

Porušenosť magnetosféry ako súčasť extrémneho kozmického počasia

Alina Prigancová, Geofyzikálny ústav SAV, Bratislava

Abstrakt

Pojmom kozmického počasia vyjadrujeme súvislý reťazec fyzikálnych procesov v systéme Slnko-Zem. Extrémne kozmické počasia zapríčinené geoeфекtívnymi procesmi v slnečnej atmosfére a medziplanetárnom priestore sa na Zemi prejavuje globálnymi (ale aj lokálnymi) poruchami s nežiaducim dopadom na sféru ľudskej činnosti. V ostatnom čase analýza tvorby a predpovede kozmického počasia sa stáva stredobodom záujmu vedeckej verejnosti. Významný pokrok v chápaní tejto problematiky môže len napredovať v rámci plánovaných medzinárodných programov (napr. IHY, CAWSES a ďalšie). Predkladaný prehľad najnovších výsledkov vedeckých aktivít a zámernov pre ďalší výskum v tejto oblasti približuje súčasné chápanie porušenosti magnetosféry ako súčasti extrémneho kozmického počasia.

1. ÚVOD

Jedným z prevratných dôsledkov kozmického výskumu, naštartovaného v druhej polovici minulého storočia, je ľudstvom uvedomená potreba kvantifikácie a následnej predpovede efektov interakcie slnečnej plazmy a medziplanetárneho magnetického poľa (MMP) s magnetosférou Zeme. Po cieleňých medzinárodných programoch štúdia zdrojov porušeného slnečného vetra, analýzy ich významu pre formovanie extrémnych medziplanetárnych podmienok, vysvetlenia odozvy magnetosféry na slnečnú variabilitu sa potenciál nášho poznania v oblasti heliofyziky a kozmickej geofyziky významne zvýšil. Zároveň na prahu nového tisícročia vystali vo všetkej naliehavosti nové problémy, ktorých riešenie sa bude realizovať v rámci nových grandióznych výskumných projektov, ako napríklad IHY (International Heliophysical Year), CAWSES (Climate and Weather in the Sun-Earth System), LWS (Live With a Star) a ďalších. Medzinárodné úsilie sa sústreďuje na dôsledné štúdium extrémneho kozmického počasia, ktorého nežiaduci dopad na sféru ľudskej činnosti je obzvlášť zreteľný vo vysoko vyspelej spoločnosti (napr. telekomunikácia, navigácia, kozmická technika).

Predkladaný prehľad porušenosti magnetosféry ako súčasti extrémneho kozmického počasia približuje niektoré zaujímavé výsledky na začiatku 21. storočia, prispievajúce k úspešnej predpovedi porušených podmienok v systéme Slnko-Zem.

