

Štatistický výskum turbulentných procesov v slnečnom vetre a magnetosfére Zeme v rokoch 1996 - 2002

*I. Dorotovič, SÚH, 947 01 Hurbanovo, Observatório Astronómico UC Coimbra a UNINOVA-CRI/CA3, Caparica, Portugalsko, dorotovic@suh.sk, id@uninova.pt
Z. Vörös, Space Research Institute, 8042 Graz, Rakúsko, zoltan.voeroes@oeaw.ac.at*

Abstrakt.

V predchádzajúcej práci (Dorotovič and Vörös, 2004) sme poukázali na to, že negaussovske vlastnosti magnetickej turbulencie v slnečnom vetre a výskyt intermitentnej magnetickej turbulencie v plazmovej vrstve magnetosféry Zeme môžu byť prepojené na základe skúmania tvaru pravdepodobnostnej rozdeľovacej funkcie (Probability Distribution Function – PDF) získanej z dvojbodových rozdielov intenzity magnetického poľa. V tejto práci sme sa zamerali na podrobný štatistický výskum (na základe údajov z rokov 1996 – 2002), ktorý zahŕňa uvažovanie parametrov intermitencie v slnečnom vetre (WIND a ACE) a v kľúčových oblastiach magnetosféry Zeme (GEOTAIL), t.j. momentov vyšších rádov - skewness a kurtosis. PDF boli v tomto prípade skonštruované pre dve oddelené časové škály: $\tau = 15, 30, \dots, 120$ s, resp. $\tau = 540, 555, \dots, 645$ s. Ukazuje sa, že silnejšie prepojenie týchto dvoch plazmových prostredí sa prejavuje viac na menších časových škálach. Výsledky naznačujú tiež tendenciu pozorovať väčšiu hodnotu momentu kurtosis v magnetickom chvoste Zeme, keď tento parameter nadobúda väčšiu hodnotu aj v slnečnom vetre.

1. ÚVOD

Je všeobecne známe, že nelineárne prepojenia a turbulencia hrajú dôležitú úlohu pri skúmaní interakčných procesov medzi slnečným vetrom (SV) a magnetosférou (MS) Zeme. Je tiež zrejmé, že keď je v MHD plazme prítomná turbulencia, nemožno ju ignorovať. Nedávno publikované riešenia problematiky turbulencie v SV boli diskutované napr. v práci (Vörös a kol., 2005).

V predchádzajúcej práci (Dorotovič and Vörös, 2004), označovanej ďalej ako DV1, sme skúmali negaussovskú charakteristiku intermitentných fluktuácií magnetického poľa na základe dostupných simultánných pozorovaní v SV a v plazmovej vrstve (PV) magnetosféry Zeme. Poukázali sme na to, že vzťah negaussovskej charakteristiky magnetickej turbulencie v SV a prejavu intermitentnej magnetickej turbulencie v PV môže byť takýmto spôsobom spoľahlivo preukázaný.

Burlaga a F.-Viñas (2004) skúmali na základe údajov z roku 2003 (t.j. počas zostupnej fázy cyklu slnečnej aktivity) multiškálovú štruktúru fluktuácií rýchlostí SV a intenzity magnetického poľa vo vzdialenosti 1 AU od Slnka. Ukázali, že priebeh pravdepodobnostnej rozdeľovacej funkcie (Probability Distribution Function – PDF) fluktuácií oboch parametrov pozorovaných družicou ACE (Advanced Composition Explorer) mož-

no na škálach od 1 h až po takmer rok popísať zovšeobecneným tvarom Tsallisovej distribúcie (Tsallis, 2004). Leubner a Vörös (2005) navrhli neextenzívny entropný prístup k intermitencii SV, kde škálová závislosť PDF rozdielov charakteristických fyzikálnych veličín tohoto intermitentného turbulentného medziplanetárneho prostredia, ako napr. hustota, rýchlosť a intenzita magnetického poľa, je presne reprezentovaná neextenzívnou bikappa funkciou. Maloškálová magnetickej turbulencia pozorovaná družicami Cluster v plazmovej vrstve Zeme bola študovaná Vörösom a kol. (2004) pomocou vlnkového určovateľa, ktorý je vhodný na porovnanie multiškálového výkonu a škálovacích vlastností magnetickej fluktuácií počas rýchleho intermitentného toku plazmy (bursty bulk flow – BBF), resp. období bez tokov a období po takýchto tokoch. Teoretické skúmanie intermitencie SV s využitím teórie chaosu vykonali Rempel a kol. (2004), kde autori navrhli, že táto teória môže byť použitá na rekonštrukciu chaotických tranzientov vo fázovom priestore údajov z družíc a na výpočet priemerného trvania laminárnych fáz v intermitencii SV.

