

Vedecká rada Prírodovedeckej fakulty  
Univerzity Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

**RNDr. Radoslav Bučík**

Autoreferát dizertačnej práce

**TOKY SEKUNDÁRNEHO GAMA ŽIARENIA  
NA NÍZKEJ POLÁRNEJ ORBITE**

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti *philosophiae doctor*  
v odbore doktorandského štúdia:

11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika

Košice 2003

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Katedre jadrovej a subjadrovej fyziky Prírodovedeckej fakulty Univerzity P. J. Šafárika v Košiciach.

Predkladateľ: RNDr. Radoslav Bučík  
Oddelenie kozmickej fyziky  
Ústav experimentálnej fyziky SAV  
Watsonova 47, 043 53 Košice

Školiteľ: Doc. Ing. Karel Kudela, DrSc.  
Ústav experimentálnej fyziky SAV

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa: .....

Obhajoba dizertačnej práce sa koná dňa ..... o ..... h  
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia  
vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie.....

11-24-9 Jadrová a subjadrová fyzika

na .....

**Predseda spoločnej odborovej komisie:**

Prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.  
FMFI Univerzita Komenského  
842 48 Bratislava

## Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>4</b>
<b>2 Hlavné výsledky</b>	<b>6</b>
2.1 Tok gama žiarenia súvisiaci s primárnym kozmickým žiarením . . . . .	6
2.2 Tok gama žiarenia od magnetosférických elektrónov . . . . .	8
2.3 Tienenie detektora na družici CORONAS-I . . . . .	11
<b>3 Záver</b>	<b>13</b>
<b>4 Summary</b>	<b>14</b>
<b>Referencie</b>	<b>16</b>
<b>Zoznam publikácií</b>	<b>18</b>

# 1 Úvod

Gama žiarenie merané v balónových experimentoch alebo na nízko-orbitálnych družiciach má primárnu (kozmicú) a sekundárnu komponentu. Primárne je buď difúzne alebo pochádza z rôznych lokalizovaných zdrojov. Významným bodovým zdrojom je Slnko počas slnečných erupcií. Difúzne gama žiarenie obsahuje izotropnú extragalaktickú alebo anizotropnú galaktickú zložku. Sekundárne gama žiarenie je produkované v interakciách primárneho kozmického žiarenia v zemskej atmosfére a v materiály obklopujúci detektor resp. v detektore samotnom. V oblasti radiačných pásov Zeme sa pozoruje vzrast sekundárnej komponenty a to najmä v čase magnetických búrok. Mechanizmy produkcie gama žiarenia v kozmickom priestore v intervale energií od 100 keV do 100 MeV sú sumarizované v [1].

Energetické gama žiarenie je v atmosfére produkované rozpadom neutrálneho piónu s maximom intenzity v  $\sim 70$  MeV [2]. Hlavný zdroj nízko-energetického gama žiarenia je brzdné žiarenie spŕškových, primárnych a návratových [3] elektrónov a elektrónov vysypávajúcich sa z radiačných pásov [4]. Príspevok primárnych elektrónov je zanedbateľný. Intenzívne čiary gama žiarenia (aj od slnečných častíc [5]) sú produkované buď anihiláciou pozitronov alebo deexcitáciou jadier  $^{16}\text{O}$  a  $^{14}\text{N}$  [6]. Čiarový príspevok je v porovnaní s inými zdrojmi veľmi malý. Kontinuum atmosferického gama žiarenia má preto dve hlavné zložky: gama žiarenie spojené s primárnym kozmickým žiarením (od spŕškových a návratových elektrónov) a brzdné žiarenie magnetosférických elektrónov.

Diferenciálne energetické spektrum atmosferického gama žiarenia je aproximované mocninovou funkciou so záporným spektrálnym indexom v rozmedzí  $-1$  až  $-2$ , v závislosti od energie (so zvyšovaním energie je spektrum mäkkšie [7]), hĺbke v atmosfére, lokálnej rigidite (východo-západná asymetria sa tiež pozoruje [8]) a smeru priletu fotónov (napr. vzrast intenzity v horizontálnom smere). Jeho intenzita antikoreluje so slnečnou aktivitou [9]. Šírková závislosť ukazuje vzrast toku gama žiarenia v polárnych oblastiach [10].

Experimenty na extrémne ťažkých družiciach (napr. Mir, Salute-7-Kosmos-1686) poukazujú na významný príspevok lokálne produkovaného gama žiarenia [11]. Iný typ pozadia predstavuje tzv. indukovaná rádioaktivita protónmi kozmického žiarenia a radiačných pásov, a sekundárnymi (napr. atmosferickými) neutrónmi v samotnom detektore [12], ktorá je dôležitá len v nízko-energetických kanáloch, približne pre energie pod 3 MeV [13].

Brzdné gama žiarenie od vysypávajúcich sa elektrónov, pozorované najmä v auro-rálnych oblastiach, predstavuje počas magnetických búrok najintenzívnejšiu komponentu nízko-energetického gama žiarenia [14].

Spektrum kozmického difúzneho gama žiarenia je predovšetkým v oblasti malých energií strmšie ako spektrum atmosferického [15]. Okrem stabilného difúzneho pozadia, pozorujú sa aj prechodné zvýšenia intenzity primárneho gama žiarenia. Tie zahŕňajú emisie počas slnečných erupcií [16] a tzv. gama záblesky. Pôvod difúzneho a zábleskov gama žiarenia je stále problematický.

Táto práca je venovaná štúdiu priestorového a energetického rozdelenia tokov sekundárneho gama žiarenia v blízkom okolí Zeme, s dôrazom na spojitosť s primárnym kozmickým žiarením a magnetosférickými elektrónmi.

Podrobné priestorové a energetické rozdelenie tokov tvrdého röntgenového alebo gama

žiarenia vo vnútornej magnetosfére sa doteraz detailne neštudovalo. Na balónových resp. družicových experimentoch sa často skúmali jednotlivé charakteristiky tokov gama žiarenia. Väčšina experimentov prebiehala na nízkych geomagnetických šírkach za účelom minimalizovať atmosferickú radiáciu pre štúdium gama žiarenie mimozemského pôvodu. Preto pozorovanie gama žiarenia v blízkom okolí Zeme je veľmi dôležité pre poznanie podmienok pozadia v astronomických experimentoch.

Toky nabitých energetických častíc, najmä populácia zachytených v geomagnetickom poli Zeme, je na rozdiel od gama žiarenia mapovaná relatívne dost' dlho. Okrem empirických model radiačných pásov (napr. NASA AE [17]), hlavne vysoko variabilné toky magnetosférických elektrónov sa predpovedajú aj teoreticky, napr. [18].

