

# Zákonitosti generovania magnetickej búrky

Alina Prigancová, Geofyzikálny ústav SAV, *geofpria@savba.sk*  
Ya. I. Feldstein, IZMIRAN, Troitsk

## Abstrakt

Výskum magnetických búrok sa začal ešte na prelome 19. a 20. storočia. Pozorovania premennej slnečnej činnosti a ich interpretácia vo vzťahu k vzniku magnetických búrok sú základom pre identifikáciu slnečných zdrojov búrkových porúch v magnetosfére. Napredovanie v tejto oblasti značne pokročilo vďaka družicovým meraniam variability slnečnej činnosti a ná sledných zmien parametrov slnečného vetra. Nový pohľad na zákonitosti generovania magnetickej búrky, skúmané na základe monitoringu medziplanetárnych podmienok a dynamiky magnetosférických procesov v chvoste magnetosféry, napomáha pochopiť celkovú energetiku búrkovej poruchy.

## 1. ÚVOD

Výskum magnetických búrok sa začal ešte na prelome 19. a 20. storočia. Štúdium vzniku týchto porúch globálneho charakteru v geomagnetickom poli (GMP) sa značne zefektívnilo vďaka bezprostredným družicovým meraniam. Na ich základe sa zistil nepretržitý prísun energie slnečného vetra do magnetosféry. Tento proces výrazne sa zintenzívňuje pri určitých medziplanetárnych podmienkach súvisiacich s premennou slnečnou činnosťou. Jej komplexný monitoring a interpretácia vo vzťahu k vyskytujúcim sa magnetickým búrkam je základom pre identifikáciu slnečných zdrojov búrkových porúch v magnetosfére. Vďaka systematickým družicovým meraniam premenných parametrov slnečného vetra, na strane jednej, a dynamických procesov v magnetosfére i jej jednotlivých oblastí (najmä v aurorálnej oblasti a v magnetosférickom chvoste), na strane druhej, sa postupne formuje nový pohľad na zákonitosti generovania magnetickej búrky.

## 2. VYSOKORÝCHLOSTNÁ PLAZMA AKO PODMIENKA GEOEFEKTÍVNOTI PÔSOBNIA

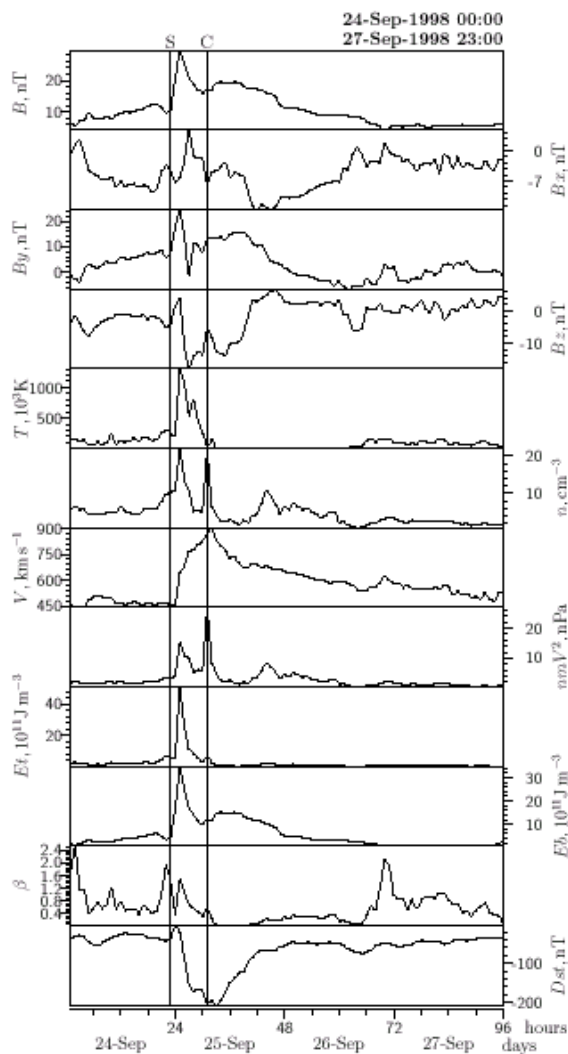
Vznik magnetickej búrky je najpresvedčivejším prejavom geoeфективности pôsobenia vonkajšieho podnetu. Ešte pred nástupom kozmickej éry sa tradovala myšlienka generovania magnetickej búrky rýchlo pohybujúcou sa slnečnou plazmou (Chapman a Bartels, 1940; Akasofu a Chapman, 1972). Tieto plazmové toky sa zvykli nazývať plazmové oblaky, turbulentné oblaky, erupčné toky, magnetické jazyky, bubliny atď. Dlhší čas sa dalo ťažko hovoriť o terminologickej ustálenosti a v odbornej literatúre existovali také pojmy ako tranzienty, plazmové piesty, erupčné výrony, koronálne ejekcie atď. V súčasnosti Americká geofyzikálna únia AGU (American Geo-