Na úplnejšie preskúmanie úlohy turbulencie v interakčných procesoch v systéme SV - MS Zeme je nevyhnutný širší štatistický výskum, ktorý zahŕňa uvažovanie parametrov intermitencie v slnečnom vetre a v kľúčových oblastiach magnetosféry Zeme. Pre gaus-

sovske procesy sú postačujúce na určenie PDF štatistické momenty 2. rádu, pre negaussovské intermitentné procesy je však nutné uvažovať momenty vyšších rádov, napr. tzv. skewness a kurtosis. To bolo cieľom nášho ďalšieho výskumu.

Dorotovič and Vörös (2005) (ďalej označované ako DV2) urobili širší štatistický výskum prepojenia SV a MS, čo zahŕňalo uvažovanie intermitentných parametrov počas 31 javov v období rokov 1996-1997 (minimum cyklu slnečnej aktivity), resp. rokov 2000-2001 (maximum cyklu slnečnej aktivity). V tejto práci prezentujeme výsledky ďalšieho rozšírenia štatistickej analýzy pridaním 32 nových javov v rokoch 1998-1999 a v roku 2002.

2. ÚDAJE O SLNEČNOM VETRE A PLAZMOVEJ VRSTVE MAGNETOSFÉRY ZEME

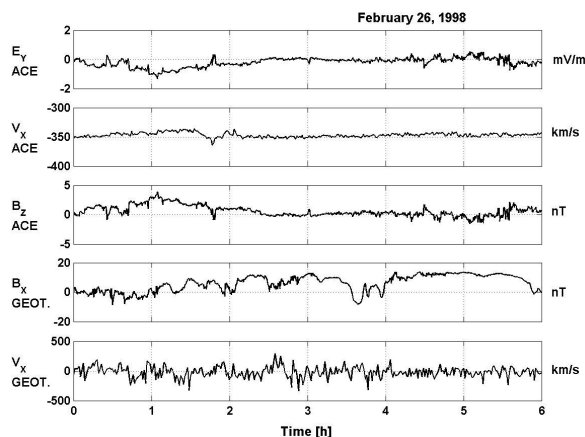
V tejto analýze boli, obdobne ako v práci DV1, použité merania rýchlosti (V_X) a magnetického poľa (B_Z) v SV vykonané družicami WIND (Ogilvie a kol., 1995; Lepping a kol., 1995) a ACE (McComas a kol., 1998; Smith a kol., 1998). Merania v SV sú porovnávané so simultánnymi meraniami rýchlosti (V_X) a magnetického poľa (B_X) z družice GEOTAIL. V tomto prípade sme však vybrali len tie javy, keď sa táto družica nachádzala v GSM polohách $X \in (-15 \div -25) R_E$, $Y \in (-10 \div 10) R_E$, a navyše, keď $|B_X| < 15$ nT, aby sme si boli istí, že sa nachádzala počas vybraných javov v PV. Na základe týchto kritérií sme identifikovali 38 vhodných javov (s dobou trvania od 6 do ~18 hodín). Všetky vstupné údaje z družíc GEOTAIL, WIND a ACE boli získané z WWW adresy [WS1] - Coordinated Data Analysis Web (CDAWeb)/NASA. Za účelom získania približne simultánných meraní z WIND/ACE a GEOTAIL sú odpovedajúce intervaly v SV posunuté v štatistickej porovnávačej analýze vždy o 1,5 h.

Priebeh dvoch ukázkových javov je zobrazený na obr. 1 b,c,d,e (26. február 1998), resp. obr. 2 b,c,d,e (7.-8. január 2002).