Priame pozorovanie vysypávajúcich sa elektrónov je ohraničené len na blízke okolie satelitu, umožňujúc tak študovať daný jav lokálne. Pozorovanie na diaľku, nepriamo brzdným gama žiarením, pre jeho nízku absorpčnú schopnosť, je dôležité z hľadiska štúdia globálnych charakteristík vysypávania sa elektrónov, ktoré poskytuje iný pohľad na tento proces. Pretože populácia energetických častíc zachytených v magnetickom poli závisí od slnečnej aktivity, experimenty, v ktorých sa meria nízko-energetické gama žiarenie môžu byť užitočné pre aktualizáciu existujúcich modelov radiácie nabitých častíc.

Väčšina experimentálnych údajov v danej práci bola získaná prístrojom SONG (Solar Neutrons and Gamma rays), vyvinutom na Ústave experimentálnej fyziky SAV v spolupráci s Ústavom jadrovej fyziky Moskovskej štátnej univerzity, merajúcom na polárnej, nízko-orbitálnej družici CORONAS-I v intervale marec-jún r. 1994. Polárna orbita družice umožňovala skenovať všetky geomagnetické šírky a prechádzať vnútorným aj vonkajším radiačným pásom. Navyše, počas štvormesačného obdobia sa získalo relatívne veľké množstvo dát. Primárne bol detektor určený pre meranie slnečných gama emisií v priebehu maxima 22. solárneho cyklu. Finančné a technické problémy spôsobili oneskorenie experimentu, takže nakoniec družica merala v blízkosti minima slnečnej aktivity, kde žiadne gama emisie zo Slnka neboli zaznamenané.

V súčasnosti vylepšená verzia prístroja SONG pracuje v intervale energií 0.028 – 100 MeV na družici CORONAS-F od júla r. 2001, okolo maxima nasledujúceho solárneho cyklu. Počas najväčšej slnečnej erupcii za posledné dva cykly, 28. 10. 2003, bolo na CORONAS-F zaznamenané vysoko-energetické gama žiarenie zo Slnka. V súčasnosti okrem CORONAS-F, slnečné elektromagnetické žiarenie je merané aj na družici RHESSI v rozsahu röntgenových energií až energií jadrových gama čiar.

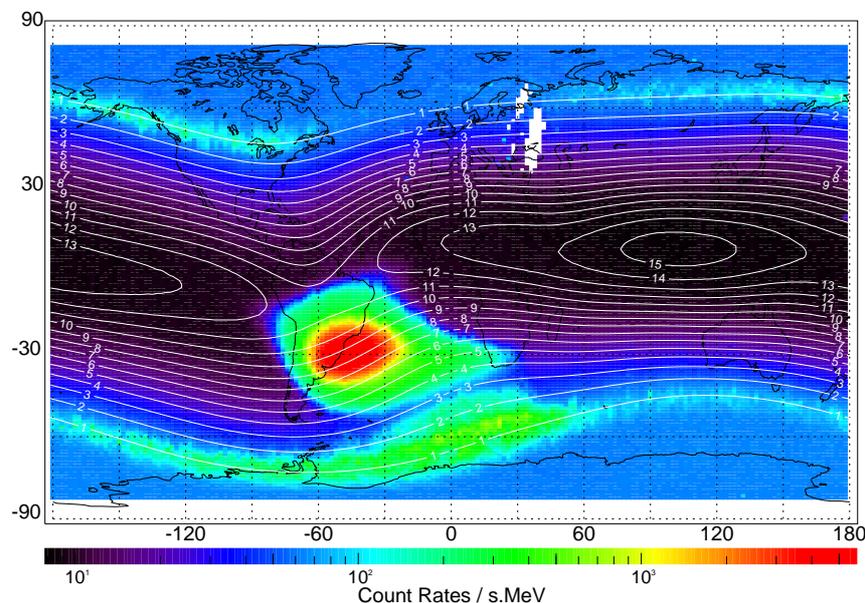
## 2 Hlavné výsledky

### 2.1 Tok gama žiarenia súvisiaci s primárnym kozmickým žiarením

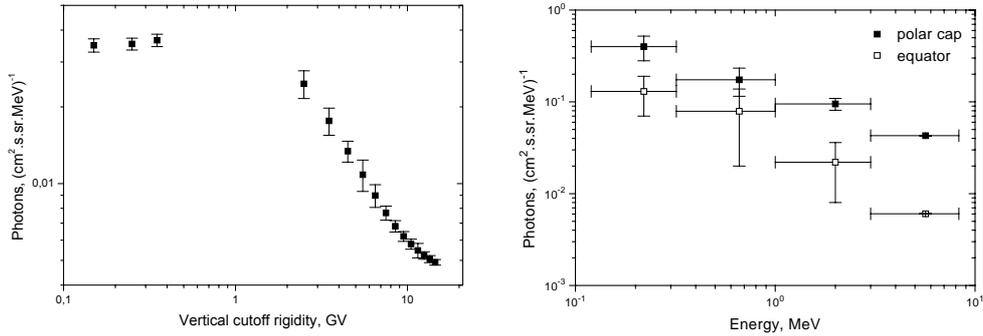
Rozdelenie tokov gama žiarenia v geografických súradniciach na výške  $\sim 500$  km v energetických intervaloch:  $0.12 - 0.32$  a  $3 - 8.3$  MeV odhaľuje dve dôležité vlastnosti: iregulárne zvýšenia v aurorálnych a subaurorálnych oblastiach a monotónne sa so šírkou meniaci tok, ktoré sú ostro priestorovo oddelené, naznačujú ich odlišný pôvod. Geografická mapa  $3 - 8.3$  MeV tokov gama žiarenia na orbite družice CORONAS-I je daná na Obr. 1.

Vzrast intenzity gama žiarenia so znižovaním geomagnetického prahu je dôkazom genetického vzťahu s primárnym kozmickým žiarením. Nasýtenie toku gama žiarenia pre  $R < 1$  GV súhlasí s odrezaním diferenciálneho spektra primárneho kozmického žiarenia pre energie  $E < 1$  GeV. Šírkové rozdelenie intenzity toku gama žiarenia je na Obr. 2 vľavo. Pre  $R > 2$  GV je získaná závislosť dobre fitovaná mocninovou funkciou s exponentom blízky k  $-1$ . Odlišnosť od integrálneho rigiditného spektra primárneho kozmického žiarenia, s exponentom  $-1.7$ , môže byť spôsobená zvýšeným príspevkom návratových albedo elektrónov na nízkych šírkach, majúcich rigidity pod geomagnetickým prahom. Pomer polárnych tokov ku equatoriálnym, rovný  $\sim 7$  a tiež získaný šírkový profil dobre súhlasí s predchádzajúcimi meraniami a výpočtami produkcie gama radiácie primárnym kozmickým žiarením.

Okrem neutrálnych častíc prístroj SONG meral aj nabitú energetickú časticu s energetickým prahom  $60$  MeV. Porovnaním so šírkovou závislosťou primárneho kozmického žiarenia, príspevok albedo nabitých častíc je najväčší na rovníku ( $\sim 80\%$ ) a najmenší na pólach.



