

# Předpovědi geomagnetické aktivity v době kolem slunečního maxima a v době sestupné fáze slunečního cyklu

Josef Bochníček, Geofyzikální ústav AV ČR, Praha, jboch @ig.cas.cz

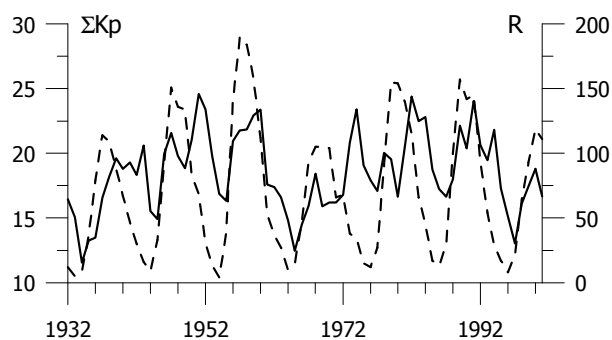
Pavel Hejda, Geofyzikální ústav AV ČR, Praha, ph @ig.cas.cz

## Abstrakt

Porovnání geomagnetických poruch vyskytovaných se v době kolem slunečního minima s geomagnetickými poruchami vyskytujícími se v době kolem slunečního maxima ukázalo, že jejich četnost se v obou extrémech slunečního cyklu nelišila o více než ~ 20%. Výrazné rozdíly mezi oběma skupinami však byly shledány v mohutnosti a časových průbězích poruch. Tyto rozdíly byly zapříčiněny odlišnými projevy sluneční činnosti v době minima a maxima. V minimu byly převažujícím zdrojem geomagnetických poruch proudy vysokorychlostního slunečního větru vycházející z takových koronálních děr, které se na snímcích v měkkém rentgenově záření jeví jako souvislé oblasti velmi nízké intenzity otevřené směrem ke slunečnímu pólu přikloněnému směrem k Zemi. V maximu byly převažujícím zdrojem geomagnetických poruch sporadicky se vyskytující jevy jako CME, eruptivní protuberance a protonové erupce spojené s rázovou vlnou. Těmto základním faktům byl podřízen výběr slunečních jevů, sledovaných za účelem včasné predikce geomagnetických poruch. Ukázalo se, že od stupně "active" je úroveň geomagnetické aktivity ve střední Evropě nižší, než je úroveň celoplanetární.

## ÚVOD

Geomagnetické poruchy jsou způsobovány nepravidelnostmi v proudění slunečního větru. Zdrojem těchto nepravidelností jsou procesy na Slunci. Charakter, mohutnost a četnost procesů souvisí s fází slunečního cyklu – sluneční aktivitou. Souvislost mezi porušeností geomagnetického pole - geomagnetickou aktivitou a sluneční aktivitou však není příliš těsná, což



Obr. č. 1. Průměrné roční hodnoty geomagnetické a sluneční aktivity v intervalu let 1932-2000. Geomagnetická aktivita je vyjádřena denním součtem Kp indexu (plná čára), sluneční aktivita Wolfovým číslem R.

lze například dokumentovat chováním průměrných ročních hodnot geomagnetické a sluneční aktivity v intervalu let 1932-2000, ukázaném na obr. 1. Geomagnetická aktivita je zde vyjádřena sumou denních hodnot indexu Kp (index byl zaveden v r.1932), sluneční aktivita Wolfovým číslem R. Křivka průměrné roční hodnoty denní geomagnetické aktivity je oproti křivce průměrné roční hodnoty sluneční aktivity méně pravidelná, má většinou dva vrcholy, z nichž druhý, zpravidla vyšší, se nachází 1-3 roky za vrcholem aktivity sluneční.

Směrem k časovým škálám kratším než 1 rok se korelace mezi průměry obou aktivit rychle zmenšuje, takže na časové škále 1 měsíc již někdy téměř vymizí (Bochníček a kol., 1996).

