



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Marie Turčičová

**Změny parametrů slunečního větru
v průběhu slunečního cyklu**

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2018

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

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

V dne

Podpis autora

Děkuji srdečně prof. RNDr. Janě Šafránkové, DrSc. za vedení práce a přínosné konzultace. Dále děkuji prof. RNDr. Zdeňku Němečkovi, DrSc. za mnoho cenných rad a komentářů. Poděkování patří též rodině a přátelům za podporu během studia.

Název práce: Změny parametrů slunečního větru v průběhu slunečního cyklu

Autor: Marie Turčičová

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc., Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Abstrakt: K objasnění složitých dějů v okolí Slunce může částečně přispět analýza dat z družic, které se v jeho okolí dlouhodobě pohybují. Předložená práce je věnována statistické studii vybraných parametrů slunečního větru z dlouhodobého hlediska. Byla použita data z družice Wind, a to zejména její měření rychlosti, koncentrace a teploty protonů a α -částic. Pomocí standardních statistických metod bylo vyšetřováno jejich chování a průběh během 23. a 24. slunečního cyklu, a to včetně srovnání těchto dvou cyklů. Zjištěné výsledky jsou v souladu se známými studiemi.

Klíčová slova: sluneční vítr, ICME, družice Wind

Title: Variations of solar wind parameters through solar cycle

Author: Marie Turčičová

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc., Department of Surface and Plasma Science

Abstract: Statistical analysis of data from satellites that operate in the vicinity of the Sun can partly contribute to the elucidation of complex processes around the Sun. This thesis is devoted to a long-term statistical study of particular parameters of the solar wind. We have used data from the Wind satellite, especially its measurements of the velocity, density and temperature of protons and α -particles. By using standard statistical tools, we explored their behaviour during the 23th and 24th solar cycles, including a comparison of both cycles. Our results are in accordance with other known studies.

Keywords: solar wind, ICME, Wind

Obsah

Úvod	2
1 Sluneční vítr, jeho vznik a vlastnosti	3
1.1 Cíle práce	5
2 Popis a příprava dat	6
2.1 Popis dat	6
2.2 Příprava dat	6
3 Meziplanetární výrony koronální hmoty (ICME)	9
3.1 Rozdíl mezi slunečními cykly	12
4 Statistické vlastnosti slunečního větru během 23. a 24. cyklu	15
4.1 Popisná statistika	15
4.2 Rozdíly mezi 23. a 24. cyklem	23
5 Vzájemné korelace jednotlivých parametrů	27
Závěr	32
Seznam použité literatury	34

Úvod

Sluneční vítr je proud plazmatu a částic vyvrhovaných z nejvyšší vrstvy sluneční atmosféry, nazývané koróna. Nejvíce jsou ve slunečním větru zastoupeny protony (94 %), dále pak jádra helia (4 %) a v nepatrném množství též jádra těžkých prvků a elektrony. Převládá názor, že existují dva základní typy slunečního větru (Zurbuchen, 2007): pomalý vítr (s rychlostmi kolem 400 km/s) vznikající pravděpodobně v rovníkových oblastech Slunce a rychlý vítr (s rychlostmi většími než 500 km/s), který má svůj původ nejčastěji v polárních oblastech nebo nad koronárními dírami. Čas od času bývá ze Slunce uvolněn velký oblak slunečního plazmatu, který projde korónou a šíří se dále meziplanetárním prostorem. Tento jev se označuje anglickou zkratkou ICME (Interplanetary coronal mass ejection, meziplanetární výron koronální hmoty) a jedná se o přechodné struktury, které však během svého šíření od Slunce porušují sluneční vítr.

Sluneční vítr je odrazem sluneční aktivity, která se mění během tzv. slunečních cyklů s periodou kolem 11 let. Od roku 2008 se nacházíme ve 24. slunečním cyklu, jehož konec je předpokládám kolem roku 2019. Mezi nejznámější projevy sluneční aktivity patří sluneční skvrny, což jsou viditelná tmavá místa na Slunci, kde v důsledku magnetického pole došlo k poklesu proudění, čímž se vytvořily oblasti s menší povrchovou teplotou než má okolí. Sluneční aktivitu lze poměřovat nejrůznějšími indexy a počet slunečních skvrn je beze sporu jedním z nich.

První poznatky o slunečním větru pocházejí již z 50. let minulého století, kdy se o něm uvažovalo jako o možném vysvětlení odchylek magnetického pole Země. Tato domněnka se potvrdila v 60. letech na základě dat z prvních družic. Měření slunečních parametrů se věnovaly postupně družice Helios, ISEE-3, Ulysses, Wind, SOHO, ACE, Genesis a STEREO. Tato práce se týká dat z družice Wind, která poskytuje dlouhodobě stabilní měření.

Družice Wind byla vypuštěna do vesmíru 1. listopadu 1994 agenturou NASA, a to za účelem dlouhodobého výzkumu vlivu slunečního větru na magnetosféru Země. Byla navedena do libračního bodu L1, kde se (s malými přestávkami) vyskytuje dodnes. Tato družice je vybavena osmi přístroji, které slouží k měření parametrů slunečního větru a dalších veličin s ním spojených. Data používaná v této práci pocházejí z přístroje SWE (Solar Wind Experiment), který obsahuje dva Faradayovy válce umožňující měřit distribuci iontů, jejich hmotnosti, rychlosti a směr. Jeho časové rozlišení je 92 s. Kompletní popis dat je možno nalézt v Ogilvie a kol. (1995), údajům o magnetickém poli se věnuje článek Lepping a kol. (1995).

Popis proudění slunečního větru z teoretického hlediska je velmi složitý a patří k ne plně vyřešeným problémům. K objasnění však mohou částečně přispět analýzy experimentálních dat z družic. Předložená práce představuje statistickou studii vybraných parametrů slunečního větru z družice Wind z přístroje SWE, a to konkrétně unášivé rychlosti iontů, koncentrace a termální rychlosti.

1. Sluneční vítr, jeho vznik a vlastnosti

Termojaderné reakce v nitru Slunce představují gigantický zdroj energie, která je transportována k jeho povrchu zářením a posléze vzestupnými proudy, kde se přenášená hmota ochlazuje a padá zpět. Ustavičný pohyb generuje zvukové vlny, jejichž energie disipuje ve sluneční atmosféře. Tento dodatečný ohřev vede ke zdánlivě paradoxní situaci - teplota na povrchu Slunce je cca 6000 K a měla by s výškou klesat podle barometrické rovnice. Ve skutečnosti ale stoupá a ve vzdálenosti asi čtyř slunečních poloměrů dosahuje maxima - asi 1.5×10^6 K. Vysoká teplota ve značné vzdálenosti od Slunce způsobuje, že sluneční atmosféra není gravitačně vázána a expanduje do prostoru ve formě tak zvaného slunečního větru.

Základní hydrodynamická teorie slunečního větru, která byla navržena v Parker (1958), je v dobré shodě s pozorováním a pozdější práce, které zahrnují i vliv magnetického pole, přinášejí jen drobné úpravy. Podle této teorie je rychlost expanze slunečního větru prakticky nezávislá na vzdálenosti od Slunce a činí v průměru cca 400 km/s, jeho teplota je řádu 10^5 K a zhruba konstantní a hustota klesá s druhou mocninou vzdálenosti od Slunce. Družicová měření poskytují následující údaje: koncentrace se obvykle nachází v rozsahu $2 - 20 \text{ cm}^{-3}$, rychlost 300 – 700 km/s. V důsledku erupce na Slunci mohou tyto hodnoty krátkodobě vzrůst až na $100 - 150 \text{ cm}^{-3}$ a 1000 km/s (Šafránková a kol., 1998).

Sluneční vítr je plně ionizované kvazineutrální plazma s vysokým stupněm ionizace odpovídající maximu teploty ve sluneční koruně. Vzhledem k nízké koncentraci je toto plazma bezesrážkové (Sagdeev, 2002). V důsledku vysoké vodivosti je sluneční magnetické pole zamrzlé v plazmatu slunečního větru a je jím unášeno do meziplanetárního prostoru. Odtud pochází i jeho název - meziplanetární magnetické pole (IMF). Nicméně magnetické pole Slunce, velmi proměnlivé jak prostorově, tak i časově, se induktivně vytváří ve vnější konvektivní zóně Slunce v oblasti 0.8 – 1 slunečního poloměru a je tvořeno dvěma základními složkami. První složka magnetického pole je více otevřená do prostoru, druhou pak tvoří uzavřené siločivky v blízkosti slunečního povrchu. Přepojováním magnetických siločar obou složek vznikají výsledné siločáry, avšak body, ze kterých tyto siločáry vycházejí, se díky přepojování náhodně pohybují po povrchu Slunce.

S intenzivním rozvojem numerických simulací je v posledních letech velká pozornost věnována procesům na Slunci, a to hlavně v souvislosti s různými formami slunečního větru. Dvě hlavní formy, rychlý a pomalý vítr se liší nejen svými parametry, ale hlavně místem vzniku na Slunci. Rychlý sluneční vítr (o rychlostech větších než 500 km/s), charakterizovaný vysokou teplotou a nízkou koncentrací částic, je většinou detekován v polárních oblastech Slunce nad koronálními děrami, což jsou struktury s nižší hustotou a teplotou než okolí, jejichž siločáry jsou více otevřené do meziplanetárního prostoru (Marsch a Tu, 1994). Pomalý sluneční vítr je naopak chladnější s vyšší koncentrací iontů a je spojován s aktivními koronálními oblastmi v ekvatoriální rovině Slunce, kde i siločáry jsou více uzavřené (Schwenn, 1983). Mezi oběma typy slunečního větru jsou i další rozdíly, např. v iontovém složení, vyšším obsahu α -částic v rychlém slunečním větru

(Kasper a kol., 2007), v podmínkách pro vznik a šíření Alfvénových vln, v teplotní anizotropii, a dalších (Schwenn a kol. (1981), Wang a Sheeley (1990)).

V blízkosti Země (1 AU), kde se pohybovalo či v současné době stále pohybuje několik monitorů slunečního větru, jsou detekovány nepravidelné fluktuace jak v koncentraci, tak i v rychlostech a teplotách slunečního větru, obvykle doprovázené i výraznými změnami v orientaci nebo hodnotě interplanetárního magnetického pole. Mezi rozměrem a změnami parametrů největší nestability patří magnetická oblaka (Burlaga a kol., 1981) nebo obecněji tzv. výrony sluneční hmoty (CMEs) vzniklé při sluneční erupci, trvající často mnoho hodin a šířící se meziplanetárním prostorem jako ICME. Prostorové rozměry těchto nestabilit se pohybují v oblasti stovek a tisíců R_E (poloměrů Země).

Jak již bylo řečeno, sluneční vítr představuje nepřetržitý proud ionizovaného slunečního plazmatu se zamrzlým magnetickým polem, který se šíří přibližně radiálně od Slunce meziplanetárním prostorem. Jeho vlastnosti jsou však značně ovlivňovány sluneční aktivitou a neustále se mění, proto je považován za důležitou komponentu kosmického počasí. Jak jsme již předeslali, tvoří jej především ionizovaný vodík (tedy protony a elektrony v přibližně stejném zastoupení), malé množství ionizovaného helia (tzv. α -částice) a zanedbatelné množství iontů těžších prvků (kyslík, železo a další). Relativní koncentrace α -částic vzhledem ke koncentraci protonů ve vzdálenosti 1 AU (1 astronomická jednotka = cca 150 milionů km) je asi 4 % (Kivelson a Russell, 1995). Mezi základní parametry slunečního větru tak patří velikost a směr magnetického pole a unášivé rychlosti, hustota protonů, elektronů a α -částic a jejich teploty. Ve vzdálenosti 1 AU se sluneční vítr šíří průměrnou rychlostí okolo 450 km/s a protože rychlost zvuku v tomto prostředí je mnohem menší (přibližně 60 km/s), je proudění slunečního větru výrazně nadzvukové.

Variace slunečního větru během jednotlivých slunečních cyklů byly zkoumány z různých hledisek mnoha autory (např. Richardson a kol. (1996); Richardson a Wang (1999); Richardson a kol. (2000); Kasper a kol. (2007); Richardson a Kasper (2008)). Například Richardson a kol. (1996) diskutovali změny tlaku (který zahrnuje hustotu a rychlost) slunečního větru v minimech a maximech slunečních cyklů v průběhu let 1975 až 1995 a jejich variace se vzdáleností od Slunce. Většina autorů své statistické studie směřovala k určení zdrojových oblastí různých typů slunečního větru. Protože obsah α -částic je jedním z důležitých faktorů pro toto určení, velká pozornost byla věnována vlastnostem této komponenty slunečního větru (Schwenn a kol. (1981), Aellig a kol. (2001), Kasper a kol. (2007), Kasper a kol. (2012), Borovsky (2008), Xu a Borovsky (2015)). Pro příklad, Kasper a kol. (2007) se zaměřili na chování α -částic v závislosti na rychlosti slunečního větru a heliosférické latitudě a našli podstatné rozdíly v obsahu α -částic v době slunečního maxima a minima. Tyto rozdíly přisuzují různým místům vzniku slunečního větru na povrchu Slunce. Rozsáhlá studie Zerbo a Richardson (2015) pak zkoumá změny parametrů slunečního větru v rozsahu 5 cyklů – od 20. do 24., tedy za více než 30 let, a hledá rozdíly mezi slunečními cykly.

1.1 Cíle práce

Cílem naší práce bylo použití statistických metod pro charakterizaci posledních dvou sluneční cyklů a konfrontace získaných výsledků se současným poznáním. Byla provedena základní statistická analýza, zejména výpočet popisných statistik a vykreslení histogramů jednotlivých veličin, které slouží k odhadu jejich rozdělení. Okrajově se také zabýváme porovnáním posledních dvou cyklů, mezi nimiž se objevují velké rozdíly ve sluneční aktivitě i v chování slunečního větru, což naznačují studie McComas a kol. (2008) a Zerbo a Richardson (2015). Jako míru fází slunečního cyklu používáme počet slunečních skvrn.

Struktura práce je následující. V kapitole 2 je uveden popis použitých dat a potřebné přípravné kroky před analýzou. V kapitole 3 je pak provedena analýza parametrů slunečního větru během tzv. meziplanetárních výronů koronální hmoty (ICME). V následující kapitole 4 se již zabýváme slunečním větrem bez ICME událostí a porovnáním vlastností plazmatu ve dvou posledních slunečních cyklech (23. a 24.). Poslední kapitola je věnována korelační analýze vybraných parametrů v různých obdobích sluneční aktivity.

Veškeré analýzy byly provedeny ve statistickém softwaru R (R Core Team, 2017).

