

Variabilita kozmického žiarenia a kozmické počasie

Karel Kudela, Ústav experimentálnej fyziky SAV, Košice, kkudela@kosice.upjs.sk

Abstrakt.

Uvedený je stručný prehľad charakteristík kozmického žiarenia s energiou $< 10^{12}$ eV a jeho vzťahov k efektom kozmického počasia. S referenciami a zoznamom domovských stránok môže prehľad slúžiť na orientáciu v problematike uvedenej v názve.

1. ÚVOD.

Pred 90 rokmi bolo objavené kozmické žiarenie v balónových experimentoch V.F. Hessa (Hess, 1912). Odvtedy fyzika kozmického žiarenia obohatila znalosti subjadrovej a jadrovej fyziky, geofyziky, astrofyziky ako aj fyziky plazmy. Na druhej strane bola týmito odborními sama ovplyvnená. Dnes ide o veľmi rozsiahlu oblasť spadajúcu tak do odborov typických pre základný výskum, ale aj pre možné aplikácie. V práci sa pokúšame podať prehľad o základných vlastnostiach kozmických energetických častíc pri energiách $< 10^{12}$ eV, tj. v oblasti, kde sú pozorovateľné priestorové a časové variácie a anizotropia toku. V časti 2 pojednáme o kozmickom žiarení (KŽ) v heliosfére, v časti 3 o vplyve magnetosféry a v časti 4 o KŽ v atmosfére. Časť 5 podáva klasifikáciu variability KŽ. V časti 6 uvedieme niektoré efekty kozmického počasia, v ktorých je dôležité KŽ a iné energetické kozmické častice a dotkneme sa aj vplyvu na atmosféru.

2. KOZMICKÉ ŽIARENIE A HELIOSFÉRA.

Tok KŽ, pozostávajúceho hlavne z protónov s malým príspevkom He a jadier ťažších, v oblasti energií nad 10^{11} eV rýchlo ubúda s energiou (zhruba mocniny s mocniteľom diferenciálneho spektra -2.6). Pri nižších energiách sa mení tvar spektra a zloženie častíc. Staršie informácie o spektre a chemickom zložení KŽ sú uvedené napr. v (Dubinský a Kudela, 1984). Novšie poznatky možno nájsť napr. v prehľadových referátoch (Proc. ICRC 1997, 1999, 2001). Podľa pôvodu, resp. oblasti urýchľovania častíc KŽ ho možno rozdeliť na 3 populácie.

2.1. Galaktické kozmické žiarenie.

Častice urýchľované do vysokých energií za hranicou heliosféry do nej prenikajú a ich história je ovplyvňovaná 4 procesmi (Jokipii, 1998): a. *konvekciou*, ako odo-

zvou na konvekciu medziplanetárneho magnetického poľa **B** plazmou slnečného vetra (SV), b. *difúziou* v priestore nábehových uhlov (uhol PA medzi vektorom rýchlosti častice KŽ a **B**) pri rozptyle na nehomogenitách medziplanetárneho magnetického poľa, ktoré zväčša vedie ku izotropizácii uhlového rozdelenia v systéme SV, c. *adiabatickým ohrevom alebo ochladením*, ku ktorým dochádza v dôsledku vzájomného približovania sa alebo vzdialovania sa nehomogenít **B** a nasledovnej zmeny energie častíc pri zrážkach s nimi, d. *driftom* vznikajúcim v dôsledku veľkorozmerových štruktúr **B** a z faktu, že gyračný pohyb KŽ okolo siločiar je proces rýchlejší ako rozptyl. Základy teórie transportu KŽ v heliosfére položil Parker (1965).

Medziplanetárne magnetické pole je aproximované Archimedovými špirálami. Radiálna konvekcia špirálového magnetického poľa vytvára rozdiel potenciálov medzi pólom a rovníkom okolo 250 MV. Na regulárne pole je superponovaná turbulentná zložka opisovaná v zjednodušenom priblížení mocninovým zákonom rozdelení veľkosti vlnového vektora **k** s mocniteľom $\sim -5/3$. Štruktúra turbulencií sa mení s cyklom slnečnej aktivity a je tvorená jednotlivými procesmi inicializovanými v slnečnej koróne. Dve opačné polarizácie medziplanetárneho poľa **B** sú oddelené tenkou heliosférickou prúdovou vrstvou, ktorá nie je len planárnym útvarom. V období slnečného minima je vrstva relatívne plochá a osciluje v rozsahu $\sim 10^\circ$ okolo slnečnej rovníkovej roviny. Amplitúda oscilácií vrstvy rastie so slnečnou aktivitou. V období slnečného maxima je štruktúra medziplanetárneho poľa zložitá.

Vo vnútornej heliosfére je hustota energie galaktického KŽ nižšia než hustota energie SV, v ktorom ako v dokonale vodivom prostredí je **B** určujúce trajektórie KŽ, vmrazené. Konfigurácia **B** je stabilná v referenčnom systéme spojenom so SV a je plazmovým tokom, ktorý nie je homogénny, izotropný ani časovo nepremenný, determinovaná. Variabilita SV je primárne určená podmienkami na slnečnom povrchu, v jeho koróne a v medziplanetárnom prostredí. Pretože binárne zrážky častíc KŽ aj gravitačné efekty sú zane-

dbateľné, možno vo vnútornej heliosfére, napr. na zemskej orbite, KŽ považovať za autonómnu populáciu častíc, ktorá koexistuje s plazmou SV. V heliosfére vonkajšej je ale hustota energie KŽ a plazmy SV porovnateľná, tj. premenlivé toky KŽ, osobitne nižších energií, môžu ovplyvňovať dynamiku toku plazmy.

Najvýraznejšími dlhodobými modulačnými efektami heliosféry na KŽ sú 11- a 22-ročná variabilita, prejavujúce sa antikoreláciou so slnečnou aktivitou. Ich modulácia s energiou KŽ klesá a pre $E > 10^{12} \text{ eV}$ je zanedbateľná. Zatiaľčo prvá zodpovedá čisto slnečnej aktivite meranej napr. počtom slnečných škvrn, druhá je dôsledkom slnečného magnetického cyklu a driftu častíc KŽ do heliosféry, ktorý má rôzny charakter pre rôzne polarizácie magnetického poľa Slnka. Okolo slnečného minima je výsledný tok KŽ určený rovnováhou medzi driftovými pohybmi častíc do vnútra heliosféry a ochladzovaním v dôsledku expandujúceho SV (turbulentná zložka poľa je relatívne slabá). Pre rôzne orientácie slnečného magnetického poľa je drift rôzny. Zatiaľčo okolo minim v r. 1976 a 1996 je **B** orientované v severnej slnečnej hemisfére od Slnka, v alternujúcich minimách r. 1965 a 1987 je orientované k Slnku. V prvých dvoch prípadoch je preferenčný smer driftu orientovaný do polárnych oblastí a preto je tok KŽ málo citlivý na zmeny heliocentrickej prúdovej vrstvy (plochšie maxima KŽ). V druhých dvoch prípadoch je drift smerovaný cez rovníkovú oblasť a preto tok KŽ reaguje pomerne rýchlo na vývoj heliocentrickej prúdovej vrstvy (maximum KŽ je výraznejšie). Významnou je aj ~27 denná variabilita, ktorá reflektuje priestorové nehomogenity slnečného povrchu (v závislosti od ich doby života) a rotáciu disku. Nízkoenergetické variácie KŽ v oblasti energií neutronových monitorov sú analyzované napr. v prácach (Kudela et al., 1991, 2002). Neregulárne poklesy KŽ u Zeme sa vyskytujú počas geomagnetických porúch, ale v niektorých prípadoch aj v obdobiach nízkej geomagnetickej aktivity. Označujú sa podľa ich objaviteľa Forbushove poklesy FD (Forbush, 1937). FD sa nevyskytujú počas všetkých silných geomagnetických porúch.

