a kol. (2019)	MEX	13585	—

1.3.2 Model založený na identifikaci regionů

Tato metoda je založena na klasifikaci měřených dat na sluneční vítr, magnetosheath a magnetosféru. Volné parametry ve vhodně zvolené empirické formuli jsou pak optimalizovány, tak aby byl počet touto formulí správně klasifikovaných bodů maximální. Tato metoda je použita v práci Němec a kol. (2020), kde se používají data měřená družicí MAVEN. Předpokládá se válcová symetrie okolo přicházejícího slunečního větru a empirická formule ve tvaru:

$$\rho^2 = \alpha(x_0 - x), \quad (1.14)$$

kde x a ρ jsou válcové souřadnice MSO (Mars-centered solar orbital) souřadné soustavy s odstraněnou aberací, α odpovídá rozevírání hranice a x_0 je subsolární vzdálenost. Dále je předpokládána závislost subsolárního bodu na dynamickém tlaku slunečního větru P_{SW} , toku ionizujícího slunečního záření F a velikosti povrchového magnetického pole B ve výšce 400 km a ve směru odpovídajícím danému přesečení ve tvaru:

$$x_0 = CP_{SW}^\beta F^\gamma B^\delta, \quad (1.15)$$

kde C , α , β , γ a δ jsou volné parametry, které se následně optimalizují. Získané optimální koeficienty jsou uvedeny v tabulce 1.3.

Tabulka 1.3: Optimální volné parametry modelu rázové vlny a magnetopauzy (Němec a kol. (2020)).

	Rázová vlna	Magnetopauza
C	$1,464 \pm 0,006$	$1,187 \pm 0,003$
α	$4,219 \pm 0,027$	$1,567 \pm 0,007$
β	$-0,063 \pm 0,003$	$-0,065 \pm 0,002$
γ	$0,205 \pm 0,006$	$0,094 \pm 0,005$
δ	$0,018 \pm 0,001$	$0,038 \pm 0,001$

2. Použitá data

2.1 Družice MAVEN

Ve značné části této práce jsou používána data měřená družicí MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution). MAVEN je družice řízená agenturou NASA (National Aeronautics and Space Administration) s vědeckým vedoucím projektu prof. Jakoskym z University of Colorado Boulder, USA. Družice byla vypuštěna v listopadu roku 2013 a na oběžnou dráhu Marsu dorazila v září následujícího roku. Primární jednorocní mise měla za cíl studovat vrchní vrstvy atmosféry Marsu a vliv slunečního větru na její únik do kosmického prostoru. Pro účely této mise byla zvolena výrazně excentrická eliptická dráha oběhu s periapsidou okolo 150 km, apoapsidou přibližně 6000 km a periodou oběhu kolem Marsu zhruba 4,5 hodiny. Díky takovéto oběžné dráze družice prolétá oblastí slunečního větru, magnetosheathem i magnetosférou. V rámci primární mise byly dále realizovány tzv. „deep-dip“ kampaně. Při těchto kampaních se periapsida oběhu dočasně snížila až na 125 km a díky tomu je možné zkoumat nejnižší vrstvy magnetosféry.

Primární mise byla několikrát prodloužena a je aktivní dodnes. V roce 2019 byla družici přiřazena nová mise, při které je MAVEN používán jako komunikační mezistupeň s pozemními rovery (toto se týká například roveru Perseverance). Pro lepší komunikační podmínky byla permanentně snížena apoapsida družice na přibližně 4500 km. S takto změněnou orbitou již družice nevyhovuje požadavkům pro použití v této práci. Celkově jsou tedy používána data z družice MAVEN v období mezi roky 2014 a 2019.

Na palubě družice je celkem osm vědeckých přístrojů, ale ne všechny jsou v předkládané práci využity. Používají se zde pouze data měřená přístroji SWIA, MAG a EUV. Tyto přístroje poskytují informace o rychlosti a koncentraci částic, magnetickém poli a slunečním ionizujícím záření. V následujících kapitolách jsou zmíněné přístroje podrobněji popsány.

2.1.1 Přístroj SWIA

Solar Wind Ion Analyzer (SWIA) je přístroj určený k měření rozdělovací funkce iontů. Měření s energetickým rozlišením 14,5% v energetickém rozsahu 5 eV až 25 keV. Prostorové pokrytí přístroje je $360^\circ \times 90^\circ$ s rozlišením $22,5^\circ$ (ve směru na Slunce pak $3,75^\circ \times 4,5^\circ$). V této práci se používají přímo na palubě družice spočítané momenty měřené rozdělovací funkce iontů, konkrétně unášivá rychlost (bulk velocity) a koncentrace iontů. Časové rozlišení těchto momentů je 4 s.

Detailní popis přístroje SWIA lze nalézt v Halekas a kol. (2015).

2.1.2 Přístroj MAG

Magnetometr MAG měří intenzitu a směr magnetického pole v místě družice. Je tvořen dvěma nezávislými trojosými flux-gate magnetometry. Tyto přístroje jsou velmi citlivé, a proto jsou usazené na nejzazších místech družice (tedy na opačných koncích solárních panelů), aby rušení od družice/druhého magneto-

metru bylo co nejmenší. Magnetometry disponují v každém směru dynamickým rozsahem měření až do $\sim 60\,000$ nT s relativní chybou nižší než 0,05%. Vnitřní vzorkovací frekvence přístroje je 32 Hz. Pro tuto práci jsou používána data se vzorkovací frekvencí 1 Hz, která jsou pro naše účely více než dostatečná.

Detailní popis přístroje MAG lze nalézt v Connerney a kol. (2015).

2.1.3 Přístroj EUV

Extreme Ultraviolet (EUV) monitor měří intenzitu dopadajícího slunečního záření. Přístroj měří na třech klíčových intervalech vlnových délek:

- (0,1 - 7) nm,
- (17 - 22) nm,
- (121,6) nm.

Sluneční záření na těchto vlnových délkách je důležité pro ionizaci, disociaci a ohřívání vrchních vrstev atmosféry Marsu. Pro tuto práci je podstatný celkový ionizující tok slunečního záření. Thiemann a kol. (2017) vytvořili model intenzity slunečního záření, který je založený na modelu FISM (Flare Irradiance Spectral Model, viz Chamberlin a kol. (2006)) a používá data měřená EUV monitorem na družici MAVEN k získání spojitých modelových spekter pokrývající široký interval vlnových délek, tzv.: FISM-Mars. Výsledné datové produkty mají časové rozlišení 1 den a rozlišení ve vlnové délce 1 nm. Celkovému ionizujícímu toku slunečního záření pak odpovídá integrál intenzity v rozsahu vlnových délek 5 – 90 nm (Mendillo a kol. (2017), Němec a kol. (2019)).

Detailní popis EUV monitoru lze nalézt v Eparvier a kol. (2015).

2.2 Databáze OMNI

OMNI je databáze parametrů slunečního větru (pro tuto práci jsou podstatné: velikost magnetického pole ve slunečním větru, koncentrace protonů a unášivá rychlost slunečního větru). Měření probíhá na více družicích (primárně družice ACE a WIND) nacházejících se typicky v blízkosti Lagrangeova L1 bodu. Naměřená data se upravují tak, aby poskytovala co nejpřesnější informace o parametrech slunečního větru v daném čase v oblasti před rázovou vlnou, tj. jsou započítána časová zpoždění odpovídající šíření slunečního větru z L1 bodu k rázové vlně. V této práci používáme OMNI data s časovým rozlišením 1 hodina, což je pro naše účely časové rozlišení bohatě dostačující. Příslušná data OMNI pokrývají časové období od roku 1963 až dodnes. Zde jsou však používána pouze data od roku 2014 do roku 2019, kdy jsou k dispozici parametry slunečního větru u Marsu měřené družicí MAVEN.

2.3 F10.7 index

Index F10.7, dobře korelovaný se sluneční aktivitou, se často využívá v ionosférických studiích jako proxy toku ionizujícího záření při absenci jeho přímých měření. Jedná se o pozemní měření toku slunečního záření na vlnové délce 10.7 cm.

Měření probíhá od roku 1947 dodnes. V této práci se používají data od roku 2014 do roku 2019. Data jsou uváděna v jednotkách slunečního toku s.f.u. (solar flux unit), přičemž platí:

$$1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}.$$

Typické hodnoty indexu F10.7 se pohybují mezi 50 a 300 s.f.u.

3. Cíle práce

Primárním cílem této práce je vytvoření modelů rázové vlny a magnetopauzy u Marsu s využitím neuronových sítí. Splnění tohoto cíle se skládá z několika dílčích částí:

- Klasifikace měřených dat do příslušných regionů
- Vytvoření dvou modelů hranic pomocí neuronových sítí, a to s využitím klasifikovaných dat a s využitím jednotlivých přesečení
- Ověření modelů pomocí individuálních přesečení hranic

Vedlejším cílem práce je odhad propagace parametrů slunečního větru od Země k Marsu.

4. Strojové učení

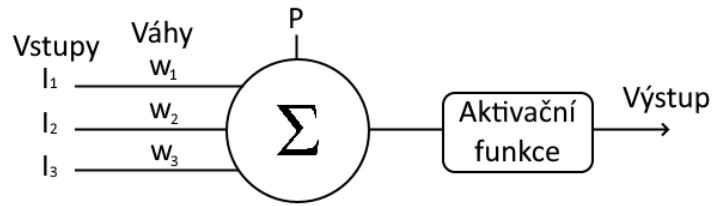
Tato kapitola je věnována nejdůležitějším technikám použitým v této práci. Technik a algoritmů, které jsou při zpracování dat použity, je mnoho, například výpočet korelačního koeficientu, směrodatné odchylky, třídění polí a mnoho dalších. Tyto techniky jsou pro zpracování velmi důležité, ale v této kapitole budeme rozebírat pouze techniky strojového učení. Strojové učení patří pod umělou inteligenci a je základním kamenem zpracování dat v této práci.

První zmínky o strojovém učení pochází z 50-tých let 20. století, kdy Frank Rosenblatt představil perceptron — první verzi umělého neuronu (Rosenblatt (1957)). Přestože počátky sahají do 50-tých let, největší rozmach tohoto odvětví se dostavil až v posledních letech. Tento rychlý rozvoj je dán především rychlým vývojem výpočetní techniky a velkým množstvím dostupných dat. Základní princip strojového učení spočívá ve vytvoření modelu, který je na základě tzv. trénovacích dat formulován tak, aby co nejpřesněji odpovídal danému problému, tj. aby pro daná vstupní data vracel výstup co nejblíže správným (očekávaným) výstupům. Trénovacími daty jsou dvojice vstupních hodnot a jim odpovídajících správných (očekávaných) výstupních hodnot. Model je speciálními algoritmy upravován tak, aby při zadaných vstupních hodnotách předpověděl správné výstupní hodnoty. Pro správné/optimální vytvoření modelu je třeba, aby trénovací množina byla co nejrozsáhlejší a ideálně homogenně rozložená v celém definičním oboru vstupních hodnot. Pokud je některá část dat více zastoupená nebo naopak chybí, tak výsledný model může být tímto negativně ovlivněn. Proces učení je často velmi náročný na výpočetní výkon a navíc jeho náročnost roste s počtem trénovacích dat.

V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány dvě techniky strojového učení, které jsou zde použity: vícevrstvé neuronové sítě a metoda podpůrných vektorů (support vector machine, SVM).

4.1 Vícevrstvé neuronové sítě

Než si představíme neuronové sítě, je nejprve potřeba se seznámit s jednoduchým umělým neuronem. Umělý neuron je analogií přírodního neuronu. Ten je v prvním přiblížení tvořen tělem, axonem a dendrity. Dendrity jsou výběžky neuronu, kterými přijímá informace a axon je výběžek, kterým informace vysílá dále. V prvním přiblížení je funkce neuronu velmi jednoduchá. Pomocí dendritů je přijmut signál, ten je zpracován v těle neuronu a pokud je signál větší než určitý práh, tak se vybudí chemická reakce, která vyšle signál axonem do následujících neuronů. Umělý neuron (dále jen neuron) funguje obdobně. Schématické znázornění neuronu se třemi vstupy je na obrázku 4.1. Z levé strany jsou vstupní hodnoty (zde tři, ale může jich být mnohem více). Každá vstupní hodnota I_i je vynásobena příslušnou vahou w_i a v těle neuronu dojde k sumaci vstupů a odečtení prahu P . Výsledek je upraven takzvanou aktivační funkcí a dostáváme finální výstup jednoho neuronu. V případě, že se jako aktivační funkce použije Heavisideova funkce, tak se tomuto neuronu říká perceptron (navržený v Rosenblatt (1957)). V neuronech se jako aktivační funkce dále používají například: hyperbolický tangens, softmax, sigmoid a další. V této práci se jako aktivační

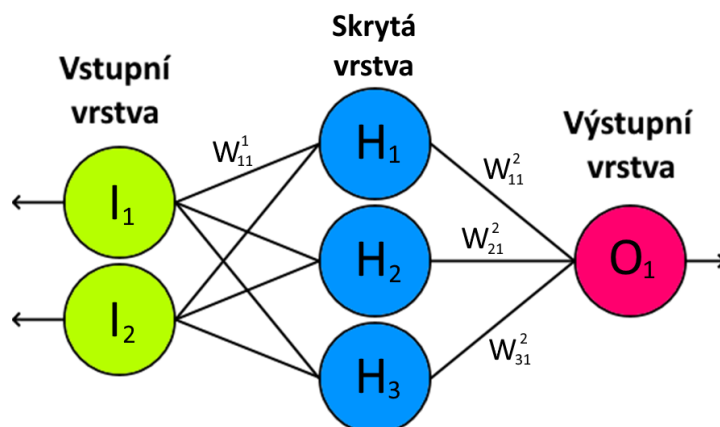


Obrázek 4.1: Schématické znázornění umělého neuronu. Neuron na obrázku má tři vstupy I_1 , I_2 a I_3 s váhami w_1 , w_2 a w_3 .

funkce používají hyperbolický tangens a softmax funkce implementovaná v programovacím jazyku Interactive Data Language (IDL), který je pro zpracování dat využít, rovnicí (4.1), kde J je počet neuronů v dané vrstvě a maximum „max“ je počítáno přes hodnoty neuronů v této vrstvě.

$$f_i(\vec{x}) = \frac{\exp(x_i - \max \vec{x})}{\sum_{j=1}^J \exp(x_j - \max \vec{x})} \quad (4.1)$$

Neuronová síť se skládá z více vrstev s mnoha navzájem propojenými neurony. Důležité je, že každý neuron je propojen s každým neuronem z předchozí vrstvy a s každým neuronem z vrstvy následující s tím, že každý spoj má vlastní váhu. Standardní struktura neuronové sítě sestává ze vstupní vrstvy, skrytých vrstev a výstupní vrstvy. Počet neuronů ve vstupní vrstvě je roven počtu parametrů modelu a počet neuronů ve výstupní vrstvě je roven počtu očekávaných výstupních hodnot. Skrytých vrstev může být mnoho, nebo také žádná, a počet neuronů v každé skryté vrstvě může být různý. Příklad neuronové sítě se dvěma vstupními neurony (I_1 a I_2), jednou skrytou vrstvou se třemi neurony (H_1 , H_2 a H_3) a jedním neuronem ve výstupní vrstvě (O_1) je na obrázku 4.2. Každá přímka znázorňuje váhu (W_{jk}^i) mezi neuronem j z vrstvy i a neuronem k z vrstvy $i + 1$.