2. Popis a příprava dat

2.1 Popis dat

Data z družice Wind jsou volně dostupná v internetovém archivu NASA (NASA, 2018) a pokrývají období od 1.1.1995 do současné doby. Naše analýza však končí 31.12.2016. V práci jsme se zaměřili na údaje z přístroje SWE, který představuje detektor slunečního větru a měří řadu jeho parametrů. Jeho časové rozlišení je 92 s a v každém časovém okamžiku jsou zaznamenány hodnoty řady parametrů. Podrobná analýza všech těchto parametrů by přesahovala rozsah bakalářské práce, proto jsme se zaměřili pouze na následující veličiny:

	veličina	jednotka
čas	rok měsíc den hodina minuta sekunda milisekunda	
protony	koncentrace 3 složky vektoru unášivé rychlosti velikost unášivé rychlosti tepelná rychlost tepelná rychlost kolmá na IMF tepelná rychlost paralelní s IMF	[cm ⁻³] [km/s] [km/s] [km/s] [km/s] [km/s]
α -částice	koncentrace 3 složky vektoru unášivé rychlosti velikost unášivé rychlosti tepelná rychlost tepelná rychlost kolmá na IMF tepelná rychlost paralelní s IMF	[cm ⁻³] [km/s] [km/s] [km/s] [km/s] [km/s]
magnetické pole	3 složky vektoru IMF	[nT]

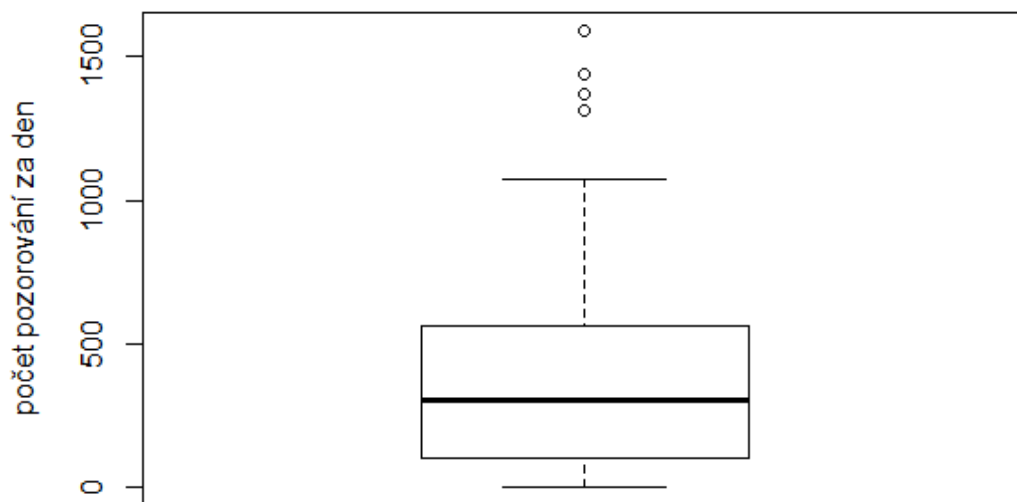
Všechny vektory jsou uváděny v souřadné soustavě GSE (Geocentric Solar Ecliptic). Zkratka IMF značí meziplanetární magnetické pole avšak touto veličinou se budeme zabývat pouze okrajově v kapitole o korelaci.

2.2 Příprava dat

Z dat byly vybrány pouze hodnoty, kdy se družice nacházela v libračním bodě L1 ve slunečním větru, čímž vznikly v datech krátké výpadky o délkách 1 až 138 dní. Dále byla data rozdělena podle druhu slunečního větru na dvě oddělené množiny. První obsahovala pouze hodnoty odpovídající ICME, jehož začátek a konec jsme získali z družicových pozorování (Richardson a Cane, 2017). Druhý soubor

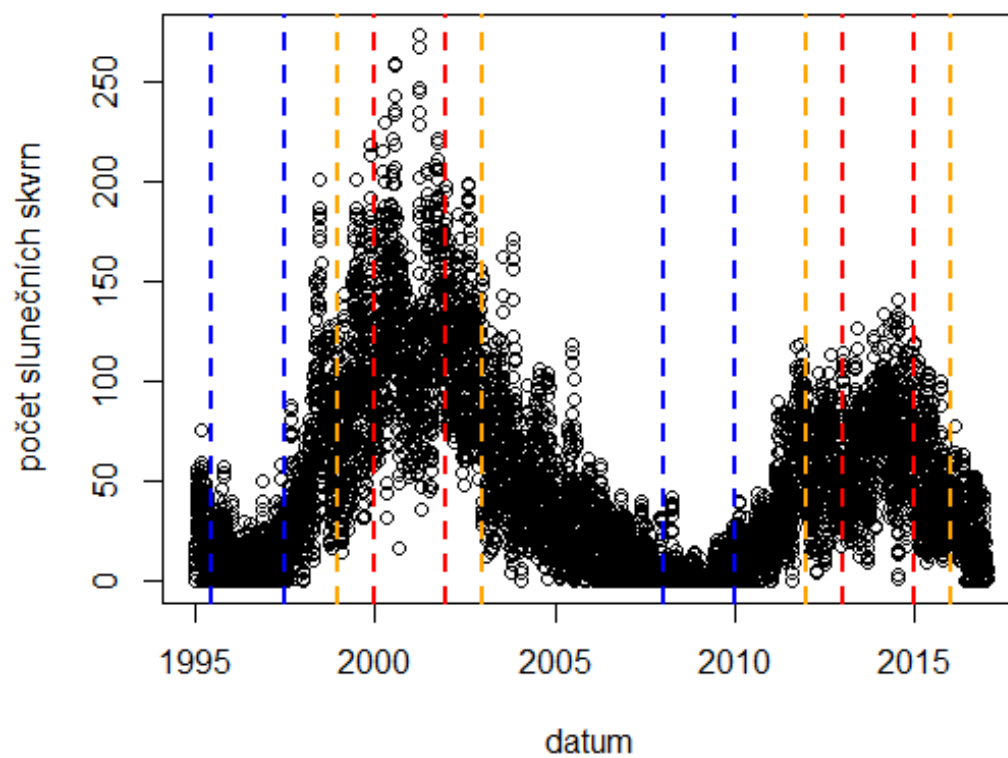
dat obsahoval již „čistý“ sluneční vítr. Kvůli vynechání některých údajů z původních dat se staly naměřené hodnoty silně neekvidistantní. Krabicový graf pro počet pozorování v jednom dni je uveden na obrázku 2.1 a je z něho patrné velké rozpětí počtu měření v jednom dni. Maximální dosažený počet měření za den byl 1591, minimální samozřejmě 0. Aby se časová řada stala ekvidistantní, rozhodli jsme se pracovat nadále s denními průměry. Vzhledem k účelu naší analýzy tímto nedochází k velké ztrátě informace, neboť v této práci se zaměřujeme na dlouhodobou změnu parametrů v řádu let, nikoli na krátkodobé změny v řádu hodin či minut.

Vzhledem k řídkému výskytu ICME byly pro analýzu parametrů během těchto událostí použity původní (tedy nezprůměrované) hodnoty.



Obrázek 2.1: Krabicový graf pro počet pozorování v jednom dni. Silná čára uprostřed krabice značí výběrový medián, dolní a horní okraje krabice reprezentují dolní a horní kvartil hodnot (tedy 25% a 75% kvantil), hranice „fousů“ ukazují minimální a maximální hodnotu a kolečka značí odlehlá pozorování.

K určení slunečního cyklu jsme použili index počtu slunečních skvrn (angl. Sun Spot Number, SSN). Denní hodnoty SSN jsme získali z internetového archivu agentury NOAA (NOAA, 2018). Jejich časový průběh v námi zkoumaném období si lze prohlédnout na obrázku 2.2. Délku cyklu udává časová odlehlost dvou minim, charakterizovaných téměř nulovým počtem slunečních skvrn. V uvažovaném období tedy pozorujeme pouze dva sluneční cykly, které se všeobecně označují jako 23. cyklus (srpen 1996 – prosinec 2008) a 24. cyklus (začátek v lednu 2009). Rozdíl mezi oběma cykly je patrný na první pohled, počet slunečních skvrn v maximu 23. cyklu (2000 – 2002) je mnohem vyšší než u druhého analyzovaného cyklu (2013 – 2015).



Obrázek 2.2: Časový průběh počtu slunečních skvrn (SSN) s vyznačením slunečních minim (modrá barva), maxim (červená barva) a rozšířených maxim (oranžová barva).

3. Meziplanetární výrony koronální hmoty (ICME)

Jak již bylo zmíněno v úvodu, meziplanetární výrony koronální hmoty jsou přechodné struktury, které během svého šíření od Slunce porušují sluneční vítr. Průměrná délka této události v našich datech byla 27 hodin a směrodatná odchylka 15 hodin. Minimální délka byla 3 hodiny, maximální 90 hodin, tj. necelé čtyři dny. V datech bylo zaznamenáno celkem 490 těchto událostí.

Rychlost částic během těchto událostí se pohybuje v širokém intervalu od desítek km/s po přibližně 1000 km/s. Rychlost protonů i α -částic má přitom velmi podobné rozdělení. Jeho odhad pomocí histogramu si lze prohlédnout na obrázku 3.1. Do obrázku je též pro srovnání přidána hustota gamma rozdělení. Toto rozdělení má velice variabilní tvar hustoty, který se pro tato data zdál vhodný. Jeho hustota má tvar

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(k)\theta^k} x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}, \quad (3.1)$$

kde k a θ jsou kladné parametry. Máme-li k dispozici nezávislá měření x_1, \dots, x_N , lze tyto parametry odhadnout metodou maximální věrohodnosti:

$$\hat{\theta} = \frac{\bar{x}}{k}$$
$$\hat{k} \approx \frac{3 - s + \sqrt{(s - 3)^2 + 24s}}{12s}, \quad \text{kde } s = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(x_i),$$

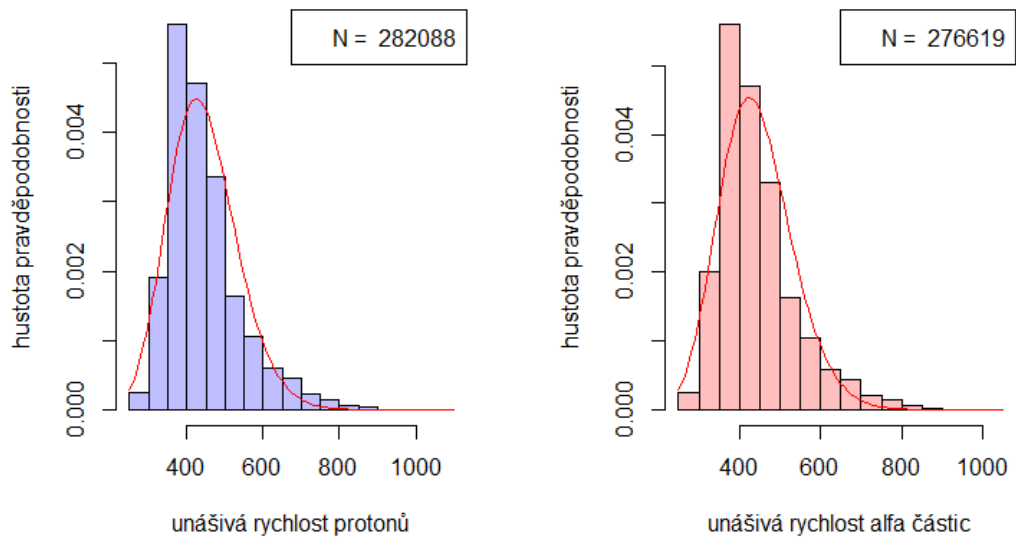
přičemž $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$. Drobným nedostatkem použití této metody je předpoklad nezávislosti měření. To pro naše data bohužel neplatí, neboť tvoří časovou řadu. Porovnání histogramu s odhadnutou hustotou gamma rozdělení zde má tedy pouze ilustrativní charakter a nebudeme na jeho základě činit žádné závěry.

Základní popisné statistiky zkoumaných veličin jsou k dispozici v tabulkách 3.1 a 3.2. Zkratka „sd“ značí směrodatnou odchylku, „počet NA“ udává počet chybějících hodnot a „počet měření“ udává skutečný počet měření (bez NA).

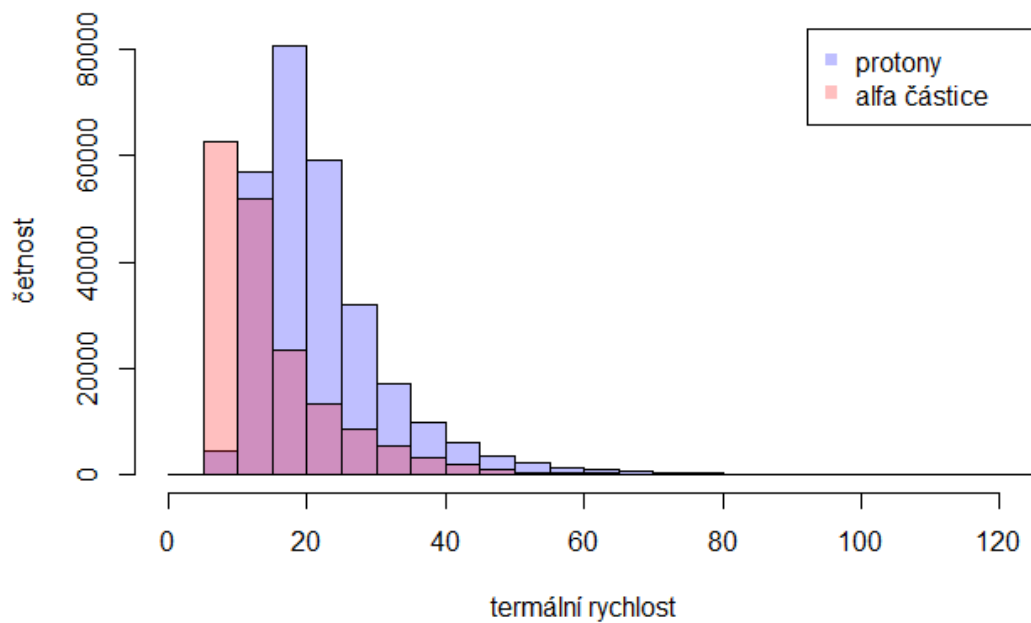
Co se týká unášivé rychlosti protonů (histogram 3.1 a tabulka 3.1), její průměrná hodnota v ICME dobře odpovídá publikovaným výsledkům (Ebert a kol., 2009).

Teplota protonů a α -částic je v ICME zhruba vyrovnaná (Ďurovcová a kol., 2017), to znamená, že termální rychlosti jsou přibližně v poměru 1:2, což dokládají i histogramy na obrázku 3.2.

Histogramy koncentrace obou druhů částic jsou vykresleny na obrázku 3.3 a z jejich porovnání vyplývá, že obsah α -částic v ICME může přesáhnout 10 %.



Obrázek 3.1: Unášivá rychlost částic během ICME s odhadem hustoty gamma rozdělení.