2. ZDROJE EXTRÉMNEHO KOZMICKÉHO POČASIA

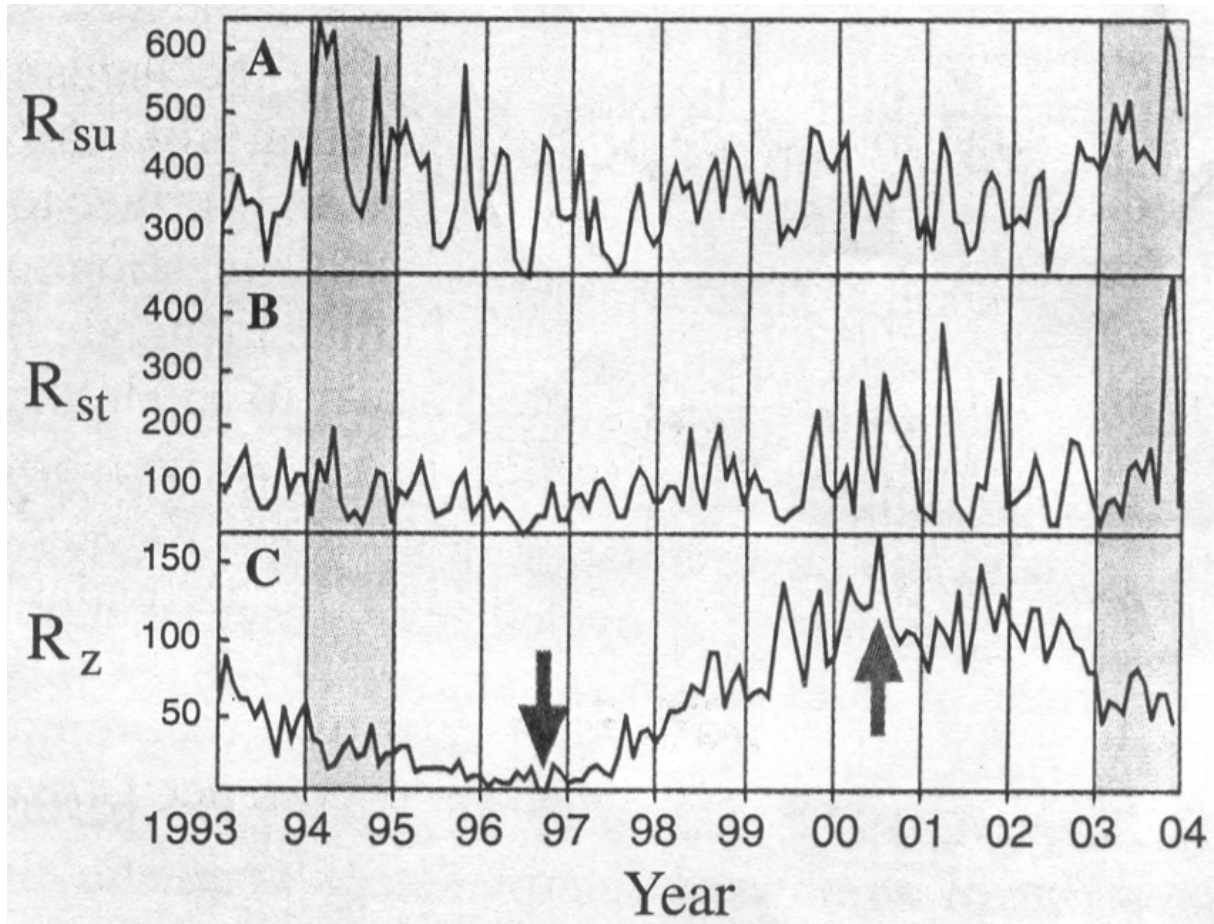
V minulosti viaceré štúdie boli venované identifikácii slnečných zdrojov a určeniu geoeфекtívnych parametrov zmagnetizovanej slnečnej plazmy (napr. Kamide and Slavin 1986). Obvykle sa pre analýzu vyberajú intervaly vzniku magnetosférických subbúrok (aurorál-

na aktivita) a magnetických búrok (globálna aktivita). V prvom prípade porušenosť magnetosféry sa charakterizuje indexom $AE = AU - AL$, kde indexy AU a AL vyjadrujú magnetický efekt ekvivalentných ionosférických prúdov známych ako východný a západný elektrožet. Pri $AE \approx 1000$ nT hovoríme o intenzívnych subbúrkach. Globálnu porušenosť magnetosféry, ako je dobre známe, charakterizuje index Dst. Pri $Dst < -100$ nT hovoríme o intenzívnych magnetických búrkach.