2.2. Slnečné kozmické žiarenie.

Vysokoenergetické častice sú urýchľované aj v samotnej heliosfére. Pre zemskú atmosféru sú dôležité najmä tzv. GLE prípady (pozemné efekty, Ground Level Events). Prvé pozorovania vysokoenergetických častíc od slnečnej erupcie boli pred 60 rokmi (vo februári 1942), kedy v časovej koincidencii s emisiou slnečných častíc boli pozorované výpadky krátkovlnového spojenia na veľké vzdialenosti (Forbush, 1946). Doteraz bolo zaznamenaných 63 prípadov GLE. Energetické spektrum častíc slnečných erupcií, aj keď v niektorých prípadoch sú urýchlené do energií $> 10 \text{ GeV}$ a pozorované na zemskom povrchu, je oveľa mäkkšie ako spektrum galaktického KŽ. Avšak v oblasti energií nižších (do niekoľko sto MeV) môže ich intenzita počas minút až niekoľkých hodín mnohonásobne prekročiť

intenzitu galaktickej zložky, čo má negatívne účinky na družicové a letecké systémy.

Viacere GLE boli zaznamenané aj neutrónovým monitorom na Lomnickom štíte (LS), čo znamená, že išlo o prípady urýchlenia na slnečnom povrchu do rigidít presahujúcich 4 GV (Kudela et al., 1993, Kudela a Storini, 2002). Časový profil slnečných protónových udalostí u Zeme závisí na podmienkach transportu z miesta urýchlenia k detektoru (magnetická konektivita). Väčšinou GLE majú u Zeme podobný časový priebeh intenzity na sieti neutronových monitorov, tj. zopovedajú izotropizácii toku pri šírení sa častíc od Slnka k Zemi. Niektoré z nich sú ale silne anizotropné, napr. 24.5.1990, kedy veľmi odlišné priebehy na stanicích s rôznymi asymptotickými smermi umožnili preveriť platnosť teoretických modelov šírenia založených na kinetickej aproximácii (Fedorov et al., 2002).

Počet prípadov so silnou emisiou častíc energií nižších (stovky MeV), ktoré na zemskom povrchu nevyvolajú odozvu, ale pre družice, kozmické sondy, príp. lietadlá môžu predstavovať nebezpečie, je oveľa vyšší než počet GLE. Sumarizácia významných diskretných protónových udalostí ($> 10 \text{ MeV}$ s maximálnym tokom $> 10/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ster}$) za uplynulé 4 slnečné cykly ukazuje podobné rozdelenie ako priemerné hodnoty počtu slnečných škvrn (Shea a Smart, 1999).

Pri slnečných erupciách môžu urýchlené protóny vyvolať vo vonkajšej slnečnej atmosfére jadrové reakcie, ktorých produktom sú aj neutróny. Ich časť, osobitne v oblasti vysokých energií, môže dôjsť na orbitu Zeme nerozpadnutá, a vyvolať efekty podobné tým od primárnych protónov. Rozdiel od protónov je v tom, že príjem je určený miestnym časom. Aj keď možná registrácia slnečných neutrónov u Zeme bola predpovedaná už v r. 1953, prvým prípadom pozemnej odozvy od slnečných neutrónov bola erupcia 3.6.1982, kedy bolo zvýšenie blízko miestneho poľudnia zaznamenané na Jungfraujoch a tiež na Lomnickom štíte (Kudela, 1990) v časovej koincidencii s meraniami na americkej družici (Chupp et al., 1987). Časový vývoj poznatkov o slnečných energetických časticiach podáva napr. prehľad (Cliver, 1999). O slnečných erupciách a emisívi Slnka vôbec pojednáva napr. Krivský (1995).

V obdobiach silných explózií vo vonkajšej atmosfére Slnka sú do medziplanetárneho prostredia emitované obrovské množstvá látky (10^{12} - 10^{13} kg), tzv. výrony koronálnej látky (CME – Coronal Mass Ejections). Tie tvoria jeden z najdôležitejších článkov reťazca slnečno-zemských vzťahov dôležitých pre kozmické počasie. Častice sú v heliosfére urýchľované pri samotnom vzniku CME, na jeho okraji počas šírenia CME v medziplanetárnom priestore, ako aj na hraniciach koronálnych dier (Reames, 2001, Lario et al., 1998).

2.3. Anomálna zložka kozmického žiarenia.

Detektory energetických častíc na Pioneer-10, IMP5 a IMP7 objavili tretiu zložku KŽ, tzv. zložku anomálnu (prehľad v Mewaldt et al., 1998). Keď sa do grafu vyne-

sie závislosť toku častíc od ich kinetickej energie (T_n) pripadajúcej na jeden nukleón (nie od rigidity $R = (A/Z) \cdot (T_n \cdot (T_n + 2M))^{1/2}$, kde M je pokojová hmotnosť protónu, A a Z sú nukleónové a nábojové číslo), pri $T_n < 50$ MeV/nukl sa prejavuje anomálne správanie sa niektorých prvkov (zvýšenie toku He, N, O a ďalších). Intenzita tejto zložky antikoreluje so slnečnou aktivitou podobne ako u zložky galaktickej. Modulácia je ale podstatne odlišná: zatiaľčo nízkoenergetické galaktické KŽ sa od slnečného maxima k minimu mení faktorom < 10 , intenzita anomálnej komponenty sa mení faktorom > 100 . Ak ide o jedenkrát ionizované atómy, majú tieto častice pri rovnakej kinetickej energii ako protón alebo totálne ionizované ióny podstatne vyššiu rigiditu. Táke častice pri relatívne nízkej energii majú veľký Larmorov polomer a môžu byť zachytené geomagnetickým poľom. To bolo navrhnuté (Blake and Friesen, 1977) a skutočne pozorované v radiačných pásoch aj na malých výškach v magnetosfére. Pôvod anomálnej zložky bol vysvetlený v práci (Fisk et al., 1974). Zatiaľčo medziplanetárne ióny nemôžu preniknúť do heliosféry kvôli medziplanetárnemu magnetickému poľu, neutrálne atómy z medziplanetárneho prostredia prenikajú do heliosféry snadno. Ak ich prvý ionizačný potenciál je vysoký, môžu ako neutrálne preniknúť do vnútornej heliosféry, kde ich časť je ionizovaná alebo UV žiarením Slnka, alebo nábojovou výmenou s iónmi slnečného vetra. Sú potom vynášané slnečným vetrom do vonkajšej heliosféry a urýchľované tam alebo v blízkosti heliosferickej terminálnej rázovej vlny (Pesses et al., 1981). Anomálne správanie sa niektorých častíc je vysvetľované ich ionizačným potenciálom. Fiskova hypotéza je potvrdená viacerými meraniami. Zatiaľčo He, N, O, Ne, Ar majú prvý ionizačný potenciál > 13.6 eV, anomálna komponenta chýba pre atómy ako C, Mg, Si, Fe, ktoré sú ionizované vo veľkom množstve predtým než sa dostanú ako neutrálne do vnútornej heliosféry.

Pre praktické účely jestvujú modely KŽ započítavajúce všetky zložky a dávajúce tok častíc daného typu a energie v určitej fáze slnečného cyklu. Modely počítajú aj s magnetosferickou priepustnosťou a príspevkom od slnečných erupcií (CREME96, Tylka et al., 1997a,b, H01, H06, H07). Veľmi užitočným je v tomto ohľade systém (H10).

3. ENERGETICKÉ ČASTICE V ZEMSKÉJ MAGNETOSFÉRE.

Magnetosféra zeme jednak pôsobí ako filter pre nabité častice prichádzajúce z medziplanetárneho prostredia, jednak ako zdroj energetických častíc.