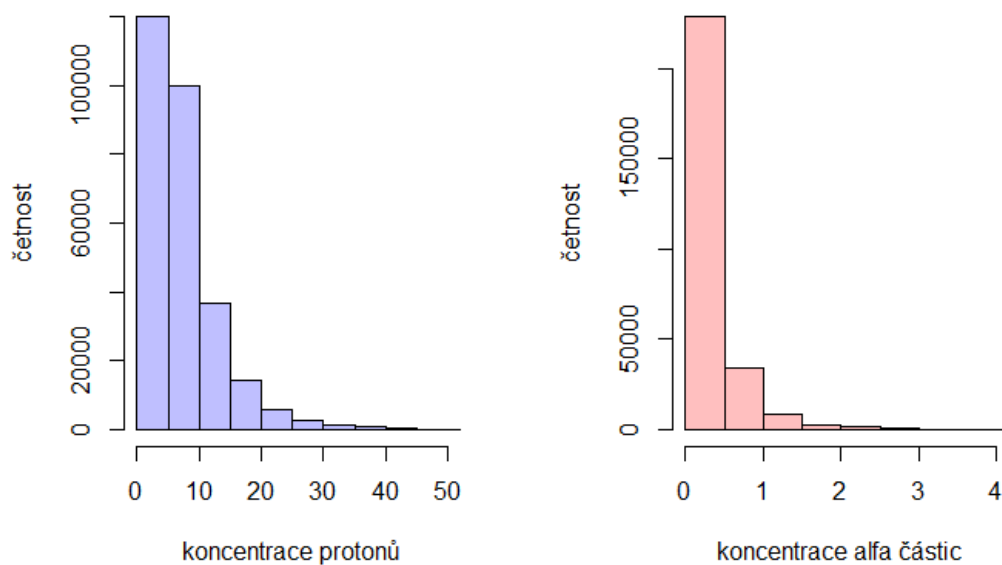
Obrázek 3.2: Termální rychlost částic během ICME.

veličina	min	25% kvantil	průměr	75% kvantil	max	sd	počet měření	počet <i>NA</i>
unášivá rychlost [km/s]	253.46	378.08	443.73	484.43	1053.89	96	282088	184
koncentrace [cm ⁻³]	0.12	3.44	7.35	9.38	108.81	6.11	282272	0
termální rychlost [km/s]	5.17	15.47	22.41	25.80	475.68	11.42	277524	4748

Tabulka 3.1: Popisné statistiky protonů během ICME.

veličina	min	25% kvantil	průměr	75% kvantil	max	sd	počet měření	počet <i>NA</i>
unášivá rychlost [km/s]	253.64	376.96	442.04	483.21	1020.30	94.82	276619	5653
koncentrace [cm ⁻³]	0.00	0.11	0.32	0.39	8.33	0.39	276642	5630
termální rychlost [km/s]	3.48	8.75	15.07	17.99	279.31	9.60	173711	108561

Tabulka 3.2: Popisné statistiky α -částic během ICME.



Obrázek 3.3: Koncentrace částic během ICME.

3.1 Rozdíl mezi slunečními cykly

Jedním z cílů této práce je i porovnání obou slunečních cyklů, které data pokrývají. Za tímto účelem jsme si údaje o ICME rozdělili do dvou skupin podle slunečního cyklu. Pro každý parametr jsme pak pomocí Kolmogorovova-Smirnovova testu testovali nulovou hypotézu $H_0 : F_{23} = F_{24}$ proti alternativě $H_1 : F_{23} \neq F_{24}$, kde F_i značí distribuční funkci daného parametru v cyklu i a rovnost platí bodově. Jedná se o pořadový test, jehož jediným předpokladem na rozdělení je spojitost obou distribučních funkcí. Testová statistika tohoto testu má tvar

$$D_{m,n} = \sup_x |\hat{F}_m(x) - \hat{G}_n(x)|,$$

kde \hat{F}_m je empirická distribuční funkce prvního výběru (s rozsahem m) a \hat{G}_n druhého výběru (s rozsahem n). Pro $m, n \rightarrow \infty$ je $D_{m,n} \rightarrow 0$. Přesný výsledek, na němž lze založit test je popsán v knize Anděl (2007), str. 241.

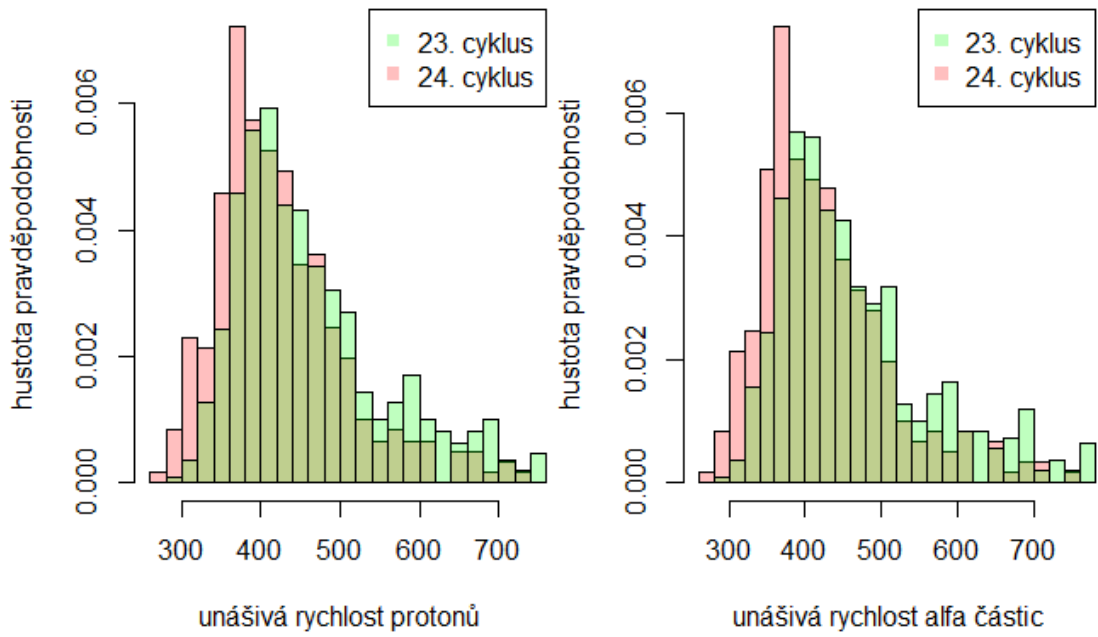
Abychom naplnili předpoklad o nezávislosti pozorování, spočítali jsme pro každou událost ICME průměrnou hodnotu parametru a test jsme prováděli pouze na těchto průměrech. Události ICME mají mezi sebou z pravidla dlouhou časovou prodlevu, a lze je tedy považovat za nezávislé. Pro 23. cyklus takto dostáváme $m = 557$ pozorování, pro 24. cyklus $n = 305$ pozorování.

P-hodnoty tohoto testu (tj. nejmenší hladiny významnosti, na nichž bychom H_0 zamítli) vyšly pro jednotlivé veličiny následovně:

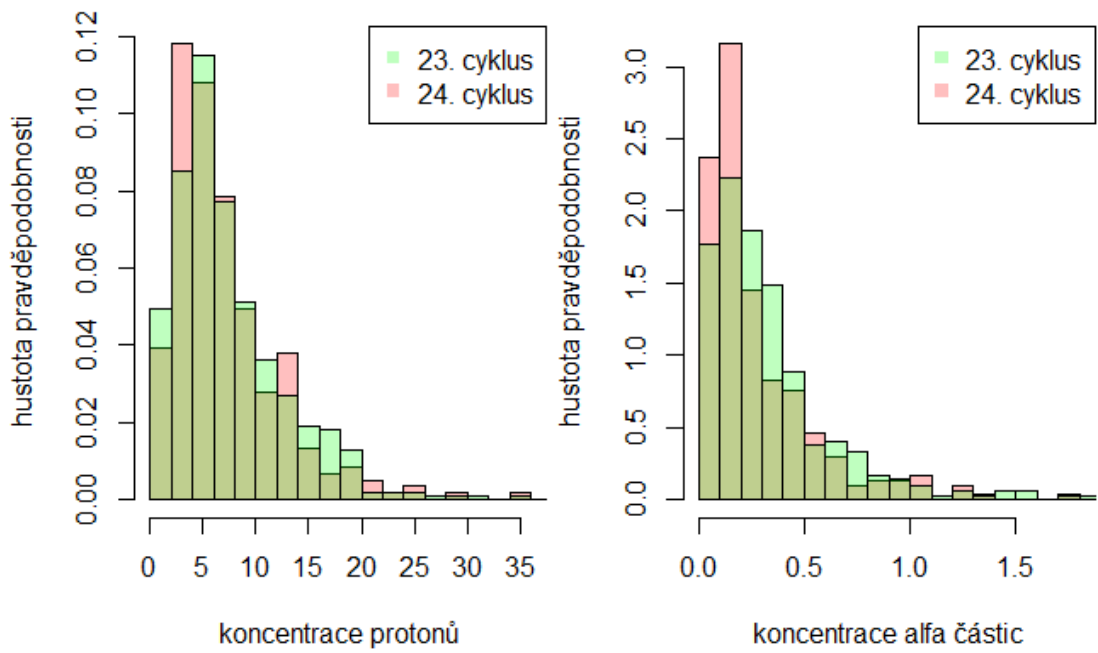
<i>veličina</i>	<i>p-hodnota</i>
unášivá rychlost protonů	$2.569 \cdot 10^{-7}$
unášivá rychlost α -částic	$2.576 \cdot 10^{-7}$
koncentrace protonů	0.428
koncentrace α -částic	$1.983 \cdot 10^{-5}$
termální rychlost protonů	0.0001039
termální rychlost α -částic	$5.455 \cdot 10^{-5}$

Výsledky Kolmogorovova-Smirnovova testu je však potřeba brát s rezervou. Není totiž důvod předpokládat, že by průměrné hodnoty parametrů ICME (v průběhu každého cyklu) měly pocházet vždy ze stejného rozdělení (F_{23} nebo F_{24}), jak tento test předpokládá. Kdyby ale byl proces ICME tímto způsobem stacionární, náš závěr by byl následující. Shodu distribučních funkcí v obou cyklech bychom zamítli ve všech případech kromě koncentrace protonů, pro něž je p-hodnota větší než zvolená hladina 5 %. Pro ostatní parametry bychom tedy na hladině 5 % prokázali odlišnost rozdělení ve 23. a 24. cyklu. Je však potřeba dodat, že při velkých počtech pozorování se i malé rozdíly stávají významnými.

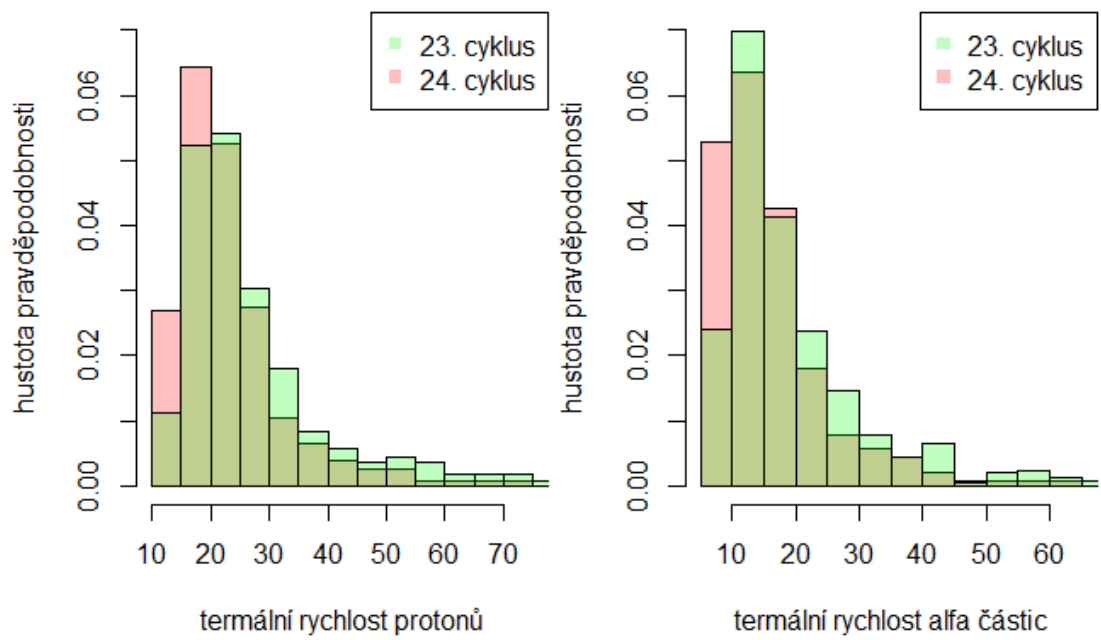
Odhlédneme-li od všech problémů spojených se statistickým zpracováním tohoto druhu dat, zdálo by se, že oba cykly jsou odlišné. Protože derivací spojitě distribuční funkce je hustota daného rozdělení, jejímž odhadem je histogram, uvádíme pro ilustraci na obrázcích 3.4 – 3.6 porovnání histogramů z obou slunečních cyklů pro všechny studované parametry. Hledáme, ve kterém parametru slunečního větru se odlišnost nejvíce projevuje. Porovnáme-li histogramy parametrů za oba cykly, lze říci, že rychlost protonů i α -částic je nižší ve 24. cyklu (s odpovídající vyšší koncentrací protonů). Také termální rychlost obou druhů částic je nižší, což koresponduje s výsledky jiných autorů, např. Zerbo a Richardson (2015).



Obrázek 3.4: Porovnání histogramů pro unášivou rychlost částic během ICME.



Obrázek 3.5: Porovnání histogramů pro koncentraci částic během ICME.



Obrázek 3.6: Porovnání histogramů pro termální rychlost částic během ICME.

4. Statistické vlastnosti slunečního větru během 23. a 24. cyklu

V této části budeme pracovat pouze s údaji pro „čistý“ sluneční vítr, tedy po vyřazení ICME. Připomeňme, že jsme se rozhodli pracovat s denními průměry jednotlivých veličin.