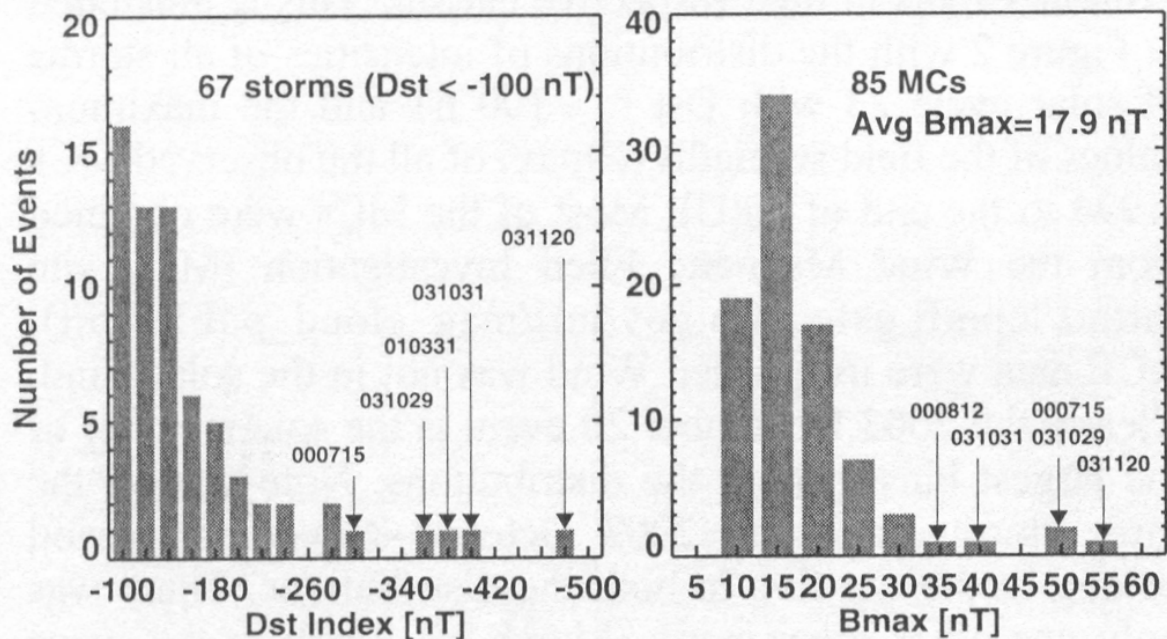
2.1. Zdroje subbúrok

Vznik subbúrok je dôsledkom prenosu energie slnečného vetra do magnetosféry a následne do aurorálnej ionosféry. Vďaka meniacej sa intenzite a variabilného časovo-priestorového rozloženia aurorálnych elektrožetov (východného a západného) a tzv. polárneho elektrožetu (PE) vznikajú lokálne poruchy vo vysokošírrovej oblasti [Prigancová a Feldstein, 2006 a tam citované články].

Výsledky analýzy subbúrok v priebehu 11-ročného slnečného cyklu (celkom sa analýze podrobilo viac ako 5000 subbúrok) za roky 1993-2003 poukazujú na to, že frekvencia ich výskytu, intenzita, procesy vyspávania častíc, ako aj Jouleov ohrev v aurorálnej oblasti je modulovaný výskytom vysokorýchlostných tokov slnečnej plazmy (Transkanen et. al., 2005). Na obr. 1 je vidieť, že subbúrková aktivita (číselne je charakterizovaná R_{su} hodnotou) dominuje v rokoch 1994 a 2003, kedy vysokorýchlostný slnečný vietor (>700 km/s) prevláda. Tieto podmienky sú charakteristické pre fázy znižujúcej sa slnečnej aktivity (3 – 4 roky po maxime 11-ročného cyklu). Práve v tejto fáze cyklu koronálne diery CH (coronal holes) ako zdroje vysokorýchlostného slnečného vetra sa rozširujú aj do prirovníkových oblastí slnečného disku, čím sa uľahčuje stretnutie rýchlych tokov slnečnej plazmy so Zemou. Závislosť subbúrkovej aktivity od fázy maxima sa neprejavuje, ale pre búrkovú aktivitu súvislosť s maximom cyklu je názornejšia, ako je vidieť na obr. 1.