3.1. Magnetosferická optika.

Systematické merania toku KŽ na rôznych šírkach ukázali silnú závislosť intenzity od geomagnetickej šírky. Najjednoduchším prístupom je odhad filtračného účinku s pomocou prahovej rigidity (R_c), ktorá oddeľuje dovo-

lené trajektórie od zakázaných (nižšie R_c všetky zakázané, vyššie R_c všetky dovolené). Pre dipólové pole a vertikálny príchod častíc k Zemi je $R_c(GV) = 14.9 \cdot \cos^4(\lambda)$, kde λ je geomagnetická šírka. Reálne magnetické pole je komplikovanejšie. Preto sa používa k určeniu prístupu častíc KŽ na dané miesto z daného smeru numerická integrácia pohybovej rovnice: z miesta detektoru sa „pustí“ častica do modelového poľa $\mathbf{B}$ s obráteným nábojom a vektorom rýchlosti. Ak trajektória skončí na Zemi, resp. na hranici magnetosféry, je označená ako zakázaná, resp. dovolená. V druhom prípade sa určí smer, z ktorého na hranicu magnetosféry prišla (asymptotický smer). Tým sa dostane systém dovolených a zakázaných trajektórií (medzi dolnou a hornou prahovou rigiditou). Premennivosť geomagnetického poľa sa zavádza pomocou modelov poľa vonkajších prúdových systémov, ktoré tečú v magnetosfére. Modely sú parametrizované napr. indexom geomagnetickej aktivity K_p (Tsyganenko, 1989). Pre Lomnický štít je výpočet urobený napr. v prácach (Bobik, 2001, Kudela et al., 1998). Prehľad prahových rigidít pre sieť staníc NM je pre pole vnútorných zdrojov (IGRF) a rôzne epochy v práci (Shea and Smart, 2001).

3.2. Magnetosferické energetické častice.

Populácie magnetosferických energetických častíc možno rozdeliť do dvoch skupín: častice radiačných pásov a kruhový prúd.

Častice radiačných pásov sú zachytené geomagnetickým poľom a tvorené najmä elektrónami s energiou do niekoľko MeV a protónmi do niekoľko sto MeV (vnútorný pás). Pri drifte okolo Zeme dosahujú minimálnych výšok v oblasti juhoatlantickej magnetickej anomálie, čo je dôležité pre radiačné poškodenie družicových systémov na malých výškach. Transport častíc radiačných pásov v časovo a priestorovo premenných štruktúrach magnetických a elektrických polí magnetosféry, straty energie pri ich interakciách s vlnením a zvyškovou atmosférou, ako aj urýchľovacie procesy vedú k redistribúcii tokov. Dôležité pre atmosféru sú zmeny PA uhla častíc, ktoré vedú ku zníženiu zrkadlových bodov a k vysypávaniu do jej horných vrstiev. Jestvujú statické modely vnútorného a vonkajšieho radiačného pásu, označované ako AP, resp. AE (napr. Bilitza, 1992, Gaffey and Bilitza, 1994). Z nich je možné odhadnúť tok častíc určitej energie (elektrónov, protónov) v zadanom mieste priestoru (L, B). Parameter L bol zavedený v práci (McIlwain, 1966). Zjednodušene, pre dipólové pole označuje L driftovú obálku tvorenú siločiarami pretínajúcimi rovinu magnetického rovníka vo vzdialenosti L zemských polomerov od stredu Zeme. Kruhový prúd (KrP , H19) tvoria zachytené ióny a elektróny s energiami desiatky-stovky keV, ktoré azimutálne driftujú okolo Zeme na $L=2-7$. Ich intenzita je monitorovaná na zemskom povrchu pomocou magnetometrov, nakoľko častice kruhového prúdu spôsobujú diamagnetický efekt. Tým sa sleduje vývoj geomagnetických porúch. Hlavné zosilnenie toku častíc kruhového prúdu, ku ktorému dochádza na $L < 4$, je objasňova-

né ako kombinácia injekcie častíc z nočnej strany, transportu a urýchľovania častíc plazmovej vrstvy v chvoste magnetosféry v dôsledku zvýšenej konvekcie spôsobenej zosilneným elektrickým poľom. Častice KrP sú monitorované aj diaľkovo – detekciou neutrálnych energetických atómov geokoróny, ktoré získavajú energiu nábojovou výmenou s KrP. Charakteristiky magnetosferických energetických častíc sú zhrnuté napr. v (Daglis et al., 1999, Daglis, 2001, Gendrin, 2001, Heynderickx, 2001). Modely možno nájsť v (H05, H10).

4. KOZMICKÉ ŽIARENIE A ZEMSKÁ ATMOSFÉRA.

Jadrá primárneho kozmického žiarenia vstupujúceho do atmosféry produkujú sekundárne kozmické žiarenie, ktorého výškové profily a energetické zloženie pre rôzne typy častíc sú rôzne. Obvykle sekundárne zložky KŽ sa rozdeľujú na (a) elektromagnetickú alebo mäkkú zložku (neutrálne pióny s veľmi krátkou dobou života ($\sim 10^{-16}$ s) rozpadajúce sa na 2γ kvantá indukujúce ďalej elektrón-pozitrónové páry), (b) tvrdú zložku, ktorú tvoria nabité pióny s dobou života dlhšou ($2.6 \cdot 10^{-8}$ s) a ktoré pri rozpade prispievajú k miónonej populácii s dobou života o 2 rády dlhšou (miónová populácia na úrovni mora je dominantnou v sekundárnom KŽ), a (c) nukleonovú zložku, pozostávajúcu z nukleonov produkovaných v jadrových interakciách. Relatívny tok rôznych zložiek sekundárneho KŽ možno nájsť napr. v (Allkofer and Grieder, 1984). Charakteristikou sekundárnych komponent je relatívne rýchly rast ich intenzity s výškou. Preto sú merania neutrónovými monitormi na vysokých horách dôležité. Neutrónový monitor bol navrhnutý v práci (Simpson, 1955). Vývoj a postupná konštrukcia siete neutrónových monitorov umožňuje detekovať nízkoenergetické neutróny, ktoré nie sú spomalené ionizačnými stratami. Sekundárne častice, ku ktorým je NM citlivý, sú v oblasti energií od niekoľko sto MeV do jednotiek GeV. NM je citlivý k nízkoenergetickej zložke primárneho KŽ (1-20 GeV) a dovoľuje jej variabilitu sledovať zo zemského povrchu. Jedným z nich je neutrónový monitor ÚEF SAV na Lomnickom štíte, ktorého merania v reálnom čase možno nájsť na (H04, <http://neutronmonitor.ta3.sk>). Patrí k monitorom s najvyššou štatistickou presnosťou na stredných šírkach.

5. VARIABILITA KŽ.

Variabilitu kozmického žiarenia v oblasti energií, ku ktorým je citlivý neutrónový monitor, možno klasifikovať podľa schémy navrhnutej Dormanom (1974). Vzťah medzi primárnym a sekundárnym KŽ je daný variáciami (1) integrálnej multiplicity, tj. počtu zaznamenaných častíc sekundárneho KŽ od jednej primárnej častice danej rigidity, (2) prahovej geomagnetickej rigidity, ku ktorej vedú zmeny geomagnetického poľa, a (3) rigiditného spektra primárnych častíc, tj. počtu častíc danej rigidity v primárnom KŽ. To odzrkadľuje tri rôz-

ne príčiny variability: prvá zodpovedá zmene výťažku sekundárnych častíc od primárnych v atmosfére (zmena ekvivalentnej hrúbky atmosféry nad detektorom), druhá opisuje zmenu filtračného účinku magnetosféry pre prichádzajúce častice, a tretí zmeny toku primárneho KŽ, tj. za magnetosférou Zeme. Variácia integrálnej multiplicity sa pre neutrónový monitor odhaduje korekciou na barometrický tlak ($\sim 0.7\%/mb$). Sezónne variácie dosahujú 1%. Teplotný efekt, ktorý je dôležitý pre mezonové teleskopy, nie je pre NM významný (pod 0.02%). Variácie (b), tj. geomagnetického prahu spôsobujú (v závislosti od geomagnetickej šírky) vzrasty až 10%, a to najmä počas hlavnej fázy geomagnetickej búrky. Tiež spôsobujú zmenu asymptotických smerov príjmu. Variácia s periódou slnečného dňa je okolo 1%. Zmeny typu (c) možno rozčleniť do troch podskupín: (ca) modulačné efekty spôsobené plazmou SV (11 ročná variácia na veľkých šírkach dosahuje až 30%, 27 denná je na úrovni do 3%, Forbushove poklesy sa prejavujú znížením intenzity až do 30%, zatiaľ čo vzrasty pred FD sú nižšie ako 2%). Druhá podskupina (cb) je tvorená hlavne časticami od slnečných erupcií (pre uvedený prípad z februára 1956 to bolo až 50 násobné zvýšenie namerané na ionizačnej komore, najsilnejší vzrast od GLE na LŠ od r. 1966 bol zaznamenaný v septembri 1989 s amplitúdou $\sim 180\%$). Poslednú podskupinu (cc) tvoria nie veľmi výrazné variácie dennej variability KŽ s periódou 22 rokov a anizotropia s hviezdny dňom. Obi dve sú menšie ako 0.5%.