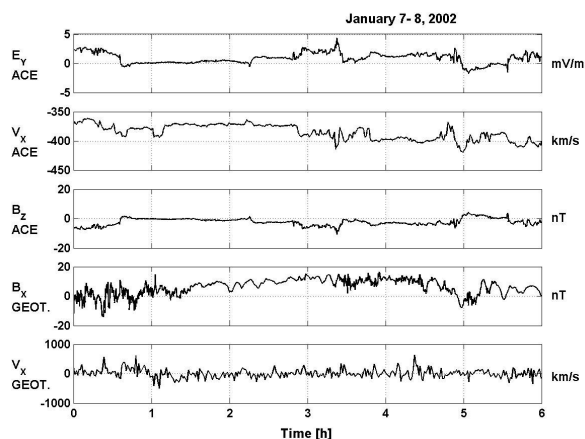
3. INTERAKČNÉ PROCESY SLNEČNÉHO VETRA A PLAZMOVEJ VRSTVY

Dlhšie javy boli rozdelené na 6 hodinové javy a takto boli použité pre ďalšiu štatistickú analýzu údaje zo 63 periód s rovnakou dĺžkou. V prvom kroku boli skonštruované znova PDF pomocou dvojbodových rozdielov definovaných vzťahom 2.1 v práci DV1:

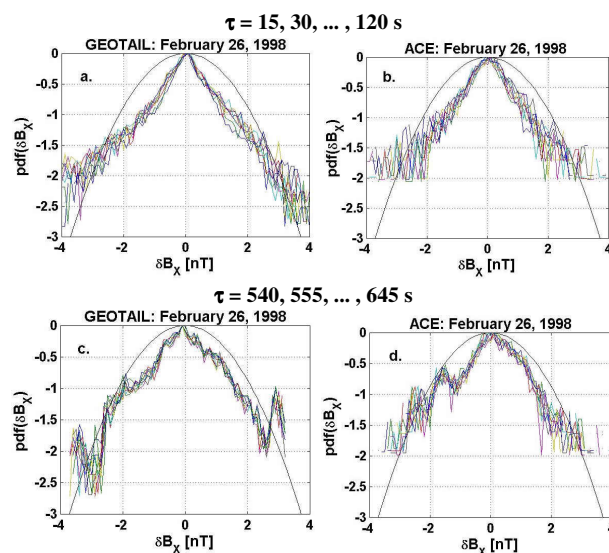
$$\delta B = B(t + \tau) - B(t) \quad (1)$$



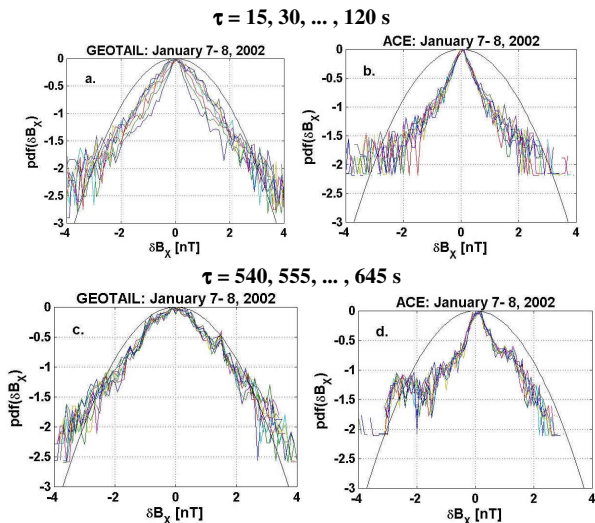
Obr. 1. Merania v slnečnom vetre (ACE) a v plazmovej vrstve (GEOTAIL) – 26. 2. 1998.



Obr. 2. Merania v slnečnom vetre (ACE) a v plazmovej vrstve (GEOTAIL) – 7.-8. 1. 2002.