Obrázek 4.2: Příklad neuronové sítě se dvěma vstupními neurony (I_1 a I_2), jednou skrytou vrstvou se třemi neurony (H_1 , H_2 a H_3) a jedním výstupním neuronem (O_1).

Jak bylo avizováno, tak trénink neuronové sítě probíhá pomocí speciálních algoritmů. Takových algoritmů je mnoho a jedním z nejznámějších je zpětné propagování (Rumelhart a kol. (1986)), které si zde stručně popíšeme. Základem

tohoto iteračního algoritmu je výpočet parciální derivace tzv. ztrátové funkce (E) podle jednotlivých vah v síti. Ztrátová funkce popisuje rozdíl mezi předpovězenými a očekávanými výstupními hodnotami, například střední kvadratická chyba. Jednotlivé váhy jsou pak upraveny podle rovnice (4.2), kde α je takzvaná rychlost učení a W^i je určitá váha v kroku i .

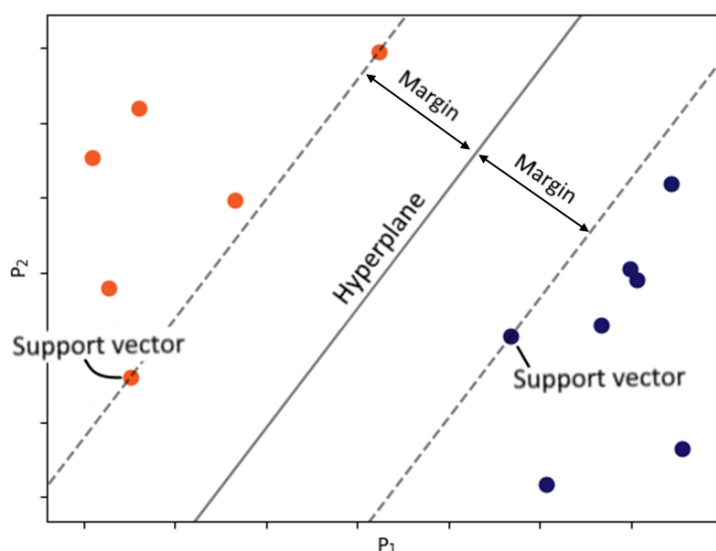
$$W^{i+1} = W^i - \alpha \frac{\partial E}{\partial W} \quad (4.2)$$

Parciální derivace ztrátové funkce tedy určuje, jak se mají jednotlivé váhy upravit, aby byla předpověď neuronové sítě přesnější.

4.2 Klasifikace dat pomocí metody podpurných vektorů

Metoda podpurných vektorů, anglicky Support Vector Machine (dále SVM), byla představena v roce 1995 jako metoda pro binární klasifikaci (Cortes a Vapnik (1995)). Pro klasifikaci více oblastí se používá například metoda one vs. one, kde se SVM postupně použije na všechny dvojice oblastí a nakonec se oddělující hranice spojí dohromady. Dále se tedy budeme zabývat pouze binární klasifikací.

Základním principem této metody je určení rozhodovací hranice (hyperplane), která co nejlépe rozděluje předem klasifikované body, a poté na základě této rozhodovací hranice klasifikování bodů nových. Příklad funkčnosti této metody v nejjednodušším případě, kdy máme ideálně lineárně separabilní problém (oblasti lze rozdělit přímkou, která všechny body správně rozdělí), je na obrázku 4.3. Jako vstupní parametry jsou hodnoty P_1 a P_2 jednotlivých bodů. Jelikož se jedná o 2D problém, je rozhodovací hranicí přímka. Rozhodovacích hranic, které



Obrázek 4.3: Příklad klasifikace ideálně lineárně separabilního problému pomocí metody SVM.

ideálně rozdělují oblasti vyznačené oranžově a modře na obrázku 4.3, je mnoho. U optimální rozhodovací hranice je však vzdálenost mezi oblastmi (margin) maximální. Ke konstrukci optimální hranice se používají takzvané podpůrné vektory (support vectors), což je určitá skupina bodů z trénovacího souboru dat, které určují vzdálenost mezi oblastmi. Lze ukázat, že vzdálenost mezi oblastmi ρ je daná rovnicí (4.3), kde \vec{W} jsou parametry obecné rovnice rozhodovací přímky (viz Cortes a Vapnik (1995)).

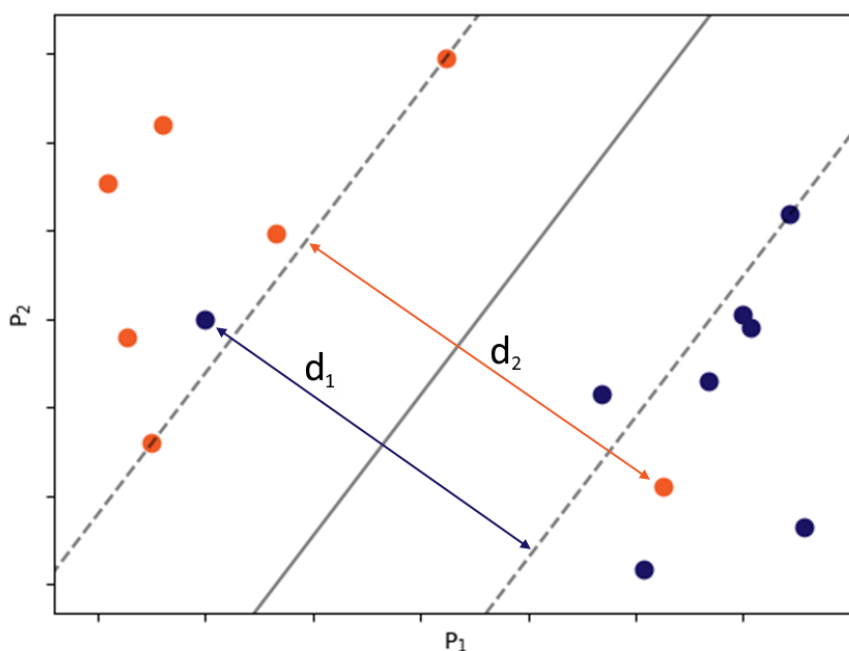
$$\rho = \frac{2}{|\vec{W}|} \quad (4.3)$$

Problém hledání optimální rozhodovací hranice tedy přechází na minimalizaci $|\vec{W}|$ za předpokladu, že nalezená hranice klasifikuje všechny trénovací body správně. Řešení tohoto problému je nad rámec této práce, více lze nalézt například v Cortes a Vapnik (1995).

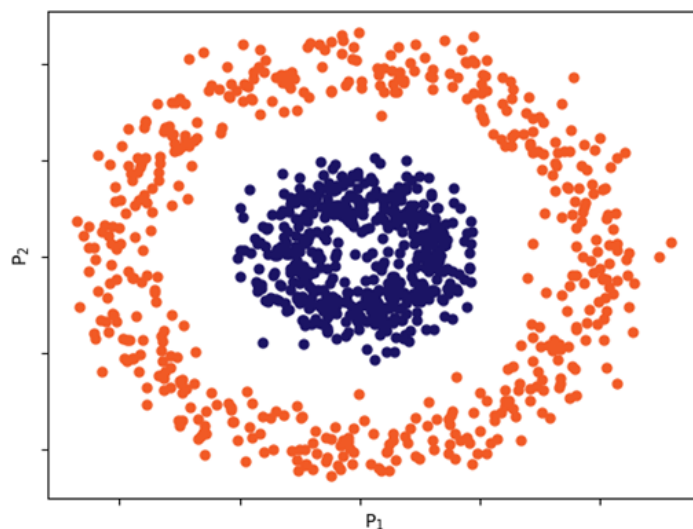
V případě, že jednotlivé oblasti nejsou oddělitelné přímkou bez chybné klasifikace, tak předchozí metoda selže. V těchto případech (což jsou v podstatě všechny reálné případy) se používá takzvaný softmargin. Minimalizační problém se upravuje na minimalizaci funkce f dané rovnicí (4.4), kde n je počet chybně klasifikovaných bodů, d_i je vzdálenost špatně klasifikovaného bodu od příslušného support vectoru (viz obrázek 4.4) a C je parametr, který zohledňuje váhu špatně klasifikovaných bodů vůči vzdálenosti mezi oblastmi.

$$f = \|\vec{W}\| + C \sum_{i=0}^n d_i \quad (4.4)$$

Když je C velké, tak se upřednostňuje správná klasifikace (na úkor menší vzdálenosti oblastí), a naopak když je C malé, tak se upřednostňuje velká vzdálenost



Obrázek 4.4: Příklad klasifikace lineárně separabilního problému s chybnou klasifikací pomocí metody SVM.



Obrázek 4.5: Příklad nelineárně separabilního problému.

mezi oblastmi. Klasifikační problém tedy opět přechází na minimalizační problém, který je nad rámec této práce, více lze nalézt například v Cortes a Vapnik (1995).

Poslední rozšíření, které zde bude nastíněné, se věnuje řešení nelineárně separabilních problémů. Toto se týká případů, kdy klasifikované body nelze rozdělit přímkou. Příklad takového problému je na obrázku 4.5. V těchto situacích se používá takzvaný „kernel trik“. Prostor parametrů se rozšíří o další dimenzi, kde řešený problém již lineárně separabilní je. Způsob, jakým se prostor rozšíří, určuje právě jádro (kernel). Existuje mnoho typů jádra, například: polynomiální, Gaussovské, Radial Basis Function (RBF), sigmoida a mnoho dalších (viz Dubey a kol. (2022)). V případě ukázky na obrázku 4.5 potřebujeme jádro, které bude záviset na vzdálenosti bodu od středu objektu. Poté nalezneme rozhodovací hranici (v tomto případě rovinu) a tu namapujeme zpět na původní dimenzi.

5. Získané výsledky

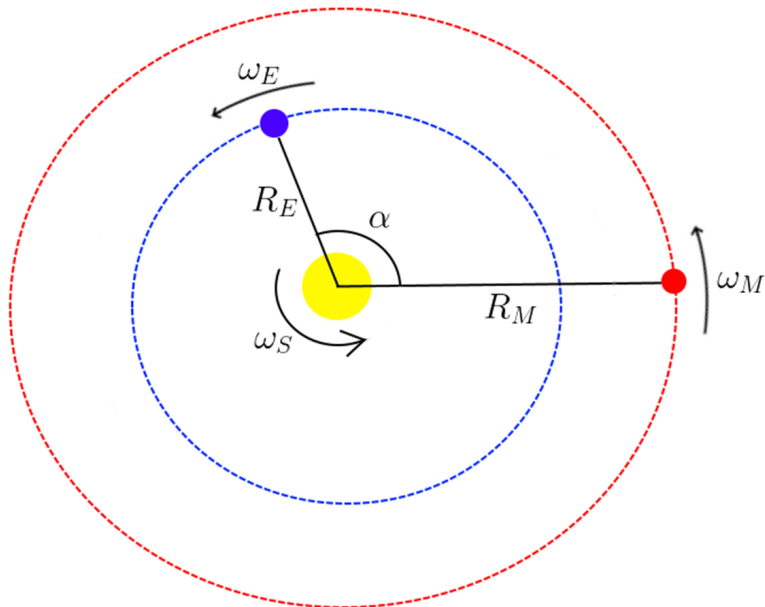
5.1 Propagace slunečního větru k Marsu

Parametry slunečního větru se typicky kontinuálně měří v Lagrangeově L1 bodě. U Země to jsou družice ACE, WIND a další, ze kterých se odvozují OMNI data (viz kapitola 2.2). U Marsu nejsou družice, které by kontinuálně měřily parametry slunečního větru, a pokud jsou tyto parametry potřeba, tak se musí získávat složitěji. V této kapitole je představena metoda, kterou lze tento nedostatek částečně vyřešit.

Tento jednoduchý idealizovaný model propagace parametrů slunečního větru vychází ze dvou předpokladů:

- Parametry slunečního větru pocházející z jednoho místa na Slunci zůstávají po dlouhý časový interval podobné (považujeme je za konstantní).
- Rychlost slunečního větru se s radiální vzdáleností r od Slunce nemění, velikost magnetického pole ve slunečním větru (interplanetary magnetic field, IMF) je úměrná r^{-1} a koncentrace částic ve slunečním větru je úměrná r^{-2} .