## VÝSLEDKY

Cílem předložené práce je provést v okolí extrémů slunečního cyklu výběr takových slunečních jevů, jejichž sledování by umožnilo včasnou predikci geomagnetických poruch. Z těchto důvodů byl analyzován charakter geomagnetické aktivity v letech minima (1995-96) a maxima (2000-01) posledního slunečního cyklu. Počet geomagneticky porušených dní ( $\Sigma Kp \geq 30$ ) je spolu se seznamem mohutnosti a fyzikálních příčin v těchto dnech se vyskytovaných

	sluneční minimum		sluneční maximum	
	1995	1996	2000	2001
počet dní se $\Sigma K_p \geq 30$	46	16	45	30
příčina zvýšené aktivity				
- koronální díry	37	15	10	0
- koronální díry + iregulární eventy	2	1	4	3
- iregulární eventy	7	0	31	27
úroveň geomagnetické aktivity				
- active	17	8	6	5
- minor storms	27	8	23	12
- major storms	1	0	13	10
- severe storms	1	0	3	3
počet dní se $\Sigma K \geq 30$ ve střední Evropě (podle observatoře Budkov)	9	1	18	8
- active	6	0	5	2
- minor storms	3	1	10	3
- major storms	0	0	3	3

Tab. č. 1. Charakter geomagnetické aktivity ve dnech se  $\Sigma K_p \geq 30$

poruch uveden v Tab.1. Tyto údaje ukázaly, že rozdíly mezi oběma údobími jsou zásadní. Rekurentní, většinou jen středně silné geomagnetické poruchy v letech 1995-96, byly vystřídány nerekurentními, většinou však silnými až velmi silnými geomagnetickými poruchami v letech 2000-2001.

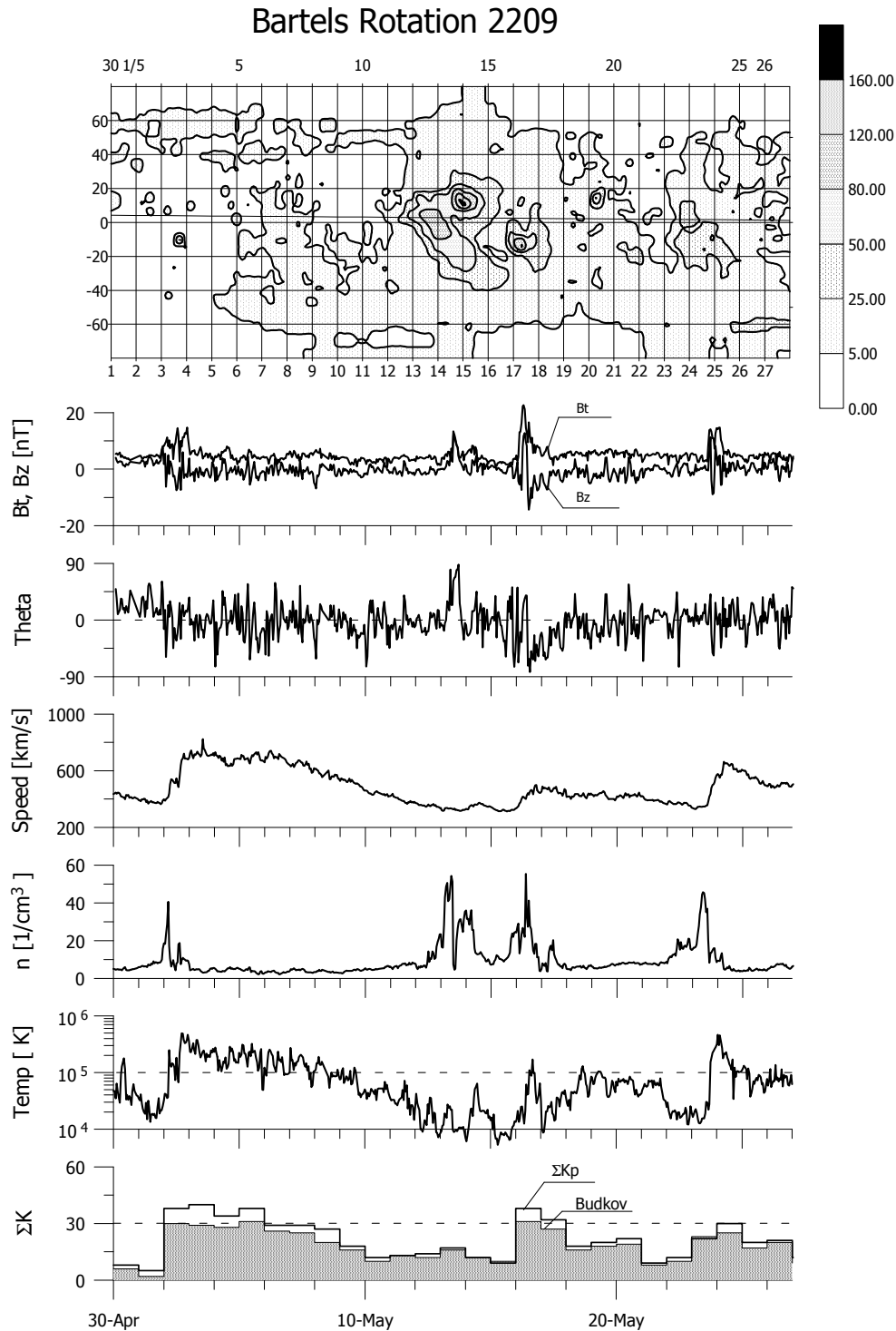