6. KOZMICKÉ POČASIE A ENERGETICKÉ KOZMICKÉ ČASTICE.

6.1. Niektoré efekty kozmického počasia.

Vplyvy vonkajšieho prostredia na zemský povrch sú študované dlho. Avšak v ostatných 10 rokoch rapídne o nich vzrástol záujem: jednak v dôsledku rozvoja kozmických techník a technológií (ISS, spojovacie družice ap.), ale aj pre poruchy pozemných a leteckých systémov, ktorých príčinami by mohli byť zmeny magnetických polí alebo emisie kozmických energetických častíc.

Jedným z najsilnejších prejavov zmien vonkajších fyzikálnych podmienok sú geomagnetické búrky. Sú reakciou systému zemská magnetosféra-ionosféra na poruchy plazmy slnečného vetra (SV). Keď sú CME emitované do medziplanetárneho prostredia, dochádza ku stláčaniu plazmy SV a na prednom okraji CME sa vytvárajú bezzrážkové rázové vlny. Niektoré CME sú geoeфекtívne, tj. šíria sa ku Zemi a spôsobujú geomagnetické poruchy (napr. Gosling et al., 1991, Gonzalez et al., 2001). Na dennej strane je magnetosféra stláčaná. Zvýšená rýchlosť vysoko vodivej plazmy SV spôsobuje zmeny podmienok dynama: vznikajú elektrické potenciály v magnetosfére a v ionosfére, ktoré v ich rôznych oblastiach vyvolávajú prúdové systémy (napr. Kivelson and Russell, 1995). Prehľad o geomagnetických bürkach možno nájsť napr. v (Baker et al., 2001). Niektoré

aspekty prenosu energie z medziplanetárneho prostredia do magnetosféry pri magnetosferických búrkach opisujú práce (Prigancová, 1996, Prigancová and Feldstein, 1992, Prigancová et al., 1994). Ak má medziplanetárne pole južnú zložku, dôjde k napojeniu siločiar a k efektívnemu prenosu energie do magnetosféry. Pri silných búrkach dosahuje vstupný výkon zo SV $10^{12} - 10^{13}$ W. Práca (Schlegel, 2001) porovnáva informácie o účinkoch silných geomagnetických búrok na technologické systémy v rôznych epochách: zatiaľčo v r. 1903 bola v (Nature, 5. Nov. 1903) „iba“ zmienka o poruchách telegrafných systémov, v prípade búrky v r. 1989 išlo o poškodenie 9 družíc, výpadky komunikačných systémov, problémy s navigáciou, výpadky elektrických rozvodov v Kanade, poruchy mikročipov ap. Podľa J. Freemana (1995) sa pojmom kozmické počasie (KP) rozumejú podmienky na Slnku a v slnečnom vetri, v zemskej magnetosfére, ionosfére a termosfére, ktoré môžu ovplyvňovať funkčnosť a spoľahlivosť kozmických aj pozemných technologických systémov a môžu ohroziť zdravie a životy ľudí (osobitne kozmonautov). Jednotlivé javy tohto reťazca opisuje napr. Daly (2002). Dôležitým článkom reťazca sú kozmické energetické častice včítane KŽ. O jeho priamych a nepriamych vzťahoch ku KP sa zmienime v ďalšej časti. Niektoré poznatky z tejto oblasti sú uvedené v prácach (Kudela et al., 2000, Kudela and Storini, 2002).

Väčšina javov, ktoré súvisia s KP je inicializovaná Slnkom. Okrem korpuskulárnych častíc sú aj emisie v oblasti UV dostatočné na ovplyvnenie zemskej ionosféry a termosféry. To isté platí aj o slnečných emisiách v X oblasti (merania na $\lambda = 0.5-0.8$ Å sú v reálnom čase na (H14)). Magnetické pole Slnka je premenné v širokom rozsahu časových škál od minút po roky (Schüssler, 2002) a je zodpovedné za rôzne energetické javy označované ako „slnečná aktivita“. CME majú svoj pôvod v koronálnych tzv. aktívnych oblastiach. Prejavujú sa komplikovanou štruktúrou **B**, sú spojené so slnečnými škvrnami a ich elektromagnetické emisie v EUV a X fitujú teploty $>10^6$ K. CME sú v súčasnosti sledované koronografom LASCO na sonde SOHO (H01). Rázová vlna na prednej strane CME tiež urýchľuje častice do vysokých energií (Lario et al., 1998). Vysokorychlostný SV unikajúci z niektorých oblastí slnečného povrchu možno pozorovať v EUV a X ako tmavé oblasti (koronálne diery). Priestorové nehomogenity slnečného povrchu (v závislosti od ich doby života) pri rotácii slnečného disku vytvárajú v medziplanetárnom prostredí štruktúry s ~ 27 dennou periodicitou. O šírení porúch v SV a ich odozve v magnetosfére pojednávajú napr. práce (Němeček et al., 1997, Šafránková et al., 1998).

Hlavnými slnečnými efektami s dôsledkami pre KP sú: produkcia nabitých vysokoenergetických častíc urýchlených na slnečnom povrchu v počiatočnej fáze CME, spojitú urýchľovaných pri šírení sa CME a na hraniciach koronálnych dier, emisie UV a X žiarenia, a inicializácia geomagnetických búrok.

Pri geomagnetických búrkach dochádza ku zmenám štruktúry geomagnetického poľa, k indukcií prúdov

v ionosfére a na zemskom povrchu (GIC – geomagneticky indukované prúdy), ku zvýšenému prieniku častíc do hornej atmosféry (osobitne na vysokých šírkach), ku vzniku polárnych žiari, k ohrevu termosféry, k injekcii častíc horúcej plazmy na nočnej strane magnetosféry a k redistribúcii tokov radiačných pásov a kruhového prúdu. Pre KŽ rastie priepustnosť magnetosféry (znižuje sa R_c). Aktuálne informácie o KP sú napr. na (H09).

Okrem účinkov kozmických energetických častíc (časť 6.2) k hlavným triedam efektov KP patria: (a) výpadky na elektrických rozvodoch, plynovodoch, resp. ropovodoch v dôsledku GIC, (b) poruchy komunikačných systémov, navigácie a radarových signálov v dôsledku rozvoja aurorálnych prúdových systémov tečúcich v ionosfére, (c) zmeny orientácie, resp. orbity družíc (osobitne na nízkych drahách) spôsobené redistribúciou výškového profilu koncentrácie častíc hornej atmosféry. Problematika (a), ktorá je aktuálna najmä na vyšších šírkach, je s konkrétnymi prejavmi opísaná napr. v prácach (Harde and Johansson, 1998, Kappenmann, 2001, Pirjola, 2002, Stauning, 2002). Efekty spadajúce do problematiky (b) sú ilustrované komunikačnými potiažami a poruchami navigačných systémov GPS (Cander, 1998, Daly, 2002, NSWPC, 2000). Poruchy orbity a presnosti orientácie družíc spojené s kozmickým počasím sú uvedené v (Klinkrad and Fritsche, 1999, Mioc and Maris, 2002).

6.2. Účinky častíc na družice, lietadlá a atmosféru.