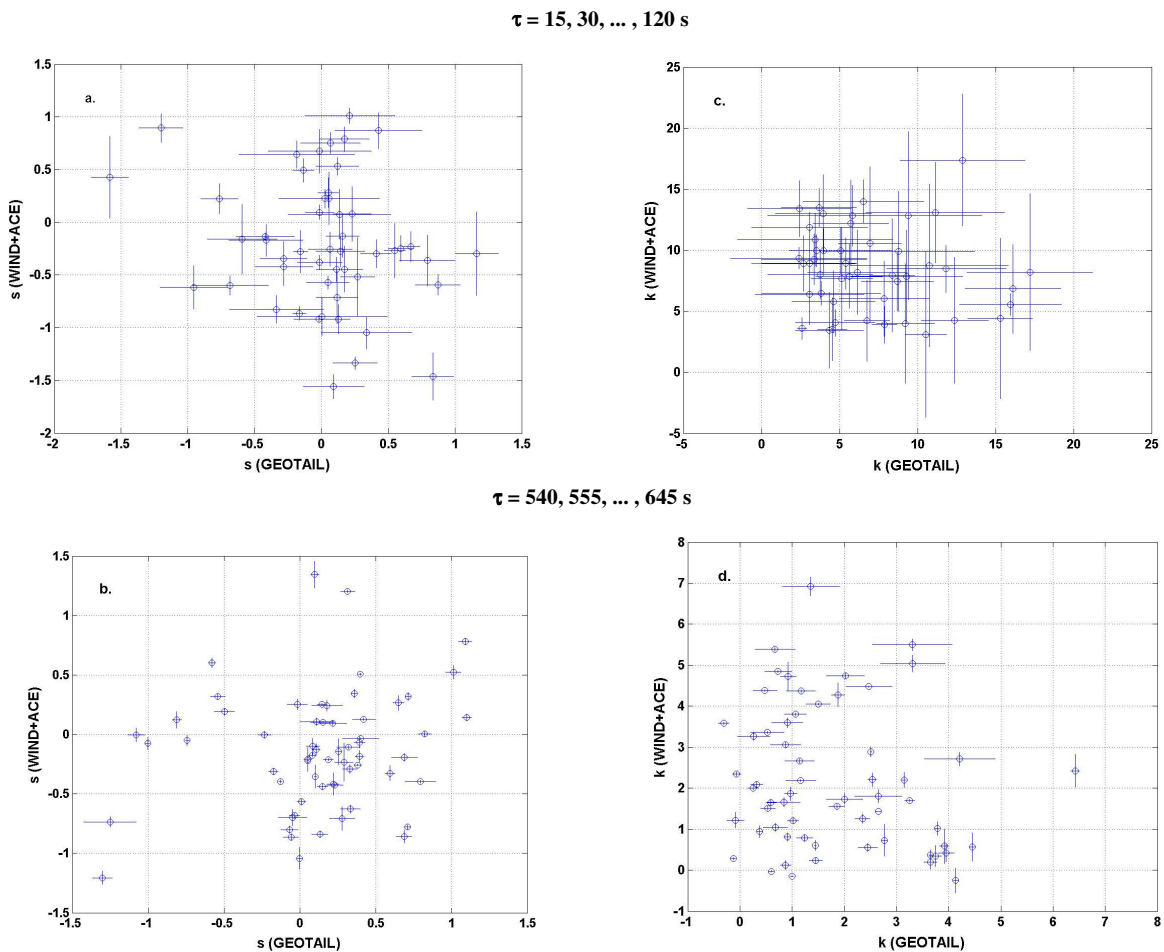


Obr. 3. Krivky PDF určené pre rozdiely (rovnica 1) X-ovej zložky magnetického poľa v plazmovej vrstve Zeme (a,c: GEOTAIL) a Z-ovej zložky magnetického poľa v slnečnom vetre (b,d: ACE) – 26.2.1998; časové škály: a,b – tau1, a c,d – tau2; gaussovské PDF sú zobrazené tenkou spojitou čiarou.