Cílem této metody je určit o jaký čas (Δt) dříve/později než žádaný čas u Marsu (t) se musí uvažovat měření u Země (t_E), aby se v obou případech jednalo o stejný zdroj slunečního větru na Slunci. Schématické znázornění typické situace mezi Sluncem, Zemí a Marsem je na obrázku 5.1. Slunce rotuje s konstantní periodou $T_S = 24,47$ dní (na rovníku, díky diferenciální rotaci je perioda rotace na pólech delší) a odpovídající úhlovou rychlostí ω_S ; Země obíhá kolem Slunce s periodou $T_E = 365,25$ dní a odpovídající úhlovou rychlostí ω_E ve vzdálenosti $R_E \sim 1$ AU



Obrázek 5.1: Schématické znázornění rotace Slunce a oběhu Země/Marsu kolem něj.

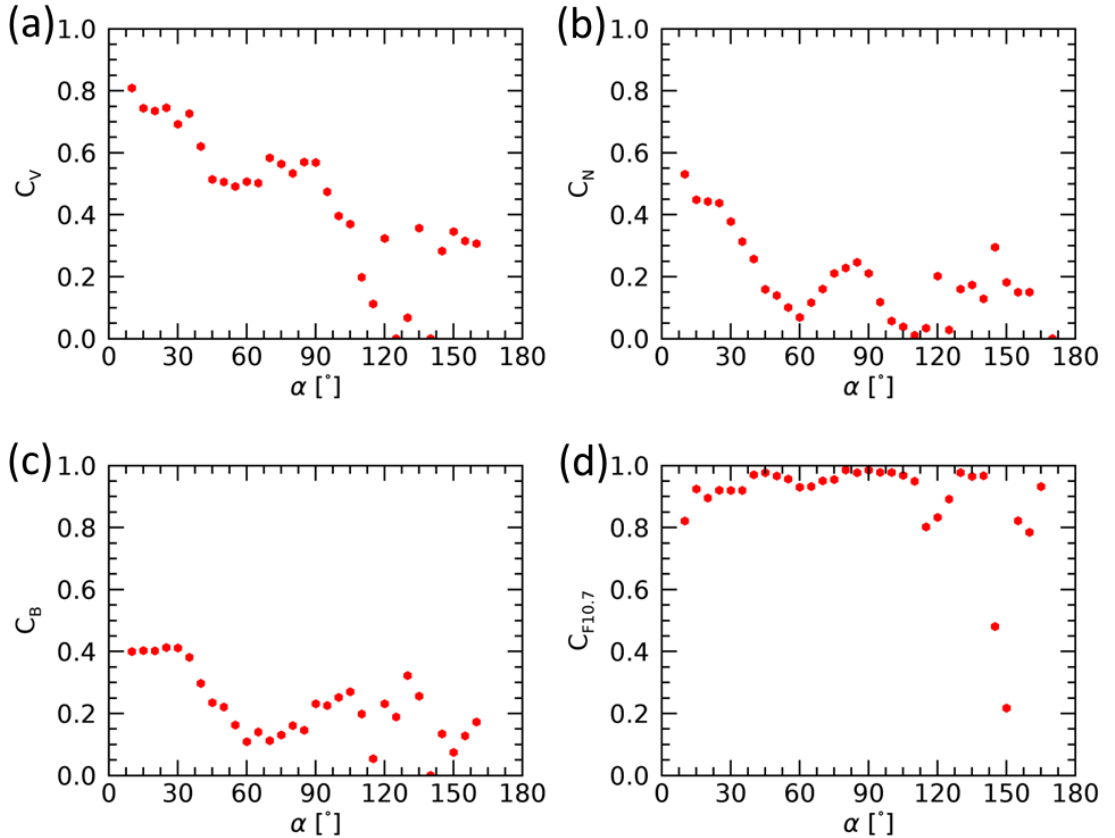
a Mars obíhá s periodou T_M a odpovídající úhlovou rychlostí ω_M ve vzdálenost $R_M \sim 1,38 - 1,67$ AU. Úhel α popisuje konfiguraci mezi Marsem a Zemí v čase t a v_{sw} je rychlost slunečního větru detekovaná u Marsu. Na základě geometrických úvah lze ukázat, že zdroj slunečního větru detekovaný v čas t u Marsu je stejný jako zdroj detekovaný v čas $t_E = t + \Delta t$ u Země, kde Δt je dáno rovnicí (5.1). Člen $(\pm 2\pi)$ zahrnuje tři možnosti: zdroj slunečního větru je detekován u Země v rámci jedné otočky Slunce nebo je detekován o jednu otočku dříve/později.

$$\Delta t = \frac{\alpha(\pm)2\pi + \frac{\omega_S}{v_{sw}}(R_E - R_M)}{\omega_S - \omega_E} \quad (5.1)$$

Rovnice (5.1) platí s malými úpravami i pro propagaci slunečního záření, reprezentované indexem F10.7 (viz kapitola 2.3). Sluneční záření se nešíří rychlostí $v_{sw} \sim 420$ km/h, ale rychlostí světla. V rovnici 5.1 je v takovém případě člen s v_{sw} odpovídající zpoždění díky propagaci zanedbatelný, a pro propagaci slunečního záření tak platí:

$$\Delta t = \frac{\alpha(\pm)2\pi}{\omega_S - \omega_E} \quad (5.2)$$

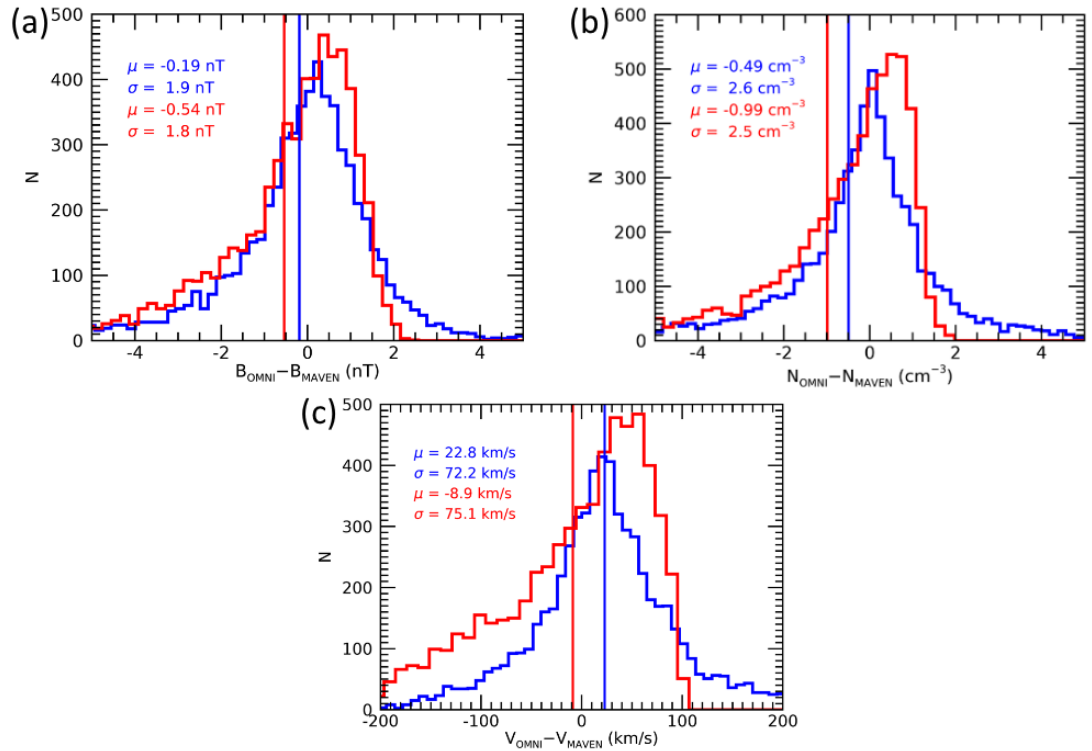
Tato metoda propagace parametrů slunečního větru a slunečního záření je dále ověřena porovnáním s daty naměřenými družicí MAVEN. Na obrázku 5.2 jsou znázorněny korelace unášivé rychlosti, koncentrace částic, velikosti magnetického



Obrázek 5.2: Závislost korelace mezi parametry slunečního větru/zářením naměřenými družicí MAVEN u Marsu a propagovanými parametry měřenými u Země na úhlu α . (a) Unášivá rychlost. (b) Koncentrace částic. (c) Velikost magnetického pole. (d) Ionizující sluneční záření.

pole a ionizujícího slunečního záření mezi měřeními družicí MAVEN u Marsu a propagováním OMNI dat/F10.7 indexu od Země v závislosti na úhlu α . Jak je vidět, tak v případě slunečního záření je korelace vyšší než 0,8 až do úhlu $\alpha \approx 120^\circ$. V případě unášivé rychlosti, koncentrace částic a velikosti magnetického pole ve slunečním větru korelace významně klesá s úhlem α a u koncentrace částic a magnetického pole ani nepřesahuje 0,5.

Dále je provedeno porovnání předkládané propagace s dlouhodobým mediánem magnetického pole, unášivé rychlosti a koncentrace částic ve slunečním větru z databáze OMNI. Na obrázcích 5.3a-c jsou vykreslené histogramy rozdílů parametrů slunečního větru propagovaných od Země a měřených u Marsu, a to pro velikost magnetického pole, koncentraci částic a unášivou rychlost. Modré histogramy jsou určeny pomocí předkládané propagace a červené histogramy jsou určeny pomocí dlouhodobého mediánu OMNI dat, s uvažováním pouze radiální závislosti příslušných veličin. Je vidět, že přesnost stanovených parametrů slunečního větru u Marsu pomocí obou metod je srovnatelná. Střední hodnoty se výrazně neodlišují a směrodatné odchylky jsou též téměř stejné. Námi navrhovaná metoda propagace však vede na poněkud symetričtější rozdělení.

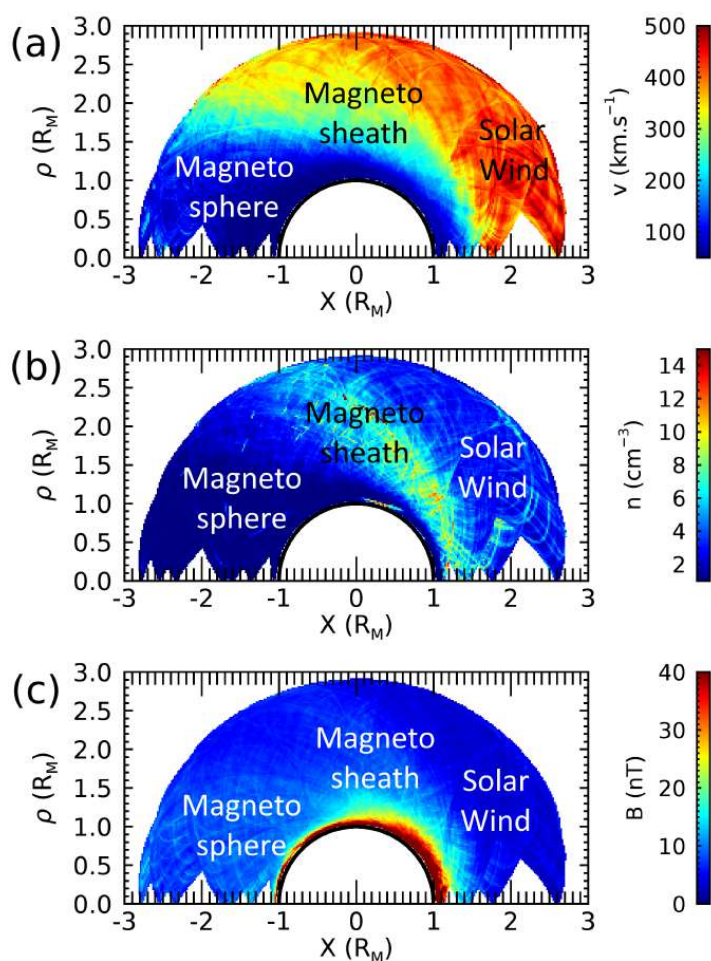


Obrázek 5.3: Histogramy rozdílů mezi propagovanými parametry slunečního větru a parametry měřenými družicí MAVEN u Marsu. Modré histogramy jsou získány pomocí předkládané metody propagace OMNI dat a červené histogramy jsou získány pomocí dlouhodobého mediánu OMNI dat. Příslušné střední hodnoty (μ) a směrodatné odchylky (σ) jsou uvedeny v příslušných histogramech, střední hodnoty navíc znázorněny kolmými čarami. (a) Velikost magnetického pole ve slunečním větru. (b) Koncentrace částic ve slunečním větru. (c) Unášivá rychlost.