Příčinou rekurentních geomagnetických poruch jsou vysokorychlostní proudy vycházející z koronálních děr, jevící se na snímcích z družice Yohkoh, prováděných v měkkém rentgenově záření, jako místa velmi nízké intenzity. Synoptické mapy koronálních děr (příklad obr. 2), zkonstruované z jednotlivých snímků družice Yohkoh, doplněné o průběhy relevantních parametrů slunečního větru, denních sum planetárního indexu  $K_p$  a indexu  $K$  geomagnetické observatoře Budkov ukázaly, že rychlost proudů slunečního větru interagujících se zemskou magnetosférou, a tedy i intenzita geomagnetických poruch, závisí na lokaci koronálních děr na slunečním disku, jejich tvaru a rozloze. Oblasti minimální intenzity měkkého rentgenova záření spojené s vysokorychlostními proudy slunečního větru měly většinou tvar klínu otevřeného směrem k pólu a nacházejícího se téměř výlučně na sluneční hemisféře přivrácené směrem k Zemi (severní hemisféře na podzim, jižní hemisféře na jaře) (Bochníček a Hejda, 2002). Průchod koronálních děr centrálním poledníkem předcházel výskyt vysokorychlostních proudů v blízkosti zemské magnetosféry o ~3,5 dne, tj o čas, jenž je potřebný k tomu, aby sluneční vítr o rychlosti ~600 km/s doputoval k Zemi. Na čelní straně vysokorychlostního proudu dojde ke zvýšení jak iontové koncentrace, tak amplitudy složky  $B_z$  meziplanetárního magnetického pole (MMP). Protonová teplota  $T_p$  vysokorychlostních proudů přesáhne hodnotu  $10^5$  K. Aby bylo možno porovnat změny intenzity měkkých rentgenových paprsků se změnami hodnot vybraných parametrů slunečního větru, byly v práci Bochníček a