physical Union) používa pojem “ejecta” pre medziplanetárny vysokorýchlostný tok plazmy a pojem “CME” pre koronálnu ejekciu pozorovateľnú pomocou koronografu. Vlastnosti plazmových výronov sa intenzívne študujú a ešte stále nie sú definitívne identifikované. Výrony sú pomalé (slow) a rýchle (fast), práve prvé nie sú jednoznačne identifikovateľné. Výrony môžu byť korotujúce (s príznačnou vysokou teplotou  $T$  a nízkou koncentráciou  $n$ ) a nekorotujúce (tranzientný tok plazmy na obežnej dráhe Zeme s maximálnou rýchlosťou  $>600$  km/s počas jedného i viac dní), t.j. rýchle výrony. Všeobecne pre identifikáciu rýchlych výronov je krivka zmeny rýchlosti prvoradá. To neznamená, že sa detailne nezvažujú celkové medziplanetárne podmienky.

## 3. MEDZIPLANETÁRNE PODMIENKY PRE VZNIK MAGNETICKEJ BÚRKY

Veľmi významnou vlastnosťou je magnetické pole. Oblasť slnečnej plazmy, charakterizovaná rotáciou magnetického poľa a značnej intenzity, a tiež nízkymi hodnotami teploty protónov  $T_p$  a plazmového parametra  $\beta$  (viď nižšie), sa zvykne nazývať magnetický oblak. Často sa poukazuje na to, že pre magnetický oblak je charakteristický dvojpohyb elektrónov v protismere, resp. protismerný pohyb protónov.

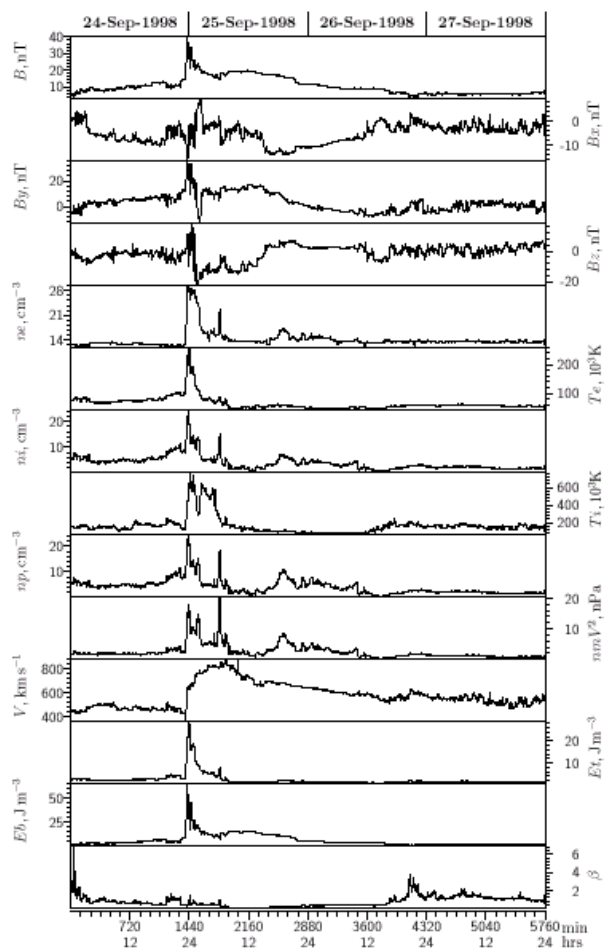
Pri vzniku magnetickej búrky je pre medziplanetárne podmienky charakteristické šírenie nárazovej vlny a magnetického oblaku. Geoeфективный magnetický oblak sa obvykle formuje v dôsledku nárazovej vlny. Ako príklad uvedieme magneticкую búrku 25.–27. septembra 1998. Pri časovom rozlíšení priemerných hodinových hodnôt sú na obr. 1 znázornené základné parametre medziplanetárneho magnetického poľa (MMP) a slnečného vetra. Zároveň ich zmeny s 5-min časovým rozlíšením sa dajú sledovať na obr. 2. Krivky magnitudy  $B$ , jej zložiek  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ , koncentrácie  $n$ , teploty  $T$ , rýchlosti  $V$  sú doplnené krivkami odvodených parametrov. Boli vypočítané dynamický tlak  $nmV^2$ , plazmový tlak  $E_i = nk(1.16T + 1.08T_e)$ , kde teplota