5.2 Identifikace oblastí a hranic mezi nimi

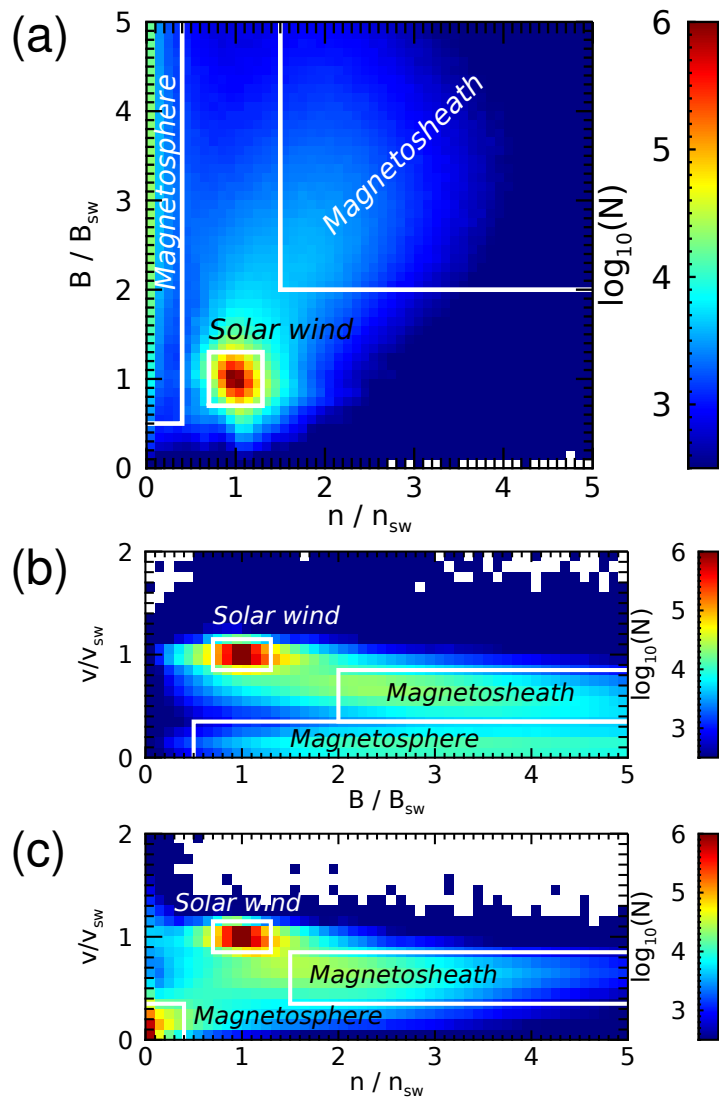
V této kapitole je popsána automatická metoda pro identifikaci oblastí (sluneční vítr, magnetosheath, magnetosféra) a individuálních přesečení rázové vlny a magnetopauzy na základě dat měřených přístroji SWIA a MAG na palubě družice MAVEN. Princip této metody byl vyvinut pro Zemi (Jelínek a kol. (2012)) a poté úspěšně použit v případě Marsu (Němec a kol. (2020)). V této práci je tato metoda navíc vylepšena o klasifikaci zbylých bodů metodou strojového učení SVM (viz kapitola 4.2). Jednotlivá přesečení jsou nakonec manuálně ověřena a případně opravena nebo vyřazena z databáze.

Unášivá rychlost (v) a koncentrace částic (n) plazmatu měřené přístrojem SWIA a velikost magnetického pole (B) měřená magnetometrem MAG jsou použity pro automatickou klasifikaci měřených dat na oblast slunečního větru, magnetosheathu nebo magnetosféry. Cílem je vytvořit automatickou proceduru, která na základě měřených parametrů plazmatu klasifikuje, ve kterém regionu se družice v daný čas nachází. Na obrázcích 5.4a-c jsou vykreslené průměrné hodnoty měřených veličin (v , n a B) v okolí Marsu v závislosti na poloze družice. Je použita MSO (Mars-centered solar orbiter) souřadná soustava s odstraněnou aberací.



Obrázek 5.4: Průměrné hodnoty parametrů plazmatu měřené družicí MAVEN. Je použita souřadná soustava MSO v jednotkách poloměrů Marsu. (a) Unášivá rychlost. (b) Koncentrace. (c) Magnetické pole.

Osa x tak směřuje proti směru přicházejícího slunečního větru. Dále předpokládáme válcovou symetrii okolo této osy a příslušnou vzdálenost od ní značíme ρ . Z těchto obrázků je zřejmé, že měřené parametry plazmatu se v jednotlivých regionech výrazně liší, což klasifikaci podstatně zjednodušuje. Základní princip je převzatý z Jelínek a kol. (2012) a zajímají nás tedy parametry plazmatu normované na parametry plazmatu ve slunečním větru. U Marsu však chybí družice, která by sloužila jako kontinuální monitor přicházejícího neporušeného slunečního větru, a tak je třeba parametry slunečního větru získávat jinak. Za předpokladu, že parametry slunečního větru se v rámci jedné půl-orbity (definované pro potřeby této práce jako část celé orbity družice MAVEN od apoapsidy po periapsidu nebo naopak) výrazně nemění (Marquette a kol. (2018)), tak lze použít družici MAVEN i jako monitor slunečního větru. Pro každou půl-orbitu družice MAVEN



Obrázek 5.5: 2D histogramy znázorňující získané hodnoty poměrů měřených veličin v místě družice ku příslušným parametrům slunečního větru. Velikost binů je $0,1 \times 0,1$ a barva reprezentuje počet měření v daném binu podle logaritmické škály na pravé straně. Bílé obdélníky vyznačují intervaly poměrů, které jsou použity pro klasifikaci do slunečního větru, magnetosheathu a magnetosféry.

jsou parametry slunečního větru (v_{sw} , n_{sw} a B_{sw}) považovány za konstantní a jsou stanoveny jako medián měřených parametrů (na příslušné půl-orbitě), které splňují následující kritéria (Němec a kol. (2020)):

- radiální vzdálenost od Marsu je větší než $2,5 R_M$,
- x -ová komponenta polohového vektoru je větší než $1 R_M$ a
- unášivá rychlost plazmatu je větší než $300 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

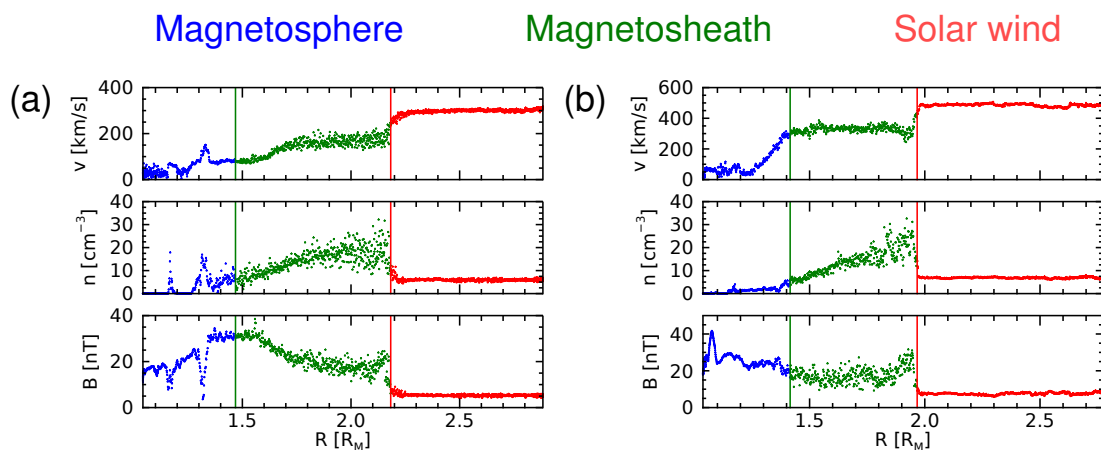
Z více jak 25000 analyzovaných půl-orbit jen 6090 z nich obsahuje alespoň 10 bodů splňujících tato kritéria pro sluneční vítr. V následující analýze jsou parametry slunečního větru základem klasifikace do jednotlivých regionů, a proto se dále uvažuje pouze těchto 6090 půl-orbit. Pro každý datový bod jsou spočteny poměry hodnot měření v místě družice vůči příslušným parametrům slunečního větru (v/v_{sw} , n/n_{sw} a B/B_{sw}) na dané půl-orbitě. Získané poměry jsou znázorněny ve 2D histogramech na obrázku 5.5. Počet bodů v každém binu je barevně rozlišen pomocí logaritmické škály na pravé straně příslušných obrázků. Velikost binů je $0,1 \times 0,1$ a bílé obdélníky vyznačují intervaly poměrů užitých pro klasifikaci do jednotlivých regionů (sluneční vítr, magnetosheath, magnetosféra) dle jednoduchých podmínek (Němec a kol. (2020)). Přesné hodnoty hranic zmíněných intervalů jsou uvedené v tabulce 5.1. Celkově v období mezi roky 2014 a

Tabulka 5.1: Intervaly poměrů měřených veličin ku příslušným parametrům slunečního větru pro klasifikaci do slunečního větru (SW), magnetosheathu (MSH) a magnetosféry (MSP). Intervaly odpovídají bílým obdélníkům na obrázku 5.5.

	v/v_{sw}	B/B_{sw}	n/n_{sw}
SW	0,85 – 1,15	0,7 – 1,3	0,7 – 1,3
MSH	0,35 – 0,85	2 – 5	1,5 – 5
MSP	0 – 0,35	0,5 – 5	0 – 0,4

2019 bylo provedeno přibližně 12,2 milionu měření, která vyhovují požadavkům pro další zpracování. Pomocí podmínek na poměry (v/v_{sw} , n/n_{sw} a B/B_{sw}) z tabulky 5.1 je z těchto 12,2 milionu měření přibližně 6,3 milionu (52%) klasifikováno jako sluneční vítr, přibližně 0,9 milionu (8%) klasifikováno jako magnetosheath a 1,8 milionu (15%) je klasifikováno jako magnetosféra. Nakonec zůstává okolo 3 milionů (25%) neklasifikovaných měření.

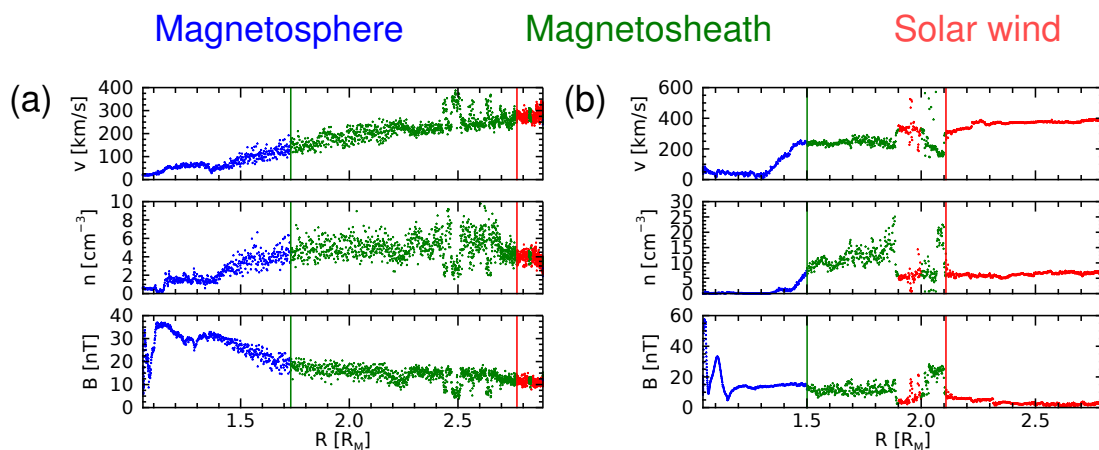
Zdůrazněme na tomto místě, že měření koncentrace částic v magnetosféře přístrojem SWIA je v principu chybné, neboť tento přístroj není uzpůsobený na měření částic v této oblasti (primárně je zaměřen na měření částic ve slunečním větru/magnetosheathu, tedy v oblastech s vysokou unášivou rychlostí). Koncentrace částic detekovaná v magnetosféře je tak systematicky mnohem nižší, než by správně měla být. V předkládané analýze se nicméně koncentrace částic v magnetosféře používá výhradně pro klasifikační důvody, a tak není potřeba znát správnou hodnotu, ale stačí vědět jak se měřená hodnota vyvíjí (za předpokladu, že je tento vývoj systematický, což je). Jinými slovy to, že pozorovaná koncentrace částic v magnetosféře je nižší z důvodu špatného měřicího přístroje (pro měření v této oblasti) je irelevantní, pokud je měření konzistentní.



Obrázek 5.6: Ukázka dvou půl-orbit, kde automatická klasifikace s pomocí metody SVM funguje dobře. Data klasifikovaná jako sluneční vítr, magnetosheath a magnetosféra jsou vykreslena červeně, zeleně a modře. Rázová vlna a magnetopauza jsou znázorněny červenými a zelenými vertikálními čarami. Jednotlivé panely ukazují, shora: unášivou rychlost, koncentraci částic a velikost magnetického pole. Data na obrázku (a) byla naměřena 29. ledna 2015 mezi 06:34 a 08:51 UT. Data na obrázku (b) byla naměřena 29. července 2016 mezi 00:08 a 02:19 UT.

Značná část dat zůstává po klasifikaci pomocí jednoduchých podmínek neklasifikovaná. Tato data se navíc často nacházejí v okolí hranic a jejich klasifikace tedy přímo ovlivňuje kvalitu modelů. Pro klasifikaci zbývajících dat je v této práci použita metoda strojového učení — metoda podpůrných vektorů (SVM). Metoda SVM je aplikována na jednotlivých půl-orbitách. Na každé půl-orbitě zvláště jsou jako trénovací data použita úspěšně klasifikovaná měření podle podmínek z tabulky 5.1. Metoda SVM poté klasifikuje zbylá, neklasifikovaná data na dané půl-orbitě. Výsledná klasifikace dat na jednotlivých půl-orbitách je dále využita pro identifikaci pozic rázové vlny a magnetopauzy. Poloha těchto hranic je určena tak, aby optimálně oddělovala příslušné sousedící regiony. Konkrétně pro rázovou vlnu je radiální vzdálenost hranice určena tak, že počet bodů o větší radiální vzdálenosti klasifikovaných jako sluneční vítr a počet bodů o menší radiální vzdálenosti klasifikovaných jako magnetosheath nebo magnetosféra je maximální. Obdobně pro magnetopauzu je radiální vzdálenost hranice určena tak, že počet bodů o větší radiální vzdálenosti klasifikovaných jako sluneční vítr nebo magnetosheath a počet bodů o menší radiální vzdálenosti klasifikovaných jako magnetosféra je maximální. Funkčnost klasifikační metody a identifikace přesečení hranic je ukázána na obrázcích 5.6 a 5.7. Na těchto obrázcích jsou vykreslené unášivé rychlosti, koncentrace částic a velikosti magnetického pole v závislosti na radiální vzdálenosti pro čtyři různé půl-orbity. Data klasifikovaná jako sluneční vítr, magnetosheath a magnetosféra jsou na obrázcích vyobrazeny červenou, zelenou a modrou barvou. Identifikované radiální vzdálenosti rázové vlny a magnetopauzy jsou na obrázcích znázorněny červenými a zelenými vertikálními čarami.