Hlavné radiačné účinky na družice a lietadlá sú zhrnuté v prácach (Dyer and Rodgers, 1999, Dyer and Lei, 2001, Hilger and Daly, 1998). Pre nízke energie častíc prostredia (materiály družíc sú v elektrickom kontakte s plazmou, ktorá je zdrojom prúdov) je dôležitou zmena potenciálu na povrchu s možnými následkami akými sú krátke spojenie VN systémov alebo výboj s indukovaným prúdovým pulzom interferujúcim s elektronikou. Pri energiách vyšších (častice radiačných pásov, kruhový prúd) radiácia spôsobuje permanentné poškodenie materiálov, čo pri dlhodobej expozícii môže ohroziť ich funkčnosť. Príkladom sú poklesy účinnosti slnečných batérií na Magion-5 (Tříska, 2000). Okrem vysokých tokov protónov slnečných erupcií sa pre možné poškodenia družicových systémov ukazujú dôležitými prípady vysokých tokov energetických elektrónov (Vampola, 1997). Tie môžu byť urýchlené na Slnku, v medziplanetárnom prostredí ako aj v zemskej magnetosfére. Tiež môžu vznikať „nové radiačné pásy“ prejavujúce sa mnohonásobne vyšším tokom aj na nízkych L v dobe silnej geomagnetickej búrky (Blake et al., 1992, 1997). Vysokoenergetické elektróny môžu preniknúť aj do vnútorných oblastí družice a akumulácia náboja na nevodivých materiáloch (napr. káblový systém) môže spôsobiť dielektrický prieboj a indukovať elektromagnetický impulz s následným poškodením vnútorných komponentov. V literatúre sú opísané prípady poškodenia družíc týmto efektom (CRRESS, Meteosat-3). Dôležitým monitorom vysokoenergetických častíc sú geostacionárne družice GOES (v súčasnosti 8,

10 a 11, dáta sú na (H12)). V dobe medzi 21.4. a 20.5.1998 došlo k totálnemu zlyhaniu družice Equator-S, k anomálii prenosu z družice POLAR a ku zlyhaniu komerčnej družice Galaxy 4. Baker et al. (1998) uvádzajú, že v tomto období došlo na družici GOES ku zvýšeniu toku elektrónov >2 MeV o 4 rády, zatiaľčo zvýšenie toku protónov >100 MeV nebolo natoľko dramatické. Silné toky energetických elektrónov boli v prvej polovici mája 1998 pozorované za zemskou magnetosférou na družici INTERBALL-1 a súčasne na sonde SOHO vo vzdialenosti $1.5 \cdot 10^6$ km od Zeme (McKenna-Lawlor et al., 2002).

Vysokoenergetické častice môžu pri interakcii s materiálom vytvoriť v elektronických súčiastkach elektrický náboj postačujúci na ovplyvnenie pamäťového stavu (tzv. SEU – single event upset) alebo na indukovanie falošných signálov napr. v detektoroch CCD. Tieto efekty sú zvyčajne vratné a spôsobujú ich aj častice KŽ, ale tiež častice radiačných pásov v oblasti juhoatlantickej magnetickej anomálie. Pre malé výšky sú preto dôležité monitorovania vysokoenergetických častíc rôznych typov a energií na polárnych orbitách (napr. mapa tokov γ žiarenia na 500 km na družici CORONAS, Bučík et al., 2000). Na vysokých šírkach je výskyt efektov SEU v čase variabilný a podstatne sa zvyšuje pri emisiách od slnečných erupcií. O ich energetickom spektre možno získať informácie kombinovaním meraní z družice GOES a zo siete pozemných NM.

Aj keď príčiny zlyhania družicových systémov nie sú vždy jednoznačne určené, jestvuje pomerne veľa prípadov s vysokou pravdepodobnosťou radiácie ako príčiny poruchy. Z nedávnej doby v t.r. uveďme 3 (H08): (i) NASA družica Aqua na 685 km slnečno-synchrónnej orbite mala poruchu spôsobenú od SEU protónmi vysokých energií (radiačné pásy) nad južným Atlantikom dňa 27.6, nasledujúci deň bola porucha odstránená, (ii) NASA sonda Genesis (hlboko v medziplanetárnom priestore) počas silnej slnečnej erupcie s emisiou protónov vysokých energií dňa 21.4. zaznamenala poruchu orientačného systému, ktorá tiež bola neskôr odstránená, (iii) japonská heliocentrická sonda Nozomi (Planet B) od rovnakej erupcie „pocítila“ poruchu komunikačného systému a jeden z jej 14 vedeckých prístrojov bol poškodený.

Na výškach lietadiel sa efekty typu SEU, známe už skôr z porúch družicových systémov, a spôsobené sekundárnymi zložkami KŽ, začali študovať relatívne nedávno (Johansson and Dyreklev, 1999). Pre eventuálne poruchy leteckých systémov sú dôležité najmä neutróny. Premennivosť ich toku spôsobujú častice slnečných erupcií a zmeny priepustnosti magnetosféry počas geomagnetických porúch. Pre výpočet produkcie neutrónov v atmosfére sa používa napr. programový systém FLUKA (Battistoni, 2002, Zuccon, 2002). V prípade „najhoršej“ známej slnečnej erupcie 23.2.1956 je odhadované, že toky neutrónov na 17 km a prahovej rigidite 1 GV by spôsobili poruchy typu SEU každých 7 s (Dyer and Lei, 2001).

Okrem možných porúch na elektronike lietadiel je dôležitá aj celková dávka ožiarenia, ktorej sú vystavené

najmä posádky lietadiel. Na zemskom povrchu tvorí príspevok od KŽ (galaktická zložka, stredné šírky) iba 8% celkovej dávky a zodpovedá 0.27 mSv/rok (H15). Úroveň radiácie rastie s výškou: na 2.2 km 3krát, na výškach Himaláji 30krát, na 10 km zhruba 150krát a na 17 km 300krát v porovnaní s úrovňou mora (prevzaté z prezentácie Bartlett et al., 2002). Odhady dávok ožiarenia podľa (Dyer and Lei, 2001) na výškach lietadiel podstatne rastú pri slnečných erupciách: zatiaľčo dávkový ekvivalent za 1 týždeň letov posádok od galaktického KŽ na 1 GV a 10 km je ~ 700 μ Sv, pre extrémnu erupciu 23.2.1956 (počas niekoľkých hodín) by bol 1400 μ Sv a na výške 17 km sú tieto hodnoty odhadnuté na 1800 μ Sv, resp. 9300 μ Sv. V takej výške by dávka za dobu erupcie dvojnásobne prekročila celkovú ročnú dávku od galaktického KŽ. Zďaleka nie všetky erupcie sú sprevádzané tak silnou emisiou častíc vysokých energií. V uvedenom prípade by ale účinky pre kozmonautov vo voľnom priestore boli asi fatálne. Aj pre „slabší“ prípad z októbra 1989 by pri práci kozmonauta na Mesiaci (zanedbateľné magnetické tienenie) mohlo dôjsť k jeho usmrteniu (Joselynn, 1998). Pre odhad dávky ožiarenia na lietadlách je užitočný programový kód CARI-6 (H11). Očakávanú dávku od galaktického KŽ na konkrétnej trase a výške letu možno odhadnúť podľa (H02). Podrobný rozbor problematiky radiačnej situácie a monitorovania pre posádky lietadiel je v práci (McAulay et al., 1996). Dozimetrické experimenty na lietadlách sa väčšinou robia integrálne v čase. Na prevenciu kódov produkcie sekundárnych častíc ako aj magnetosferickej priepustnosti sú cenné merania s lepším časovým rozlíšením. Rozsiahly materiál tohto typu je získavaný rutinne s rozlíšením 5 min na linkách ČSA (Spurný and Datchev, 2001, Spurný et al., 2002). Počas slnečnej erupcie s tvrdým energetickým spektrom (GLE 60 dňa 15.4.2001, NM na Lomnickom štíte s $R_c = 4$ GV zaznamenal jasný vzrast), bola v dobe letu z Prahy do New Yorku zaznamenaná zvýšená dávka ožiarenia na dvojnásobok očakávaného v časovej koincidencii s maximom GLE na NM vyšších šírok (Spurný and Datchev, 2001). Otázkou zostáva, či aj silné FD alebo zmeny priepustnosti magnetosféry vedú na výškach lietadiel k merateľnému efektu zmeny dávky ožiarenia. Prehľad vzťahov KŽ a zdravia je napr. v prácach (Reitz, 1999, Shea and Smart, 2000, SSB, 1996).