Obr. 1. Priebeh mesačných priemerov R_{su} ako miery subbúrkovej aktivity (A), R_{st} ako miery búrkovej aktivity (B) a relatívneho počtu slnečných škvŕn R_z (C) za obdobie 1993–2003. Roky maximálneho výskytu vysokorýchlostného slnečného vetra sú vyznačené tienením. Šípky označujú minimum a maximum 11-ročného slnečného cyklu [Tanskanen et al., 2005].



Obr. 2. Výskyt intenzívnych búrok v období 1996-2003 (vľavo) a MC v období dostupnosti WIND údajov 1994-2003 (vpravo) podľa hodnoty D_{st} (vľavo) a hodnoty B_{max} (vpravo). Najintenzívnejšia búrka zo dňa 20. 11. 2003 je označená spolu s ďalšími mohutnými búrkami dátumom vo forme RMMDD (3 búrky sú z obdobia október-november 2003 [Gopalswamy et al., 2005b]).

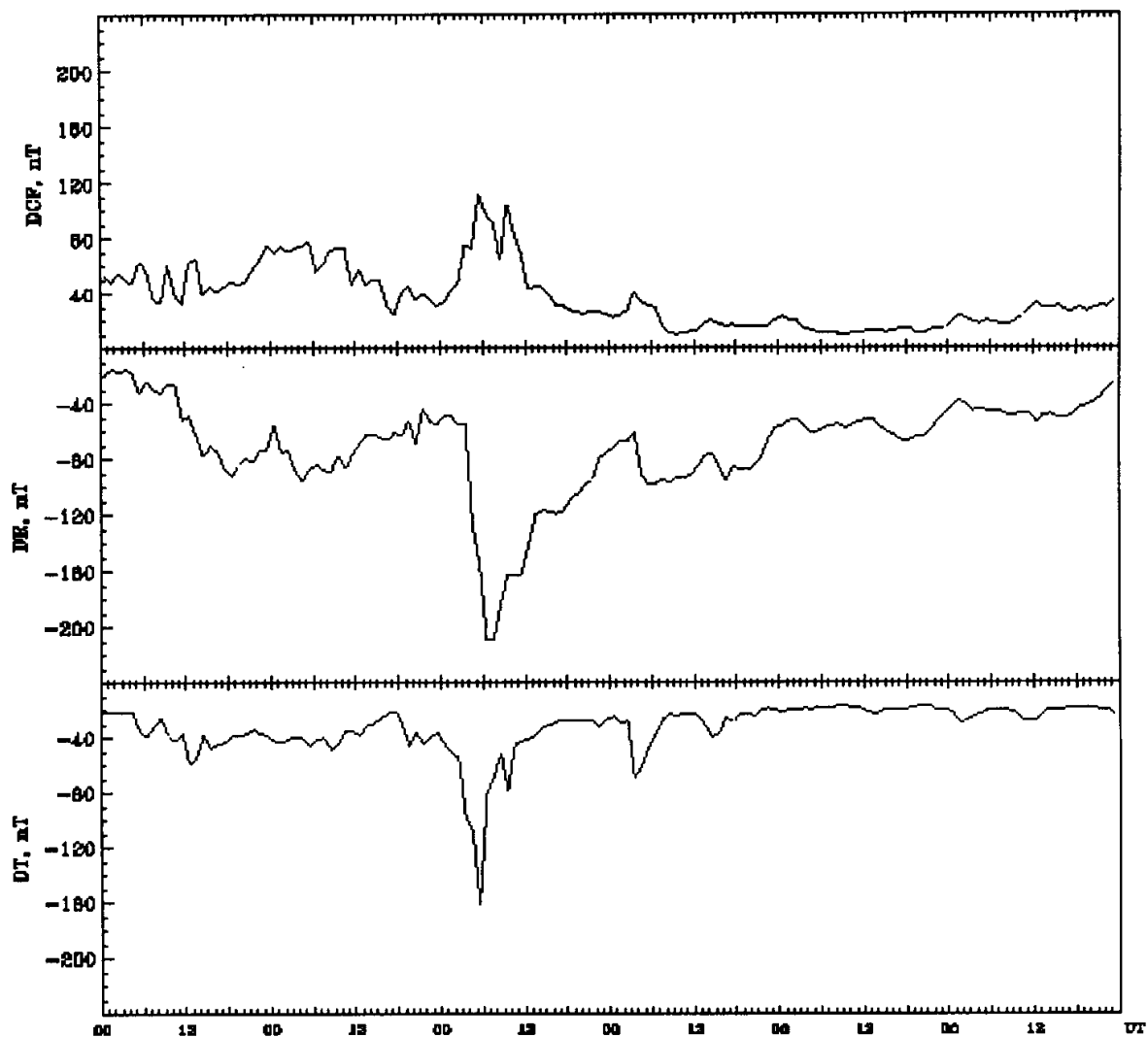
2.2. Zdroje magnetických búrok

Problematika zdrojov magnetických búrok je predmetom výskumu po viaceré desaťročia. Štatisticky sa zistila odlišnosť zdrojov pre búrky rôznej intenzity. Slabšie a mierne búrky sa najčastejšie spájajú s vysokorýchlostným slnečným vetrom z koronálnych dier (napr. tzv. rekurentné búrky). Je všeobecne známa súvislosť koronálnych výronov CME (Coronal Mass Ejection), vyznačujúcich sa formovaním medziplanetárnych magnetických oblakov MC (Magnetic Cloud) s výskytom magnetických búrok [Gosling et al., 1990]. Pritom otázka geoeфекtívnosti týchto zdrojov ešte nie je uspokojivo zodpovedaná a vyžaduje výskum evolúcie medziplanetárnych štruktúr pri ich šírení k Zemi [Gopalswamy et al., 2005a].