**Obr. 1.** Vývoj búrkovej poruchy (dolná krivka) a časové zmeny (s jednodinovým časovým rozlíšením) základných a odvodených parametrov slnečného vetra (viď text) pre magnetickú búрку 25.–27. septembra 1998.

elektrónov  $T_e = 1.5 \cdot 10^5$  K, magnetický tlak  $E_b = B^2 / 8\pi$  a parameter  $\beta$  daný pomerom  $E_t / E_b$ . Vývoj búrkovej poruchy znázorňuje index búrkovej variácie  $Dst$  (obr. 1).

Na identifikáciu štruktúrnych prvkov toku slnečnej plazmy sa využívajú ú daje s vyšším časovým rozlíšením (1-minútové, 5-minútové). Príchod rýchlej nárazovej vlny (S - Shock) spôsobenej CME sa zaregistroval o  $\sim 23:20$  UT 24. septembra, kedy rýchlosť slnečného vetra sa zvýšila zo 450 km/s do 650 km/s, magnitúda  $B$  narástla do  $\sim 40$  nT z predchádzajúcej hodnoty 14 nT, hodnota  $n$  sa zvýšila z  $8 \text{ cm}^{-3}$  do  $27 \text{ cm}^{-3}$  a  $T$  z  $3 \cdot 10^5$  do  $> 1 \cdot 10^6$  K. O  $\sim 01:00$  UT 25. septembra  $B_z$  sa znížila do  $-20$  nT a jej južná orientácia pretrvávala do  $06:00$  UT ( $B_s = -12$  nT), čo zapríčinilo vznik hlavnej fázy magnetickej búrky. Magnetický oblak (C - Cloud) mal začiatok o  $\sim 07:10$  UT 25. septembra s trvaním do  $\sim 16:30$  UT 26. septembra, kedy hodnoty  $\beta$  sú nízke (obr. 2). Zníženie  $B_z$  do  $\sim -13$  nT vyvoláva ďalšiu hlavnú fázu búrky. Za magnetickým oblakom vznikajú Alfvénové vlny s  $B_z$



**Obr. 2.** Ako obr. 1, ale s 5-min časovým rozlíšením

$\sim 4$  nT (pozorované od 18:00 UT 26. septembra a celý ďalší deň) (Tsurutani, 2002).

Uvedená búrka je zaujímavá tým, že kompresia magnetosféry pri príchode nárazovej vlny nastáva počas severnej orientácie  $B_z$  zložky. Ako je uvedené vyššie, len o  $\sim 01:00$  UT  $B_z$  postupne nadobúda južnú orientáciu. Okrem magnetogramov ďalšie merania umožňujú posúdiť procesy v magnetosfére a ionosfére. Merania v ultrafialovej časti spektra pomocou UVI (Polar Ultraviolet Imager) a vo viditeľnom svetle pomocou VIS (Visible Imaging System/Earth Camera) dokumentovali zaujímavé úkazy. Je známe, že nárast dynamického tlaku slnečného vetra spôsobuje zmenšenie vzdialenosti do magnetopauzy v smere Slnko-Zem; ako dôsledok sa znižuje aj vzdialenosť do vnútorného okraja plazmovej vrstvy v magnetosférickom chvoste a zároveň tu rastie priečný prúd. Následne musí sa zväčšiť plocha polárnej čiapky a tiež magnetický tok v tejto oblasti. Aj hlavná fáza búrky obvykle spôsobuje expandovanie polárnej čiapky, t.j. posun aurorálneho oválu smerom k rovníku.