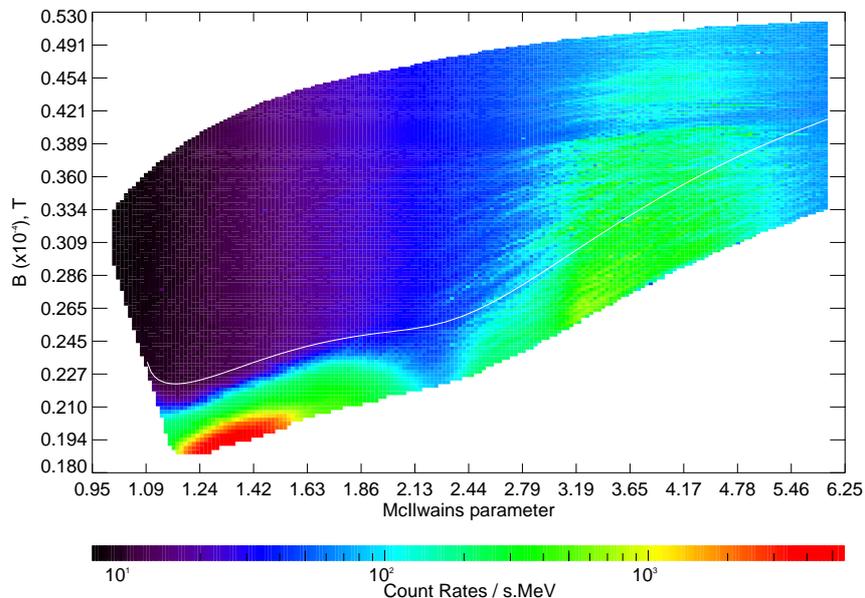
Obrázok 1: Mapa stredných tokov gama žiarenia v energetickom intervale  $3 - 8.3$  MeV. Farebná škála odpovedá log početnosti detektora za 1 s na 1 MeV. Čiary vertikálnej prahovej rigidity  $R$  sú v jednotkách GV.



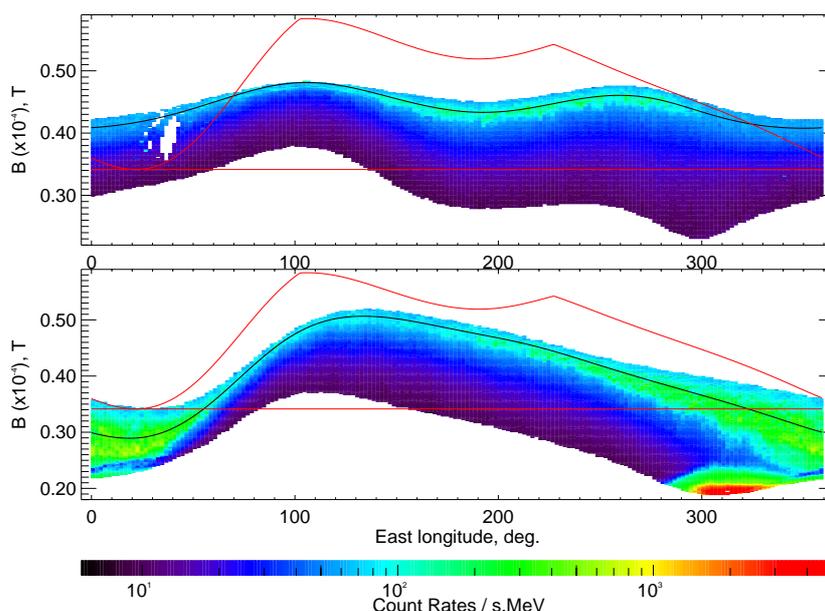
Obrázok 2: (vľavo) Závislosť intenzity 3 – 8.3 MeV gama žiarenia na prahovej rigidite v mieste merania. (vpravo) Diferenciálne energetické spektrum gama žiarenia merané na rovníku a na póloch.

Závislosť tokov na lokálnom čase je pravdepodobne spôsobená tienením detektora korpusom družice od atmosferického gama žiarenia. Pomer nočných tokov ku denným, rovný faktoru  $\sim 1.3$ , je blízky pomeru zorných polí detektora na nočnej a dennej strane orbity, čo odpovedá našej predstave. Tento fakt nepriamo poukazuje na to, že pozorované gama žiarenie v energetickom kanále 3 – 8.3 MeV má predovšetkým atmosferický pôvod. Difúzne gama žiarenie je v rozmedzí od 0.2 do 1.5% celkového pozorovaného toku, podľa toho či meriame v polárnych oblastiach alebo v blízkosti rovníka.

V energetickom intervale 0.12 – 0.32 MeV, gama žiarenie indukované protónmi primárneho kozmického žiarenia bolo odhadnuté porovnaním šírkových závislostí v oboch energetických kanáloch a predstavuje 83% na rovníku a 53% v polárnych oblastiach z celkového meraného toku.



Obrázok 3: Rozdelenie tokov gama žiarenia v súradnicovo systéme  $L - B$ . Pole  $B_{min}^{100}$  je zobrazené bielou čiarou.



Obrázok 4: Dĺžkové rozdelenie tokov 3 – 8.3 MeV gama žiarenia pre severné (horný panel) a južné (dolný panel) zrkadlové body. Magnetická obálka  $L = 3.9$ , stred maxima tokov v zóne kvázizáchytu, je znázornená čiernou čiarou. Stratové kužele pre toto  $L$  sú zobrazené červeno. Oblasť kvázizáchytu (driftový stratový kužel) je ohraničená horizontálnou červenou čiarou a čiarou nad ňou.

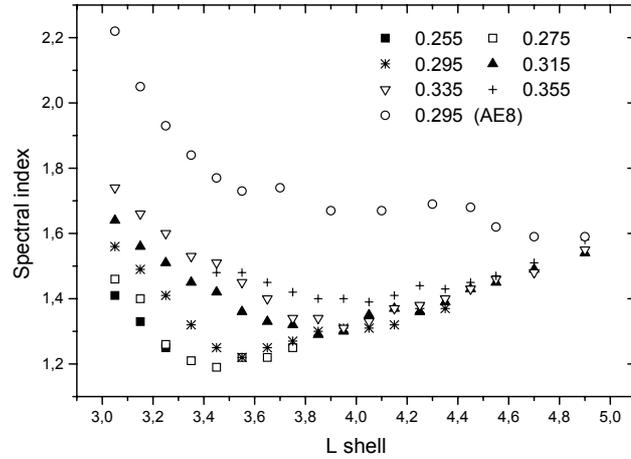
Diferenciálne energetické spektrum gama žiarenia po korekcii na indukované pozadie je na Obr. 2 vpravo. Pozorované spektrá sú o niečo tvrdšie ako spektrá atmosferického gama žiarenia, čo môže byť čiastočne spôsobené nepresnosťou v určení energeticky závislého geometrického faktora prístroja SONG. Strmší sklon spektra na rovníku môže reflektovať príspevok nabitých albedo častíc, produkujúcich mäkšie spektrum.