Na obrázku 5.6 jsou dva příklady půl-orbit, kde automatická klasifikace funguje dobře. V obou případech dochází ke skokovým změnám měřených veličin při přechodu hranic. Při přechodu ze slunečního větru do magnetosheathu dochází k poklesu unášivé rychlosti, zvýšení koncentrace částic a zvýšení velikosti



Obrázek 5.7: Formát je stejný jako na obrázcích 5.6. Na obrázku vlevo je ukázka půl-orbity, u které bylo vyraženo přesečení magnetopauzy. Na obrázku vpravo je ukázka půl-orbity, na které došlo k vícenásobnému přesečení rázové vlny. Data na obrázku (a) byla naměřena 17. listopadu 2014 mezi 05:46 a 08:04 UT. Data na obrázku (b) byla naměřena 12. srpna 2018 mezi 15:22 a 17:35 UT.

magnetického pole, jak by dle teorie mělo (viz kapitola 1.2). V případě přechodu z magnetosheathu do magnetosféry dochází k dalšímu snížení unášivé rychlosti, snížení koncentrace částic a zvýšení intenzity magnetického pole, což je opět ve shodě s teorií. Data byla měřena 29. ledna 2015 v čase od 06:34 do 08:51 UT a 29. července 2016 v čase od 00:08 do 02:19 UT.

Často je však situace mnohem komplikovanější a identifikace regionů není tak zřejmá. Situace se zejména komplikuje se zvětšujícím se úhlem θ (úhel, který svírá polohový vektor družice MAVEN s osou x , tj. se směrem na přicházející sluneční vítr). Při větších hodnotách úhlu θ jsou přesečení rázové vlny a magnetopauzy hůře identifikovatelná. K zajištění přesné identifikace hranic jsou tak dále uvažována pouze ta přesečení, u kterých je x -ová souřadnice pozitivní. Aby na každé půl-orbitě byl dostatek bodů klasifikovaných do jednotlivých regionů (sluneční vítr, magnetosheath a magnetosféra), požadujeme, aby na každé půl-orbitě byl počet klasifikovaných bodů v každém regionu větší než 20. S těmito dodatečnými podmínkami nám zbývá 5318 přesečení rázové vlny a 3156 přesečení magnetopauzy. Jednotlivá přesečení hranic jsou dále manuálně zkontrolována. Pokud jsou naměřené veličiny v průběhu dané půl-orbity velmi nejasné a identifikace přesečení hranice vizuálně nemožná, je dané přesečení vyjmuto z další analýzy (originální klasifikace do jednotlivých regionů však pro účely další analýzy zůstává). Touto cestou je vyjmuto 313 přesečení rázové vlny a 121 přesečení magnetopauzy. Ukázka takto problematické půl-orbity, kde bylo vyjmuto přesečení magnetopauzy, je na obrázku 5.7a. Data byla naměřena 17. listopadu 2014 mezi 05:46 a 08:04 UT.

Při manuální kontrole jednotlivých půl-orbit je klasifikace a přesečení hranic opravena v případě, že automatická klasifikace a identifikace hranic selhává, ale správná klasifikace/poloha hranic je vizuálně zřejmá. Tato oprava se týká 901 přesečení rázové vlny a 165 přesečení magnetopauzy. Pokud je opravena poloha přesečení hranice, tak je odpovídajícím způsobem opravena i klasifikace do jednotlivých regionů. Například pokud je posunuta poloha přesečení rázové vlny dále

od Marsu, tak klasifikace dat, která jsou mezi původní polohou přesečení a novou polohou přesečení je změněna na magnetosheath. V poslední řadě stojí za zmínku, že příležitostně dochází k vícenásobným přesečením jedné hranice v rámci jedné půl-orbity. Příklad takovéto situace je znázorněn na obrázku 5.7b. Příslušná data byla naměřena 12. srpna 2018 mezi 15:22 a 17:35 UT. Na této konkrétní půl-orbitě dochází k vícenásobnému přeseční rázové vlny. Konkrétně jde o trojitě přesečení na radiálních vzdálenostech přibližně $1,9 R_M$, $2,0 R_M$ a $2,1 R_M$. V takovém případě představená procedura na identifikaci přesečení hranic nalezne pouze jedno přesečení dané hranice. Finální databáze přesečení hranic sestává z 5005 přesečení rázové vlny a 3035 přesečení magnetopauzy. Jednotlivá přesečení hranic jsou v dalších částech práce použita pro část analýzy, pro zbytek analýzy je použita přímo klasifikace jednotlivých bodů do příslušných oblastí (celkově 12,2 milionu dat). Jednotlivá přesečení hranic jsou také použita pro porovnání modelů mezi sebou.

5.3 Modely rázové vlny a magnetopauzy

V následujících dvou kapitolách jsou představeny dva odlišné přístupy pro tvorbu modelů rázové vlny a magnetopauzy. Pro tvorbu modelů jsou v obou případech použity neuronové sítě (viz kapitola 4.1) s tím rozdílem, že se v obou přístupech používají různé trénovací datasey a jiná struktura neuronových sítí.

V prvním přístupu se pro trénování neuronové sítě používá všech 12,2 milionu bodů klasifikovaných jako sluneční vítr, magnetosheath nebo magnetopauza. Každý bod sestává z radiální vzdálenosti R , úhlu θ mezi x -ovou osou a příslušným polohovým vektorem družice MAVEN, dynamického tlaku slunečního větru P_{SW} , celkového toku ionizujícího slunečního záření F , velikosti povrchového magnetického pole B_{surf} a označení odpovídající klasifikaci bodu do regionu. U rázové vlny je označení „za“ pro body klasifikované jako sluneční vítr a označení „před“ pro body klasifikované jako magnetosheath a magnetosféra. Analogicky pro magnetopauzu užíváme označení „za“ pro body klasifikované jako sluneční vítr a magnetosheath a označení „před“ pro body klasifikované jako magnetosféra. Velikost povrchového magnetického pole B_{surf} je určena pomocí modelu magnetického pole ve výšce 400 km (Cain a kol. (2003)) na pozici odpovídající polohovému vektoru družice MAVEN. Výsledný model předpovídá, zda se daný bod nachází před nebo za uvažovanou hranicí směrem od Marsu.

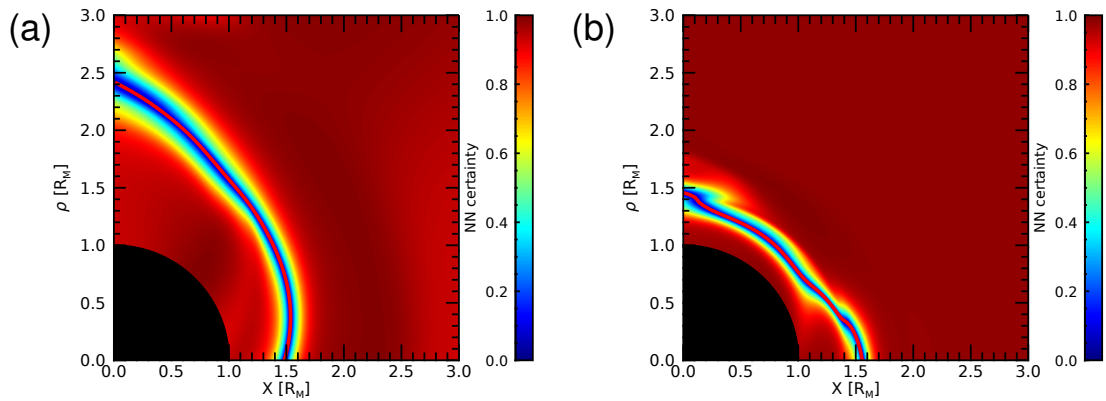
V druhém přístupu se pro trénování neuronové sítě používají pouze identifikovaná individuální přesečení hranic (5005 přesečení rázové vlny a 3035 přesečení magnetopauzy) a neuronová síť přímo předpovídá radiální vzdálenost uvažované hranice pro dané parametry.

Relevantní parametry, které mají vliv na polohu a tvar rázové vlny a magnetopauzy, jsou získány na základě následujícího postupu. Vycházíme ze souboru parametrů, u kterých předpokládáme, že jsou relevantní: θ , P_{SW} , F , B_{surf} , Alfénovo-Machovo číslo M_A a velikost magnetického pole ve slunečním větru B_{SW} . Nejprve předpokládáme závislost polohy a tvaru rázové vlny a magnetopauzy na úhlu θ a dynamickém tlaku slunečního větru P_{SW} (které jsou zřejmými hlavními parametry řídícími polohu obou hranic) a vytvoříme odpovídající model tvořený neuronovou sítí. Dále spočítáme korelace mezi ostatními (dosud nepoužitými) parametry z počátečního souboru parametrů a rozdílem mezi pozorovanými a predi-

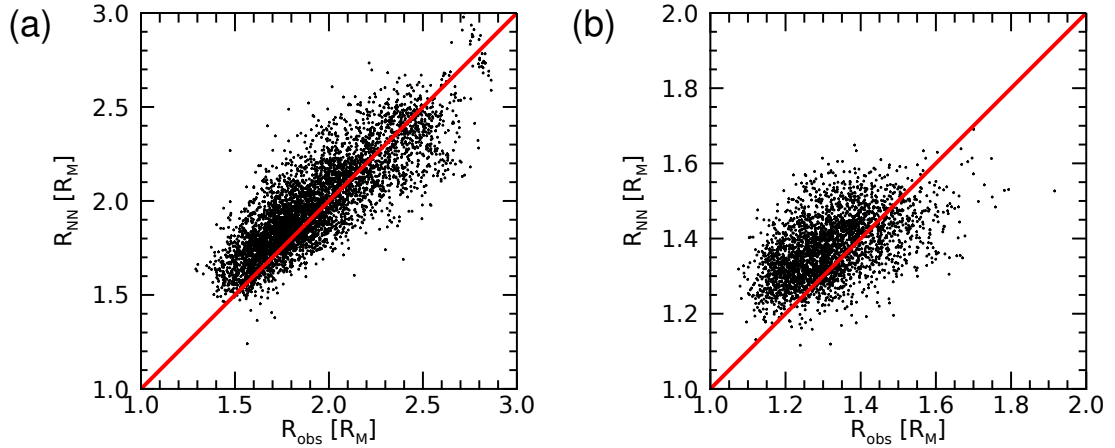
kovanými radiálními vzdálenostmi uvažované hranice. Dosud nepoužitý parametr, který odpovídá nejvyšší korelaci (například F) následně přidáme do modelu (parametry nového modelu by v tomto případě byly θ , P_{SW} a F) — a vytvoříme nový model, opět založený na neuronové síti a nových parametrech. Tento proces opakujeme dokud není absolutní velikost korelačního koeficientu pro všechny zbylé parametry menší než 0,1. Finální parametry pro rázovou vlnu jsou R , θ , P_{SW} , F , B_{surf} a M_A . Finální parametry pro magnetopauzu jsou R , θ , P_{SW} , F , B_{surf} a B_{SW} .

5.3.1 Model založený na klasifikaci jednotlivých oblastí

V tomto modelu se jako trénovací dataset používají jednotlivé klasifikované body, tedy přibližně 12,2 milionu bodů. Jednotlivé body však nejsou identicky relevantní pro polohu a tvar hranic. Nejvíce relevantní jsou ta data, jež jsou blízko k uvažované hranici. Body, které jsou velmi daleko od uvažované hranice, přispívají jen velmi málo informací ohledně polohy a variability hranice. Pro zajištění podobné relevance použitých dat jsou při trénování modelu použita pouze ta data, jejichž radiální vzdálenost je do $0,5 R_M$ od radiální vzdálenosti dané hranice určené empirickým modelem (Němec a kol. (2020)). Identifikace regionů je navíc problematická za slunečním terminátorem. Pro zajištění co nejkvalitnějšího trénovacího souboru dat jsou proto použita pouze data, která jsou měřena před slunečním terminátorem – tedy úhel $\theta < 90^\circ$. Při této restrikci je počet bodů klasifikovaných jako magnetosféra velmi nízký, což komplikuje konstrukci trénovacího datasetu relevantního pro magnetopauzu. Z tohoto důvodu je omezení na úhel pro relevantní data u magnetopauzy, navzdory nižší kvalitě trénovacího datasetu, upraveno na $\theta < 105^\circ$. Poslední úpravou trénovacích datasetů pro rázovou vlnu a magnetopauzu je vyrovnání počtu bodů „před“ a „za“ uvažovanou hranicí. Trénovací dataset obsahující mnohem větší počet bodů v jedné skupině bodů než počet bodů v ostatních skupinách je totiž škodlivý pro funkčnost neu-



Obrázek 5.8: Prostorové rozložení jistoty neuronové sítě pro klasifikaci oblastí definované jako absolutní hodnota z rozdílu hodnot obou výstupních neuronů. Jistota neuronové sítě na každé pozici je barevně kódovaná podle barevné škály na pravé straně. Pro získání těchto obrázků byly použity mediány parametrů z celého datasetu: $P_{SW} = 0,633$ nPa, $F = 1,076$ mW m $^{-2}$ a $B_{surf} = 4,761$ nT. Červená křivka odpovídá hranici předpovězené modelem. (a) Rázová vlna. (b) Magnetopauza.

