

O priechodnosti kozmického žiarenia v premenlivej magnetosfére

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

Abstrakt

Kozmické žiarenie nízkych energií prichádza na dané miesto k povrchu atmosféry Zeme v závislosti od stavu zemskej magnetosféry. Jeho anizotropia, odvodená z meraní siete neutrónových monitorov musí uvažovať variabilitu magnetosféry. Sú uvedené niektoré výsledky výpočtov transmisnej funkcie a asymptotických smerov príjmu pre vybrané miesta zemskeho povrchu. Výpočty založené na rôznych modeloch geomagnetického poľa vonkajších zdrojov sú spravené pre pokojné obdobia a pre silné poruchy magnetosféry v rokoch 2003 a 2004. Diskutované sú možnosti využitia meraní kozmického žiarenia neutronovými monitormi na stredných a nízkych šírkach pre testovanie platnosti modelov geomagnetického poľa v porušenej magnetosfére.

1. ÚVOD

Zemské magnetické pole je filtrom pre prístup kozmického žiarenia (KŽ) k Zemi. Najčastejšie je tento efekt odhadovaný pomocou výpočtov trajektórií nabitých častíc z miesta pozorovania v modelovom geomagnetickom poli pričom sa prisúdi častici opačný elektrický náboj a vektor rýchlosti (napr. *Shea et al, 1965*) a výsledok je nepriamo porovnaný s meraniami (napr. *Miyasaka et al, 2003; Tyasto et al, 2004; Smart a Shea, 2001; Leske et al, 2001; Smart et al, 2003*). Zvýšená geomagnetická aktivita vedie k zmenám odrezávacej rigidity a asymptotických smerov príjmu (napr. v práci *Flückiger et al, 1986*).

Uvedieme zmeny transmisnej funkcie magnetosféry pre intervaly v októbri-novembri 2003 a v novembri 2004, ktoré boli charakteristické silnými geomagnetickými poruchami. Odhady sú založené na výpočtoch trajektórií v rôznych modeloch geomagnetického poľa. Podrobnosti výpočtovej metódy možno nájsť v prácach (*Kaššovicová a Kudela, 1995; Bobík, 2002; Kudela a Usoskin, 2004*). Terminológia odrezávacích rigidít je prevzatá z práce *Cooke et al, 1991*. Pre vektor magnetického poľa \mathbf{B} sú použité modifikované subrutíny 'Geopack 2003' zo stránky <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/magnetos/data-based/modeling.html> a IGRF model uvedený napr. na stránke <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.

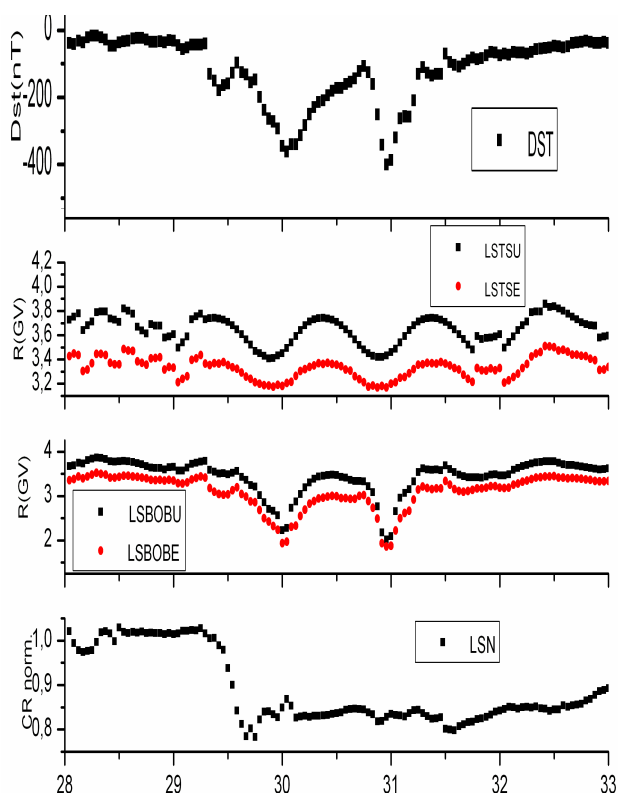
Výpočty používajú tri aproximácie zemskeho magnetického poľa s rôznymi reprezentáciami vonkajších prúdových systémov, a to (1) model Tsyganenko Ts89 (*Tsyganenko, 1989*); (2) rozšírenie