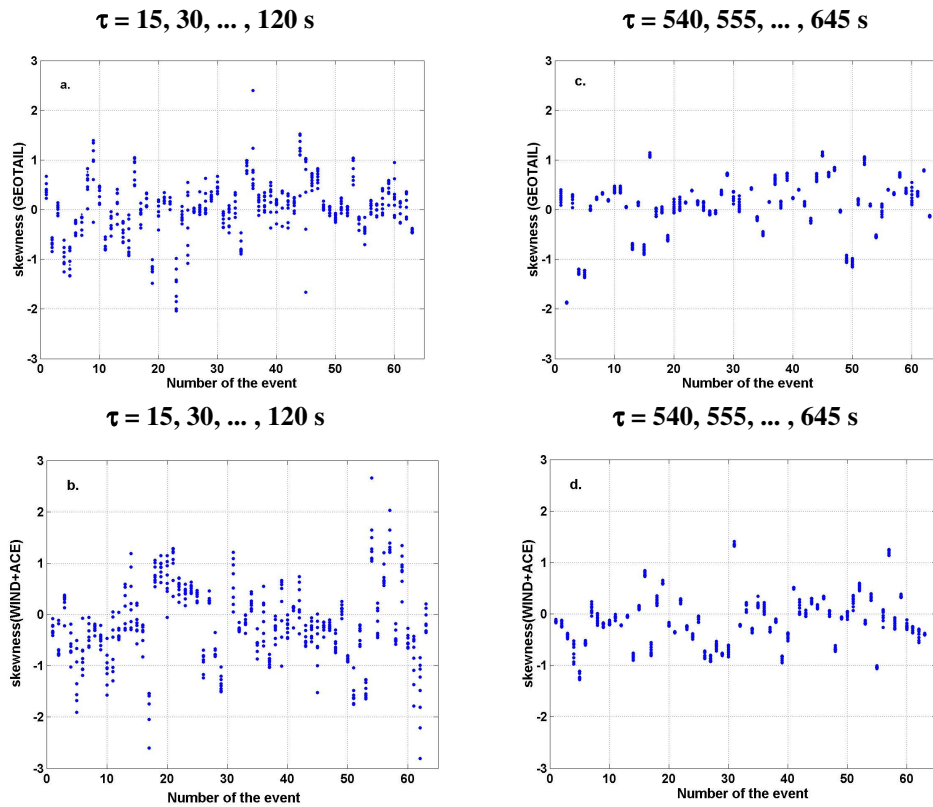


Obr. 4. Krivky PDF určené pre rozdiely (rovnica 1) X-ovej zložky magnetického poľa v plazmovej vrstve Zeme (a,c: GEOTAIL) a Z-ovej zložky magnetického poľa v slnečnom vetre (b,d: ACE) – 7.-8.1 2002; časové škály: a,b – tau1, a c,d – tau2; gaussovské PDF sú zobrazené tenkou spojitou čiarou.

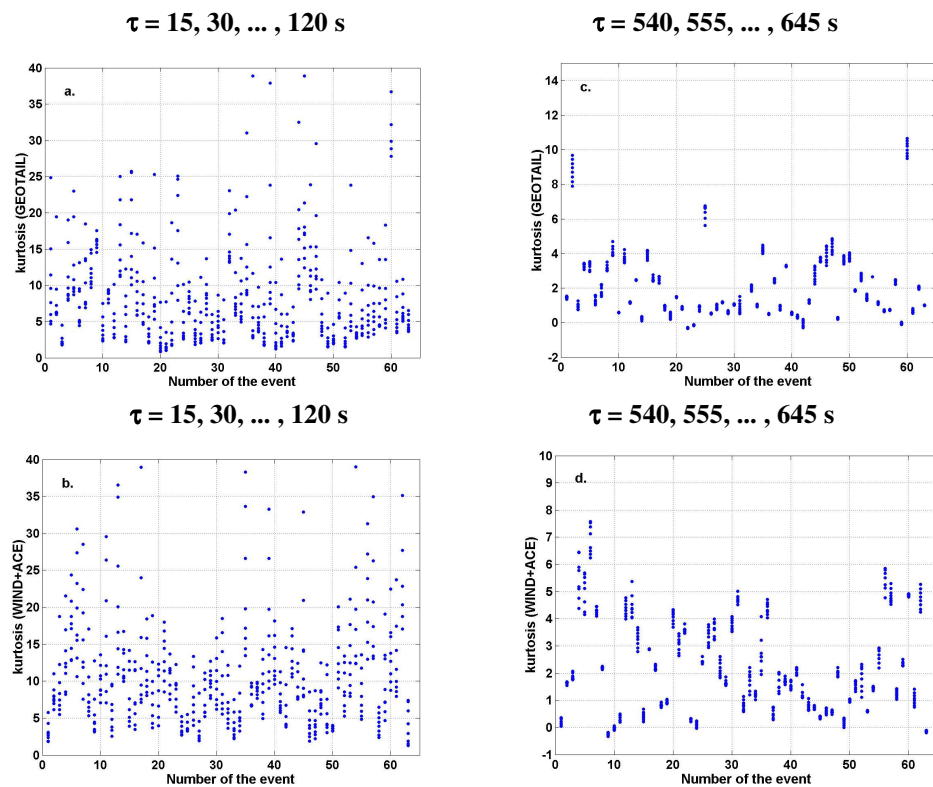
Priebeh PDF bol vypočítaný pre dve oddelené časové škály: $\tau = 15, 30, \dots, 120$ s (**tau1**), resp. $\tau = 540, 555, \dots, 645$ s (**tau2**). PDF pre dva javy zobrazené na obr. 1. a obr. 2. sú ukázané na obr. 3. a obr. 4. Hlavným cieľom tejto práce však bolo vykonanie štatistickej analýzy skewness a kurtosis určených pre jednotlivé javy. Preto boli pomocou stredných hodnôt pre jednotlivé časové škály: a,c - tau1, a b,d - tau2, pre GEOTAIL (x-ová os) versus Wind (y-ová os) [1996-1997], a pre GEOTAIL versus ACE [1998-2002] zobrazené rozptylové grafy pre skewness (s) a kurtosis (k), ktoré sú na obr. 5. Navyše je na obr. 6. a obr. 7. ilustrovaný vývoj s a k (y-ová os) ako funkcia poradového čísla jednotlivých javov (x-ová os) oddelene pre družicu GEOTAIL, WIND a ACE.