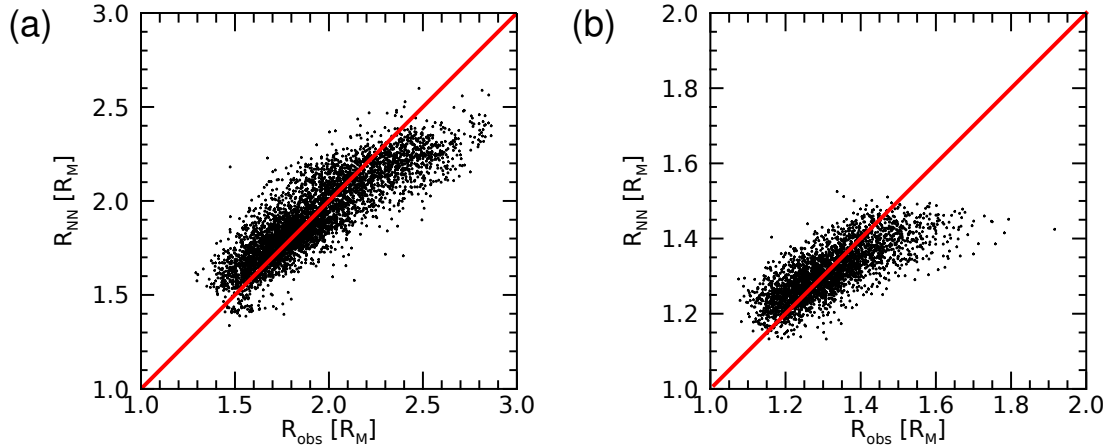


Obrázek 5.9: Radiální vzdálenosti určené pomocí neuronové sítě založené na klasifikaci jednotlivých bodů do příslušných oblastí v závislosti na pozorovaných radiálních vzdálenostech hranic. Každý bod v grafu odpovídá jednomu přesečení hranice. Červená přímka znázorňuje závislost jedna ku jedné. (a) Výsledky pro rázovou vlnu. (b) Výsledky pro magnetopauzu.

ronových sítí. Neuronová síť poté mnohem častěji tíhne k predikci bodů z více zastoupené skupiny. Standardní technika pro vylepšení nevyvážených datasetů je takzvaná metoda náhodného nadvýběru, anglicky random over-sampling (ROS). Tato technika spočívá v náhodné duplikaci bodů z méně populovaných oblastí (Hulse a kol. (2007)). V této práci je tato technika použita na 5° výšece v θ pro získání více homogenního rozdělení dat. Z původního počtu 3 298 979 bodů v trénovacím datasetu pro rázovou vlnu získáváme 4 564 494 bodů a z původního počtu 2 398 350 bodů v trénovacím datasetu pro magnetopauzu získáváme 2 792 190 bodů. V datasetu pro rázovou vlnu je tedy přibližně 28% umělých a v datasetu pro magnetopauzu je přibližně 14% umělých.

Pro rázovou vlnu a magnetopauzu jsou vytvořeny dva různé modely. Oba modely jsou založeny na vícevrstvých neuronových sítích s pěti vstupními neurony (pro pět vstupních hodnot: R , θ , P_{SW} , F a B_{surf}), třemi skrytými vrstvami se sedmi neurony v každé z nich a dvěma výstupními neurony (odpovídající pravděpodobnosti, že se daný bod nachází před/za uvažovanou hranicí). Ve všech vrstvách je jako aktivační funkce použit hyperbolický tangens, až na poslední vrstvu, kde je použita softmax funkce. Softmax funkce normuje výstupní hodnoty na interval 0 až 1, přičemž jejich součet je roven jedné. Výstupní hodnoty tak přibližně odpovídají pravděpodobnosti, s jakou je daný bod před/za uvažovanou hranicí. Pro rázovou vlnu i magnetopauzu je použita stejná struktura neuronové sítě, ale pro jejich trénování se používají dva různé trénovací datasety, které byly diskutovány v předchozím odstavci.

Funkčnost modelů při typických hodnotách řídicích parametrů (mediány celého datasetu: $P_{SW} = 0,633$ nPa, $F = 1,076$ mW m $^{-2}$ a $B_{surf} = 4,761$ nT) jsou ukázány na obrázcích 5.8a,b pro rázovou vlnu a magnetopauzu. Barevné kódování odpovídá jistotě předpovědi neuronové sítě, že se daný bod nachází před/za danou hranicí. Jistota je pro potřeby této práce definovaná jako absolutní hodnota rozdílu hodnot obou výstupních neuronů. V případě, že je jistota blízka jedné, je předpověď neuronové sítě velmi jasná a s vysokou pravděpodobností správná. Na



Obrázek 5.10: Radiální vzdálenosti určené pomocí neuronové sítě založené na jednotlivých přesečení hranic v závislosti na pozorovaných radiálních vzdálenostech příslušných hranic. Každý bod v grafu odpovídá jednomu přesečení hranice. Červená přímka znázorňuje závislost jedna ku jedné. (a) Výsledky pro rázovou vlnu. (b) Výsledky pro magnetopauzu.

druhou stranu, když je jistota blízká nule, tak hodnota obou výstupních neuronů je blízká 0,5 a daný bod se může s podobnou pravděpodobností nacházet před i za uvažovanou hranicí. Výsledná závislost radiální vzdálenosti hranice na úhlu θ je určena na základě změny předpovídané oblasti (z oblasti „před“ hranicí na oblast „za“ hranicí a obráceně). V této práci byla použita metoda půlení intervalů. Vypočtená radiální vzdálenost dané hranice za typických hodnot řídicích parametrů je v závislosti na úhlu θ vykreslena červenou křivkou na obrázku 5.8.

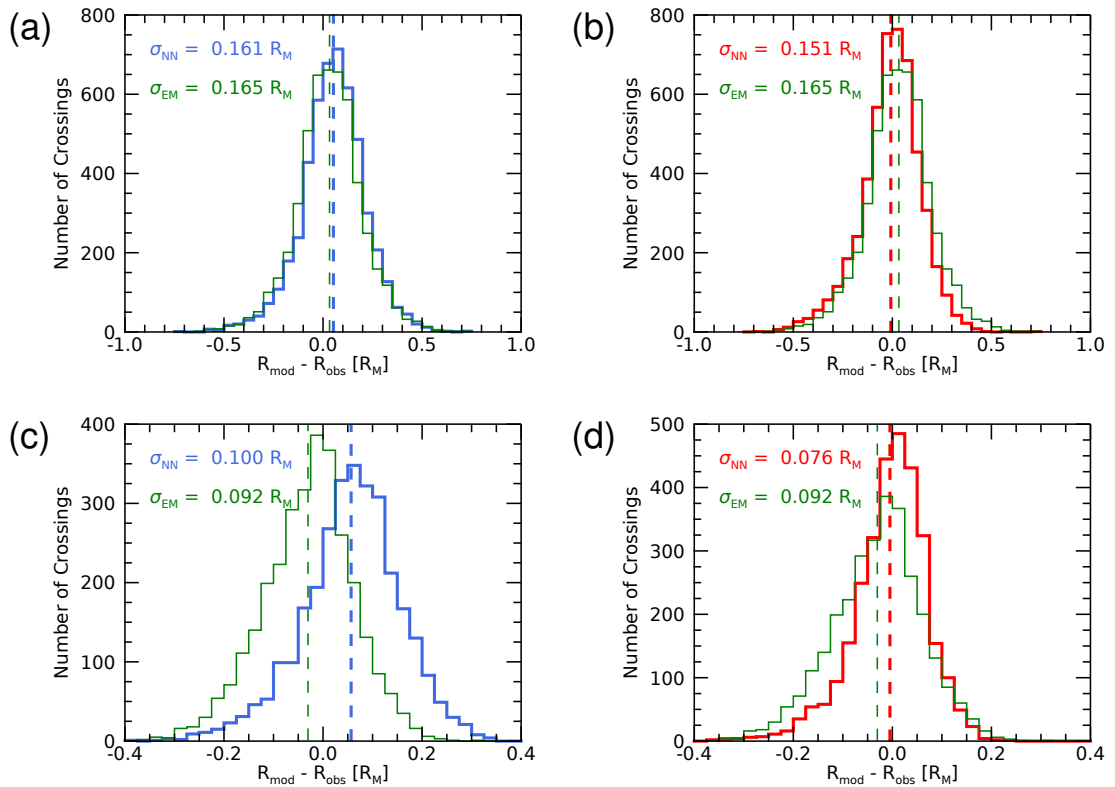
Pro ověření přesnosti výsledných modelů hranic jsou ke každému pozorovanému přesečení určeny předvídané radiální vzdálenosti dané hranice, a to s využitím příslušných řídicích parametrů odpovídajících danému přesečení. Výsledky přímého porovnání radiálních vzdáleností rázové vlny a magnetopauzy určených pomocí neuronových sítí a radiálních vzdáleností pozorovaných přesečení daných hranic jsou na obrázcích 5.9a,b. Každý bod v grafu odpovídá jednomu přesečení hranice a červená přímka znázorňuje závislost jedna ku jedné. Celkově je mezi pozorovanými a předpovězenými polohami jednotlivých přesečení hranic dobrá shoda. Poněkud lepší shoda nastává u rázové vlny, kde Pearsonův korelační koeficient je 0,83. V případě magnetopauzy dosahuje hodnota Pearsonova korelačního koeficientu přibližně 0,52. Dále je vidět, že model magnetopauzy systematicky předpovídá o něco větší radiální vzdálenosti hranice než odpovídající pozorovaná přesečení.

5.3.2 Model založený na identifikovaných přesečeních hranic

Druhý přístup se více podobá tradičním modelům hranic, jelikož výstupem modelu je přímo radiální vzdálenost dané hranice při daných řídicích parametrech. V tomto případě se jako trénovací dataset používají jednotlivá přesečení hranic (5005 přesečení rázové vlny a 3035 přesečení magnetopauzy). Stejně jako v předchozím přístupu jsou opět vytvořeny dva různé modely, jeden pro rázovou vlnu a

jeden pro magnetopauzu. Oba modely jsou založeny na vícevrstvých neuronových sítích a mají následující strukturu: pět vstupních neuronů (pro pět vstupních parametrů: θ , P_{SW} , F , B_{surf} a M_A pro rázovou vlnu a θ , P_{SW} , F , B_{surf} a B_{SW} pro magnetopauzu), dvě skryté vrstvy s osmi neurony v každé z nich a jeden výstupní neuron (přímo odpovídající předpovídané radiální vzdálenosti hranice). Ve všech vrstvách je jako aktivační funkce použit hyperbolický tangens.

Předpovězené radiální vzdálenosti rázové vlny a magnetopauzy jsou na obrázku 5.10a,b porovnány s pozorovanými přesečenými příslušných hranic. Celkově je nalezena dobrá shoda mezi pozorovanými a předpovězenými polohami hranic, jak v případě rázové vlny tak v případě magnetopauzy. Příslušné Pearsonovy korelační koeficienty jsou 0,86 pro rázovou vlnu a 0,76 pro magnetopauzu. Je třeba však poznamenat, že pozorovaná přesečení jsou v tomto případě použita jako trénovací data, ale i jako přesečení pro výsledné porovnání. Neuronová síť tedy při porovnávání nedostává nový typ dat, jako je tomu v předchozím případě. Systematicky lepší výsledky neuronové sítě jsou tedy do jisté míry očekávatelné. I přesto je však pozorován určitý systematický posun předpovídaných poloh hranic pro přesečení na větších radiálních vzdálenostech, kde jsou předpovídané radiální vzdálenosti hranic menší než pozorované.



Obrázek 5.11: Histogramy rozdílů mezi předpovídanou a pozorovanou radiální vzdáleností rázové vlny (a, b) a magnetopauzy (c, d). Modré histogramy (a, c) jsou získány pomocí prezentovaného modelu založeného na klasifikaci oblastí. Červené histogramy (b, d) jsou získány pomocí prezentovaného modelu založeného na jednotlivých přesečeních hranic. Zelené histogramy jsou získány pomocí empirického modelu (Němec a kol. (2020)). Směrodatné odchylky jednotlivých modelů (σ_{NN} a σ_{EM}) jsou uvedeny v barevném kódování v příslušných grafech.

5.3.3 Porovnání představených modelů

Nakonec jsou všechny představené modely porovnány s empirickým modelem (Němec a kol. (2020)). Modely jsou porovnány pomocí histogramů rozdílů mezi předvídanými a pozorovanými radiálními vzdálenostmi hranic. Histogramy jsou uvedeny na obrázku 5.11. Histogramy v prvním sloupci jsou získány pomocí neuronových sítí založených na klasifikaci oblastí a histogramy v druhém sloupci jsou získány pomocí neuronových sítí založených na jednotlivých přesečeních dané hranice. Obrázky 5.11a,b odpovídají rázové vlně a obrázky 5.11c,d odpovídají magnetopauze. Směrodatné odchylky daných rozdělání jsou uvedeny v příslušných obrázcích barvou odpovídající barvě daného histogramu. Podle směrodatné odchylky σ jsou prezentované modely mírně přesnější než porovnávaný empirický model. Jedinou výjimkou je model magnetopauzy založený na klasifikaci jednotlivých oblastí (obrázek 5.11c). Tento model systematicky předvídá větší radiální vzdálenost magnetopauzy než odpovídá pozorovaným přesečením, a navíc je příslušná směrodatná odchylka o trochu větší než v případě empirického modelu. U všech ostatních prezentovaných modelů je směrodatná odchylka nižší než směrodatná odchylka porovnávaného empirického modelu.

6. Diskuze

Prezentovaná metoda založená na automatické klasifikaci měřených dat a následném využití neuronových sítí pro formulaci modelů hranic s sebou — v porovnání s tradičními empirickými modely založenými na fitování manuálně identifikovaných přesečení předdefinovanou funkční závislostí — přináší řadu výhod.