Hejda (2002) synoptické mapy vykreslovány v Bartelsových a nikoliv v Carringtonových rotacích. Při konstrukci synoptických map jednotlivých Bartelsových rotací byly použity všechny dostupné snímky ze satelitu Yohkoh. Vzhledem k tomu, že čas na časové škále roste zleva doprava, bylo nutné použít zrcadlových obrazů synoptických map. Škála relativní intenzity byla zvolena tak, aby se "koronální díry" na synoptických mapách pokud možno co nejvíce shodovaly s koronálními děrami publikovanými NOAA. Z tohoto důvodu byly "koronální díry" definovány jako oblasti, v nichž intenzita je menší, než 5 relativních jednotek.

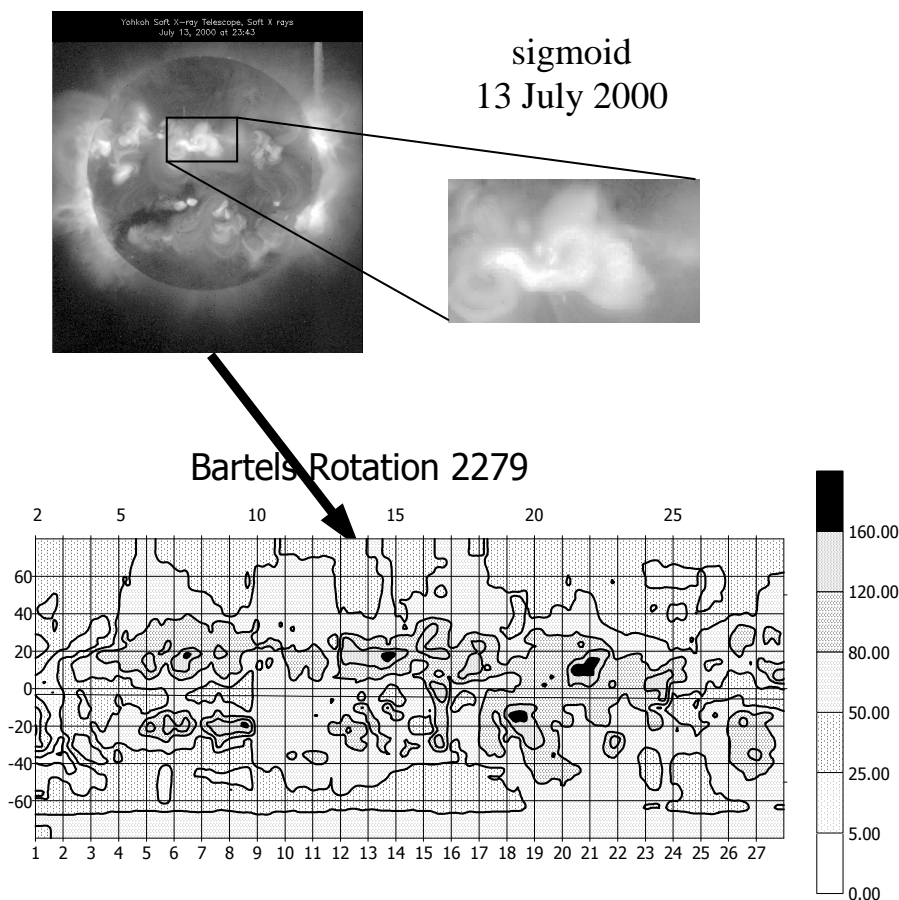
Nerekurentní geomagnetické poruchy jsou způsobovány výrony koronální hmoty, tzv. CME. Podle rychlosti ejection rozděluje CME na pomalé (~400 km/s) a rychlé (~1000 km/s). Pomalé CME jsou velmi těsně spojeny s eruptivními protuberancemi, jejichž viditelným projevem jsou mizející filamenty – DSF. Transportní doba pomalého CME do blízkosti Země je ~ 4 dny. Rychlé CME, uvolňované zpravidla z okrajů aktivních oblastí, sice nejsou těsně spojeny s žádným takto vizuálně zřetelným jevem, nicméně jako jejich precursory byly vyzorovány hodinová a delší LDE (Long Duration Event) a sigmoidy. Existence sigmoidů je spojena se zkroucením silotrubic slunečního magnetického pole. Přesáhne-li zkroucení mezi jejími konci  $2,5 \pi$ , silotrubice se stane nestabilní a začne se přehýbat. Přehnutí na sebe bere charakteristický sigmoidový tvar, pozorovatelný v měkkém rentgenově záření jako koronální zjasnění (Hudson a Webb, 1997; Rust, 1997). Transportní doba rychlého CME do blízkosti Země činí ~2-3 dny. Markantním znakem obou typů CME je jejich nízká protonová teplota, která zpravidla nepřesáhne hodnotu  $10^5$  K. Ve srovnání s protonovou teplotou vysokorychlostních proudů je tedy nižší (Neugebauer a Goldstein, 1997; Ness, 2001).

Rázová vlna, vytvářející se na přední straně CME, vede ke vzrůstu amplitudy MMP a k stáčení jeho totálního vektoru směrem k jihu. Amplituda magnetického pole CME výrazně převyšuje průměrnou amplitudu MMP. V průběhu interakce CME se zemskou magnetosférou (trvá někdy i desítky hodin) se magnetické pole CME otočí v souřadnicové rovině (y;z) rovnoměrnou rychlostí

o úhel  $\theta = 180^\circ$ . Tento úhel, rovnající se  $+90^\circ$ , směřuje-li totální vektor na sever a  $-90^\circ$ , směřuje-li totální vektor na jih, se tedy v průběhu interakce lineárně mění. Z linearit této změny vyplývá, že po polovinu interakční doby, t.j. po dobu několika hodin, je magnetické pole CME orientováno jižně. Jižní orientace magnetického pole rázové vlny, následovaná



Obr. č. 2. Synoptická mapa koronálních děr a aktivních oblastí Bartelsovy rotace č. 2209, zkonstruovaná z jednotlivých snímků družice Yohkoh, doplněná o průběhy magnetického pole, rychlosti, hustoty a teploty slunečního větru a o průběhy denních sum planetárního indexu  $K_p$  a indexu  $K$  geomagnetické observatoře Budkov.