Magnetické búrky na zostupnej fáze 23 slnečného cyklu poskytli nové údaje pre pochopenie ich zdrojov. Najintenzívnejšia búrka 23. cyklu dňa 20.11.2003 s $D_{st} = -472$ nT sa viaže na CME v aktívnej oblasti AO0501.

Ako ukazujú družicové merania (ACE), v zodpovedajúcom MC bolo magnetické pole značne intenzívne (~ 56 nT) s prevládajúcim južným orientáciou a rýchlosť slnečného vetra pri náraze na magnetosféru bola ~ 700 km/s (v blízkosti Slnka dosahovala 1660 km/s). Na mimoriadnosť intenzity tejto búrkovej poruchy ukazuje jej porovnanie s intenzívnymi búrkami v 23. cykle (celkovo 67 búrok s $D_{st} < -100$ nT) a zodpovedajúcich MC s intenzívnymi magnetickými poľami (85 MC s priemerným $B_{max} = 17.9$ nT). Ako vidieť na obr. 2, intenzita búrky 20.11.2003 je podľa všetkého dôsledkom najintenzívnejšieho magnetického poľa B_{max} s orientáciou fakticky opačnou voči planetárnemu poľu v subsolárnom bode (podmienka výraznej rekonexie, ktorá vyúsťuje do následného vysokogeoefektívneho účinku). Pri posúdení geoeфекtívnosti CME (resp. MC) je dôležitá komplexná analýza slnečných údajov z hľadiska ďalších ukazovateľov aktivity v časovej a priestorovej blízkosti daného CME (výskyt filamentov, erupcií, röntgenového

2-7 May 1998



Obr. 3. Porovnanie magnetických efektov magnetosférických prúdov na magnetopauze (DCF), prstencového prúdu (DR) a prúdu v magnetosférickom chvoste (DT) pre magnetickú búrku v dňoch 2.-7.5.1998.

žiarenia atď.), čo vyžaduje dôkladné spracovanie meraní pomocou EIT/SOHO (Extreme-UV-Imaging Telescope), LASCO/SOHO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph), ako aj H-alpha meraní d'.