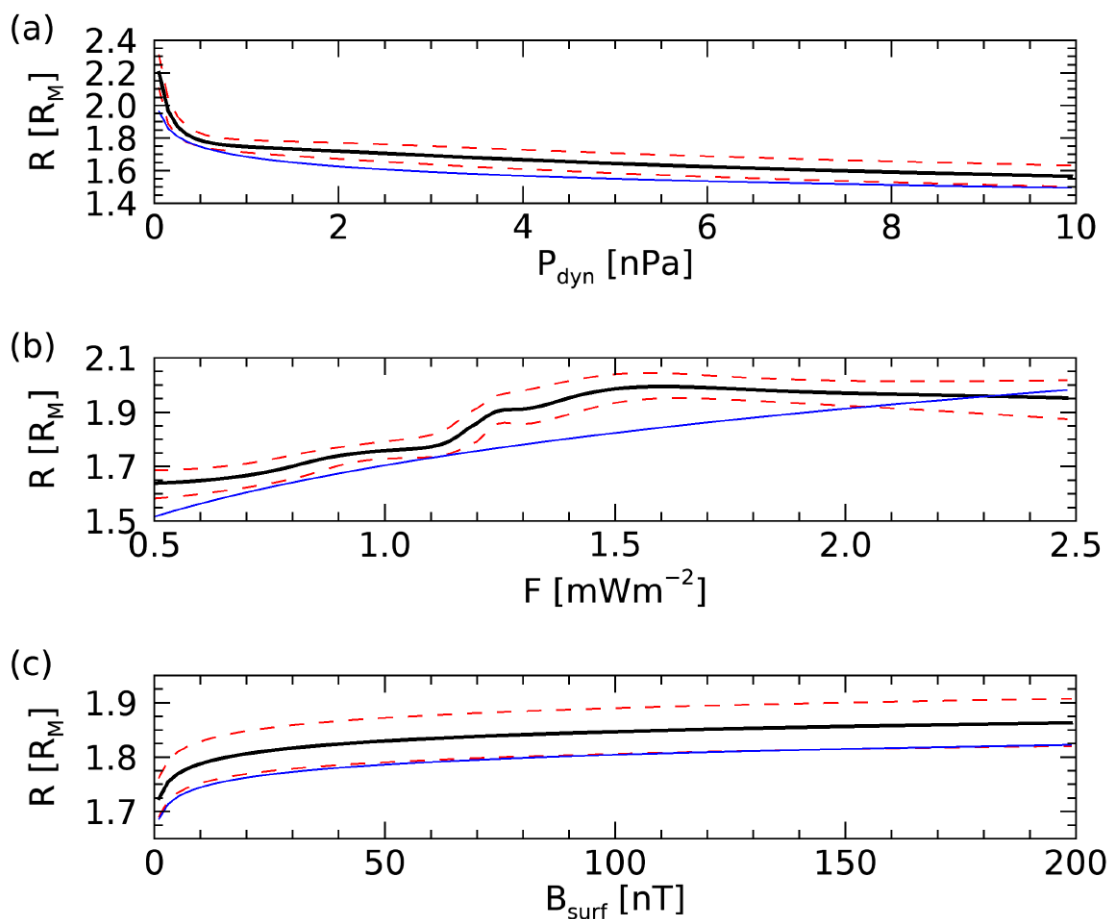
Tradičně užívaná manuální identifikace jednotlivých přesečení hranic (ať už plně manuální či ulehčená nějakou verzí semi-automatického algoritmu hledajícího výrazné skoky v měřených veličinách) je časově značně náročná a vyžaduje velké množství lidské práce. Navíc je, s ohledem na obtížnou rozlišitelnost některých přesečení, poměrně náchylná k možným chybám. Oproti tomu námi užitá metoda založená na klasifikaci jednotlivých oblastí nejprve s využitím prahových hodnot měřených veličin a následně s využitím metody SVM je snadno automatizovaná a dobře fungující i bez vnějšího zásahu lidského experta. Při klasifikaci měřených dat touto metodou sice také může dojít k chybné klasifikaci, nicméně vzhledem k obrovskému počtu dílčích měření (v porovnání s počtem přesečení hranic) není eventuální chybná klasifikace natolik zásadní.

Další podstatnou výhodou metody identifikace oblastí je, že implicitně řeší problémy s vícenásobným přesečením hranic a nerovnoměrným pokrytím prostoru družicovými daty. Družice pohybující se po výrazně excentrické dráze totiž (díky druhému Keplerovu zákonu) tráví většinu doby v blízkosti apoapsidy, zatímco doba strávená v blízkosti periapsidy je výrazně kratší. To nutně vede k vyšší pravděpodobnosti identifikace přesečení na větších radiálních vzdálenostech. Oproti tomu identifikace přesečení na radiálních vzdálenostech větších než je radiální vzdálenost apoapsidy, resp. menších než je radiální vzdálenost periapsidy, je vyloučena. To může vést, v závislosti na přesné oběžné dráze družice, k výraznému výběrovému zkreslení výsledného souboru přesečení, které je velmi obtížné až nemožné adekvátně korigovat. Námi užitá metoda identifikace oblastí je tímto výběrovým zkreslením prakticky nezatížena a navíc poskytuje možnost pro tvorbu modelu využít veškerá dostupná data/informace, nikoli pouze dílčí polohy jednotlivých přesečení.

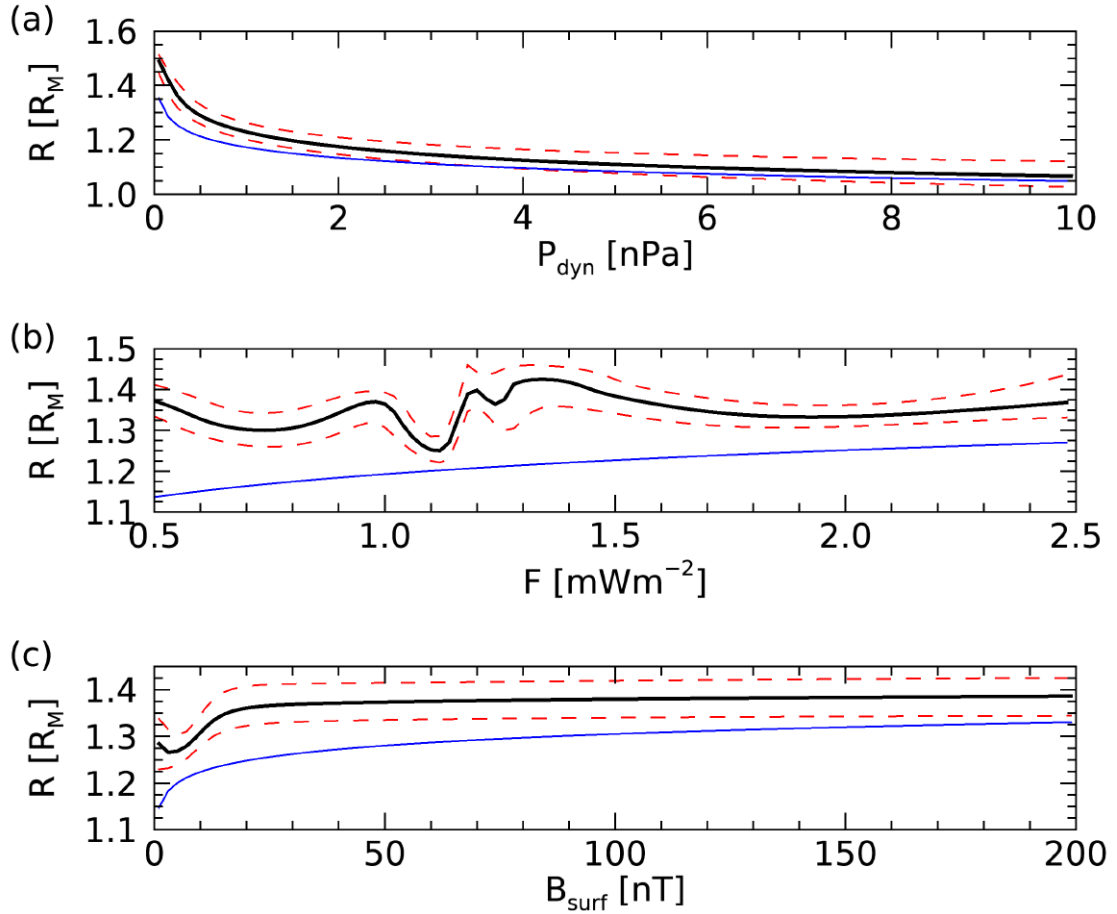
Využití neuronových sítí pro vlastní formulaci modelu s sebou rovněž přináší značná pozitiva. Velkou výhodou (a zároveň i nevýhodou) je především volnost takto formulovaných modelů. Ve standardních přístupech — kde se používá matematická formule s volnými parametry, které se optimalizují — je výsledný model řízen právě touto formulí, jejíž volba, ačkoli naprosto klíčová, je typicky dána „shora“, na základě volby výzkumníka tvořícího model. Postrádá tak přímou vazbu na měřená data a reálnou situaci a nemusí jí nutně ani dostatečně dobře odpovídat. U Marsu byla například v některých studiích uvažována parabolická aproximace, která je v případě magnetopauzy poměrně nepřesná (Vignes a kol. (2000)). Oproti tomu model formulovaný na základě neuronových sítí není vázán žádnou předdefinovanou formulí, ale je vytvořen přímo tak, aby co nejlépe odpovídal dostupným experimentálními datům. Výsledný tvar hranic je tak velmi obecný (jak moc obecný je dáno přesnou konfigurací neuronové sítě) a není omezen žádnými požadavky/předpoklady.

Výše zmíněným problémem, způsobeným právě přílišnou volností vytvářených modelů, je nepředvídatelnost výstupu. Celkem jednoduše se může například stát,

že pro určité vstupní hodnoty je model naprosto nepoužitelný, protože výstupní hodnoty modelu jsou zjevně chybné, přičemž nelze předem říci, v jaké situaci toto nastane. Tento jev je typicky způsoben nehomogenním trénovacím souborem dat, tj. situací, kdy některé hodnoty parametrů nejsou adekvátně zastoupeny. Při tvorbě modelů na základě klasifikace měřených dat s využitím neuronových sítí se skutečně ukázalo, že právě homogenita měřených dat v prostoru i v rámci intervalu uvažovaných parametrů je pro správné fungování modelu naprosto kritická a musí být provedena homogenizace, aby došlo alespoň k částečnému zmírnění tohoto problému. V souboru dat, který máme k dispozici, se eventuálně problematická nehomogenita vyskytuje hned v několika případech. V oblasti subsolárního bodu je oblast s nižším počtem naměřených dat, což může způsobovat nepřírozené chování predikované polohy rázové vlny na obrázku 5.8a. V měřených parametrech slunečního větru jsou dále intervaly hodnot, které jsou mnohem méně zastoupeny než ostatní hodnoty. Tento problém může způsobovat nepřírozené chování hranic pro určité hodnoty parametrů. Tuto nehomogenitu je bohužel komplikované potlačit a v této práci odstraněna nebyla. Přímé srovnání přesnosti vytvořených



Obrázek 6.1: Předvídané závislosti radiálních vzdáleností rázové vlny při úhlu $\theta = 45^\circ$ v závislosti na (a) dynamickém tlaku slunečního větru, (b) ionizačním toku slunečního záření a (c) velikosti povrchových magnetických polí. Modrá křivka je získána empirickým modelem (viz 1.3.2), černá křivka je získána modelem založeným na klasifikaci oblastí představeným v této práci a červené přerušované čáry označují hranici jistoty neuronové sítě 0,3.



Obrázek 6.2: Předvídané závislosti radiálních vzdáleností magnetopauzy při úhlu $\theta = 45^\circ$ v závislosti na uvažovaných parametrech. Formát je stejný jako u obrázku 6.1.

modelů založených na neuronových sítích s přesností empirického modelu založeného na předdefinované formuli (Němec a kol. (2020)) nicméně ukazuje sílu tohoto obecného přístupu, která dále poroste s rostoucím množstvím dostupných dat.

Dále v případě neuronových sítí nelze jednoduše odhadnout vývoj polohy a tvaru hranice v závislosti na určitém parametru. V případě empirického modelu, který je dán přesnou matematickou formulí, je vývoj hranice z této formule okamžitě zřejmý. Z modelu založeného na neuronových sítích je získání obdobné informace poněkud složitější. Typicky je potřeba systematicky zkoumat výstup modelu při změně zvoleného parametru a zachování zbylých parametrů konstantních, jak je provedeno na obrázcích 6.1 a 6.2 pro model založený na klasifikaci oblastí.

Na obrázku 6.1 jsou vyobrazeny předpovídané radiální vzdálenosti rázové vlny při úhlu $\theta = 45^\circ$ v závislosti na uvažovaných parametrech: (a) dynamický tlak slunečního větru, (b) ionizační tok slunečního záření a (c) velikost povrchových magnetických polí. Modrá křivka je získána pomocí předchozího empirického modelu (viz kapitola 1.3.2), černá křivka je získána za pomoci modelu představeného v této práci a červené přerušované čáry označují hranici jistoty této neuronové sítě 0,3.

Závislosti radiální vzdálenosti rázové vlny na dynamickém tlaku slunečního

větru a velikosti povrchových magnetických polí (obrázky 6.1a,c), které jsou předpovídány pomocí neuronové sítě založené na klasifikaci oblastí, mají celkový trend stejný jako empirický model a v rámci hranice jistoty neuronové sítě 0,3 empirickému modelu dobře odpovídají. U ionizujícího tlaku slunečního záření je předvídaná závislost složitější. Vzhledem k tomu, že měřených dat s hodnotami F mezi 1,0 a 2,0 mW m⁻² je velmi málo, je funkčnost modelu v této oblasti velmi omezená a téměř jistě nepřesná. Celkově si nicméně model rázové vlny založený na klasifikaci oblastí a empirický model rázové vlny velmi dobře odpovídají.

Pro případ magnetopauzy si však model založený na klasifikaci oblastí a empirický model už tolik neodpovídají, jak je vidět i z obrázku 5.11c. Obecné trendy závislostí radiálních vzdáleností magnetopauzy na uvažovaných parametrech jsou sice stejné, ale předkládaný model systematicky předvídá větší radiální vzdálenosti než porovnávaný empirický model. Tento systematický posun je pozorovatelný i na obrázku 5.11c.