4.1 Popisná statistika

V souladu s převládajícím názorem, že sluneční vítr se podle místa vzniku dělí na pomalý a rychlý, jsme si data rozdělili na hodnoty odpovídající těmto dvěma typům větru. Za pomalý vítr jsme přitom uvažovali ten s unášivou rychlostí protonů nižší než 400 km/s a za rychlý vítr jsme označili ten, kdy byla unášivá rychlost protonů vyšší než 500 km/s. Abychom mohli porovnat změnu jednotlivých parametrů v průběhu slunečního cyklu, zkoumali jsme oba tyto datové soubory v období slunečního maxima a slunečního minima. Maximum sluneční aktivity je charakterizováno vysokým počtem slunečních skvrn, sluneční minimum naopak počtem skvrn blízkým nule. Zvolená období maxima a minima jsou vyznačena na obrázku 2.2. Délka každého analyzovaného dílčího úseku je 2 roky. V těchto obdobích jsme zkoumali rozdělení jednotlivých parametrů obou typů větru. Pracovali jsme přitom s následujícími počty měření:

	sluneční maximum	sluneční minimum
pomalý vítr	847	819
rychlý vítr	418	305
vynecháno	630	409

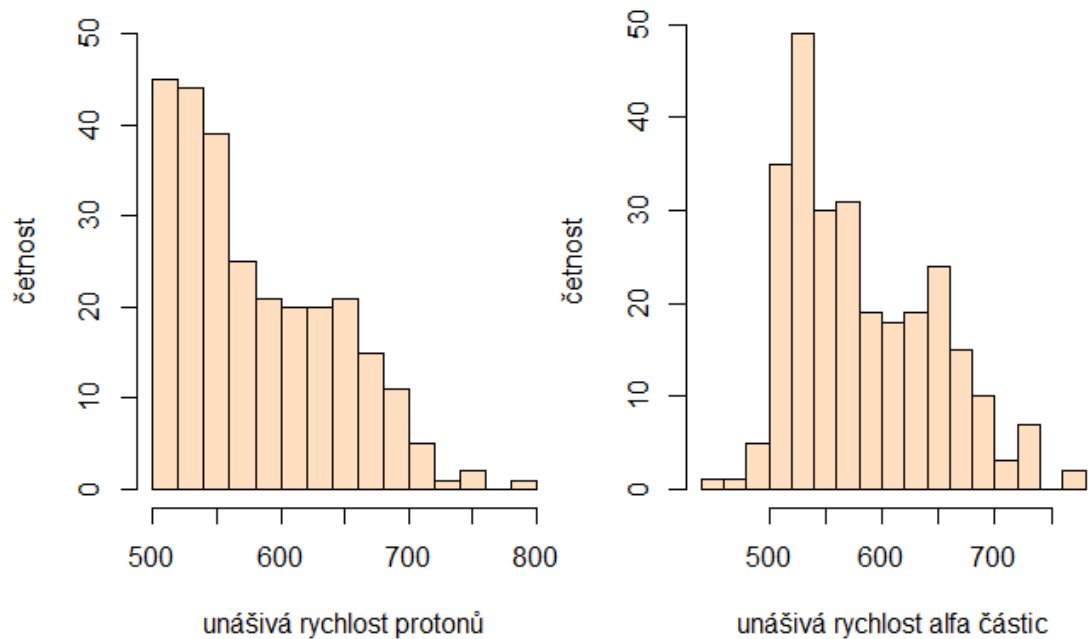
Průměry a směrodatné odchylky jsou k dispozici v tabulce 4.1. Z tabulky je patrné, že unášivá rychlost α -částic je velmi podobná unášivé rychlosti protonů, a to jak ve slunečním minimu, tak v maximu a bez ohledu na typ slunečního větru. Koncentrace protonů odpovídá předpokladu, že pro pomalý sluneční vítr je větší a pro rychlý menší. Rozdíly mezi minimem a maximem jsou malé, nicméně je třeba připomenout, že pro pomalý sluneční vítr máme v obou obdobích výrazně více pozorování. Koncentrace α -částic se pro pomalý a rychlý vítr příliš neliší, a to v minimu ani v maximu, což je v rozporu se studií Kasper a kol. (2012), která se ale zabývala pouze 23. cyklem. Výraznější rozdíly jsou pro termální rychlosti. Rychlý sluneční vítr má přibližně dvojnásobnou termální rychlost obou druhů částic než pomalý sluneční vítr. Rozdíly mezi minimem a maximum jsou přitom malé.

Histogramy jednotlivých parametrů slunečního větru si lze prohlédnout na obrázcích 4.1 až 4.6. Poznamenejme, že u některých grafů se nachází několik málo ojedinělých pozorování za horní hranicí rozsahu osy x, avšak na tvar histogramu nemají tyto odlehlé hodnoty žádný vliv. Soubor histogramů odráží výsledky představené přehledně v tabulce 4.1. Nicméně další zajímavé poznatky

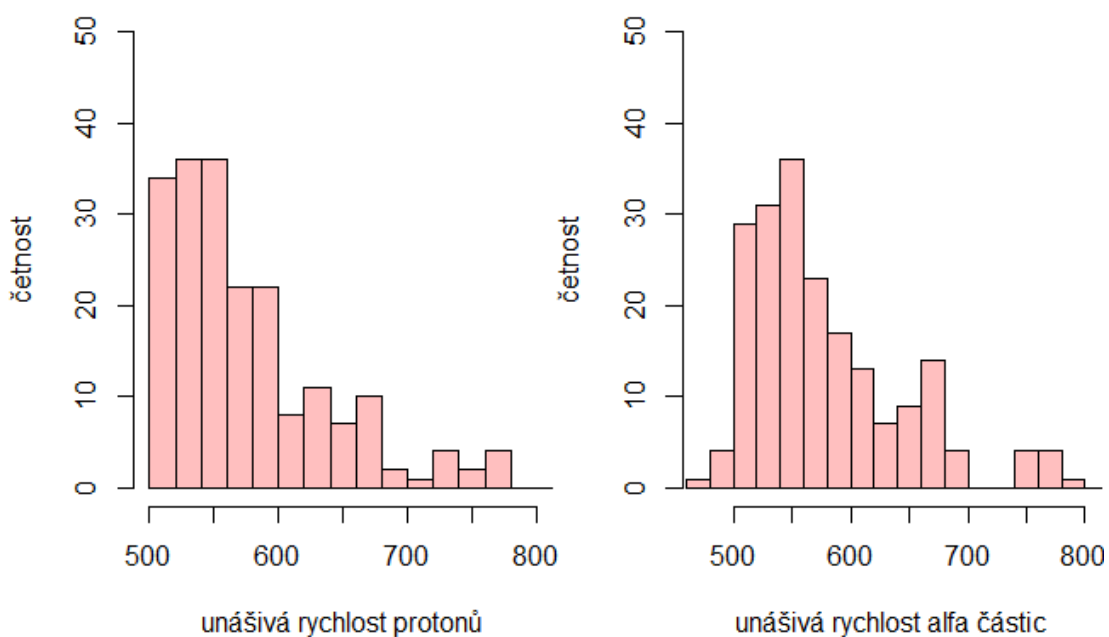
je možné vypořádat. Přestože pro rozlišení typu slunečního větru byla použita hodnota unášivé rychlosti protonů (< 400 km/s a > 500 km/s, obrázky 4.1 a 4.2), objevují se v histogramech unášivé rychlosti α -částic hodnoty > 400 km/s pro pomalý a hodnoty < 500 km/s a větší než 800 km/s pro rychlý sluneční vítr. První z těchto dvou pozorování souvisí s tím, že střední hodnoty rychlosti α -částic jsou ve zdrojové oblasti vyšší než rychlosti protonů, ale na dráze k Zemi dochází k jejich vyrovnání. Nicméně v jednotlivých případech může rychlost α -částic v pomalém slunečním větru zůstat vyšší než rychlost protonů. V rychlém slunečním větru zůstávají α -částice rychlejší než protony, což je ve zdánlivém rozporu s pozorováním jejich menších rychlostí (obr. 4.1). Ze základních magnetohydrodynamických rovnic vyplývá, že vzájemná rychlost protonů a α -částic je orientována podél magnetického pole a intervaly, kdy jsou α -částice pomalejší než protony odpovídají změnám směru magnetického pole způsobeným turbulencí.

veličina	vítr	protony		α -částice	
		sluneční		sluneční	
		maximum	minimum	maximum	minimum
unášivá rychlost [km/s]	pomalý	350 ± 32	344 ± 32	348 ± 32	342 ± 32
	rychlý	577 ± 68	582 ± 61	580 ± 70	583 ± 64
koncentrace [cm ⁻³]	pomalý	8.16 ± 4.54	9.48 ± 4.82	0.28 ± 0.19	0.14 ± 0.12
	rychlý	4.60 ± 4.32	3.76 ± 2.14	0.23 ± 0.32	0.14 ± 0.09
termální rychlost [km/s]	pomalý	27 ± 7	24 ± 6	21 ± 10	18 ± 8
	rychlý	57 ± 18	53 ± 10	55 ± 20	55 ± 14

Tabulka 4.1: Průměry a směrodatné odchylky parametrů slunečního větru v jednotlivých obdobích.

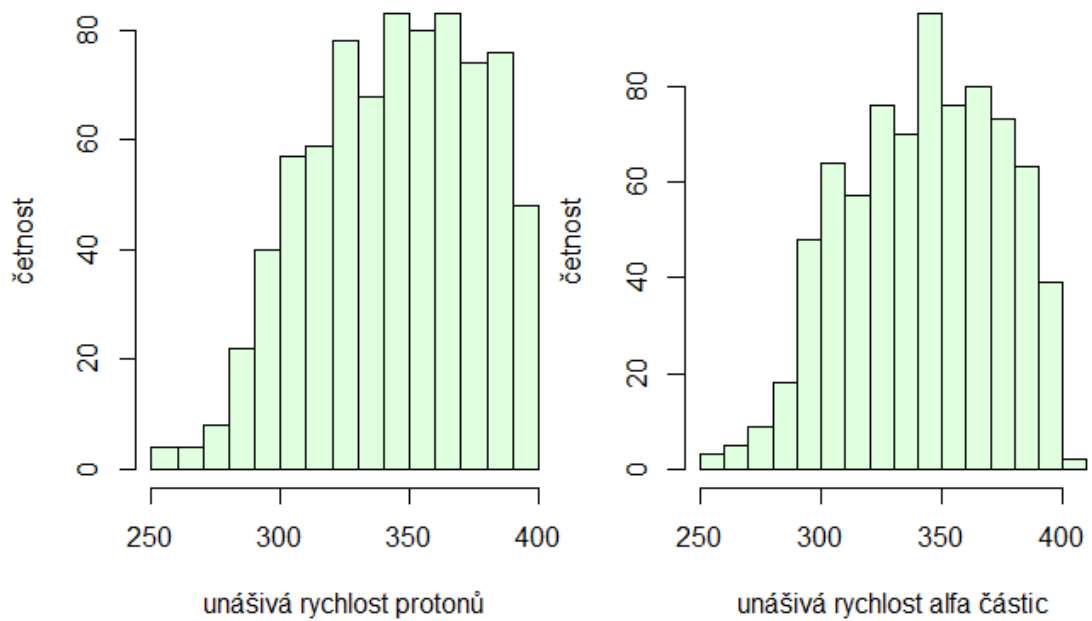


(a) Sluneční minimum.

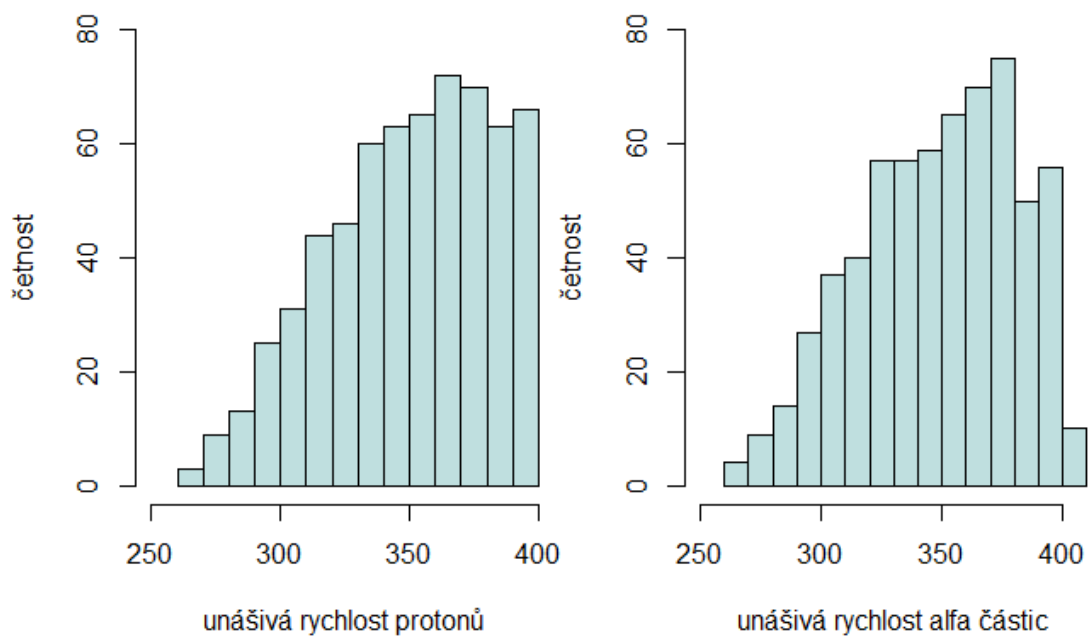


(b) Sluneční maximum.

Obrázek 4.1: Unášivá rychlost částic rychlého slunečního větru v období slunečního minima a maxima.

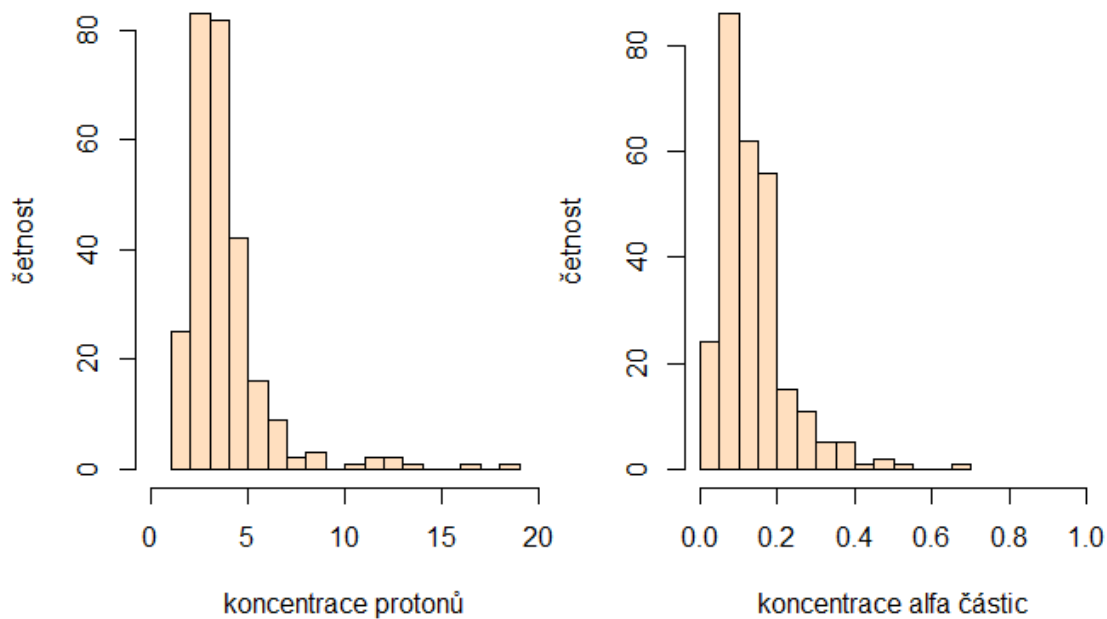


(a) Sluneční minimum.