Intenzívne búrky sa tiež nezriedka (hlavne vo fáze spadu slnečného cyklu), zapríčiňujú korotujúcimi oblasťami interakcie CIR (Corotating Interaction Region) formujúcimi sa pri pôsobení vysokorýchlostného slnečného vetra na pozadí nízkorýchlostného prúdenia plazmy.

Pre vývoj búrky sú dôležité procesy energizácie prstencového prúdu ako aj dynamika radiačných pásov [napr. Miyoshi and Kataoka, 2005], ktorá je odlišná pre CME-generované, CIR-generované a superbúrky. Napr. superbúrky, pre ktoré potenciál polárnej čiapky dosahuje aj ~170 kV v porovnaní s ~120 kV pre CME- a CIR-generované búrky. Vďaka zvýšenému výskytu Alfvénových vln v prípade CIR-generovaných búrok, krátke opakované intervaly MMP južnej orientácie sa vyskytujú aj v návratovej fáze, ktorá sa vďaka tomu stáva pozvoľnejšou a dlhšou.

Rekonštrukcia premenného magnetosférického poľa pomocou tzv. paraboloidného modelu [Feldstein et al., 2005] poukazuje aj na potrebu započítania príspevku nielen prstencového prúdu, ale aj prúdov na magnetopauze a v magnetosférickom chvoste [Prigancová, Feldstein, 2003]. Magnetický efekt týchto prúdov je porovnateľný (Obr. 3). Zohľadnenie tohto faktu vedie k ďalšiemu upresneniu modelovania magnetickej búrky.

3. PREDPOVEĎ ÚROVNE PORUŠENOSTI MAGNETOSFÉRY AKO PREJAVU NEPRIAZNIVÉHO KOZMICKÉHO POČASIA

3.1. D_{st} index

D_{st} index je kvantitatívnou mierou nepriaznivého kozmického počasia pri výskyte magnetických búrok. Ako ukazujú výsledky analýzy magnetických búrok s $D_{st} < -85$ nT (celkom 64 búrok za obdobie 1997-2002) časový posun vzniku poruchy v magnetosfére voči vzniku geoeфекtívneho signálu v slnečnej plazme (napr. kulminovanie južne orientovaného MMP podľa meraní družice ACE) je 0-2 hodiny, [Gonzalez and Ecker, 2005].

Priemerné maximálne hodnoty $|D_{st}|$ a $|B_s|$ pre skúmané búrky sú:

$$|D_{st}| = 134.6 \pm 55.8 \text{ nT}$$

$$|B_s| = 15.6 \pm 6.6 \text{ nT}$$

V čase kulminácie D_{st} dosahuje B_s len 85 % (-11.9 \pm 7.1 nT) svojej maximálnej hodnoty. Pri kulminujúcom B_s má už D_{st} hodnotu v štádiu tlmenia (-112.5 \pm 58.6 nT). Pritom integrálna hodnota elektrického poľa $E_y = VB$ v priebehu celej hlavnej fázy búrky, resp. do okamihu maximálnej hodnoty $|B_s|$ je 39.8 mV/m-hr,

resp. 26.6 mV/m-hr. To značí, že dodatočne k 2/3 maximálnej E_y sa vyžaduje ešte 1/3, aby globálna porucha kulminovala [Gonzalez and Ecker, 2005]. Pre predpoveď nepriaznivého kozmického počasia je toto zistenie užitočné.