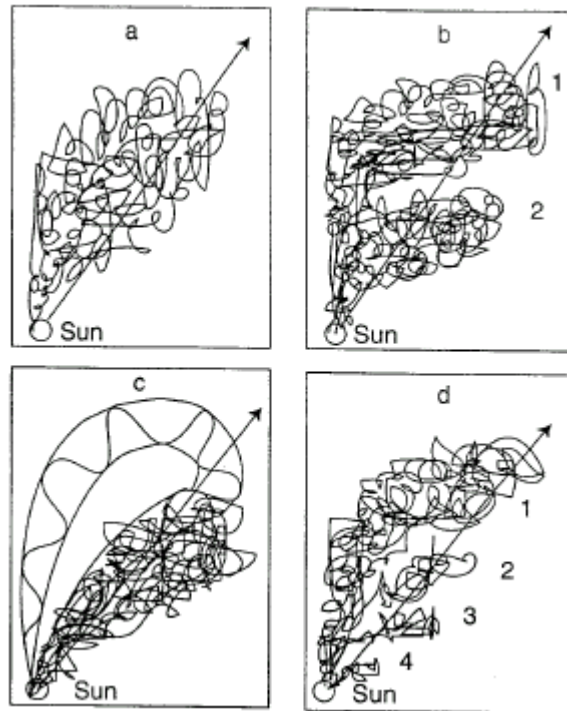
Avšak v prípade uvažovanej búrky preukázali UVI a VIS ú daje, že hneď po nárazovej vlne sa magnetický tok v polárnej čiapke začal znižovať (Clauer et al., 2001). To znamená, že v počiatočnej fáze búrky je plocha polárnej čiapky (a teda i magnetický tok) vo väčšej miere kontrolovaná orientáciou MMP, ako dynamickým tlakom, resp. termálnym tlakom. Doterajší výskum ukázal, že práve orientácia MMP je determinujúcim faktorom pre topológiu

magnetického poľa, pre procesy rekonexie na magnetopauze a pre konfiguráciu magnetosférických prúdových systémov. Analýza pozemských meraní poskytovaných dĺžkovým reťazcom geomagnetických observatórií v stredných a nízkych šírkach preukázala, že odozva magnetosféry na náhly nárast dynamického tlaku nie je rovnaká a závisí od šírky miesta pozorovania a od lokálneho času. Pri južnej orientácii MMP je odozva silnejšia v nočnom sektore a slabšia v dennom sektore, ak uvažujeme nízke a stredné šírky. Je to vďaka nárastu prúdov v tzv. oblasti 1 (Region 1) a v chvoste, kde vznikajú subúrky. Pri severnej orientácii MMP odozva je výraznejšia v dennom sektore (na poludnie), pretože porušenie je kontrolované hlavne prúdmi na magnetopauze (Russell et al., 1994). Tieto lokálne zvláštnosti magnetických porúch, ako aj dynamické procesy v polárnej čiapke poukazujú na odlišnosti interakcie slnečnej plazmy s magnetosférou pri južnej a severnej orientácii MMP počas silnej kompresie magnetosféry, kedy sa mení konfigurácia magnetických a elektrických polí v magnetosfére, a tiež nastáva rekonfigurácia konvekcie a prúdových systémov vrátane pozdĺžnych prúdov. Tieto prechodné prúdy môžu byť tak silné, že potierajú efekt kompresie magnetosféry v oblasti rovníka pre miestne poludnie, resp. poľnoc.

Pre uvedenú magnetickú búrku je vidieť, že vývoj porušenia magnetosféry síce sa inicializuje vonkajším agensom, ale tento zároveň pôsobí aj ako spúšťač mechanizmu pre reťazec fyzikálnych procesov vo vnútri magnetosféry.