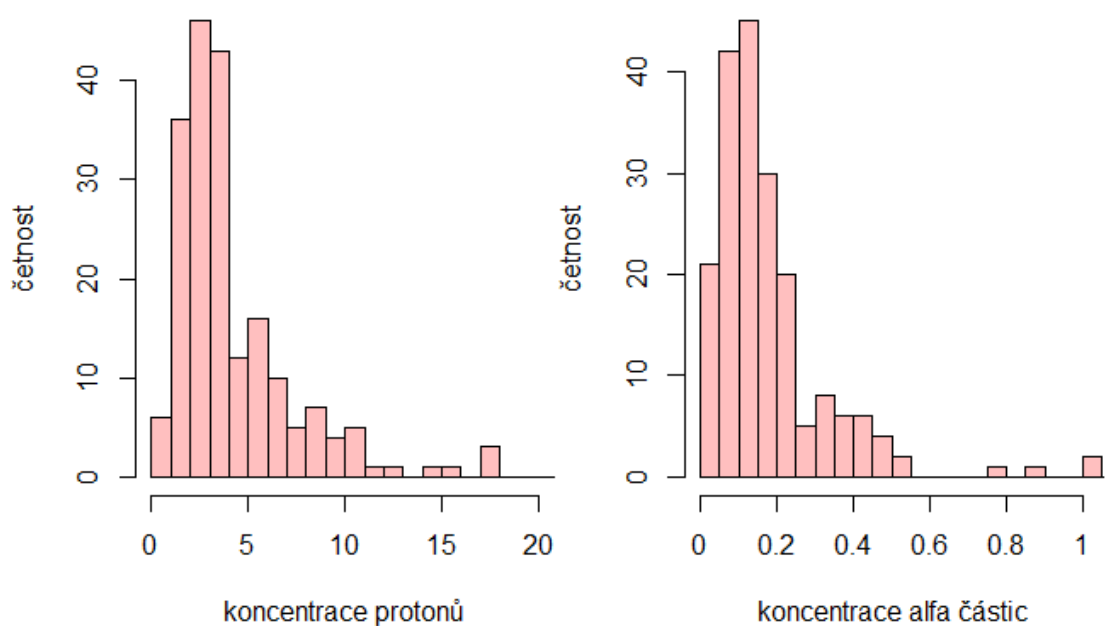


(b) Sluneční maximum.

Obrázek 4.2: Unášivá rychlost částic pomalého slunečního větru v období slunečního minima a maxima.

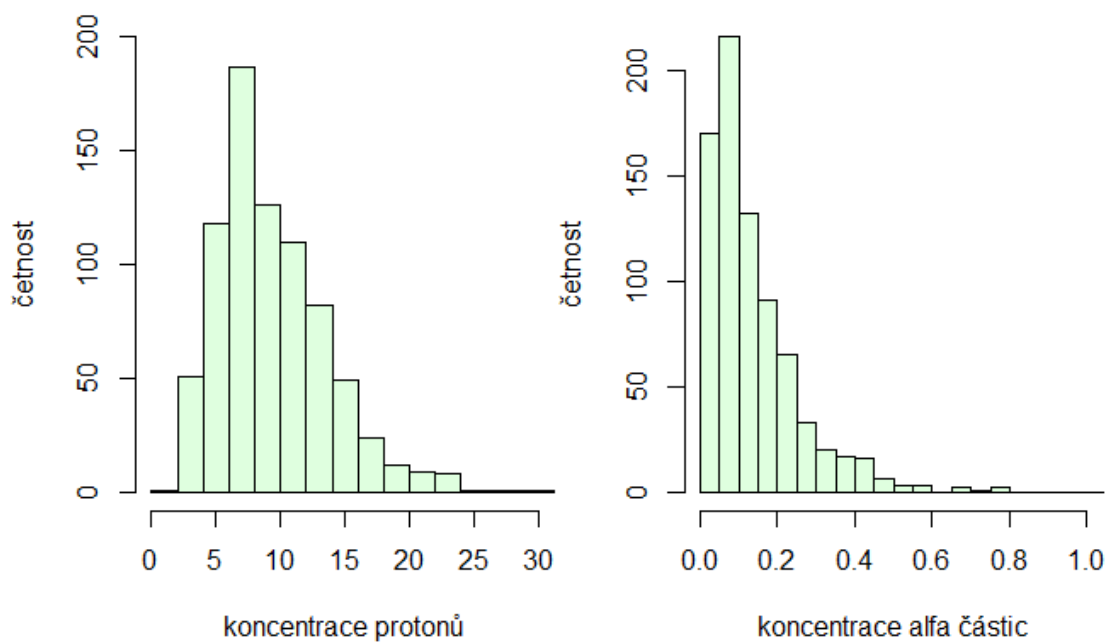


(a) Sluneční minimum.

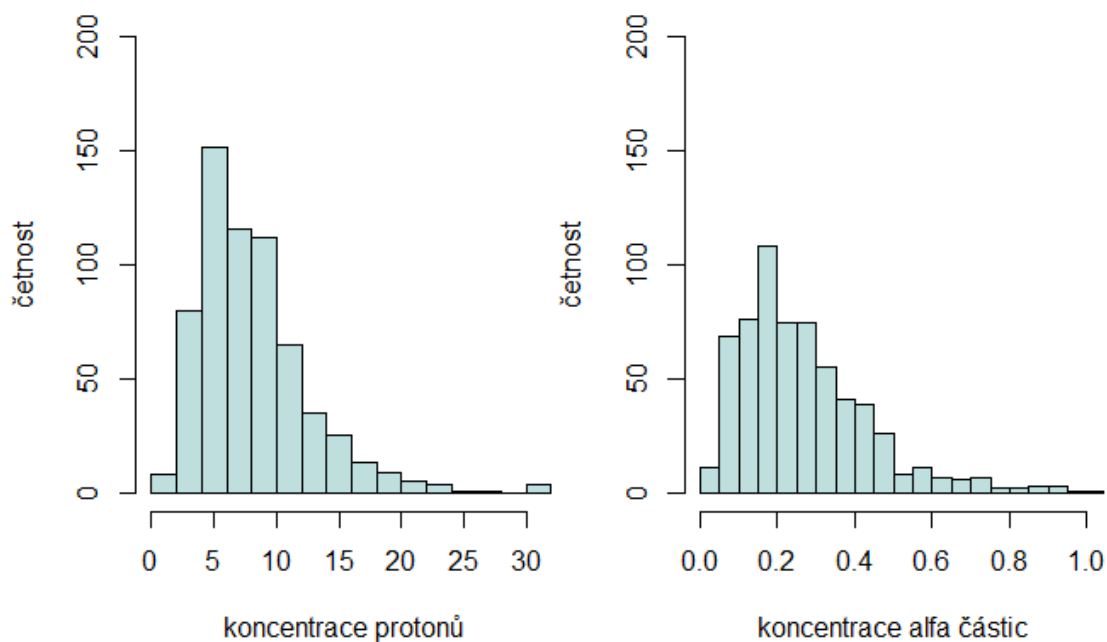


(b) Sluneční maximum.

Obrázek 4.3: Koncentrace částic rychlého slunečního větru v období slunečního minima a maxima.

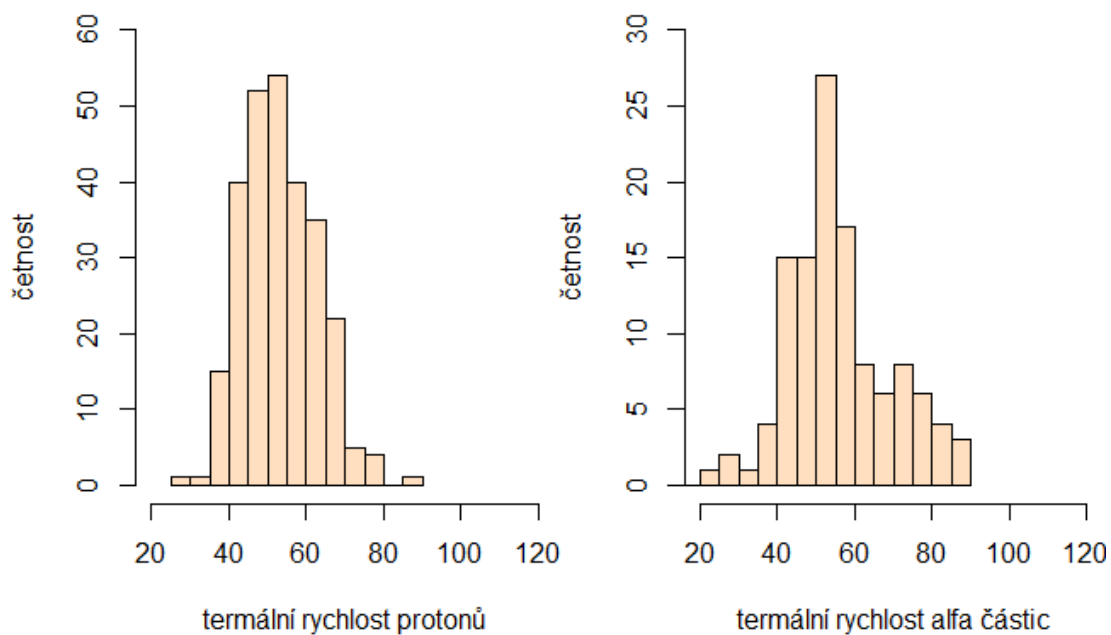


(a) Sluneční minimum.

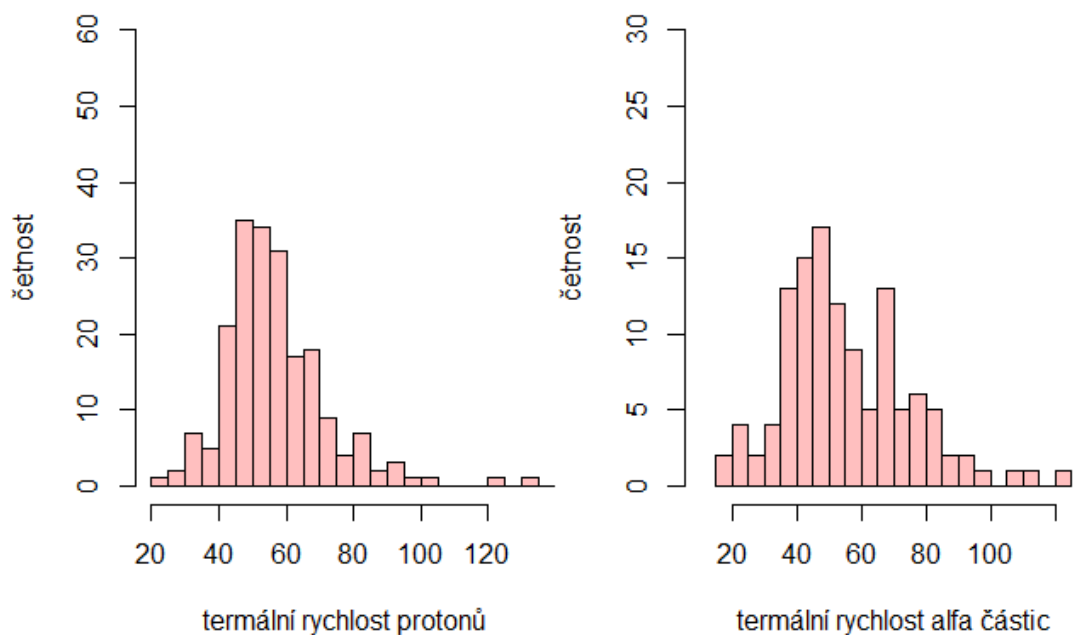


(b) Sluneční maximum.

Obrázek 4.4: Koncentrace částic pomalého slunečního větru v období slunečního minima a maxima.

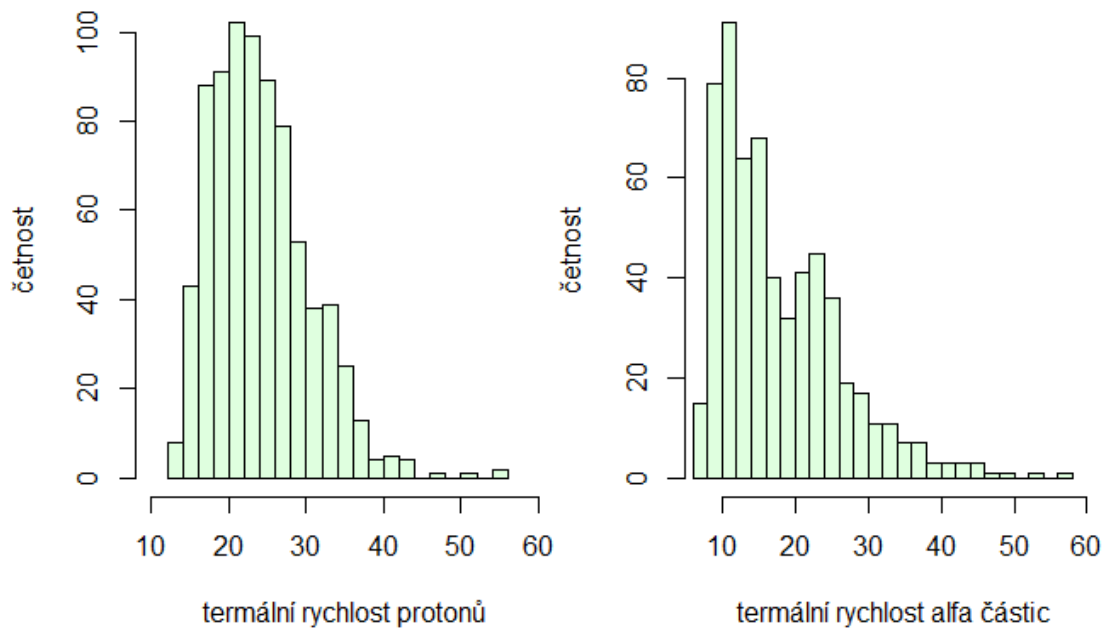


(a) Sluneční minimum.