**Obr. č. 3.** Situace předcházející geomagnetické bouři, ke které došlo 15.7.2001. Snímek slunečního disku provedený družicí Yohkoh, detail sigmoidu a synoptická mapa slunečního povrchu v měkkém rentgenově záření příslušné Bartelovy rotace. Intenzita měkkého rentgenova záření je udávána v relativních jednotkách.

několikahodinovou jižní orientací magnetického pole CME, dávají vznik silným geomagnetickým poruchám (Tsurutani a Gonzales, 1997). Příkladem takovéto, v posledním cyklu se vyskytnuvší poruchy, je geomagnetická bouře z 15.7.2000 (obr. 3-4).

I když je všeobecně známo, že výskytu silných geomagnetických poruch vždy předchází výrazné zvýšení toku vysokoenergetických protonů), spolehlivým prekursorem geomagnetických poruch takovéto zvýšení není. Týká-li se navíc toto zvýšení jen toku protonů s energiemi  $E \geq 10$  MeV, není rovněž přesvědčivým dokladem výrazné erupční aktivity. Počet zvýšení toku protonů vysokých energií pozorovaných v intervalu 2000- květen 2002, spolu s počty přidružených zvýšení geomagnetické aktivity a s počty přidružených erupcí třídy M-X, je udán v Tab.2.

## DISKUSE

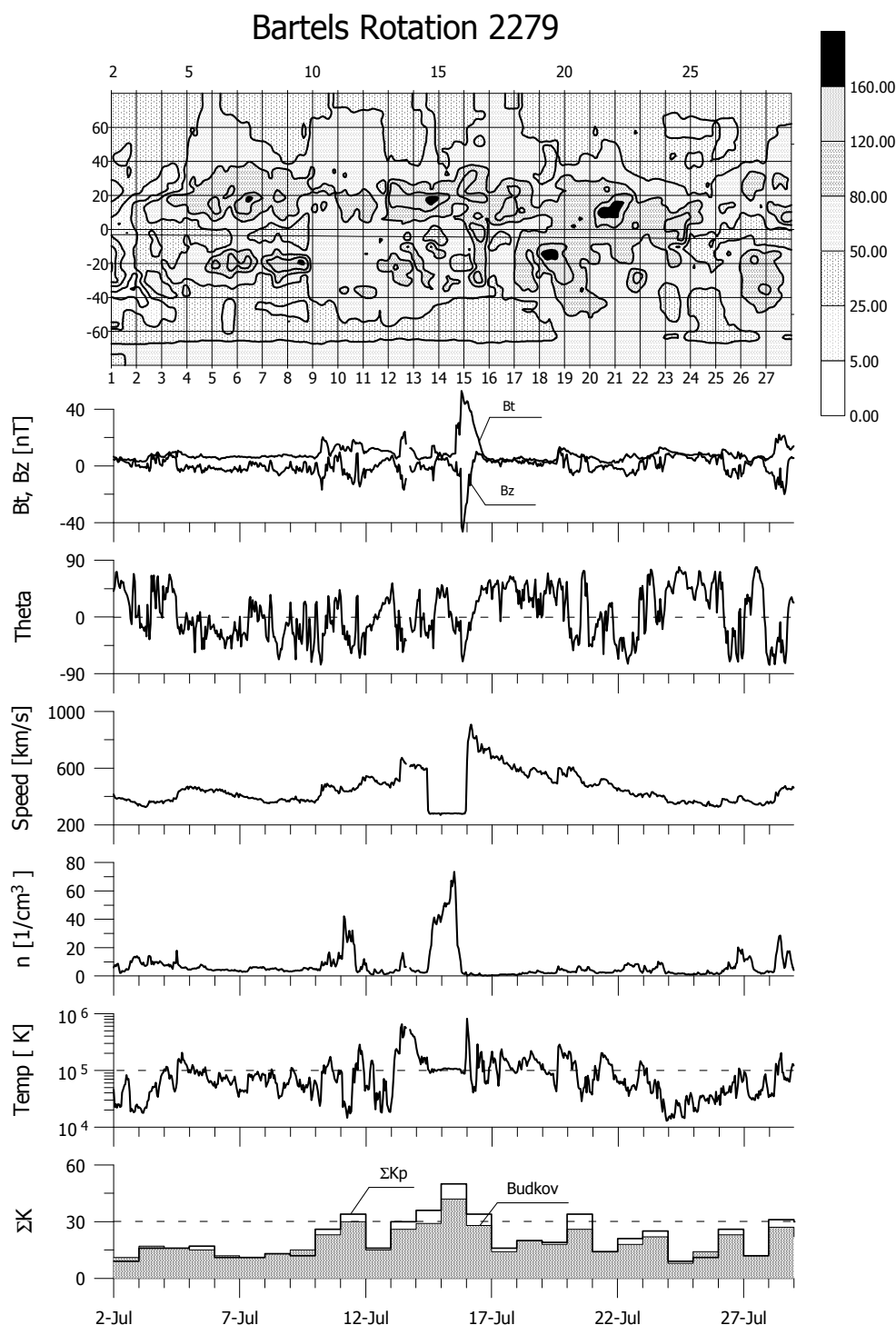
Porovnááme-li geomagnetickou aktivitu v údobí 1995-96 s údobím 2000-01 podle četnosti výskytu dní, v nichž geomagnetická aktivita dosáhla, nebo převýšila úroveň  $\Sigma Kp=30$ , zjistíme mezi oběma údobími rozdíl pouze 20%. Porovnáme-li však obě údobí podle mohutnosti v nich vyskytnuvších se poruch, nebo