3.2. K_p index

K_p index je najzaužívanejšou mierou úrovne porušenia magnetosféry. Využitie časového radu K_p (nepretržitý od r. 1932) pomáha identifikovať zákonitosti procesov interakcie slnečnej a magnetosférickej plazmy (napr. dynamika plazmovej vrstvy a magnetosférického chvosta ako celku, dynamika vnútornej magnetosféry, injekcia plazmy do ionosféry). Využitie K_p indexu pre interdisciplinárne výskumy a pre praktické účely (potreby v oblasti telekomunikácie, bezpečnosti kozmických misí a d') je všeobecne známe (napr. Prigancová et al., 1989). Je vidieť, že pre predpoveď K_p je dostatočne široký dopyt. Sú známe viaceré modely na rekonštrukciu úrovne geomagnetickej aktivity. V ostatnom čase boli navrhnuté prístupy s využitím neurónových sietí (napr. Valach et al., 2006, resp. Valach et al., vid' tento zborník).

3.3. aa index

Časový rad aa indexu je najdlhší a tým umožňuje posúdiť charakter kozmického počasia v minulosti. Pri výpočte aa indexu sa pôvodne využívali merania z dvoch približne antipolárnych observatórií, a to Greenwich (1868-1925) a Melbourne (1868-1915). Neskôr sa používali merania z ďalších vybraných observatórií, a to Abinger (1926-1956) a Hartland (od r. 1957) v severnej pologuli i Toolangi (1920-1979) a Canberra (od r. 1980) v južnej pologuli. Prísne kalibračné kritériá a minimalizácia chýb korekciami lokálnych efektov pri uvedenom striedaní observatórií zaručujú homogénnosť časového radu aa indexu. Od začiatku minulého storočia tento index vykazuje trend nárastu. Prítomnosť tohto trendu, zrejme z hodnôt oficiálneho aa indexu [Clilverd et al., 2005], sa potvrdila aj rekonštrukciou aa indexu na základe meraní z observatórií Sodankylä a Niemegk. Aj toto nepriame potvrdenie trendu podporuje predpoklad, že slnečné koronálne magnetické pole sa podstatne zosilnilo za posledných 100 rokov. Inými slovami, dlhodobé zmeny kozmického počasia sú reálne. Cyklické zmeny kozmického počasia sú zreteľné pri porovnaní jednotlivých fáz cyklu, najmä jeho minima a maxima. Nadchádzajúci 24. cyklus slnečnej aktivity bude podľa prognózy jedným zo slabších [Schatten, 2005]. Štúdium slnečno-zemských vzťahov pri takýchto špecifických, podľa odhadov, podmienkach otvára perspektívu zistenia nových súvislostí tvorby kozmického počasia.

4. ZAMERANIE ĎALŠIEHO VÝSKUMU

Zameranie ďalšieho výskumu je zrejme z nastolených pre nastávajúce obdobie projektov.

Najdôležitejšími okruhmi problémov sú:

- a) otázky vzniku zdrojov aktivity na Slnku a ich geoeфекtívnosť (program IHY, vid' www.ihy2007.org)
- b) problematika vplyvu variability Slnka na evolúciu klímy (CAWSES, vid' www.bu.edu/cawses/)
- c) význam kozmického počasia v našom živote (LWS vid' www.lws.gsfc.nasa.gov).

Pri ich realizácii sa počíta so zdokonalením pozemských (napr. virtual observatories) a družicových (napr. sentinels) meraní, ako aj s modernými prístupmi spracovania databáz pozorovaní (napr. EGY – Electronic Geophysical Year, vid' www.egy.org).

5. ZÁVER

Problematika porušenia magnetosféry ako súčasti extrémneho kozmického počasia je pre technologicky napredujúcu spoločnosť stále atraktívnejšou.

Vedecké úsilie sa v súčasnosti zameriava na nasledovné problémy:

- fyzikálna podstata variability Slnka (evolúcia erupčnej činnosti, vznik a šírenie geoeфекtívneho procesu vo vnútornej heliosfére, akcelerácia energetických častíc) a následných efektov
- modelovanie a simulácia procesov interakcie (vznik magnetosférickej poruchy)
- dynamika systému xionosféra-termosféra
- prognóza a predpoveď efektov kozmického počasia.