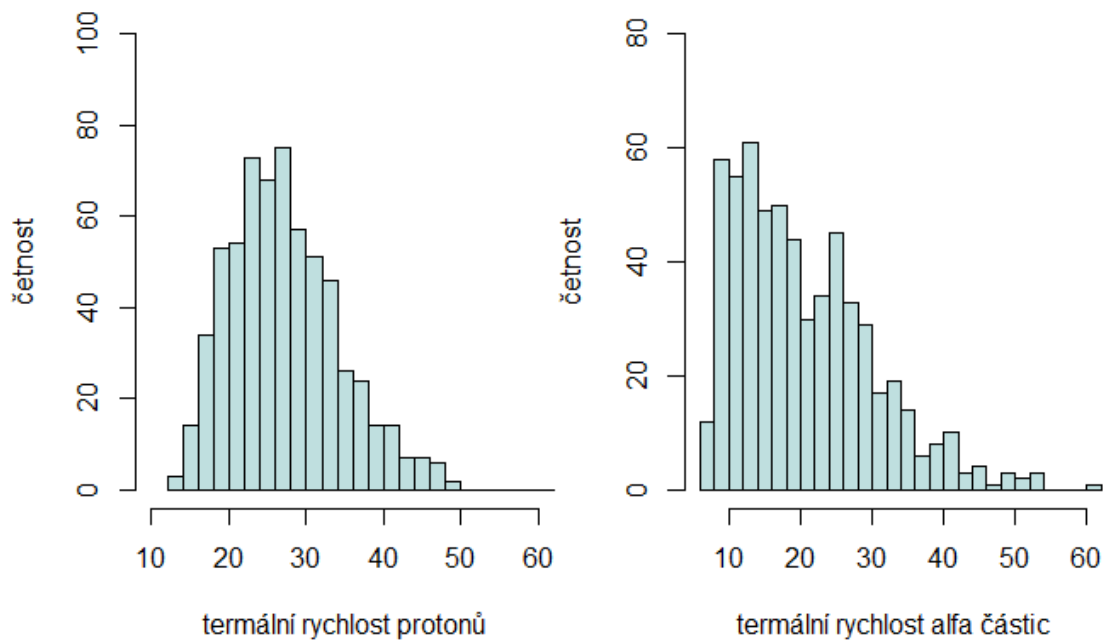


(b) Sluneční maximum.

Obrázek 4.5: Termální rychlost částic rychlého slunečního větru v období slunečního minima a maxima.



(a) Sluneční minimum.



(b) Sluneční maximum.

Obrázek 4.6: Termální rychlost částic pomalého slunečního větru v období slunečního minima a maxima.

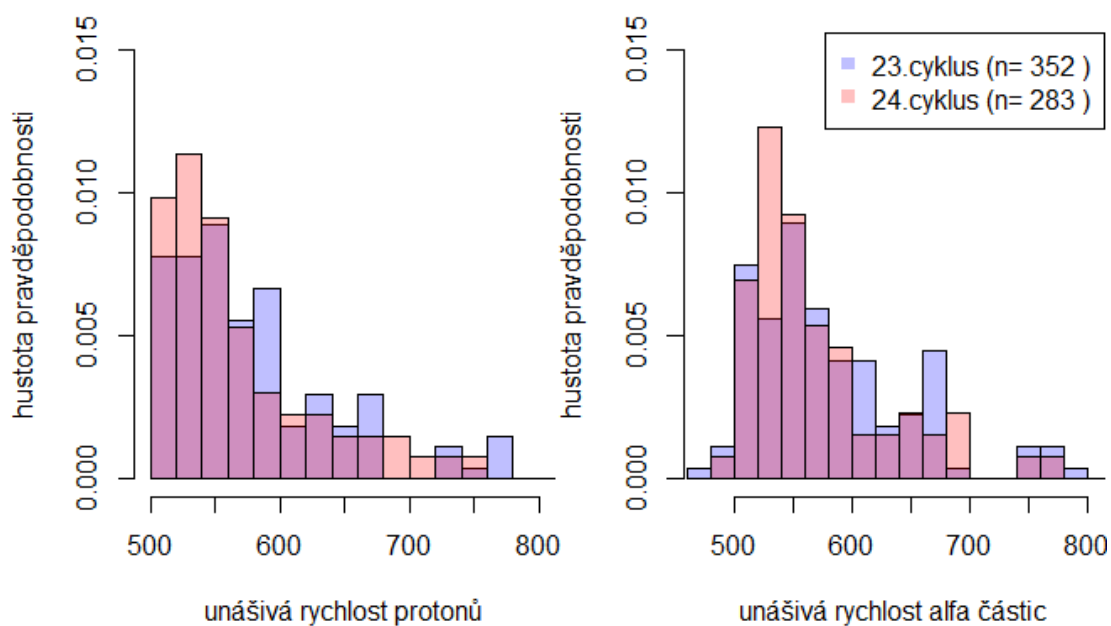
4.2 Rozdíly mezi 23. a 24. cyklem

Pro studium rozdílů mezi oběma cykly zde bohužel není možné použít žádný z klasických dvouvýběrových testů, protože pozorování tvoří časovou řadu, tudíž jsou silně závislá. Řešením by bylo použití regresního modelu pro závislá pozorování, v němž by číslo cyklu bylo jednou z vysvětlujících proměnných. Taková analýza by však přesahovala rámec této práce. Zde se tedy omezíme pouze na porovnání histogramů v období slunečních maxim. Porovnání pro sluneční minima by nemělo dobrý smysl, protože sluneční cykly jsou odděleny právě pomocí těchto minim, takže bychom porovnávali dvě skupiny tvořící jednu ucelenou časovou řadu. Výsledné grafy si lze prohlédnout na obrázcích 4.7 až 4.9, přičemž počet použitých měření je uveden v legendě každého grafu. Dále poznamenejme, že téměř ve všech grafech se nachází několik ojedinělých pozorování za horní hranici rozsahu osy x .

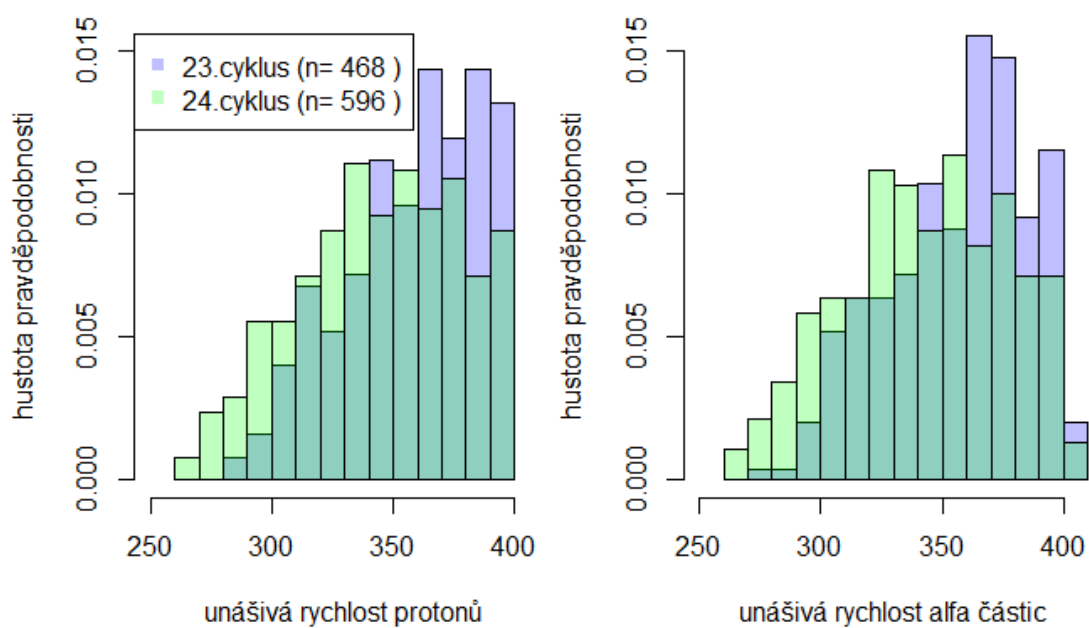
Pro unášivou rychlost protonů a α -částic (obrázek 4.7) pozorujeme posun jejich rozdělení směrem k nižším rychlostem ve 24. cyklu. Tento rozdíl mezi oběma cykly je výrazný hlavně pro pomalý sluneční vítr a souvisí patrně s celkově nižší sluneční aktivitou ve 24. cyklu (viz obrázek 2.2). Podobné konstatování platí i pro rozdělení termálních rychlostí obou druhů částic (obrázek 4.9), ve 24. cyklu se vesměs rozdělení posouvá k nižším rychlostem bez ohledu na typ slunečního větru.

Pro koncentrace protonů a α -částic (obrázek 4.8) se oba cykly jak pro rychlý, tak i pro pomalý sluneční vítr liší jen málo (i když slabá tendence k nižším koncentracím pro oba druhy částic je patrná hlavně pro rychlou složku slunečního větru). Zajímavé je, že střední koncentrace α -částic je víceméně stejná v pomalém i rychlém slunečním větru. To platí jak v období maxima, tak i v období minima sluneční aktivity (viz tabulka 4.1). V literatuře (Kasper a kol., 2012) je možno nalézt pouze analýzy relativní koncentrace (tj. poměru koncentrací α -částic a protonů), kterým naše střední hodnoty odpovídají. Rozdíly mezi hodnotami koncentrací protonů v pomalém a rychlém slunečním větru jsou pravděpodobně způsobeny faktem, že celkový tok částic ze sluneční korony se zachovává, ale není zcela jasné, proč totéž neplatí pro těžší ionty. Větší relativní obsah α -částic pravděpodobně souvisí s hloubkou zdrojové oblasti ve sluneční koruně, ale k jednoznačnému vysvětlení je třeba dalšího studia.

Celkově je možno shrnout, že všechny sledované parametry (rychlost, koncentrace a teplota obou základních komponent slunečního větru) vykonají mezi 23. a 24. cyklem posun směrem k nižším hodnotám. To sice odpovídá poklesu sluneční aktivity měřené počtem slunečních skvrn, ale příčinná souvislost není zřejmá. Počet slunečních skvrn odpovídá spíše počtu ICME, které jsou z naší analýzy vyloučeny. Nejpravděpodobnější vysvětlení by bylo, že dochází k malému poklesu průměrné teploty sluneční korony, která určuje rychlost a množství hmoty uvolňované do meziplanetárního prostoru. Tato teplota není přímo měřitelná, ale je možno předpokládat, že vyšší sluneční aktivita bude mít za následek intenzivnější ohřev korony prostřednictvím zvukových a Alfvénovských vln.

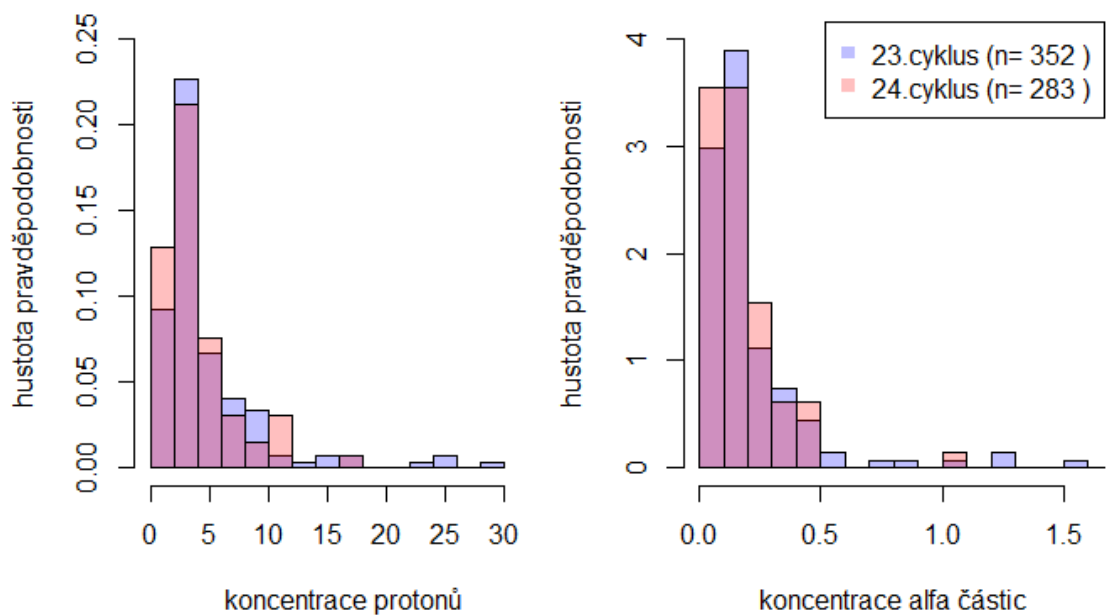


(a) Rychlý sluneční vítr.

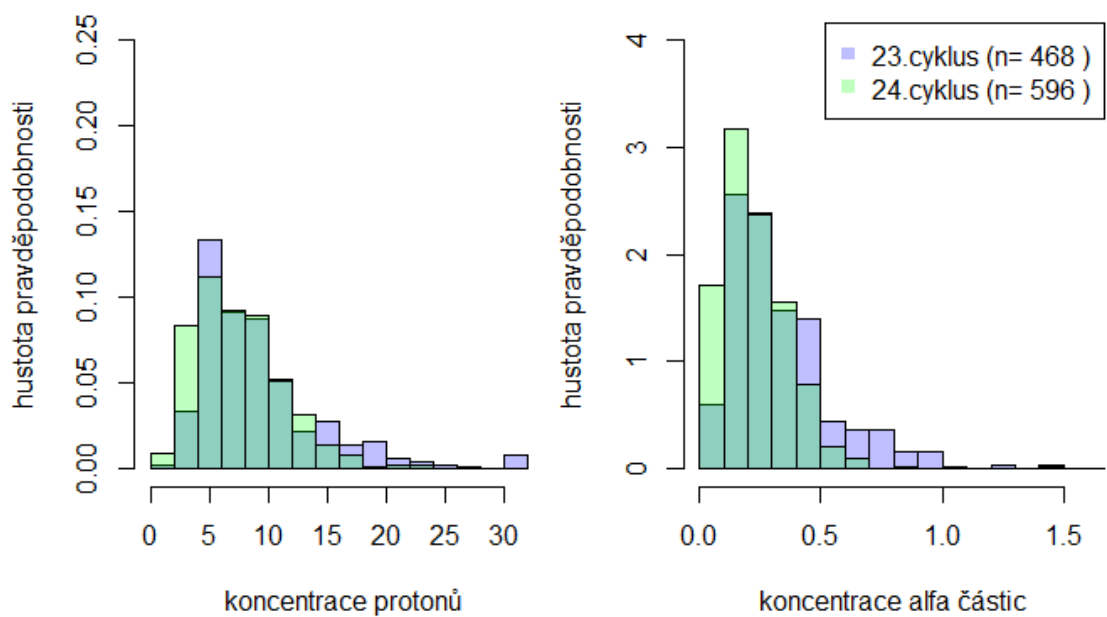


(b) Pomalý sluneční vítr.

Obrázek 4.7: Porovnání histogramů unášivé rychlosti částic rychlého a pomalého slunečního větru v období slunečních maxim 23. a 24. cyklu.