Konečně je nutné připomenout, že v okolí Marsu doposud chybí družice, která by kontinuálně měřila parametry slunečního větru. Předchozí studie (Marquette a kol. (2018)) ukázaly, že v rámci jedné orbity družice MAVEN ($\sim 4,5$ hodiny) se parametry slunečního větru typicky výrazně nemění. To nám umožňuje za parametry slunečního větru na každé půl-orbitě uvažovat mediány parametrů měřených v časech, kdy se na dané půl-orbitě družice ve slunečním větru nacházela. Ačkoli je tento přístup z globálního pohledu korektní a umožňuje formulaci adekvátních modelů obou hranic, je zřejmé, že v případě výrazných krátkodobých událostí ve slunečním větru přestává fungovat a uvažované parametry slunečního větru v době jednotlivých měření mohou být výrazně odlišné od skutečných.

Závěr

V předkládané práci jsou vytvořeny modely rázové vlny a magnetopauzy u Marsu na základě dat měřených družicí MAVEN. Pro tento účel jsou využity metody strojového učení — metoda podpůrných vektorů a vícevrstvé neuronové sítě. Družicová data jsou klasifikovaná pomocí modifikované metody použité u Země (Jelínek a kol. (2012)), která na základě poměrů měřených dat vůči příslušným parametrům slunečního větru určí, zda se družice v daný čas měření nachází ve slunečním větru, magnetosheathu nebo magnetosféře. Touto cestou však nelze klasifikovat všechna měřená data, ale přibližně jen 75% z nich. Zbýlých přibližně 25% měřených dat je následně klasifikováno pomocí metody podpůrných vektorů. Tato metoda je použita zvláště na každé půl-orbitě, kde jsou již klasifikovaná data použita jako trénovací soubor pro metodu podpůrných vektorů, která je následně využita ke klasifikaci zbývajících dat. Na každé půl-orbitě jsou dále identifikována jednotlivá přesečení hranic jako místa, kde dochází ke změně klasifikovaných regionů — rázová vlna se nachází v místě, kde se mění sluneční vítr na magnetosheath a magnetopauza se nachází v místě, kde se mění magnetosheath na magnetosféru.

Celkově jsou vytvořeny čtyři modely hranic (dva pro rázovou vlnu a dva pro magnetopauzu) s využitím dvou odlišných přístupů. První přístup je založen čistě na klasifikaci dat do jednotlivých regionů. Výstupem modelu je v tomto případě předpověď, zda se bod definovaný polohou družice a relevantními parametry (dynamický tlak slunečního větru P_{SW} , tok ionizujícího slunečního záření F a velikost povrchového magnetického pole B_{surf}) nachází „před“ nebo „za“ uvažovanou hranicí. Druhý přístup je založen na přesečeních dané hranice identifikovaných na jednotlivých půl-orbitách. Výstupem modelu je pak přímo radiální vzdálenost uvažované hranice v závislosti na relevantních parametrech. Vytvořili jsme vlastní proceduru pro stanovení relevantních parametrů, které jsou: P_{SW} , F , B_{surf} a Alfvénovo-Machovo číslo M_A pro rázovou vlnu a P_{SW} , F , B_{surf} a velikost magnetického pole ve slunečním větru B_{SW} pro magnetopauzu. V obou přístupech jsou struktury neuronových sítí použitých pro tvorbu příslušných modelů obou hranic stejné. Získané modely jsou nakonec ověřeny pomocí jednotlivých přesečení hranic a porovnány s empirickým modelem (Němec a kol. (2020)). Předkládané modely, s výjimkou modelu magnetopauzy založeného na klasifikaci regionů, popisují polohu hranic o trochu lépe než porovnávaný empirický model. Vytvořené modely lze spustit online na adrese http://aurora.troja.mff.cuni.cz/~linzmayer/bs_mpb_models/.

V další práci by bylo vhodné se zaměřit na model magnetopauzy založený na klasifikaci regionů, který vykazuje horší vlastnosti než ostatní modely. Dále by bylo možné rozšířit modely založené na klasifikaci regionů o další parametry, případně se pokusit o lepší homogenizaci užitého vstupního souboru dat. Konečně je zde možnost rozšíření souboru měřených dat/přesečení o data získaná pomocí jiných družic (především Mars Express).

Seznam použité literatury

- ACUÑA, M., CONNERNEY, J., WASILEWSKI, P. a KOL. (1998). Magnetic Field and Plasma Observations at Mars: Initial Results of the Mars Global Surveyor Mission. *Science*, **279**, 1676–1680. doi: 10.1126/science.279.5357.1676.
- ACUÑA, M., CONNERNEY, J., NESS, N. a KOL. (1999). Global Distribution of Crustal Magnetization Discovered by the Mars Global Surveyor MAG/ER Experiment. *Science*, **284**, 790–793. doi: 10.1126/science.284.5415.790.
- BAME, S. J., HUNDHAUSEN, A. J., ASBRIDGE, J. R. a STRONG, I. B. (1968). Solar wind ion composition. *Phys. Rev. Lett.*, **20**, 393–395. doi: 10.1103/PhysRevLett.20.393.
- BIERMANN, L. (1951). Kometenschweife und solare korpuskularstrahlung. *Zeitschrift fur Astrophysik*, **29**, 274–286.
- BIRKELAND, K. (1916). Are the solar corpuscular rays that penetrate the earth's atmosphere negative or positive rays. *Videnskapsselskapets skrifter. I. Mat-Naturv Klasse*, **1**(1), 1–27.
- CAIN, J. C., FERGUSON, B. B. a MOZZONI, D. (2003). An n=90 internal potential function of the Martian crustal magnetic field. *Journal of Geophysical Research*, **108**(E2). doi: 10.1029/2000JE001487.
- CHAMBERLIN, P., WOODS, T. a EPARVIER, F. (2006). Flare irradiance spectral model (fism) use for space weather applications. *Space Weather: The International Journal of Research and Applications*, pages 19–24.
- CHAPMAN, S. a ZIRIN, H. (1957). Notes on the solar corona and the terrestrial ionosphere. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*.
- CONNERNEY, J., ACUÑA, M., WASILEWSKI, P. a KOL. (2001). The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution. *Geophysical Research Letters*, **28**, 4015–4018. doi: 10.1029/2001GL013619.
- CONNERNEY, J., ESPLEY, J., LAWTON, P. a KOL. (2015). The MAVEN Magnetic Field Investigation. *Space Science Reviews*, **195**, 257–291. doi: 10.1007/s11214-015-0169-4.
- CORTES, C. a VAPNIK, V. (1995). Support-vector networks. *Mach Learn*, **20**, 273–297. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00994018>.
- DUBEY, S. R., SINGH, S. K. a CHAUDHURI, B. B. (2022). Activation functions in deep learning: A comprehensive survey and benchmark. *Neurocomputing*, **503**, 92–108. ISSN 0925-2312. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.06.111>.
- EDBERG, N. J. T., LESTER, M., COWLEY, S. W. H. a KOL. (2008). Statistical analysis of the location of the martian magnetic pileup boundary and bow shock and the influence of crustal magnetic fields. *Journal of*

- Geophysical Research: Space Physics*, **113**(A8). doi:
<https://doi.org/10.1029/2008JA013096>.
- EDBERG, N. J. T., LESTER, M., COWLEY, S. W. H. a KOL. (2010).
Magnetosonic mach number effect of the position of the bow shock at mars in
comparison to venus. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **115**
(A7). doi: <https://doi.org/10.1029/2009JA014998>.
- EPARVIER, F., CHAMBERLIN, P., WOODS, T. a KOL. (2015). The Solar
Extreme Ultraviolet Monitor for MAVEN. *Space Science Reviews*, **195**,
293–301. doi: [10.1007/s11214-015-0195-2](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0195-2).
- HALEKAS, J., TAYLOR, E., DALTON, G. a KOL. (2015). The Solar Wind Ion
Analyzer for MAVEN. *Space Science Reviews*, **195**, 125–151. doi:
[10.1007/s11214-013-0029-z](https://doi.org/10.1007/s11214-013-0029-z).
- HALL, B. E. S., LESTER, M., SÁNCHEZ-CANO, B. a KOL. (2016). Annual
variations in the martian bow shock location as observed by the mars express
mission. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **121**(11),
11,474–11,494. doi: <https://doi.org/10.1002/2016JA023316>.
- HALL, B., SÁNCHEZ-CANO, B., WILD, J. a KOL. (2019). The Martian Bow
Shock Over Solar Cycle 23–24 as Observed by the Mars Express Mission.
Journal of Geophysical Research: Space Physics, **124**, 4761–4772. doi:
[10.1029/2018JA026404](https://doi.org/10.1029/2018JA026404).
- HULSE, J. V., KHOSHGOFTAAR, T. M. a NAPOLITANO, A. (2007).
Experimental perspectives on learning from imbalanced data. *ACM
International Conference Proceeding Series*, pages 935–942. doi:
[10.1145/1273496.1273614](https://doi.org/10.1145/1273496.1273614).
- JELÍNEK, K., NĚMEČEK, Z. a ŠAFRÁNKOVÁ, J. (2012). A new approach to
magnetopause and bow shock modeling based on automated region
identification. *Journal of Geophysical Research*, **117**. doi:
[10.1029/2011JA017252](https://doi.org/10.1029/2011JA017252).
- KIVELSON, M. a RUSSELL, C. (1995). *Introduction to Space Physics*.
Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 9781139878296. doi:
[10.1017/9781139878296](https://doi.org/10.1017/9781139878296).
- LINDEMANN, F. (1919). Lxx. note on the theory of magnetic storms. *The
London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of
Science*, **38**(228), 669–684. doi: [10.1080/14786441208636000](https://doi.org/10.1080/14786441208636000).
- MARQUETTE, M. L., LILLIS, R. L., HALEKAS, J. S. a KOL. (2018).
Autocorrelation Study of Solar Wind Plasma and IMF Properties as
Measured by the MAVEN Spacecraft. *Journal of Geophysical Research*, **123**,
2493–2512. doi: [10.1002/2018JA025209](https://doi.org/10.1002/2018JA025209).
- MENDILLO, M., NARVAEZ, C., VOGT, M. a KOL. (2017). Sources of
Ionospheric Variability at Mars. *Journal of Geophysical Research*, **122**,
9670–9684. doi: [10.1002/2017JA024366](https://doi.org/10.1002/2017JA024366).

- NAGY, A., WINTERHALTER, D., SAUER, K. a KOL. (2004). The Plasma Environment of Mars. *Space Science Reviews*, **111**, 33–114. doi: 10.1023/B:SPAC.0000032718.47512.92.
- NĚMEC, F., MORGAN, D., KOPF, A. a KOL. (2019). Characterizing Average Electron Densities in the Martian Dayside Upper Ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, **124**, 76–93. doi: 10.1029/2018JE005849.
- NĚMEC, F., LINZMAYER, V., NĚMEČEK, Z. a ŠAFRÁNKOVÁ, J. (2020). Martian Bow Shock and Magnetic Pileup Boundary Models Based on an Automated Region Identification. *Journal of Geophysical Research*, **125**. doi: 10.1029/2020JA028509.
- PARKER, E. (1958). Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. *Astrophysical Journal*, **128**, 664–676. doi: 10.1086/146579.
- RAMSTAD, R., BARABASH, S., FUTAANA, Y. a HOLMSTRÖM, M. (2017). Solar wind- and euV-dependent models for the shapes of the martian plasma boundaries based on mars express measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **122**(7), 7279–7290. doi: <https://doi.org/10.1002/2017JA024098>.
- ROSENBLATT, F. (1957). The perceptron - a perceiving and recognizing automaton. Technical Report 85-460-1, Cornell Aeronautical Laboratory, Ithaca, New York.
- RUMELHART, D., HINTON, G. a WILLIAMS, R. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, **323**, 533–536. doi: <https://doi.org/10.1038/323533a0>.
- SIDDIQI, A. A. (2018). *Beyond Earth : a chronicle of deep space exploration, 1958-2016*. National Aeronautics and Space Administration, Office of Communications, NASA History Division, Washington, DC. ISBN 9781626830424.
- SLAVIN, J. a HOLZER, R. (1981a). The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution. *Journal of Geophysical Research*, **86**, 11,401–11,418. doi: 10.1029/JA086iA13p11401.
- SLAVIN, J. A. a HOLZER, R. E. (1981b). Solar wind flow about the terrestrial planets 1. modeling bow shock position and shape. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **86**(A13), 11401–11418. doi: <https://doi.org/10.1029/JA086iA13p11401>.
- THIEMANN, E., CHAMBERLIN, P., EPARVIER, F. a KOL. (2017). The MAVEN EUVM model of solar spectral irradiance variability at Mars: Algorithms and results. *Journal of Geophysical Research*, **122**, 2748–2767. doi: 10.1002/2016JA023512.
- TROTIGNON, J. G., DUBININ, E., GRARD, R., BARABASH, S. a LUNDIN, R. (1996). Martian planetopause as seen by the plasma wave system onboard phobos 2. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **101**(A11), 24965–24977. doi: <https://doi.org/10.1029/96JA01898>.

- TROTIGNON, J., GRARD, R. a SKALSKY, A. (1993). Position and shape of the martian bow shock: the phobos 2 plasma wave system observations. *Planetary and Space Science*, **41**(3), 189–198. doi: [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(93\)90058-A](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90058-A).
- TROTIGNON, J., MAZELLE, C., BERTUCCI, C. a KOL. (2006). Martian shock and magnetic pile-up boundary positions and shapes determined from the Phobos 2 and Mars Global Surveyor data sets. *Planetary and Space Science*, **54**, 357–369. doi: 10.1016/j.pss.2006.01.003.
- VIGNES, D., MAZELLE, C., RME, H. a KOL. (2000). The Solar Wind interaction with Mars: locations and shapes of the Bow Shock and the Magnetic Pile-up Boundary from the observations of the MAG/ER experiment onboard Mars Global Surveyor. *Geophysical Research Letters*, **27**, 49–52. doi: 10.1029/1999GL010703.
- XU, S., LIEMOHN, M. W., DONG, C., MITCHELL, D. L., BOUGHER, S. W. a MA, Y. (2016). Pressure and ion composition boundaries at mars. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **121**(7), 6417–6429. doi: <https://doi.org/10.1002/2016JA022644>.