Modely atmosféry možno nájsť napr. v práci (Bilitza, 1992). Jedným z účinkov kozmických energetických častíc na atmosféru je ionizácia. Pre kozmické počasie (šírenie elektromagnetických vln, navigáciu) je určujúcim výškový profil ionizácie. Produkciu iónov okrem elektromagnetického slnečného žiarenia ovplyvňujú aj korpuskulárne energetické častice, najmä na malých výškach a na nočnej strane (starší prehľad napr. v práci Kudela, 1989). Pod 100 km je vysypávanie častíc radiačných pásov pre ionizáciu v niektorých prípadoch dominantné. Vysokoenergetické elektróny sporadicky prenikajúce do magnetosféry tvoria hlavný zdroj ionizácie na 40-60 km. Pod 40 km je určujúcim faktorom ionizácie kozmické žiarenie. Ionizácia je výsledkom procesov produkcie, rekombinačných strát (radiačných,

disociatívnych, nábojovej výmeny) a difúzie. Zmeny ionizácie od energetických častíc sú tvorené hlavne variabilitou emisií slnečných erupcií a redistribúciou zachytených častíc a kruhového prúdu. Zatiaľčo vo vrstvách E,F sú pre ionosferické efekty kozmického počasia dôležité geomagnetické búrky (Laštovička, 2002), nižšie sa prejavuje kombinácia búrok a energetických častíc (Laštovička, 1988). Práce (Fedulina and Laštovička, 2001, Laštovička and Mlch, 1999, Storini et al., 1998) ukazujú vplyv kozmického žiarenia a magnetickej aktivity na stav ozónovej vrstvy. Kozmické žiarenie pravdepodobne súvisí aj s oblačnosťou a počasím. Lu and Sanche (2002) uvádzajú, že disociácia CF_2Cl_2 a CFCl_3 na povrchu ľadu v polárnej stratosfére na 15 km, spôsobená kozmickým žiarením je asi účinná. Svensmark a Friis-Christensen (1997) ukazujú vysokú koreláciu medzi celkovým pokryvom oblačnosti (družicové meteorologické merania) a intenzitou kozmického žiarenia v r. 1984-1991. Pokiaľ vzrast intenzity KŽ spôsobí vzrast v aerosole, môže to objasniť kladnú koreláciu KŽ a povrchovej teploty nízkych oblakov. Sú uvádzané aj historické súvislosti (uplynulých 1000 rokov) zmeny podnebia s intenzitou KŽ (nepriamo z rádionuklidov). Vplyv KŽ na nízku oblačnosť je diskutovaný v práci (Marsch and Svensmark, 2000). Súvislosťami slnečnej aktivity a počasia sa zaoberajú viaceré práce, napr. (Prigancová et al., 1998), Podrobne sú takéto súvislosti zhrnuté (Tinsley and Fangqun Yu, 2002) a niektoré nové poznatky sú v práci (Yu, 2002). Prekvapivé je, že vplyv slnečnej aktivity je najsilnejší na nízku oblačnosť (pod 3 km), čo poukazuje na mikrofyzikálne mechanizmy spojené s tvorbou aerosolov, ktorá je zvyšovaná pravdepodobne ionizáciou KŽ. Diskusie o väzbách medzi KŽ a počasím pokračujú. Podrobné zhrnutie s komentárom uvádzajú Harrison a Shine (2002). Kniveton a Todd (2001) uvádzajú súvislosti medzi KŽ a zrážkami nad oceánmi, Todd a Kniveton (2001) poukazujú na zmeny oblačnosti počas FD v KŽ. Korelácia medzi parametrami počasia a KŽ vedú k úvahám o príčinnej súvislosti. Je ale treba brať do úvahy, že (a) zmeny KŽ sú väčšinou sprevádzané aj zmenami geomagnetickej a slnečnej aktivity, (b) nie je dostatok laboratórnych experimentov objasňujúcich mikrofyzikálne efekty zodpovedné za tieto väzby. Nedávno v CERN začali aktivity umožňujúce fyzikom atmosféry sledovať vplyvy prirodzenej radiácie na aerosoly a formovania oblakov (Fastroop et al., 2000).

O nepriamych vzťahoch KŽ ku KP pojednávajú napr. (Bieber and Evenson, 1998, Kudela et al., 1996, 2000, Kudela and Storini, 2002, Munakata et al., 2000, Belov et al, 1995) a viaceré ďalšie. Ide najmä o zmenu anizotropie KŽ, ktorá sa prejavuje niekoľko hodín pred inicializáciou geomagnetickej poruchy, a ktorú KŽ vzhľadom na jeho veľkú strednú voľnú dráhu a Larmorovský polomer otáčania „cítia“ pri šírení CME (šíri sa rýchlosťami podstatne nižšími než KŽ) zo vzdialeností viac ako 0.1 AU. V súčasnosti sa robia štúdie zamerané na možné využitie týchto prediktorov pre efekty KP. Tieto

postupy sú založené na metódach umelej inteligencie (napr. Andrejková et al., 1998).

Poznámka. Prehľad literatúry nie je úplný a môže byť aj subjektívny s ohľadom na zameranie autora. Rukopis neprešiel jazykovou korektúrou.

Podakovanie.

Práca bola pripravená s podporou projektu APVT č. 0259.

Literatúra.

- Allkofer, O.C., and P.K.F. Grieder: 1984, Cosmic rays on Earth, in *Physics Data, Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, GMBH, Karlsruhe, Nr. 25-1*
- Andrejková, G., H. Toth, and K. Kudela: 1998, Fuzzy networks in the prediction of geomagnetic storms, *ESA WPP-148*, p. 173-180
- Baker, D.N., et al: 1988, Disturbed space environment may have been related to Pager satellite failure, *Eos Trans., AGU*, **79**, No 40, p. 477, 482-483
- Baker, D.N., N.E. Turner, and T.I. Pulkkinen: 2001, Energy Transport and Dissipation in the Magnetosphere During Geomagnetic Storms, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **63**, p. 421-430, 2001
- Bartlett, D.T., et al.: 2002, Investigation of Radiation Doses at Aircraft Altitudes during a complete solar cycle, *ESA SP-477*, p. 525-528
- Battistoni, B.: 2002, <http://lxmi.mi.infn.it/~battist/needs.ppt>
- Bilitza, D.: 1992, Solar-terrestrial models and application software, *Planet. Space Sci.*, **40**, 541-579
- Belov, A.V. et al: 1985, Search for prediction of Forbush decrease, *Proc. 14th ICRC, Rome*, **4**, 889-891
- Bieber, J.W., and P. Evenson: 1988, CME geometry in relation to cosmic ray anisotropy, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2955-2958, 1998
- Blake, J.B., and D. Friesen: 1977, technique to determine the charge state of the anomalous component of low energy cosmic rays, *Proc. 15th ICRC, Plovdiv*, **2**, 341-344, 1977
- Blake, J.B., et al.: 1997, Correlation of Changes in the Outer Zone Relativistic Electron Population With Upstream Solar Wind and Magnetic Field Measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **24**, p. 927-930
- Blake, J.B., et al: 1992, Identification of an Unexpected Space Radiation Hazard, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **39**, No 6, p. 1761-1764
- Bobik, P.: 2001, *Prechod kozmického žiarenia magnetosférou Zeme*, Dizertačná práca PhD, UPJŠ, Košice
- Bučík, R., et al.: 2000, Distribution of Gamma Ray Fluxes at Altitude 500 km: Coronas-I Data, *Acta Physica Slovaca*, **50**, No. 1, 267-274
- Cander, L.R.: 1988, Space Weather effects on telecommunication, *ESA WPP- 148*, p. 35-42
- Cliver, E.W.: 2000, in *26th ICRC, Invited, Rapporteur and Highlight Papers*, AIP Conference Proc., Melville, New York, **516**, 103-119
- Chupp, E.L., H. Debrunner, E.O. Flückiger, D.J. Forrest, F. Gollier, G. Kanbach, W.T. Vestrand, J. Cooper, and G. Share: 1987, Solar neutron emissivity during the large flare on 1982 June 3, *Astrophys. J.*, **318**, 913-925
- Daglis, I.A., et al: 1999, the terrestrial ring current: origin, formation, and decay, *Rev. Geophys.*, **4**, p. 407-438
- Daglis, I.A.: 2001, Ring Current Physics, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 205-214
- Daly, E.J.: Space Weather: 2002, A Brief Review, *ESA SP-477*, xviii-xxiv, 2002
- Dorman, L.I.: 1974, *Cosmic Rays, Variations, and Space Explorations*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1974
- Dubinský, J., K. Kudela: 1984, Kozmické žiarenie, pp. 162, VEDA, Bratislava
- Dyer, C., and D. Rodgers: 1999, Effects on Spacecraft and Aircraft Electronics, *ESA WPP-155*, p. 17-27
- Dyer, C.S., and F. Lei: 2001, Monte Carlo calculations of the