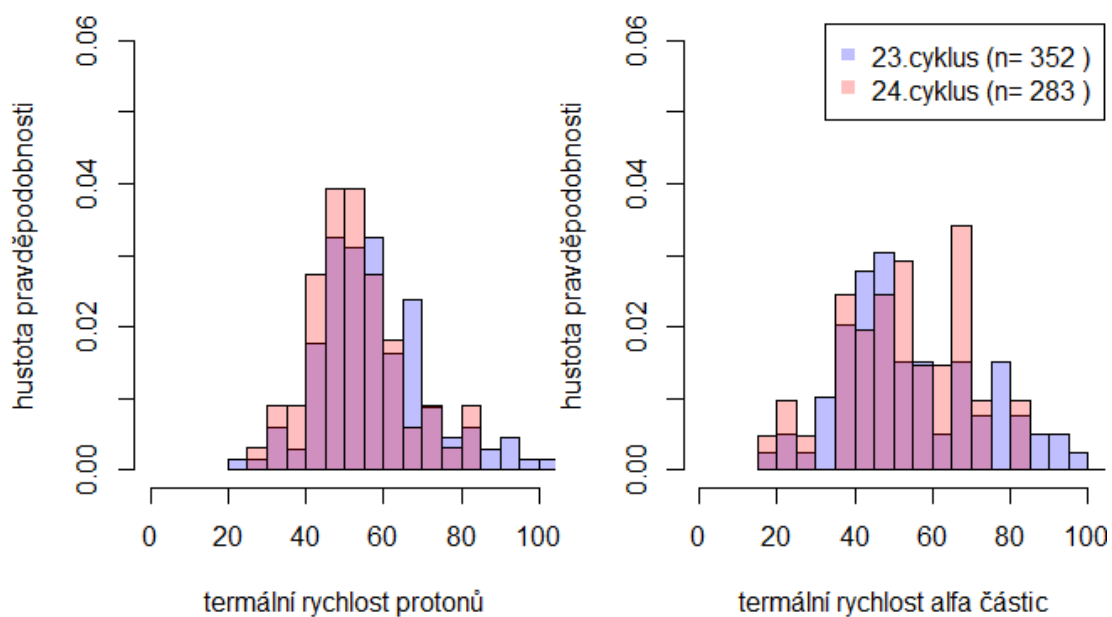


(a) Rychlý sluneční vítr.

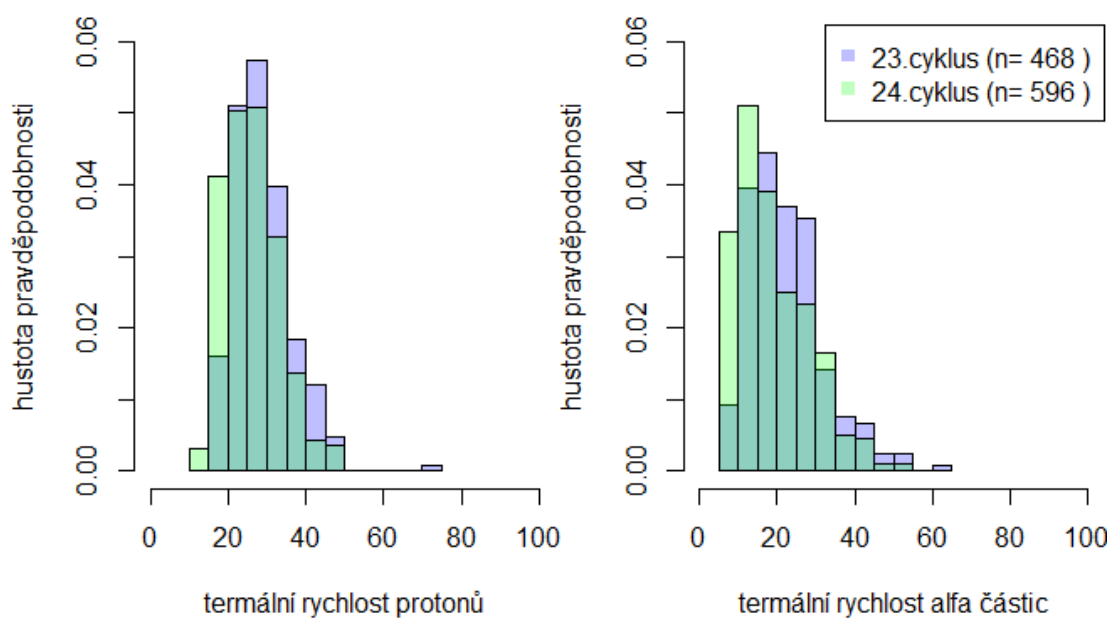


(b) Pomalý sluneční vítr.

Obrázek 4.8: Porovnání histogramů koncentrace částic rychlého a pomalého slunečního větru v období slunečních maxim 23. a 24. cyklu.



(a) Rychlý sluneční vítr.



(b) Pomalý sluneční vítr.

Obrázek 4.9: Porovnání histogramů termální rychlosti částic rychlého a pomalého slunečního větru v období slunečních maxim 23. a 24. cyklu.

5. Vzájemné korelace jednotlivých parametrů

V této kapitole uvádíme vzájemné korelace základních parametrů slunečního větru. Vypočten byl Spearmanův korelační koeficient, který měří sílu monotónní závislosti dvou veličin pocházejících ze spojitého rozdělení. Tento koeficient je definován vztahem

$$r_S = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(Q_i - \bar{Q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}} = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (R_i - Q_i)^2, \quad (5.1)$$

kde R_1, \dots, R_n , resp. Q_1, \dots, Q_n jsou pořadí daná velikostí hodnot v prvním, resp. druhém výběru a \bar{R} a \bar{Q} jsou jejich průměry. Jedná se tedy vlastně o Pearsonův korelační koeficient vypočítaný z pořadí. Korelační matice pro jednotlivé studované situace jsou uvedeny v tabulkách 5.1 a 5.2. Význam zkratk pro jednotlivé veličiny je následující:

v_unas_prot	unášivá rychlost protonů
v_unas_a	unášivá rychlost α -částic
konc_prot	koncentrace protonů
konc_a	koncentrace α -částic
v_term_prot	termální rychlost protonů
v_term_a	termální rychlost α -částic
magPoleX	x -ová složka magnetického pole
magPoleY	y -ová složka magnetického pole
magPoleZ	z -ová složka magnetického pole
magPole	velikost magnetického pole
ssn	Sun Spot Number (počet slunečních skvrn)

Modrou barvou jsou v tabulkách vyznačeny hodnoty, pro které jsme nezamítli nulovou hypotézu, že tyto dvě veličiny jsou nezávislé, tj. jejich korelační koeficient je nula. Alternativní hypotéza je, že veličiny jsou závislé. Testová statistika tohoto testu má tvar

$$r_S \sqrt{n - 1} \quad (5.2)$$

a za nulové hypotézy má asymptoticky normované normální rozdělení. Tato asymptotika se využívá již pro $n > 30$ (Anděl, 2007).

V tabulce 5.1 jsou uvedeny korelace pro parametry slunečního větru v období rozšířeného maxima pro 23. a 24. cyklus. Rozšířené maximum je vyznačeno na obrázku 2.2 oranžovou barvou. Tyto korelace byly vypočteny z cca dvanácti set pozorování. Počet pozorování uvádíme pouze orientačně, neboť každá dvojice veličin obsahovala trochu jiný počet úplných párů. Korelace pro počet slunečních skvrn je potřeba brát s rezervou, neboť tato veličina nesplňuje předpoklad spojitosti.

Nejprve se soustředíme na závislosti, které jsou v obou cyklech podobné. Vzhledem k tomu, že rychlost protonů se pohybuje v rozmezí 250 – 800 km/s (obr. 4.1 a 4.2) a vzájemná rychlost protonů a α -částic nepřesahuje několik desítek km/s, je pochopitelná vysoká korelace unášivých rychlostí obou složek. Zachování

hustoty toku slunečního větru vede k významné antikorelaci rychlosti a koncentrace (-0.5), která je dobře známá (např. Marsch a Tu (1994), Zurbuchen (2007)), stejně jako pozitivní korelace mezi unášivou a tepelnou rychlostí. Poměrně překvapivá je vysoká (≈ 0.8) korelace koncentrací protonů a α -částic, přestože jejich poměr se mění v poměrně širokých mezích, od 0.005 do 0.15 (Kasper a kol., 2012).

Korelace jednotlivých složek magnetického pole mezi sebou i s dalšími veličinami jsou uvedeny pouze pro úplnost, protože korelační analýza využívá denní průměry. Variace směru magnetického pole jsou na této časové škále natolik velké, že střední hodnota jednotlivých složek je blízká nule a nízké hodnoty korelací jsou proto pochopitelné. Jistou výjimkou je významná antikorelace složek B_x a B_y , která odpovídá preferenční orientaci magnetického pole podél Parkerovy spirály (Parker, 1958).

Analýza ukázala vysoké hodnoty korelačního koeficientu mezi intenzitou magnetického pole a koncentrací nebo termální rychlostí obou studovaných složek plazmatu slunečního větru, naopak korelace s jejich rychlostí jsou prakticky nulové. Domníváme se, že tato korelace je důsledkem vývoje slunečního větru. Vlivem interakcí pomalého a rychlého slunečního větru dochází k lokálním kompresím. U komprimované oblasti plazmatu dochází k nárůstu koncentrace a termální rychlosti plazmatu a také intenzity v něm zamrzlého magnetického pole. Není však možno vyloučit, že na pozitivní korelaci se projevují i poměry ve zdrojových oblastech na slunečním povrchu. Tento aspekt bude předmětem dalšího studia, protože hodnota korelací mezi intenzitou magnetického pole a parametry je výrazně vyšší ve 24. cyklu, který se vyznačuje naopak nižšími hodnotami parametrů plazmatu (viz výsledky předchozí kapitoly). Efekt většího vlivu variací magnetického pole na změny parametrů plazmatu ve 24. cyklu také pravděpodobně souvisí i s nižšími hodnotami korelačních koeficientů mezi parametry plazmatu navzájem.

Horní část tabulky 5.2 obsahuje Spearmanovy korelace mezi parametry během událostí ICME, a to v celém zkoumaném období. I malé hodnoty korelace se projeví jako statisticky významné, neboť byly vypočteny z více než dvou set tisíc pozorování. Velké hodnoty korelace vycházejí mezi koncentracemi obou druhů částic a dále mezi jejich termálními rychlostmi.

Vysoká korelace unášivých a teplých rychlostí protonů a α -částic uvnitř ICME odpovídá relativně novému poznatku (Ďurovcová a kol., 2017), že ICME je možno považovat za magnetické nádoby, vznikající v hloubi sluneční korony, kde jsou obě složky slunečního větru blízko termodynamické rovnováhy. Ze zdrojové oblasti jsou pak „vystřeleny“ do toku slunečního větru, ale rovnovážný stav je při tom zachován. Horší korelace (0.6 oproti 0.8) koncentrací protonů a α -částic uvnitř ICME než ve zbytku slunečního větru naznačuje, že tyto struktury jsou vytvářeny v širokém rozsahu výšek nad slunečním povrchem, neboť výška nad povrchem určuje relativní zastoupení jednotlivých složek. Z tohoto hlediska je naopak překvapivá mnohem nižší korelace koncentrací obou komponent slunečního větru s celkovou intenzitou magnetického pole (0.3) než odpovídá pozorování v klasickém slunečním větru. Tímto faktem se prozatím nikdo nezabýval a patrně souvisí s hodnotami parametrů ve zdrojových oblastech. Budeme se mu tedy věnovat v dalším studiu.

Dolní část tabulky 5.2 je věnována korelacím pro pomalý a rychlý sluneční vítr. V případě pomalého slunečního větru bylo k dispozici přes tři tisíce pozorování,

v případě rychlého větru pouze jeden a půl tisíce pozorování. V tabulce vidíme řadu rozdílů. Například korelace koncentrace α -částic s unášivou rychlostí protonů a α -částic je u pomalého slunečního větru kladná, kdežto u rychlého záporná. Naopak korelace koncentrace protonů s jejich termální rychlostí je u pomalého větru lehce záporná, u rychlého větru kladná. Stejně je tomu pro α -částice. Další rozdíl je u korelací velikosti magnetického pole s unášivou rychlostí obou druhů částic. U pomalého slunečního větru jsou tyto korelace kladné, u rychlého větru nezamítáme jejich nulovost.

Porovnání hodnot korelačních koeficientů mezi jednotlivými parametry pro pomalý a rychlý sluneční vítr potvrzuje oprávněnost tohoto dělení. Rychlý sluneční vítr vykazuje vesměs významně vyšší hodnoty korelací. To naznačuje, že ve slunečné koruně jsou jednotlivé parametry spolu svázány a turbulentní procesy, které jsou výraznější v pomalém slunečním větru, tyto vzájemné vazby postupně oslabují.

23. cyklus												
v_unas_prot	v_unas_a	konc_prot	konc_a	v_term_prot	v_term_a	magPoleX	magPoleY	magPoleZ	magPole	ssn		
1	0.996	-0.510	-0.317	0.827	0.762	-0.071	0.098	0.036	0.083	0.006		
v_unas_a	1	-0.506	-0.311	0.819	0.768	-0.078	0.099	0.033	0.079	0.004		
konc_prot	-0.510	1	0.831	-0.344	0.054	0.054	-0.059	0.011	0.447	-0.014		
konc_a	-0.317	0.831	1	-0.181	-0.044	0.025	0.002	0.015	0.439	0.017		
v_term_prot	0.827	0.819	-0.181	1	0.893	-0.063	0.118	0.054	0.296	0.014		
v_term_a	0.762	0.768	-0.324	0.893	1	-0.088	0.172	0.030	0.210	0.033		
magPoleX	-0.071	-0.078	0.054	-0.063	-0.088	1	-0.506	0.036	-0.002	0.027		
magPoleY	0.098	0.099	-0.059	0.118	0.172	-0.506	1	-0.005	0.044	-0.025		
magPoleZ	0.036	0.033	0.011	0.054	0.030	0.036	-0.005	1	0.063	0.025		
magPole	0.083	0.079	0.447	0.296	0.210	-0.002	0.044	0.063	1	-0.013		
ssn	0.006	-0.014	0.017	0.014	0.033	0.027	-0.025	0.025	-0.013	1		

24. cyklus												
v_unas_prot	v_unas_a	konc_prot	konc_a	v_term_prot	v_term_a	magPoleX	magPoleY	magPoleZ	magPole	ssn		
1	0.998	-0.465	-0.125	0.836	0.782	0.046	-0.022	-0.035	0.195	-0.048		
v_unas_a	1	-0.470	-0.127	0.832	0.784	0.043	-0.023	-0.036	0.189	-0.046		
konc_prot	-0.465	1	0.741	-0.277	-0.301	-0.031	0.050	0.027	0.451	-0.001		
konc_a	-0.125	0.741	1	0.069	0.178	-0.020	0.040	-0.001	0.520	-0.041		
v_term_prot	0.836	-0.277	0.069	1	0.915	0.014	0.013	-0.044	0.398	-0.035		
v_term_a	0.782	0.784	0.178	0.915	1	-0.008	0.020	-0.057	0.309	-0.039		
magPoleX	0.046	0.043	-0.031	0.014	-0.008	1	-0.550	0.051	-0.037	-0.023		
magPoleY	-0.022	-0.023	0.050	0.020	0.020	-0.550	1	-0.053	0.106	0.029		
magPoleZ	-0.035	0.027	-0.001	-0.044	-0.057	0.051	-0.053	1	-0.007	-0.042		
magPole	0.195	0.451	0.520	0.398	0.309	-0.037	0.106	-0.007	1	-0.051		
ssn	-0.048	-0.001	-0.041	-0.035	-0.039	-0.023	0.029	-0.042	-0.051	1		

Tabulka 5.1: Spearmanův korelační koeficient pro jednotlivé dvojice parametrů slunečního větru v období rozšířeného maxima pro 23. a 24. cyklus. Modrou barvou jsou vyznačeny korelace, které nevyšly signifikantně odlišně od nuly.