#### 4. IDENTIFIKÁCIA ZDROJOV BÚRKOVEJ PORUCHY

Magnetické oblaky sú charakteristickým prejavom rýchlych výronov. Avšak pri rýchlych výronoch sa vyskytujú aj zložitejšie štruktúry, tzv. komplexné výrony (complex ejecta). Ich štruktúrne prvky sú rozmanité, ale variabilita orientácie (jej irregulárne zmeny) magnetického poľa ostáva spoločnou vlastnosťou. Ako ukázala analýza meraní plazmy a magnetického poľa (družica ACE) za približne dvojročné obdobie (február 1998 – november 1999), spadajúce do fázy zvyšujúcej sa slnečnej aktivity, sa vyskytuje 5 rýchlych výronov za rok. Celkovo z 9 výronov 4 sa identifikovali ako magnetické oblaky, t.j. 44% (Burlaga et al., 2001). Podľa doterajších výskumov priebehu cyklu slnečnej aktivity 1/3 rýchlych výronov je zastúpená magnetickými oblakmi. Ako ukázali Burlaga et al. (2001), pri zvýšenej slnečnej aktivite výskyt magnetických oblakov a komplexných výronov je porovnateľný, ale čas prechodu výronov je dlhší. Je to spojené s expanziou pri šírení alebo s väčšou perzistenciou slnečných zdrojov komplexného výronu, resp. existenciou nie jedného (obr. 3a), ale viacerých zdrojov (obr. 3b, d). Popri hypotéze o tvorbe komplexných výronov vďaka interakcii tokov slnečnej plazmy z dvoch i viacerých zdrojov je zaujímavá aj hypotéza o interakcii magnetického oblaku a CME (Obr. 3c). Uvedené (na obr. 3) hypotetické



Obr. 3. Hypotetické modely štruktúry výronov slnečnej plazmy: a) relatívne homogénna štruktúra výronu pri CME; b) komplexná štruktúra výronu pri interakcii tokov plazmy z dvoch CME; c) štruktúra pri interakcii s magnetickým oblakom; d) štruktúra pri viacerých CME rôzneho rozsahu (Burlaga et al., 2001).

modely vyžadujú svoje upresnenie na základe ďalších družicových pozorovaní a najnovších metód teoretického modelovania.

#### 5. VNÚTORNÉ ZDROJE BÚRKOVEJ PORUCHY

Od 80-tych rokov predošlého storočia, kedy sa dalo oprieť o početné družicové merania v rôznych oblastiach magnetosféry, naše predstavy o generovaní magnetickej búrky zaznamenali kvalitatívnu zmenu. Pribúdajú stále nové výsledky (príkladom je aj analýza vyššie uvedenej búrky), poukazujúce na to, že búrková porucha je výsledkom pôsobenia nielen vonkajších ale aj vnútorných zdrojov v samotnej magnetosfére. Totiž práve družicové merania (najmä AMPTE – Magnetospheric Particle Tracer Explorer, CRRES – Combined Release and Radiation Effects Satellite) ukázali, že v prstencovom prúde (PP) je populácia iónov (najmä  $O^+$ ) výrazne závislá od ionosférických zdrojov, a to najmä pri intenzívnej búrkovej poruche, čo je zrejme z prehľadu najnovších poznatkov zhrnutých v (Prigancová, 2000). Len za pokojných magnetosférických podmienok prevládajú v PP nabité častice zo slnečného vetra. Pri vzniku, ale najmä pri zintenzívnení globálnej magnetickej poruchy prísun častíc do PP sa zabezpečuje ionosférickými zdrojmi.

Štúdium únikových ionosférických tokov (out-flows) iónov poukazuje na ich závislosť od variability dynamického tlaku slnečného vetra. Preto neprekvapuje, že smerom hore orientovaný tok (upward flux) iónov  $O^+$  na dennej strane súvisí s náhlymi impulzmi (SI – sudden impul-

se), resp. s SSC (storm sudden commencement), ktoré vznikajú pri náhlej kompresii magnetosféry (Moore et al., 1999). Značný prísun ionosférickej plazmy, nazvaný Moorom et al. (1999), IME (podľa analógie s CME), t.j. ionosférický výron hmoty, následne spôsobuje intenzifikáciu PP. To sa preukázalo v prípade horeuvedenej búrky v septembri 1998.