- influence on aircraft radiation environments of structures and solar particle events, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, p. 1-9, Dec. 2001
- Fangqun Yu: 2002, Altitude variations of cosmic ray induced production of aerosols for global cloudiness and climate, *J. Geophys. Res.*, Space Physics, July, 2002
- Fastroop, B., et al. (J. Kirkby, spokesman): 2000, CLOUD: an atmospheric research facility at CERN, CERN/SPSC 2000-041, pp. 16
- Fedorov, Yu., M. Stehlik, K. Kudela, and J. Kaššovicová: 2002, Non-diffusive particle pulse transport, *Solar Physics*
- Fedulina, I., and J. Laštovička: 2001, Effect of Forbush decreases of cosmic ray flux on ozone at higher middle latitudes, *Adv. Space Res.*, **27**, No 12, p. 2003-2006
- Fisk, L.A., B. Kozlovsky, and R. Ramaty: An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancements in low energy cosmic rays, *Astrophys. J. Lett.*, **190**, L35, 1974
- Forbush, S.E.: 1937, On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm, *Phys. Rev.*, **51**, 1, 108-1, 109
- Forbush, S.E.: 1946, Three unusual cosmic ray increases possibly due to charged particles from the Sun, *Phys. Rev.*, **70**, p. 771, 1946
- Gaffey, J., and D. Bilitza: 1994, NASA/National Space Science Data Center trapped radiation models, *J. Spacecraft and Rockets*, **31**, No 2, p. 172
- Gendrin, R.: 2001, The role of wave particle interactions in radiation belts modeling, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 151-166
- Gosling, J.T., D.J. McComas, J.L. Philips, and J.S. Bame: 1991, Geomagnetic activity associated with Earth passage of interplanetary shock disturbances and Coronal Mass Ejections, *J. Geophys. Res.*, **96**, 7831-7839
- Gonzalez, W.D., A.L.C. de Gonzalez, J.H.A. Sobral, A.D. Lago, and L.E. Vieira: 2001, Solar and Interplanetary causes of very intense geomagnetic storms, *J. Atmos. Solar-Terr. Physics*, **63**, p. 403-412
- Harde, C., and C. Johansson: 1998, Space weather effects on natural gas pipelines, *ESA WPP-148*, p. 43-49, 1998
- Harrison, R.G., and K.P. Shine: 1999, review of recent studies of the influence of solar changes on the Earth's climate, 64 pp., <http://www.met.rdg.ac.uk/~radiation/newref2.html#pub2002>, a report produced for Hadley Centre/Meteorological Office, UK
- Hess, V.F., *Physik. Zeitschr.*:1912, **13**, 1085
- Heynderickx, D., et al.: 2001, SPENVIS, ESA's Space Environment Information System, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 245-254
- Heynderickx, D.: 2001, Predictive radiation belt models, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 139-150
- Hilgers, A., and E.J. Daly: 1998, Space Weather Effects on Space Systems, *ESA WPP-148*, p. 21-28, 1998
- H01 <http://crsp3.nrl.navy.mil/creme96/>
- H02 <http://jag.cami.jccbi.gov>
- H03 <http://lasco-www.nrl.navy.mil/>
- H04 <http://neutronmonitor.ta3.sk>
- H05 <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/magnetos/radbelt.html>
- H06 <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/sun/jpl.html>
- H07 <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/sun/solpro.html>
- H08 <http://sat-nd.com/failures/index.html>
- H09 <http://spaceweather.com>
- H10 <http://spenvis.oma.be>
- H11 <http://www.cami.jccbi.gov/aam-600/610/600radio.html>
- H12 <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GOES>
- H13 http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/ring_current.html
- H14 http://www.sec.noaa.gov/rt_plots/xray_5m.html
- H15 <http://www.umich.edu/~radinfo/introduction/radrus.html>
- Johansson, K., and P. Dyreklev: 1999, Space Weather Effects on aircraft electronics, *ESA WPP-155*, p. 29-34, 1999
- Jokipii, J.R.: 1998, Cosmic Rays, in *From the Sun, Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, Ed. S.T. Suess, B.T. Tsurutani, AGU, DC, p. 123-132
- Joselynn, J. A.: 1998, The human impact of solar flares and magnetic storms, in *From the Sun, Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, Ed. S.T. Suess, B.T. Tsurutani, American Geophysical Union, DC, p. 67-72
- Kahler, S.W.: 2001, Origin and Properties of Solar Energetic Particles in Space, in: *Space Weather*, Proc. Of the Chapman Conference, eds. P. Song, H.J. Singer and G.L. Siscoe, pp. 109-122, *Geophysical Monograph Series*, Vol. 125, AGU
- Kappenmann, J.: 2001, An Introduction to Power Grid Impacts and Vulnerabilities from Space Weather, in *Proc. Of the NATO Advanced Study Institute on Space Storms and Space Weather Hazards*, ed. Daglis, I., p. 335-361, Kluwer Acad. Press
- Kivelson, M.G., and C.T. Russell: Introduction to Space Physics, Cambridge, Cambridge University Press, 1995
- Klinkrad, H., and B. Fritsche: 1999, Orbit and attitude perturbations due to aerodynamics and radiation pressure, *ESA WPP-155*, p. 29-36
- Kniveton, D.R., and M.C. Todd: 2001, On the relationship between precipitation, precipitation efficiency and cosmic ray flux, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, p. 1527-1530
- Křivský, L.: 1995, Slunce z kosmického prostoru, Hvězdárna v Úpici, str. 108
- Kudela, K., M.A. Shea, D.F. Smart, and L.C. Gentile: 1993, Relativistic protons at Lomnický Štít, Proc. 23rd ICRC, Calgary, Vol. SH, 73-76
- Kudela, M. Storini, P. Bobik, and J. Kaššovicová: 1998, Access of cosmic rays to Lomnický Štít and Rome stations, *Proc. 16th ECRS, Alcala*, 71-74
- Kudela, K., and M. Storini: 2001, Cosmic rays: Basic characteristics and relations to Space Weather, in *Sun-Earth Connection and Space Weather*, Italian Physical Society, ed. M. Candidi, M. Storini and U. Villante, vol. 75, p. 101-118
- Kudela, K.: 1989, Energy deposition of corpuscular radiation in the middle atmosphere, in *Middle Atmosphere Program, Handbook for MAP 29*, ed. J. Laštovička, T. Miles and A. O'Neill, part 1, p. 135-141
- Kudela, K.: 1990, A search for solar neutron response in neutron monitor data, *The Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **73**, 297-302
- Kudela, K., M. Storini, M.Y. Hofer, and A. Belov: 2000, Cosmic Rays in Relations to Space Weather, *Space Sci Rev.*, **93**, p. 139-160
- Kudela, K., M. Storini: 2002, Direct and Indirect Relations of Cosmic Rays to Space Weather, *ESA SP-477*, p. 289-292, 2002
- Kudela, K., A.G. Ananth, D. Venkatesan: 1991, The low frequency spectral behaviour of cosmic ray intensity, *J. Geophys. Res.*, **96**, No A9, p. 15,871-15,875
- Kudela, K., J. Rybák, A. Antalová, and M. Storini: 2002, Time evolution of low-frequency periodicities in cosmic ray intensity, *Sol. Phys.*, **205**, p. 165-175
- Lario, D., B. Sanahuja, and A.M. Heras: 1998, Energetic particle events: efficiency of interplanetary shocks, *Ap. J.*, **509**, 415-434
- Laštovička, J.: 1988, A review of solar wind and high energy particle influence on the middle atmosphere, *Ann. Geophys.*, **6** (4), p. 401-408
- Laštovička, J., and P. Mlch: 1999, Is ozone Affected by Geomagnetic Storms?, *Adv. Space Res.*, **24** (5), p. 631-640
- Laštovička, J.: 2002, Monitoring and forecasting of ionospheric space weather effects of geomagnetic storms, *J. Atmos. And Solar-Terrestrial Phys.*, **64**, p. 697-705
- Lu, Q.-B., and L. Sanche: 2001, Effects of cosmic rays on atmospheric chlorofluorocarbon dissociation and ozone depletion, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 078501, August 2001
- Marsh, N., and H. Svensmark: 2000, Low cloud properties influenced by cosmic rays, *Phys. Rev. Lett.*, **85**, 23, p. 5004-5007, Dec. 4, 2000
- McAulay, I.R., et al.: 1996, Exposure of air crew to cosmic radiation, a report of EURADOS Working group 11 „The radiation exposure and monitoring of air crew“, Office for official publications of the European Communities, pp. 77, Luxembourg
- McIlwain, C.E.: 1996, Magnetic coordinates, *Space Sci. Rev.*, **5**, p. 585-598
- McKenna-Lawlor, S., et al: 2002, Spacecraft measurements of ions and electrons (> 40 keV) near and far upstream of the Earth's bow shock, *Adv. Space Res.*, in press
- Mewaldt, R.A., A.C. Cummings, E.C. Stone: 1998, Anomalous Cosmic Rays: Interstellar Interlopers in the Heliosphere and Magnetosphere, in *From the Sun, Auroras, Magnetic Storms, Solar Flares, Cosmic Rays*, Ed. S.T. Suess, B.T. Tsurutani, American