Relatívne samostatnú časť predstavuje analýza krátkodobých variácií (Forbushových efektov) nabitých častíc meraných na CORONAS-I, ktoré sú tradične vyšetrované sieťou pozemných neutrónových monitorov. Šírková závislosť variácií tokov nabitých častíc počas dvoch magnetických búrok v apríli 1994, ukazuje silný pokles na rovníku, kde v podstate pozorujeme častice pod geomagnetickým prahom, a vzrast toku v stredných šírkach spájaný s poklesom lokálnej odrezávacej rigidity [19].

## 2.2 Tok gama žiarenia od magnetosférických elektrónov

Toky gama žiarenia v oboch energetických intervaloch boli analyzované v invariantných magnetických súradniciach  $L, B$ , zavedených McIlwainom [20]. Na Obr. 3 je rozdelenie stredných tokov gama žiarenia v  $L - B$  priestore pre interval energií 3 – 8.3 MeV. Modelovanie geometrie  $L - B$  priestoru v magnetickom poli Zeme za predpokladu že výška 100 km je hranica medzi úplnou a nulovou absorpciou v atmosfére ukazuje, že pre  $L > 1.1$  pole  $B_{min}^{100}$  oddeluje oblasť stabilného záchytu od oblasti kde častice môžu byť kvázizachytené.

Zvýšené toky v  $L - B$  súradniciach sa sústreďujú do dvoch intervalov  $L$  oddelených oblasťou poklesu toku gama žiarenia. Porovnanie s nominálnou polohou radiačných pásov ukazuje, že prvá najintenzívnejšia zóna leží vo vnútornom radiačnom páse a druhá široká oblasť súhlasí s polohou vonkajšieho pásu.

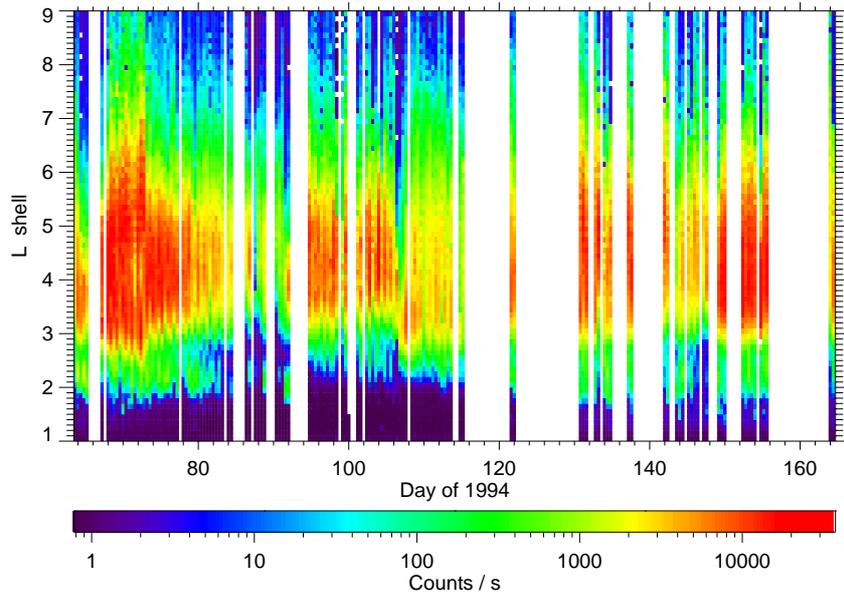


Obrázok 5: Variácie záporného mocninového spektrálneho indexu gama žiarenia a elektrónov AE-8 modelu na  $L$  pre rôzne hodnoty  $B$ .

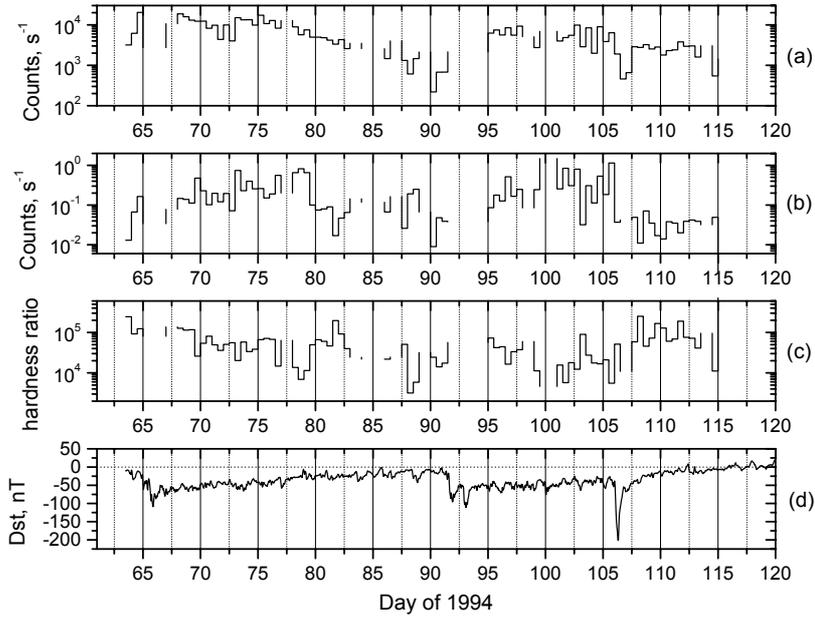
Zvýšené toky gama žiarenia na výške  $\sim 500$  km vo vnútornom páse, ktoré ležia v zóne stabilného záchytu, budú produkované zachytenými časticami v materiály družice. Jediným efektívnym mechanizmom v tomto intervale energií je brzdné žiarenie relativistických elektrónov. Štruktúra tokov v oblasti stabilného záchytu, t.j. nárast intenzity smerom k magnetickému rovníku a strmý gradient intenzity tokov vo vnútornom páse odráža rozdelenie tokov zachytených čatíc pri ich zrkadlení pozdĺž siločiar a tiež efekt atmosferického odrezania, analyzovaný v [21]. Vo vonkajšom radiačnom páse, sú intenzívne toky gama žiarenia pozorované aj v oblasti kvázizáchytu. Obr. 4 ukazuje ich dĺžkové rozdelenie na jednotlivých magnetických obálkach  $L$ . Charakter tejto závislosti môže byť vysvetlený akumuláciou elektrónov pri ich východnom dĺžkovom drifte pred hranicou ich vysypania do atmosféry (nárast tokov gama žiarenia smerom na východ), a rozdielnou variáciou apertúry driftového stratového kužel'a (DLC) pre severné a južné zrkadlové body.