porovnáme-li je podle fyzikálních příčin těchto poruch, zjistíme mezi nimi výrazné rozdíly.

Jestliže v letech 1995-96 poruchám o mohutnosti major storm a severe storm patřily pouze 2 případy z celkem 62 zvýšení geomagnetické aktivity, patřilo v letech 2000-01 poruchám o mohutnosti major storm a severe storm již 29 případů z celkem 75 zvýšení geomagnetické aktivity. Obdobně výrazné rozdíly existují i ve fyzikálních příčinách vyskytnuvších se poruch.

Jestliže v letech 1995-96 byly koronální díry příčinou 52 a iregulární eventy příčinou 7 případů zvýšení geomagnetické aktivity, byly v letech 2000-01 koronální díry příčinou 10 a iregulární eventy příčinou 58 případů zvýšení geomagnetické aktivity. Dominance koronálních děr a s nimi spojených vysokorychlostních proudů v době slunečního minima, byla tedy v době slunečního maxima vystřídána dominancí iregulárních eventů.

Geomagnetická aktivita registrovaná na středoevropské observatoři Budkov, je ve srovnání s celoplanetární aktivitou nižší. Dlouhodobá srovnání ukázala, že tento, od stupně „active“ již patrný rozdíl, se s každým dalším vyšším stupněm zvětšuje. Geomagnetická aktivita



**Obr. č. 4. Synoptická mapa slunečního povrchu v měkkém rentgenově záření Bartelsovy rotace č. 2279, magnetické pole, rychlost, hustota a teplota slunečního větru a denní suma celoplanetárního indexu Kp a indexu K geomagnetické observatoře Budkov.**

stupně „severe storm“ je tudíž ve střední Evropě vyjímečná.

Vzhledem k region od regionu se lišícím rozdílům mezi celoplanetární a regionální geomagnetickou aktivitou, musí se každá regionální předpověď geomagnetické aktivity opírat jak o znalost extraterestriálních údajů, tak

o znalost dlouhodobého chování geomagnetického pole v dané oblasti.