- Geophysical Union, DC, p. 123-132
- Mioc, V., and G. Maris: 2002, Solar Activity effects on Space Mission Orbits, *ESA SP-477*, p.567-570
- Munakata, K., et al.: 2000, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, *J. Geophys. Res.*, **105**, 27,457-27,468
- National Space Weather Program Council, *National Space Weather Program, Implementation Plan*, 2nd Edition, FCM-P31-2000, Office of the Federal Co/ordinator for Meteorology, Washington DC, July 2000
- Němeček, Z., et. al.: 1997, Multipoint study of the solar wind: INTERBALL contribution to the topic, *Adv. Space Res.*, **20**, 659
- Parker, E.N.: 1965, *Planet. Space Sci.*, **13**, 9-49
- Pesses, M.E., J.R. Jokipii, and D. Eichler: 1981, Cosmic ray drift, shock wave acceleration and the anomalous component of cosmic rays, *Astrophys. J. Lett.*, **246**, L85
- Pirjola, R.: 2002, Ground Effects of Space Weather – Geomagnetically Induced Currents, *ESA SP-477*, p. 497-504, 2002
- Prigancová, A., M. Bieleková, and Ya.I. Feldstein: 1994, Magnetic storm development and its quantification for aims of modelling, *J. Geomag. Geoelectr.*, **46**, 341
- Prigancová, A., M. Hvoždara, M. Bieleková: 1998, On sun-climate relations: Hurbanovo data, 1871-1995, *Contr. Geophys. Inst. SAS*, **28**, 161
- Prigancová, A.: 1996, On magnetospheric response during stormy periods, *Adv. Space Res.*, **18**, (8), 237
- Prigancová, A., and Ya.I. Feldstein: 1992, Magnetospheric storm dynamics in terms of energy output rate, *Planet. Space Sci.*, **40**, 581
- Reames, D.V.: 2001, SEPs: Space Weather Hazard in Interplanetary Space, in: *Space Weather, Proc. Of the Chapman Conference*, eds. P. Song, H.J. Singer and G.L. Siscoe, pp. 101-107, *Geophysical Monograph Series*, Vol. 125, AGU
- Reitz, G.: 1999, Biological Effects of Space Radiation, *ESA WPP-155*, p. 53-60
- Schlegel, K.: 2001, The Strongest Geomagnetic Storms of the Last Century, *Radio Science Bull.*, **298**, p. 5-11, September 2001
- Schüssler, M.: 2002, Magnetic Variability of the Sun, *ESA SP-477*, 3-8
- Shea, M.A., and D.F. Smart: 1999, Patterns of solar proton events over four solar cycles, *Proc. 26th ICRC, Salt Lake City*, **6**, 374-377
- Shea, M.A., and D.F. Smart: 2000, Cosmic ray implications for human health, *Space Sci. Rev.*, **93**, p. 187-206
- Shea, M.A., and D.F. Smart: 2001, Vertical cutoff rigidities for cosmic ray stations since 1955, *Proc. of 27th ICRC, Hamburg*, 4063-4066
- Simpson, J.A.: 1955, Cosmic Radiation Neutron Intensity Monitor, *Annals of the IGY*, 1955
- Space Studies Board: 1996, Radiation Hazards to Crews of Interplanetary Missions: Biological Issues and Research Strategies, National Res. Council, National Academy Press, Washington, USA
- Spurný, F., and Ts. Dachev: 2001, Intense Solar Flare Measurements, April 15, 2001, *Radiat. Prot. Dosim.*, **95**, p. 273-275
- Spurný, F.: 2002, Exposure of Air Crew to Cosmic Radiation. Calculation and Experimental Approach; in *High Levels of Natural Radiation and Radon Areas: Radiation Dose and Health Effects*: eds. W. Burkart, M. Sohrabi, A. Bayer; Elsevier Science, p. 121-129
- Stauning, P.: 2002, High-Voltage Power Grid Disturbances during Geomagnetic Storms, *ESA SP-477*, p. 521-524
- Storini, M., M.A. Shea, and D.F. Smart: 1998, Solar corpuscular radiation and its relation to the atmospheric ozone issue, in *Proc. Third SOLTIP Symp.*, eds. X.S. Feng, F.S. Wei and M. Dryer, p. 505-512, Int. Academic Publishers, Beijing
- Svensmark, H., and E. Friis-Christensen: 1997, Variations of cosmic ray flux and global cloud coverage – a missing link in solar-climate relationships, *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 59, No 11, p. 1225-1232
- Šafránková, J., et al.: 1998, The January 10-11, 1997 magnetic cloud: multipoint measurements, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2549
- Tinsley, B.A., and Fangqun Yu: 2002, Atmospheric Ionization and Clouds as Links Between Solar Activity and Climate, in press, *AGU Monograph: Solar Variability and Its Effects on the Earth's Atmospheric and Climate System*, pp. 19, USA
- Todd, M.C., and D.R. Kniveton: 2001, Changes in cloud cover associated with Forbush decreases in galactic cosmic rays, *J. Geophys. Res.*, **106** (D23), p. 32031-32042
- Triska, P.: 2000, personal communication
- Tsyganenko, N.A.: 1987, A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet, *Planet. Space Sci.*, **37**, 5-20
- Tylka, A.J., et al.: 1997a, CREME96: A revision of the cosmic ray effects on microelectronics code, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **44**, N.6, p. 2120-2130
- Tylka, A.J., et al.: 1997b, Probability distribution of high-energy solar heavy ion fluxes from IMP-8, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **44**, N.6, p. 2140-2149
- Vampola, A.L.: 1987, The Aerospace Environment at High Altitudes and its Implications for Spacecraft Charging and Communications, *J. Electrostat.*, **20**, p. 21-26
- Zuccon, P.: 2002, <http://ams.cern.ch/AMS/Analysis/hpl3itp1/psfiles/P.ZucconMar01.pdf>