Obr. 5. Rozptylové grafy skewness (s) pre (a,b): GEOTAIL (x-ová os) versus Wind + ACE (y-ová os), a kurtosis (k) pre (c,d): GEOTAIL (x-ová os) versus Wind + ACE (y-ová os); stredné hodnoty pre časové škály: a,c - tau1, a b,d - tau2.



Obr. 6. Časový vývoj s (y -ová os) ako funkcia poradového čísla jednotlivých javov (x -ová os) oddelene pre družicu GEOTAIL, WIND+ACE.



Obr. 7. Časový vývoj k (y -ová os) ako funkcia poradového čísla jednotlivých javov (x -ová os) oddelene pre družicu GEOTAIL, WIND+ACE.

4. DISKUSIA A ZÁVERY

Rozptylové grafy na obr. 5a,b ukazujú, že skewness, ktorý sa rovná 0 pre normálne (gaussovské) rozdelenie, má tak záporné, ako aj kladné hodnoty (na malých [tau1] ale aj väčších [tau2] časových škálach), čo naznačuje, že rozdelenie hodnôt v PDF je asymetrické s chvostom natiahnutým buď k záporným resp. ku kladným hodnotám. Rozptylové grafy na obr. 5c,d ukazujú, že kurtosis, ktorý sa rovná 0 pre gaussovské rozdelenie, má (okrem niekoľkých javov na škále tau2) len kladné hodnoty, čo znamená, že rozdelenie hodnôt v PDF je prevažne leptokurtické. Na malých časových škálach (tau1) sa body v rozptylovom grafe (obr. 5c) zoskupujú okolo bodu [8,8] a toto naznačuje, že rozdelenia sú značne leptokurtické tak v SV ako aj v magnetickom chvoste Zeme. Navyše, jet u tendencia pozorovať väčšie hodnoty kurtosis v chvoste keď odpovedajúci moment kurtosis je väčší aj v SV. To naznačuje možnú prítomnosť mechanizmu prepojenia, ktorý je silnejší, keď je v SV prítomná turbulencia. Na väčších škálach (tau2) sa body rozptylového grafu (obr. 5d) zoskupujú okolo bodu [2,2], čo naopak naznačuje, že tvar PDF je prevažne takmer gaussovský (napr. na obr. 4c).