Závislosť energetického spektra gama žiarenia na magnetickej obálke  $L$  pre rôzne hodnoty pol'a  $B$  vo vonkajšom radiačnom páse a v oblasti stabilného záchytu je na Obr. 5. Vo vnútornom okraji vonkajšieho radiačného pásu je evidentná energetická závislosť na  $B$ . Zmäčkovanie spektra s rastom  $B$  môže byť vysvetlené príspevkom albeda elektrónov k populácii zachytených častíc. Keďže pri priečnej difúzi k malým  $L$  dochádza k urýchľovaniu, pri zachovaní prvého adiabatického invariantu, tvrdenie spektra smerom od vonkajšieho okraju môže byť pri injekcii elektrónov týmto vysvetlené.

Toky gama žiarenia v DLC sú aj časovo závislé ako to pre elektróny merané prístrojom MKL na tej istej družici ilustruje Obr. 6. Jednotlivé injekcie elektrónov sú spojené s magnetickými búrkami, ktoré sú identifikované poklesom  $D_{st}$  indexu. Na Obr. 7. sú poldňové priemerné toky DLC elektrónov na  $L$  odpovedajúcim maximu intenzity pre dva energetické intervaly. Rozdielny časový profil tokov elektrónov nízkych a vysokých energií naznačuje ich odlišný pôvod. Pokiaľ nízko-energetická komponenta vzrastie okamžite po hlavnej fáze magnetickej búrky, pravdepodobne v dôsledku ich priamej injekcie, toky

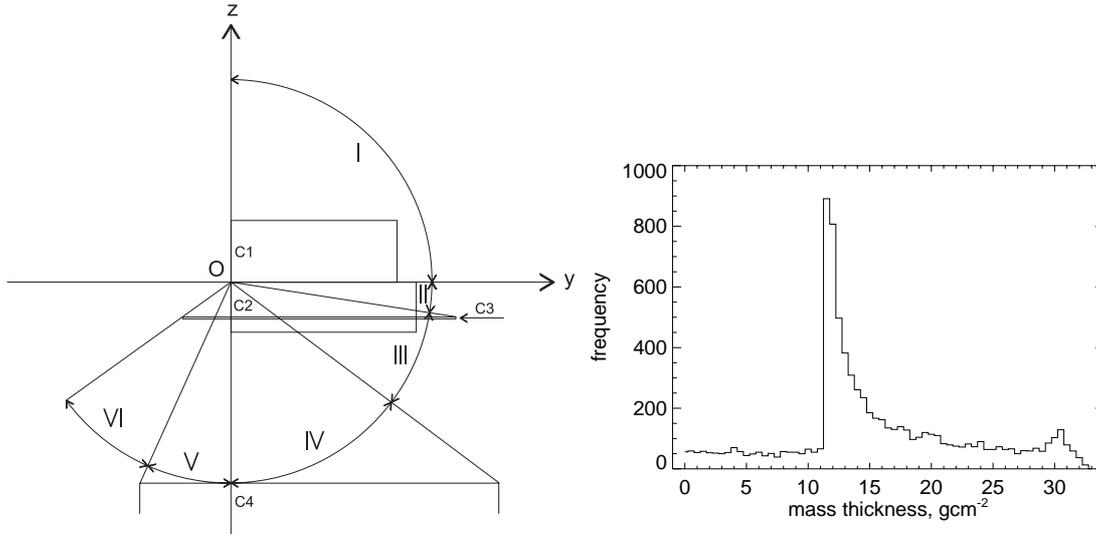


Obrázok 6:  $L - t$  diagram DLC elektrónov v energetickom intervale 0.5 – 1.5 MeV.



Obrázok 7: (a,b)-12 hod. priemery 0.5 – 1.5 a 6 – 12 MeV tokov elektrónov, (c)-pomer tokov, (d)- $D_{st}$  index.

elektrónov vysokých energií narastajú pomaly až po niekoľkých dňoch. Objavenie sa vysokoenergetickej komponenty môže byť objasnené betatrónovým radiálnym urýchľovaním spolu s lokálnym pôsobením neadiabatických mechanizmov urýchľovania [22].



Obrázok 8: (vľavo) Model rozloženia hmoty okolo CsI scintilátora. (vpravo) Histogram rozdelenia hmoty v C1.

Design.	$\theta$	$\phi$	$\Omega$	$\bar{s}_n$	$\sigma_n$	$\varepsilon$	$n$
I	$(0, \frac{\pi}{2})$	$(0, \pi)$	$1.00\pi$	15.60	7.04	0.16	7905
II	$(\frac{\pi}{2}, \theta_2)$	$(0, \pi)$	$0.20\pi$	26.09	12.73	0.26	9273
III	$(\theta_2, \theta_4)$	$(0, \pi)$	$0.47\pi$	30.34	12.44	0.30	6480
IV	$(\theta_4, \pi)$	$(0, \pi)$	$0.33\pi$	45.87	17.87	0.46	5879
V	$(\theta_4, \pi)$	$(\pi, 2\pi)$	$0.13\pi$	30.39	18.06	0.30	13573
VI	$(\theta_2, \theta_4)$	$(\pi, 2\pi)$	$0.38\pi$	4.66	1.07	0.05	2065

Tabuľka 1: Výsledky simulácie hrúbky látky v jednotlivých priestorových uhloch.  $\theta, \phi$  definujú priestorový uhol  $\Omega$  v sr.  $\bar{s}_n$  - priemerná hrúbka látky ( $\text{g cm}^{-2}$ );  $\sigma_n$  - smerodajná odchýlka ( $\text{g cm}^{-2}$ );  $\varepsilon$  -  $1.96\sigma$  štatistická chyba ( $\text{g cm}^{-2}$ );  $n$  - počet pokusov.

### 2.3 Tienenie detektora na družici CORONAS-I

Model rozdelenia hmoty okolo scintilátora CsI prístroja SONG na družici CORONAS-I je daný na Obr. 8 vľavo. SONG spolu s ostatnými prístrojmi bol umiestnený na rampe vo vzdialenosti 1 m od predného konca družice. Toto zložité geometrické rozdelenie hmoty bolo modelované štvoricou valcov C1 (materiál nad úrovňou stredu CsI), C2 (materiál pod stredom CsI), C3 (prístrojová rampa), a C4 (družica). Počiatok súradnicového systému na Obr. 8 je v strede CsI. Rímske číslice označujú výber priestorových uhlov podľa počtu rôznych absorbérov v ktorých sa simulovala priemerná hmota. Okrem toho, že nebolo známe rozdelenie hustoty v objektoch okolo CsI, pre zjednodušenie aj rozdelenie hustoty v modelovaných valcoch sa uvažovalo konštantné. Stredná hmota v jednotlivých priestorových uhloch bola počítaná metódou Monte Carlo. V Tab. 1 sú uvedené výsledky simulácie strednej hmoty v priestorových uhloch podľa Obr. 8. Histogram rozdelenia hmoty vo valci C1 je v pravej časti Obr. 8. Stredná hmota v priestorovom uhle  $4\pi$  je približne

rovná  $16 \text{ g cm}^{-2}$ .