Ďalší pokrok v tejto oblasti je základom riešenia teoretických problémov (napr. globálne klimatické zmeny) a zabezpečenia praktických úloh každodenného života high-tech spoločnosti (napr. komunikácia, navigácia, radary, bezpečnosť energetických sietí, anomálie elektroniky (najmä družicovej), erózia družicových dráh, radiačná bezpečnosť).

Pod'akovanie

Vyžiadaný prehľadový referát bol vypracovaný v rámci grantu VEGA 2/5121.

LITERATÚRA

- Clilverd M. A. et al., 2005: Reconstructing the long-term aa-index. *J. Geophys. Res.*, 110, A07205, doi: 10.1029/2004JA010762.
- Feldstein, Ya. I., B.T. Tsurutani, A. Prigancová et al., 2003: The magnetospheric response to a two-stream solar wind interval during solar maximum: a self-consistent magnetospheric model. In ed. Wilson, A.: *Proceedings of the ISCS Symposium 2003 'Solar Variability as an Input to the Earth's Environment', held on June 23-28, 2003, at Tatranska Lomnica, Slovakia, ESA SP-535*. ESA Publication Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- Feldstein Y., A.E. Levitin, J.U. Kozyra, B.T. Tsurutani, A. Prigancová et al., 2005: Self-consistent modeling of the large-scale distortions in the geomagnetic field during the 24-27 September 1998 major magnetic storm. *J. Geophys. Res.*, 110, A11214, doi:10.1029/2004JA010584.
- Gonzalez E. D. and E. Ecker, 2005: A study on the peak D_{st} and peak negative B_z relationship during intense geomagnetic storms. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L18/03, doi:10.1029/2005 GL023486.
- Gopalswamy N. et al., 2005a: Solar source of the largest geomagnetic storm of cycle 23. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12809, doi: 10.1029/2004 GL021639.
- Gopalswamy N. et al., 2005b: Introduction to violent Sun-Earth connection events of October–November 2003. *J. Geophys. Res.* 110, A09500, doi: 10.1029/2005YA011268.
- Kamide Y. and J. A. Slavin (Eds), 1986: *Solar Wind-Magnetosphere Coupling*, TERRAPUS, Tokyo.
- Lepping R. P. et al., 1990: Magnetic field structure of interplanetary magnetic clouds at 1AU. *J. Geophys. Res.*, 95, 11957.
- Miyoshi Y. and R. Kataoka, 2005: Ring current ions and radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21105, doi: 10.1029/2005GL02459.
- Prigancová A., Ya. I. Feldstein, 2005: Prúdové systémy počas globálnej poruchy magnetosféry. Zb. 17. Celoštátneho slnečného seminára, SÚH, Hurbanovo, 175–178.
- Prigancová A., Y. Feldstein, 2006: Prúdy v aurorálnej oblasti a ich dynamika. Prednáška na konferencii *Človek ve svém kosmickém a pozemském prostředí*, Úpice, 2006.
- Prigancová A. et al., 1989: Faktor slnečnej a geomagnetickej a geomagnetickej aktivity v životnom prostredí, GFÚ SAV, Bratislava.
- Schatten K., 2005: Fair space weather for solar cycle 24. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21106, doi: 10.1029/2005GL024363.
- Tanskanen E. I. et al., 2005: Magnetospheric substorms are strongly modulated by interplanetary high-speed streams. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16104, doi: 10.1029/2005 GL023318.
- Valach A., et al., 2006: Kozmické počasia a predpoveď geomagnetickej aktivity. Prednáška na konferencii „Človek ve svém kosmickém a pozemském prostředí“, Úpice.
- F. Valach, A. Prigancová, M. Váczyová, 2006: NS-model pre predpoveď geomagnetických búrok. 18. celoštátny slnečný seminár s medzinárodnou účasťou, Zb. 18. Celoštátneho slnečného seminára, SÚH, Hurbanovo.