Obr. 6 a obr. 7 ukazujú, že je niekoľko javov kde sa hodnoty s alebo k zoskupujú v malom rozsahu honôt (platí to najmä v prípade väčších časových škál tau2), čo naznačuje, že tvar PDF je veľmi podobný pre všetkých 8 časových škál (pre všetky hodnoty τ). Ak uvažujeme zvlášť obdobie minima 23. cyklu slnečnej aktivity (1996-1997) a obdobie jeho maxima (2000-2001) (ako to bolo urobené v práci DV2), možno vidieť z obr. 5a,b v práci DV2, že skewness pre PDF z údajov WIND+ACE (z-ová os) má prevažne záporné hodnoty v období minima a záporné aj kladné hodnoty v období maxima. Naopak, hodnoty skewness pre PDF z údajov GEOTAIL (x-ová os) sú záporné aj kladné. Toto môže naznačovať závislosť interakčných procesov SV a PV od cyklu slnečnej aktivity. Je však nutné poznamenať, že počet uvažovaných javov (9 v období minima a 22 v období maxima) nie je štatisticky veľmi významný. V tejto práci obr. 5a,b ukazujú, že hodnoty skewness pre PDF z údajov GEOTAIL (x-ová os) nadobúdajú záporné i kladné hodnoty. Rozdelenie hodnôt kurtosis je približne rovnaké v období minima, resp. maxima (obr. 5c,d v práci DV2).

Na základe analýzy vykonanej v tejto práci sme našli, že silnejšie prepojenie dvoch skúmaných plazmových prostredí sa prejavuje na nižších časových škálach (tau1). Je však potrebný podrobnejší štatistický výskum, vrátane fyzikálnych interpretácií interakčných procesov

SV a PV, na spoľahlivejšie potvrdenie našich predpokladov. Rozptylové grafy však nedávajú jasné vysvetlenie ako môže byť štatistika turbulencie v slnečnom vetre a v zemskom magnetickom chvoste fyzikálne prepojená. Preto musia byť štatistické výskumy nahradené podrobnejšou analýzou konkrétnych vybraných javov (case studies), v rámci ktorých môžu byť priamo skúmané zvláštnosti špecifických podmienok v oboch oblastiach. Toto všetko bude predmetom nášho ďalšieho výskumu.

Pod'akovanie

Autori sú povďační N. Nessovi a D.J. McComasovi za poskytnutie údajov zo satelitu ACE, R. Leppingovi za údaje z družice WIND, ako aj S. Kokubunovi a L. Frankovi za údaje z družice GEOTAIL. Táto práca bola podporená Fundação para a Ciência e Tecnologia, Lisboa, Portugalsko (grant SFRH/BPD/14628/2003 a čiastočne POCTI-SFA-2-675) (I.D.).

LITERATÚRA

- Burlaga, L.F., and F. Viñas, A.: 2004, Multiscale structure of the magnetic field and speed at 1 AU during the declining phase of solar cycle 23 described by a generalized Tsallis probability distribution function, *J. Geophys. Res.*, **109**, A12107, DOI:10.1029/2004JA010763.
- Dorotovič, I., and Vörös, Z.: 2004, Examining the role of turbulence in the solar wind – magnetosphere interaction processes, referát, in *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, Proceedings IAU Symposium No. 223*, eds. A.V. Stepanov, E.E. Benevolenskaya and A.G. Kosovichev, 537, DOI: 10.1017/S1743921304006763.
- Dorotovič, I., and Vörös, Z.: 2005, On the interconnection of the magnetic turbulence in the solar wind and the Earth's plasma sheet, poster in European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Vienna, Austria, 24 – 29 April 2005.
- Lepping, R. P., et al.: 1995, in *The Global Geospace Mission*, ed. by C. T. Russell, Kluwer, 207.
- Leubner, M. P. and Vörös, Z.: 2005, A nonextensive entropy approach to solar wind intermittency, *Astrophys. Journal*, **618**, 547.
- McComas, D. J., Bame, S. J., Barker, P., Feldman, W. C., Phillips, J. L., Riley, P., Griffée, J. W.: 1998, *Space Sci. Rev.*, **86**, 563.
- Ogilvie K. W., et al.: 1995, *Space Sci. Rev.*, **71**, 55.
- Smith, C. W., L'Heureux, J. L., Ness, N.F., Acuna, M. H., Burlaga, L. F., and Scheifele, J.: 1998, *Space Sci. Rev.*, **86**, 613.
- Vörös, Z., Leubner, M. P., and Baumjohann, W.: 2006, Cross-scale coupling induced intermittency near interplanetary shocks, *J. Geophys. Res.*, **111**, A02102
WS1: <http://rumba.gsfc.nasa.gov/cdaweb/>