ICME	v_unas_prot	v_unas_a	konc_prot	konc_a	v_term_prot	v_term_a	magPoleX	magPoleY	magPoleZ	magPole	ssn
v_unas_prot	1	0.999	-0.292	0.062	0.306	0.374	-0.053	-0.010	0.017	0.083	0.238
v_unas_a	0.999	1	-0.285	0.060	0.299	0.374	-0.055	-0.012	0.014	0.083	0.233
konc_prot	-0.292	-0.285	1	0.620	0.141	0.050	-0.002	0.034	0.010	0.253	-0.104
konc_a	0.062	0.060	0.620	1	0.212	0.153	-0.030	0.016	0.016	0.296	0.132
v_term_prot	0.306	0.299	0.141	0.212	1	0.900	0.000	0.002	0.006	0.109	0.086
v_term_a	0.374	0.374	0.050	0.153	0.900	1	0.005	-0.009	-0.004	0.134	0.086
magPoleX	-0.053	-0.055	-0.002	-0.030	0.000	0.005	1	-0.111	0.019	0.000	-0.034
magPoleY	-0.010	-0.012	0.034	0.016	0.002	-0.009	-0.111	1	-0.027	0.062	0.018
magPoleZ	0.017	0.014	0.010	0.016	0.006	-0.004	0.019	-0.027	1	-0.007	0.019
magPole	0.083	0.083	0.253	0.296	0.109	0.134	0.000	0.062	-0.007	1	-0.037
ssn	0.238	0.233	-0.104	0.132	0.086	0.086	-0.034	0.018	0.019	-0.037	1

Pomalý sluneční vítr

	v_unas_prot	v_unas_a	konc_prot	konc_a	v_term_prot	v_term_a	magPoleX	magPoleY	magPoleZ	magPole	ssn
v_unas_prot	1	0.992	-0.272	0.169	0.674	0.615	0.021	-0.006	0.027	0.234	0.116
v_unas_a	0.977	1	-0.279	0.176	0.665	0.622	0.021	-0.002	0.024	0.229	0.123
konc_prot	-0.259	-0.257	1	0.474	-0.073	-0.118	0.024	0.019	-0.061	0.385	-0.045
konc_a	-0.137	-0.114	0.806	1	0.404	0.467	0.017	0.040	-0.075	0.553	0.394
v_term_prot	0.532	0.504	0.225	0.186	1	0.879	0.012	0.013	-0.006	0.465	0.192
v_term_a	0.445	0.445	0.184	0.211	0.740	1	-0.001	0.028	-0.011	0.367	0.157
magPoleX	-0.037	-0.034	-0.005	-0.003	-0.034	0.009	1	-0.481	0.044	0.042	0.010
magPoleY	-0.007	-0.012	0.042	-0.009	0.002	-0.001	-0.540	1	-0.029	-0.006	0.015
magPoleZ	-0.003	-0.009	-0.073	-0.059	0.000	-0.054	0.049	-0.053	1	-0.021	-0.048
magPole	0.035	0.034	0.695	0.596	0.561	0.290	-0.030	0.053	-0.042	1	0.336
ssn	-0.047	-0.035	0.125	0.176	0.103	0.014	-0.035	0.058	0.027	0.357	1

Tabulka 5.2: Spearmanův korelační koeficient pro jednotlivé dvojice parametrů ICME (horní tabulka), pomalého slunečního větru (horní trojúhelník dolní tabulky) a rychlého slunečního větru (dolní trojúhelník dolní tabulky). Modrou barvou jsou vyznačeny korelace, které nevyšly signifikantně odlišně od nuly.

Závěr

Tato práce představuje statistickou studii chování vybraných parametrů slunečního větru. Analyzována byla data z družice Wind z období 1995 – 2016, která tedy pokrývají téměř dva sluneční cykly.

Studovali jsme zvláště meziplanetární výrony koronální hmoty a sluneční vítr bez těchto událostí. Sluneční vítr jsme pak dále zkoumali zvláště v minimu a v maximu sluneční aktivity, která byla charakterizována počtem slunečních skvrn. Kromě základních nástrojů popisné statistiky použitých na jednotlivé parametry jsme se též věnovali hledání rozdílů mezi jednotlivými cykly a odhadu závislostí mezi jednotlivými veličinami.

Ve všech zkoumaných případech jsme pozorovali velmi podobné rozdělení unášivé rychlosti protonů i α -částic, čemuž odpovídá i hodnota korelačního koeficientu blízká 1. Koncentrace α -částic v ICME dosahuje až 10 %, zatímco u „čistého“ slunečního větru je to mnohem méně. Z porovnání histogramu na obrázku 3.2 s obrázky 4.5 až 4.6 vyplývá, že ICME má nižší teplotu protonů než sluneční vítr, což je v souladu se studií Richardson a Cane (1995).

Sluneční vítr se v závislosti na unášivé rychlosti protonů rozlišuje na rychlý a pomalý. Tyto dva typy větru vznikají pravděpodobně na různých místech na Slunci a odlišují se také svými parametry. Neexistuje exaktní hranice pro oddělení těchto dvou typů větru, avšak volí se subjektivně zpravidla mezi 400 až 600 km/s. My jsme jako rychlý sluneční vítr označili ten s rychlostí protonů přes 500 km/s a jako pomalý ten s rychlostí protonů pod 400 km/s. Pro jinak zvolenou hranici by se výsledky provedených analýz mohly drobně lišit. Pomalý sluneční vítr se vyznačuje vyšší koncentrací protonů a nižší termální rychlostí obou druhů částic. Unášivá rychlost protonů a α -částic je pro oba typy větru podobná, avšak za zmínku stojí přítomnost α -částic pomalejších než 500 km/s v rychlém slunečním větru. Korelace mezi jednotlivými veličinami se pro oba typy větru drobně liší, někdy dokonce i znaménkem.

Provedené analýzy naznačují, že chování slunečního větru se během posledních dvou cyklů významně liší. To je v souladu i s dalšími studiemi (McComas a kol. 2008, Zerbo a Richardson 2015). Unášivá i termální rychlost protonů i α -částic v ICME byla ve 23. cyklu o trochu vyšší než ve 24. cyklu. Toto pozorování podporuje i Kolmogorovův-Smirnovův test, který rovnost distribučních funkcí těchto cyklů zamítl pro všechny veličiny s výjimkou koncentrace protonů. Podobná pozorování lze učinit i pro pomalý a rychlý sluneční vítr v období slunečního maxima. Ve 24. cyklu přitom převažoval pomalý sluneční vítr, kdežto ve 23. cyklu převažoval rychlý sluneční vítr. Rozdíly pozorujeme i v hodnotách korelace mezi jednotlivými parametry v těchto dvou cyklech. Při pohledu na průběh počtu slunečních skvrn (obrázek 2.2), který je odrazem sluneční aktivity, je patrné, že ve 23. cyklu vykazovalo Slunce vyšší aktivitu, proto vyšší hodnoty jednotlivých parametrů v tomto cyklu nejsou překvapivé.

Na závěr poznamenejme, že získané výsledky jsou většinou v souladu s jinými známými studiemi. Naše studie ale přináší i nové poznatky, které budeme dále precizovat. Práce však také ukázala, že aplikace klasických statistických testů na tato data je mnohdy velmi problematická, neboť nejsou splněny předpoklady těchto metod. Pro hlubší analýzu by byly potřeba složitější statistické nástroje,

které by ale přesahovaly rámec bakalářské práce. Některé části si však dle našeho názorů tuto hlubší analýzu zaslouží a budou předmětem dalšího studia.

Seznam použité literatury

- AELIG, M. R., LAZARUS, A. J. a STEINBERG, J. T. (2001). The solar wind helium abundance: Variation with wind speed and the solar cycle. *Geophysical Research Letters*, **28**, 2767–2770.
- ANDĚL, J. (2007). *Základy matematické statistiky*. Matfyzpress, Praha.
- BOROVSKY, J. E. (2008). Flux tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **113** (A8), A08110 (25pp).
- BURLAGA, L. F., SITTLER, E., MARIANI, F. a SCHWEEN, R. (1981). Magnetic loop behind an interplanetary shock: Voyager, helios, and imp 8 observations. *Journal of Geophysical Research*, **86**, 6673–6684.
- ĎUROVCOVÁ, T., ŠAFRÁNKOVÁ, J., NĚMEČEK, Z. a RICHARDSON, J. D. (2017). Evolution of proton and alpha particle velocities through the solar cycle. *The Astrophysical Journal*, **850**(2), 164.
- EBERT, R. W., MCCOMAS, D. J., ELLIOTT, H. A., FORSYTH, R. J. a GOSLING, J. T. (2009). Bulk properties of the slow and fast solar wind and interplanetary coronal mass ejections measured by ulysses: Three polar orbits of observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **114**(A1), A01109. doi: 10.1029/2008JA013631.
- KASPER, J. C., STEVENS, M. L., LAZARUS, A. J., STEINBERG, J. T. a OGILVIE, K. W. (2007). Solar wind helium abundance as a function of speed and heliographic latitude: Variation through a solar cycle. *The Astrophysical Journal*, **660**(1), 901–910.
- KASPER, J. C., STEVENS, M. L., KORRECK, K. E., MARUCA, B. A., KIEFER, K. K., SCHWADRON, N. A. a LEPRI, S. T. (2012). Evolution of the relationships between helium abundance, minor ion charge state, and solar wind speed over the solar cycle. *The Astrophysical Journal*, **745**(2), 162.
- KIVELSON, M. G. a RUSSELL, C. T. (1995). *Introduction to Space Physics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- LEPPING, R., ACÛNA, M. H., BURLAGA, L., FARRELL, W. M., SLAVIN, J. A., SCHATTEN, K. H., MARIANI, F., NESS, N. F., NEUBAUER, F. M., WHANG, Y. C., BYRNES, J. B., KENNON, R. S., PANETTA, P. V., SCHEIFELE, J. a WORLEY, E. M. (1995). The wind magnetic field investigation. *Space Science Reviews*, **71**, 207–229.
- MARSCH, E. a TU, C. Y. (1994). Non-gaussian probability distributions of solar wind fluctuations. *Annales Geophysicae*, **12**(12), 1127–1138. doi: 10.1007/s00585-994-1127-8.
- MCCOMAS, D. J., EBERT, R. W., ELLIOTT, H. A., GOLDSTEIN, B. E., GOSLING, J. T., SCHWADRON, N. A. a SKOUG, R. M. (2008). Weaker solar

- wind from the polar coronal holes and the whole sun. *Geophysical Research Letters*, **35**(18), L18103. doi: 10.1029/2008GL034896.
- NASA (2018). Archiv dat. <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>. Online přístup; datum 30. dubna 2018.
- NOAA (2018). Archiv dat. <http://swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>. Online přístup; datum 30. dubna 2018.
- OGILVIE, K. W., CHORNAY, D. J., FRITZENREITER, R. J., HUNSAKER, F., KELLER, J., LOBELL, J., MILLER, G., SCUDDER, J. D., SITTNER, E. C., TORBERT, R. B., BODET, D., NEEDELL, G., LAZARUS, A. J., STEINBERG, J. T., TAPPAN, J. H., MAVRETIC, A. a GERGIN, E. (1995). Swe, a comprehensive plasma instrument for the wind spacecraft. *Space Science Reviews*, **71** (1), 55–77. ISSN 1572-9672. doi: 10.1007/BF00751326.
- PARKER, E. N. (1958). Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. *The Astrophysical Journal*, **128**, 664–676.
- R CORE TEAM (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- RICHARDSON, I. a CANE, H. (1995). Regions of abnormally low proton temperature in the solar wind (1965–1991) and their association with ejecta. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **100**(A12), 23397–23412.
- RICHARDSON, I. a CANE, H. (2017). Archiv dat. <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>. Online přístup; datum 30. dubna 2018.
- RICHARDSON, I. G., BERDICHEVSKY, D., DESCH, M. D. a FARRUGIA, C. J. (2000). Solar-cycle variation of low density solar wind during more than three solar cycles. *Geophysical Research Letters*, **27**(23), 3761–3764. doi: 10.1029/2000GL000077.
- RICHARDSON, J. D. a KASPER, J. C. (2008). Solar cycle variations of solar wind dynamics and structures. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **70**, 219–225.
- RICHARDSON, J. D. a WANG, C. (1999). The global nature of solar cycle variations of solar wind dynamic pressure. *Geophysical Research Letters*, **26**, 561–564.
- RICHARDSON, J. D., BELCHER, J. W., LAZARUS, A. J., PAULARENA, K. I. a GAZIS, P. R. (1996). Statistical properties of the solar wind. In WINTERHALTER, D., GOSLING, J. T., HABBAL, S. R., KURTH, W. S. a NEUGEBAUER, M., editors, *Solar Wind Eight, Proceedings of the Eighth International Solar Wind Conference*, volume 382, pages 483–486.
- ŠAFRÁNKOVÁ, J., NĚMEČEK, Z., PŘECH, L., ZASTENKER, G., NIKOLAEVA, N., NOZDRACHEV, M., SKALSKY, A., PAULARENA, K. a MUKAI, T. (1998).

- The January 10-11, 1997 magnetic cloud: Multipoint measurements. *Geophysical Research Letters*, **25**, 2549–2552.
- SAGDEEV, R. Z. (2002). Collective processes and shock in rarefied plasmas. *Problems of the Plasma Theory*, (20).
- SCHWENN, R., ROSENBAUER, H. a MÜLHAUSER, K. H. (1981). Singly-ionized helium in the driver gas of an interplanetary shock wave. *Geophysical Research Letters*, **7**(3), 201–204. doi: 10.1029/GL007i003p00201.
- SCHWENN, R. (1983). Direct correlations between coronal transients and interplanetary disturbances. *Space Science Reviews*, **34**(1), 85–99. ISSN 1572-9672. doi: 10.1007/BF00221199.
- WANG, Y.-M. a SHEELEY, N. R., J. (1990). Magnetic-flux transport and sunspot-cycle evolution of coronal holes and their wind streams. *The Astrophysical Journal*, **355**(2), 726.
- XU, F. a BOROVSKY, J. E. (2015). A new four-plasma categorization scheme for the solar wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **120**(1), 70–100. doi: 10.1002/2014JA020412.
- ZERBO, J.-L. a RICHARDSON, J. D. (2015). The solar wind during current and past solar minima and maxima. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **120**, 10250–10256.
- ZURBUCHEN, T. H. (2007). A new view of the coupling of the sun and the heliosphere. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **45**, 297—338.