Získané výsledky sa využili na upresnenie nominálne všesmerového ( $4\pi$ ) uhla príjmu detektora CsI. V energetickom intervale  $0.12 - 0.32 \text{ MeV}$  je korigovaný uhol príjmu rovný  $1.8\pi \text{ sr}$  a pre interval  $3 - 8.3 \text{ MeV}$   $2.9\pi \text{ sr}$ , za predpokladu že absorbným materiálom je hliník. Nižší uhol príjmu pre malé energie je odrazom vyššieho absorbného koeficientu gama žiarenia pre rozsah  $0.12 - 0.32 \text{ MeV}$ .

Stredná hmota okolo CsI cez celý priestorový uhol bola použitá pre výpočet produkcie brzdného gama žiarenia v materiály družice od elektrónov v modeli AE-8 vo vnútornom radiačnom páse. V tých oblastiach  $L - B$  priestoru kde model AE-8 približne súhlasí s priestorovým rozdelením tokov gama žiarenia, vypočítané hodnoty sa dobre zhodujú s nameranými.

### 3 Záver

V nasledujúcich bodoch sú stručne zosumarizované najvýznamnejšie dosiahnuté výsledky.

- Bolo získané detailné priestorové rozdelenie stredných tokov gama žiarenia za štvormesačné obdobie, na výške 500 km, v geografických a invariantných magnetických súradniciach pre dva energetické intervaly. Dve komponenty gama žiarenia boli identifikované: gama radiácia od primárneho kozmického žiarenia a častíc albeda, a gama žiarenie produkované magnetosférickými elektrónmi. Takéto podrobné rozdelenie doteraz nebolo urobené.
- Šírková závislosť gama žiarenia meraného mimo radiačných pásov ukazuje zreteľný súvis tejto komponenty s primárnym kozmickým žiarením. Nájdená prevažnosť albedo častíc v blízkosti rovníka pravdepodobne ešte zoslabuje šírkovú závislosť gama žiarenia, či zmäkčuje jeho energetické spektrum na rovníku. Bolo ukázané že efekt albedo častíc je dôležitý aj pri Forbushových poklesoch intenzity primárneho kozmického žiarenia.
- Na základe analýzy energetických spektier gama žiarenia v oblasti stabilného záchytu vo vonkajšom radiačnom páse bol identifikovaný dôležitý príspevok albedo častíc pre oblasť jeho vnútorného okraja a pôsobenie urýchľovania vo vonkajšej časti kde je pozorovaná prevažnosť energetickejších častíc. Časový profil spektra MKL elektrónov v DLC vo vonkajšom radiačnom páse jasne ukazuje energizáciu spojenú s magnetickými búrkami v období marec-jún 1994 a tiež dobrú časovú koincidenciu s tokmi gama žiarenia.
- Pre interpretáciu tokov gama žiarenia v magnetických súradniciach bolo modelované rozdelenie populácie zachytených elektrónov na konštatnej výške  $L - B$  priestoru v magnetickom poli Zeme a ich dĺžkové rozdelenie v stratových kuželoch. Intenzívne toky gama žiarenia pri prechode oblasťou stabilného záchytu vo vnútornom a vonkajšom radiačnom páse sú umelým efektom od materiálu na družici. Počas magnetických búrok zvýšene toky pozorované v aurorálnych oblastiach plynú z vysypania sa elektrónov z vonkajšieho radiačného pásu do atmosféry resp. hmoty na družici. V práci bolo po prvý krát poukázané na tento súvis.
- Bol vyvinutý zjednodušený model geometrického rozdelenia hmoty okolo detektora gama žiarenia na družici CORONAS-I. Model zahŕňa metódu výpočtu rôznych priestorových uhlov a Monte Carlo odhad strednej hrúbky látky v nich. Pomocou navrhovaného modelu bol upresnený uhol príjmu gama žiarenia všesmerovým detektorom CsI prístroja SONG a takto modifikovaný jeho geometrický faktor. Kôli podobnosti v experimentálnom usporiadaní, navrhovanú metodiku je možné priamo aplikovať pre družicu CORONAS-F. Simulovaná hrúbka látky bola ďalej použitá pre výpočet produkcie brzdného gama žiarenia.
- Bola vytvorená databáza meraných tokov gama žiarenia, ktorú použili aj renomované zahraničné laboratória. Okrem prvotnej analýzy experimentálnych dát za účelom identifikácie chýb merania bol vytvorený súbor programov pre výpočet trajektórie družice a potrebných geomagnetických a astronomických parametrov. V súčasnosti sa daný programový balík využíva aj pre nový experiment CORONAS-F.

## 4 Summary

Detailed distribution of gamma rays at 500 km altitude in geographic and geomagnetic coordinates has been obtained. Two contributions are identified: by primary cosmic rays and charged albedo fluxes, and due to magnetospheric electrons.

The intensity of the first component was found to be inversely proportional to the primary cosmic-ray cutoff rigidity. The presence of re-entrant albedo electrons at closed field lines at low latitudes seems to be one of the reasons of the hardness of this dependence in comparison with similar one for primary cosmic rays. The same fact can also partly explain softer gamma-ray energy spectra observed near the equator than at the pole. The prevalence of albedo charged particle flux near the equator in integral energy channel measuring electrons and protons with energy release of 60 MeV was also deduced from our measurements.

During the magnetic storms, charged albedo flux dominance can explain anomaly in Forbush decrease, which maximum was observed at equatorial region. The charged particle flux increase at middle latitudes at beginning of the magnetic storm was attributed to the local rigidity cutoff variation - its diamagnetic decrease due to ring current builds up. The possibility of the cosmic-ray variation study by detectors on high-inclination satellites was in the present work demonstrated.

The saturation of the 3 – 8.3 MeV gamma-ray flux for  $R < 1$  GV agrees with cutoff to the differential energy spectrum of primary cosmic rays at  $E \leq 1$  GeV. The structure of rigidity cutoff distribution at altitude of 500 km in geographical map is similar to the 3 – 8.3 MeV gamma-ray flux distribution. These are reasons why we believe that first detected component of gamma rays are secondary gamma radiation produced by primary cosmic rays in the Earth's atmosphere and flowing out to the satellite altitude with any unresolved local contribution. However, the local gamma rays seem to have a minor importance in observed gamma-ray flux. It was found the night-day asymmetry in detected gamma-ray intensity could be explained by the shadowing effect of the satellite body from the atmosphere, indirectly confirming that CORONAS-I gamma rays are mainly due to atmospheric gamma radiation.

The induced contribution due to primary cosmic-ray bombardment, which decreases the latitudinal effect for energies up to 3 MeV was estimated and subtracted from the gamma-ray flux in energy channel of 0.12 – 0.32 MeV.

The distribution in  $L - B$  coordinates showing the regular pattern of the atmospheric gamma rays of the cosmic origin is well-arranged according to the McIlwain's  $L$  parameter, quantity highly correlated with the geomagnetic cutoff.