Z tohto hľadiska je pochopiteľný tesný fyzikálny vzťah medzi subbúrkami a búrkami. Pre výskum tohto vzťahu sa vyžaduje ozrejmiť si tak časové, ako aj priestorové súvislosti pre subbúrky a búrky. Pritom pre uvažované úkazy sú časové a priestorové škály značne odlišné: trvanie globálnej búrkovej poruchy je aj niekoľko dní a trvanie subbúrkovej poruchy lokálneho charakteru môže byť kratšie ako 1 hod. Pritom proces dipolarizácie (priebežné nadobudanie dipólovej konfigurácie poľa) počas subbúrky prispieva k injekcii plazmy do vnútornej magnetosféry. Injekcia je hlbšia pri kooperovaní procesov dipolarizácie a globálnej konvekcie (Fok et al., 1999). Poznamenáme, že štatistika magnetických búrok potvrdzuje, že najintenzívnejšie búrky, na rozdiel od miernych a slabých, sú doprevádzané SI, resp. SSC. Uvedená súvislosť, ako aj zistenie odlišného zloženia plazmy vo vnútornej magnetosfére počas búrok a subbúrok poukazuje na to, že magnetická búrka sa nemôže mechanicky chápať ako postupnosť subbúrok. Transformácia subbúrkovej aktivity v búrkovú variáciu nastáva pri značnom zvýšení toku ionosférickej plazmy cez magnetosférické laloky (lobes) do plazmovej vrstvy. Odtiaľ z magnetosférického chvosta musí plazma postúpiť do vnútornej magnetosféry, aby sa PP zosilnil. Pre potvrdenie tejto predbežnej predstavy je potrebná analýza viacerých búrok na základe čo najpresnejšieho odhadu vnútornej hranice plazmovej vrstvy.

Dnes význam ionosférických zdrojov plazmy (napr.  $O^+$ , ale aj  $H^+$ ) pre intenzifikáciu PP je všeobecne uznávaný. Ich výnosnosť závisí od stupňa ionizácie ionosféry súvisiaceho s hladinou EUV slnečného žiarenia (F10.7).

Inými slovami, otázka generovania magnetickej búrky sa má zodpovedať na základe viacerých aspektov fyziky vzťahov Slnko-Zem. Pre zhrnutie výkladu zdôrazníme nasledovnú skutočnosť. Aby sme v súlade so súčasnými predstavami vystihli podstatu vzniku magnetosférickej poruchy, treba hovoriť o

kozmickej búrke (space storm). Tento pojem je adekvátnou mierou formovania poruchy v systéme Slnko-medziplanetárny priestor-magnetosféra-ionosféra a zároveň je súčasťou pojmu kozmické počasie (space weather). Preto adekvátne vysvetlenie otázky generovania magnetickej búrky podmieňuje úspešnosť predpovede kozmického počasia, ovplyvňujúceho bezporuchové fungovanie mnohých náročných systémov v technosfére, v sfére činnosti modernej spoločnosti.

## 6. ZÁVER

Zákonitosti generovania magnetickej búrky stále ostávajú predmetom dôsledného výskumu vo fyzike slnečno-zemských vzťahov. Vďaka družicovým meraniam variability rôznych prejavov slnečnej činnosti a následných zmien parametrov slnečného vetra sa identifikácia slnečných zdrojov globálnych porúch v magnetosfére stala presnejšou. Zároveň družicové merania v jednotlivých častiach magnetosféry, najmä v aurorálnej oblasti a v magnetosférickom chvoste, pomáhajú pochopiť komplexný príspevok dynamických procesov v magnetosfére pre celkovú energetiku búrkovej poruchy. Využitie vyššieho časového rozlíšenia pri monitoringu dáva cennú informáciu pre ďalšie napredovanie v tejto dôležitej oblasti výskumu.

## POĎAKOVANIE

Príspevok bol pripravený v rámci grantu VEGA 2/2009.

## LITERATÚRA

- Akasofu S.-I. and S. Chapman: 1972, *Solar-Terrestrial Physics*, Clarendon Press, Oxford.
- Burlaga L. F., R. M. Skoug, C. W. Smith, D. F. Webb, T. H. Zurbuchen, and A. Reinard: 2001, *J. Geophys. Res.*, 106, 20957.
- Clauer C. R., I. I. Alexeev, E. S. Belenkaya, and J. B. Baker: 2001, *J. Geophys. Res.*, 106, 25695.
- Chapman S. and J. Bartels: 1940, *Geomagnetism*, Oxford University Press, London.
- Fok M.-C., T.E. Moore, and D.D. Delcourt: 1999, *J. Geophys. Res.*, 104, 14557.
- Moore T.E. et al.: 1999, *Geophys. Res. Lett.*, 25, No. 15, 2339.
- Prigancová A.: 2000, In: *Zborník z 15. Celoštátneho slnečného seminára, Patince 2000*, ed. B. Lukáč, SÚ H Hurbanovo, 183.
- Russell C. T., M. Ginskey, and S. M. Petrinec: 1994, *J. Geophys. Res.*, 99, 253.
- Tsurutani B.: 2002, personal communication