Geomagnetické oddělení Geofyzikálního ústavu, vydávající od roku 1994 denní předpovědi geomagnetické aktivity pro oblast střední Evropy, se proto při jejich vypracovávání opírá nejen o informace o Environment Boulder a družicemi Yohkoh, Soho, a

rok		E ≥ 10 MeV	E ≥ (10, 50, 100) MeV	celkem
2000	počet zvýšení	12	8	20
	zvýšení geom. aktivity	9	4	13
	erupce M - X	9	8	17
2001	počet zvýšení	11	17	28
	zvýšení geom. aktivity	4	13	17
	erupce M - X	5	16	21
2002	počet zvýšení	9	1	10
	zvýšení geom. aktivity	5	1	6
	erupce M - X	8	1	9

Tab. č. 2. Zvýšené toky protonů vysokých energií

ACE, ale i o znalost dlouhodobých a krátkodobých trendů geomagnetické aktivity, pozorovaných na české geomagnetické observatoři Budkov. Předpovědi předává do zpravodajství ČT a do ústředí mezinárodní organizace ISES (International Space Environmental Service) se sídlem v Boulderu, USA. Od druhé poloviny roku 2000 jsou tyto předpovědi uveřejňovány na webových stránkách RWC (Regional Warning Center) Prague. Vydávání předpovědí, finančně podporované "Programem pro podporu cíleného výzkumu Akademie věd", umožňuje hlubší vhléd do mnoha aspektů vzniku geomagnetických poruch.

## ZÁVĚRY

Výsledky srovnání charakteru geomagnetických poruch vyskytnuvších se v letech 1995-96 a 2000-01, tj v letech minima a letech maxima posledního slunečního cyklu ukázaly, že:

- 1) Četnost dní, v nichž  $\Sigma Kp \geq 30$ , se v obou údobích lišila o ~ 20%.
- 2) Zatímco v letech 1995-96 těžiště vyskytnuvších se poruch tvořily poruchy slabé až střední (25 active, 35 minor storm, 1 major storm, 1 severe storm), těžištěm poruch vyskytnuvších se v letech 2000-01 byly poruchy střední až silné (11 active, 35 minor storm, 23 major storm, 6 severe storm).
- 3) V sestupné fázi a v době kolem slunečního minima jsou hlavním zdrojem zájmu predikčních týmů koronální díry, v době kolem slunečního maxima pak aktivní oblasti, filamenty, informace o výskytu LDE a RSP II a informace z experimentu LASCO.
- 4) Cílem denní analýzy aktivních oblastí, snímkaných v měkkém rentgenově (družice Yohkoh) a v tvrdém UV (družice Soho) záření je odhad míry jejich nestability. Dobrým prekursorem prudkého výronu hmoty z takovýchto oblastí se ukázalo zjasnění ve tvaru S (sigmoid).
- 5) Úroveň geomagnetické aktivity ve střední Evropě je ve srovnání s úrovní aktivity celoplanetární nižší, a to od stupně "active".

## Literatura:

Bochníček J., Bucha V., Hejda P. and Pýcha J.: 1996, „Relation between Northern Hemisphere winter temperatures and

geomagnetic or solar activity at different QBOPhases“, J. Atmos. Terr. Phys., 58, 883-897.

Bochníček J., Hejda P.: 2002, „Areas of minimum intensity of soft X-rays as sources of solar wind high-speed streams“, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 64, 511-515.

Crooker N. U., Siscoe G. L.: 1986, „The effect of the solar wind on the terrestrial environment“, Physics of the Sun, edited by P. A. Sturrock, T. E. Holzer, D. M. Mihalas and R. K. Ulrich, D. Reidel, 193-249.

Hudson H. S., Webb D. F.: 1997, „Soft X-ray signatures of coronal ejections“, Coronal Mass Ejections, edited by N. Crooker, J. A. Joselyn and J. Feynman, AGU, 27-38.

Ness N. F.: 2001, „Interplanetary magnetic field dynamics“, Space Storms and Space Weather Hazards, edited by I. A. Daglis, Kluwer, 131-155.

Neugebauer M., Goldstein R.: 1997, „Particle and field signatures of Coronal Mass Ejections in the solar wind“, Coronal Mass Ejections, edited by N. Crooker, J. A. Joselyn and J. Feynman, AGU, 245-251.

Rust D. M.: 1997, „Helicity conservation“, Coronal Mass Ejections, edited by N. Crooker, J. A. Joselyn and J. Feynman, AGU, 119-125.

Tsurutani B., Gonzales W. D.: 1997, „The interplanetary causes of magnetic storms : A review, edited by B. Tsurutani, W. Gonzales, Y. Kamide and J. K. Arballo, AGU, 77-89.