We found that most intense fluxes, irregularly distributed at geographical maps lies at stable trapped zones. In  $L - B$  coordinates enhanced fluxes concentrate into two areas, which correspond to the nominal location of the trapped radiation belts. The most intense is clustered into the inner radiation zone. Both inner and outer zone enhancements are separated by region of the flux decreasing, corresponding to the slot region between the belts. The qualitative modeling of the radiation belt electron behavior in altitude-section in  $L - B$  space of the Earth's magnetic field prefers electron bremsstrahlung origin of the observed gamma-ray fluxes.

Detailed energy spectral characteristics of the gamma-ray flux in outer stable trapped zone show intensity peak between  $L$  shells of 3.5 and 4, where the power law spectral

index has minimal value, indicating high energy part of the gamma-ray electron parents presents here. From the analysis of the newly injected MKL electrons during the magnetic storms in March-June 1994 period was deduced that electrons could be energized during the inward radial diffusion with contribution of any local heating process. The significant contribution of albedo electrons to the formation of the trapped electron flux in the inner boundary of the outer radiation belt was gather from the spectral analysis. In the same part of the outer belt the gamma-ray spectral profile along the  $L$  shells copies the AE electron model one. Discrepancy at higher  $L$ -shells can be explained by not including the temporal variations in the model.

Similar energy spectral slopes between AE electrons and SONG gamma rays in outer and slot regions could also confirm that observed gamma-ray flux is mainly due to bremsstrahlung electrons as a only one effective production mechanism of low-energy gamma continuum in the Earth's environment. The simple test on the bremsstrahlung production by AE inner belt electrons in the limits of our simplification following from the production scheme and uncertainties in flux reconstruction is in good agreement with our observations.

Temporal variability of the gamma rays at the atmospheric drift loss cone coincided with the  $D_{st}$  profile indicating couple of magnetic storms during the studied time interval. The coincidence with the MKL relativistic drift loss cone electrons presents gamma rays as a good proxy for the population of the precipitating energetic electrons. No substantial time variable flux in the inner belt was observed, basically indicating the not strictly magnetospheric origin of the inner belt electrons.

In summary, based on our analysis the enhanced fluxes of gamma rays observed in the inner radiation belt are artificial effect of the satellite and of the instrumental matter. In the outer radiation belt, gamma rays are combination of both the Earth's atmosphere and the artificial emissions.

The matter distribution in the complex experimental setup around the CsI crystal of the SONG instrument on CORONAS-I satellite has been modeled. The methods of the solid angle calculation and Monte Carlo average mass thickness estimation have been developed, giving the possibility to calculate mean matter in various directions, and with variable size of the solid angle. However, accuracy of the proposed model is limited by knowing of the real mass distribution in whole space around the detecting crystal. We select the eight solid segments supposing (the density variation in the surrounding instruments was unknown in the present study) having the most different mass density. Specifying the position of the detecting element (CsI crystal), and values of the masses and dimensions of the ambient objects, the detector shielding for the present CORONAS-F experiment can be evaluated.

Knowing the average mass thickness distribution in the different eight solid angles the nominal  $4\pi$  detector FOV was qualified and for local bremsstrahlung production the simulated mass thickness was used.

In order to accomplish all stated problems the gamma-ray database of the measured fluxes by the SONG instrument on CORONAS-I was developed. The packed of programs on computation satellite orbit and required geophysical parameters was developed. This packed has been recently used for data on CORONAS-F experiment.

## Referencie

- [1] E. L. Chupp, *Gamma-ray Astronomy*, D. Reidel, Dordrecht, Holland, 1976.
- [2] K. P. Beuermann, Secondary electrons and photons in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*, *76*, 4291, 1971.
- [3] S. W. Barwick et al., Cosmic ray reentrant electron albedo: High-Energy Antimater Telescope ballon measurements from Fort Sumner, New Mexico, *J. Geophys. Res.*, *103*, 4817, 1998.
- [4] W. L. Imhof, G. H. Nakano, R. G. Johnson, and J. B. Reagan, Satellite observations of bremsstrahlung from widespread energetic electron precipitation events, *J. Geophys. Res.*, *79*, 565, 1974.
- [5] G. H. Share and R. J. Murphy, Atmospheric gamma rays from solar energetic particles and cosmic rays penetrating the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, *106*, 77, 2001.
- [6] J. R. Letaw, G. H. Share, R. L. Kinzer, R. Silberberg, E. L. Chupp, D. J. Forrest and E. Rieger, Satellite observation of atmospheric nuclear gamma radiation, *J. Geophys. Res.*, *94*, 1211, 1989.
- [7] R. R. Daniel and S. A. Stephens, Cosmic-ray-produced electrons and gamma rays in the atmosphere, *Revs. of Geophys. and Space Phys.*, *12* 233, 1974.
- [8] D. J. Morris, Production of high-energy gamma rays by cosmic ray interactions in the atmosphere and lunar surface, *J. Geophys. Res.*, *89*, 10,685, 1984.
- [9] M. J. Harris, G. H. Share, and M. D. Leising, Spatial and temporal variability of the gamma radiation from Earth's atmosphere during a solar cycle, *J. Geophys. Res.*, in press, 2003.
- [10] Yu. E. Efimov, A. A. Gusev, K. Kudela, L. Just and G. I. Pugacheva, Spatial distribution of albedo particles on altitudes  $\sim 500$  km, *Czech. J. Phys. B*, *35*, 1371, 1985.
- [11] A. V. Bogomolov, V. V. Bogomolov, Yu. I. Denisov, Yu. I. Logachev, S. I. Svertilov, M. I. Kudryavtsev, V. I. Lyagushin and T. V. Ershova, The properties of gamma-radiation and high-energy neutron fluxes in Mir station orbit, *Radiat. Meas.*, *35*, 473, 2002.
- [12] A. J. Dean, F. Lei and P. J. Knight, Background in space-borne low-energy  $\gamma$ -ray telescopes, *Space Sci. Rev.*, *57*, 109, 1991.
- [13] G. H. Share, R. L. Kinzer, M. S. Strickman, J. R. Letaw and E. L. Chupp, Instrumental and atmospheric background lines observed by the SMM gamma-ray spectrometer, in *High-Energy Radiation Background in Space*, *AIP Conf. Proc.*, vol.186, edited by A. C. Rester and J. I. Trombka, American Institute of Physics, New York, 1989.
- [14] W. L. Imhof, Review of energetic ( $> 20$  keV) bremsstrahlung X-ray measurements from satellites, *Space Sci. Rev.*, *29*, 201, 1981.

- [15] S. C. Kappadath et al., The preliminary cosmic diffuse gamma-ray spectrum from 800 keV to 30 MeV measured with COMPTEL, *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf.*, *2*, 230, 1995.
- [16] S. N. Kuznetsov, K. Kudela, I. N. Myagkova and B. Yu. Yushkov, Gamma and X-ray solar flare emissions: CORONAS-F measurements, *Proc. 28th Int. Cosmic Ray Conf.*, *SH1*, 3183, 2003.
- [17] J. I. Vette, The AE-8 trapped electron model environment, Technical Report NSSDC 91-24, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., 1991.
- [18] T. Beutier and D. Boscher, A three-dimensional analysis of the electron radiation belt by the Salammbô code, *J. Geophys. Res.*, *100*, 14,853, 1995.
- [19] J. I. Lockwood and W. R. Webber, Forbush decreases and interplanetary magnetic field disturbances: associations with magnetic clouds, *J. Geophys. Res.*, *96*, 11,587, 1991.
- [20] C. E. McIlwain, Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles, *J. Geophys. Res.*, *66*, 3681, 1961.
- [21] J. Lemaire, A. D. Johnstone, D. Heynderickx, D. J. Rodgers, S. Szita and V. Pierrard, Final Report of the TREND-2 Project, Contract No. 9828/92/NL/FM, ESA/ESTEC/WMA TRP, 1995.
- [22] Y. Miyoshi, A. Morioka, T. Obara, H. Misawa, T. Nagai and Y. Kasahara, Rebuilding process of the outer radiation belt during the 3 November 1993 magnetic storm: NOAA and Exos-D observations, *J. Geophys. Res.*, *108*, 1004, 2003.

## Zoznam publikácií

R. Bučík, K. Kudela, S. N. Kuznetsov, I. N. Myagkova, The fluxes of gamma rays in the magnetic coordinates  $L - B$  at CORONAS-I altitude, *Space Weather, Special Theme section - Proceedings of ISEC 2003, Toulouse: Conference on Radiation belt and Solar energetic particle Science*, 2003, submitted.

R. Bučík, K. Kudela, A. V. Dmitriev, S. N. Kuznetsov, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, Review of electron fluxes within the local drift loss cone: Measurements on CORONAS-I satellite, *Adv. Space Res.*, 2003, in press.

R. Bučík, K. Kudela, On mass in  $4\pi$  solid angle around SONG CsI scintillator aboard CORONAS-I satellite, *Acta Phys. Slovaca*, 53, 329-345, 2003.

H. Rothkaehl, K. Kudela, Z. Klos, R. Bučík, The global distribution of RF emission and low energy gamma ray fluxes in the topside ionosphere, *Geophys. Res. Abs.*, 5, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April, 2003, Abstract 05257.

R. Bučík, K. Kudela, A. V. Dmitriev, S. N. Kuznetsov, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, Spatial distribution of low energy gamma-rays associated with trapped particles, *Adv. Space Res.*, 30, 2843-2848, 2002.

S. N. Kuznetsov, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, K. Kudela, R. Bučík, H. Mavromichalaki, Effects of the April 1994 Forbush events on the fluxes of the energetic charged particles measured on board CORONAS-I: their connection with conditions in the interplanetary medium, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 64, 535-539, 2002.

R. Bučík, A. Dmitriev, K. Kudela, S. Kuznetsov, S. Ryumin, Model of gamma-ray fluxes on CORONAS satellites, *Proc. of Space Radiation Environment Workshop*, 1-3 November, 1999, DERA, Farnborough, UK, 2002.

J. B. Blake, M. D. Looper, K. R. Lorentzen, K. Kudela, R. Bučík, Correlation of spacecraft observations of energetic gamma ray fluxes with those of relativistic electrons in the drift loss cone, *Geophys. Res. Abs.*, 4, 27th General Assebmly EGS, Nice, France, 21-26 April, 2002, Abstract 00774.

R. Bučík, K. Kudela, S. N. Kuznetsov, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, Changes in cosmic ray intensity observed on CORONAS-I satellite during magnetic storms in April 1994, *Proc. of ICRC 2001*, p.3520-3522, 2001.

S. N. Kuznetsov, R. Nymmik, S. P. Ryumin, B. Yu. Yushkov, K. Kudela, R. Bučík, Energetic charged particle fluxes under the radiation belts, *Proc. of ICRC 2001*, p.1651-1653, 2001.

R. Bučík, K. Kudela, A. V. Bogomolov, I. N. Myagkova, S. N. Kuznetsov, S. P. Ryumin, Distribution of gamma ray fluxes at altitude 500 km: CORONAS-I data, *Acta Phys. Slovaca*, 50, 267-274, 2000.

R. Bučák, K. Kudela, S. P. Ryumin, Spatial distribution of atmospheric gamma ray fluxes at altitude 500 km, *Proc. of the 13th Conf. of Slovak and Czech Physicists*, p.107-109, 2000.

A. V. Bogomolov, R. Bučák, A. V. Dement'ev, A. V. Dmitriev, K. Kudela, M. I. Kudryavtsev, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, S. I. Svertilov, N. M. Sobolevskiy, Fluxes and spectra of secondary neutrons with energies  $> 20$  MeV and gamma-rays with energies  $> 0.12$  MeV on Coronas-I satellite, Salute-7-Kosmos-1686 orbital complex and Mir orbital station, *Izv. Akad. Nauk Ser. Fiz.*, 63, 1660-1664, 1999.

R. Bučák, K. Kudela, A. V. Bogomolov, I. N. Myagkova, S. N. Kuznetsov, S. P. Ryumin, Map of the low energy gamma ray fluxes at altitude 500 km, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté pleso*, 29, 147-155, 1999.

R. Bučák, A. Dmitriev, K. Kudela, S. Ryumin, Gamma-radiation of the Earth's atmosphere from the CORONAS-I data, *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf.*, 7, p.433-436, 1999.

R. Bučák, K. Kudela, A. V. Bogomolov, S. N. Kuznetsov, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, Survey of "the geomagnetically trapped" low energy gamma radiation, *WDS'99, Proc. of Contributed Papers*, edited by J. Šafránková, MFF UK, Prague, p.240-245, 1999.

R. Bučák, K. Kudela, A. V. Bogomolov, S. N. Kuznetsov, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, Mapping of "trapped" gamma radiation observed by CORONAS-I satellite, *Proc. of Scientific Conference*, edited by B. Zagyi, M. Koval'aková, J. Ziman, Technical University Košice, p.182-187, 1999.

A. V. Bogomolov, R. Bučák, A. V. Dement'ev, Yu. I. Denisov, A. V. Dmitriev, K. Kudela, M. I. Kudryavtsev, I. N. Myagkova, S. P. Ryumin, S. I. Svertilov, N. M. Sobolevskiy, Energetic neutron and gamma-ray fluxes observed on board CORONAS-I satellite, Salute-7-Kosmos-1686 orbital complex and Mir orbital station, *32nd Scientific Assembly of Cospar Abstracts*, p.395, 1998.

R. Bučák, K. Kudela, A. V. Bogomolov, I. N. Myagkova, S. N. Kuznetsov, S. P. Ryumin, Distribution of gamma ray fluxes at altitude 500 km: CORONAS-I data, *WDS'98, Proc. of Contributed Papers*, edited by J. Šafránková, MFF UK, Prague, p.216-219, 1998.