modelu Ts89 o Dst (*Boberg et al, 1995*) a (3) nový model Ts04 opísaný v práci *Tsyganenko a Sitnov, 2005*. Zatiaľčo prvé dva modely sú parametrizované aktuálnou trojhodinovou hodnotou K_p , resp. hodinovou hodnotou Dst, \mathbf{B} v treťom modeli sú vstupné parametre odvodené aj z prehistórie slnečného vetra a medziplanetárneho magnetického poľa.

2. TRANSMISIVITA V ODLIŠNÝCH OBDOBIACH PORUŠENOSTI MAGNETOSFÉRY

A. Interval 1 (28.október - 1.november 2003)

V tomto intervale počas silného poklesu Dst okolo poľnoci z 29. na 30. októbra bol zaznamenaný veľmi silný Forbushov pokles intenzity KŽ na viacerých neutrónových monitoroch (NM). Na pozadí Forbushovho poklesu okolo doby kedy Dst dosiahlo minimum, bol zaznamenaný vzrast intenzity KŽ a to osobitne na stanicích s vysokou nominálnou odrezávacou rigiditou (nízke geomagnetické šírky). Tento vzrast je pravdepodobne výsledkom zlepšenia transmisivity magnetosféry pre KŽ počas geomagnetickej búrky. Slabšie vzrasty boli pozorované aj na stredných šírkach (obr.1). Výpočty ukázali, že podľa modelu (2) čas kedy odrezávacia rigidita dosahuje minima zodpovedá dobe maxima vzrastu. Na rozdiel od toho počas druhého poklesu Dst (okolo poľnoci z 30. na 31. októbra) neboli vzrasty KŽ zaznamenané, aj keď výpočty podľa modelov (2) a (3) predpovedajú podstatné zlepšenie transmisivity pre KŽ.

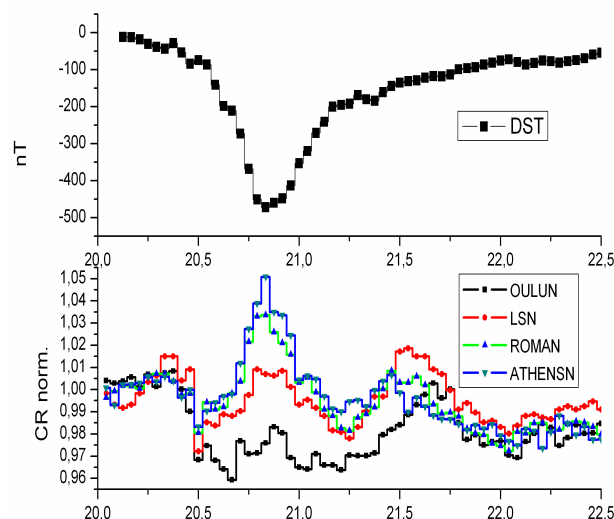


Obr.1. Profil Dst; vypočítaná horná a efektívna vertikálna odrezávacia rigidita pre Lomnický štít s použitím modelu (1); odrezávacie rigidity podľa modelu (2); Profil intenzity KŽ meraný NM na Lomnickom štíte (49.20 N, 20.22 E, 2634 m). Na osi x je čas v dňoch od začiatku októbra 2003.

Počas intervalu 1 bolo tiež vypočítané zlepšenie transmisivity nízkoenergetického KŽ registrovaného na nízkoorbitálnej družici s polárnym náklonom CORONAS-F (zníženie odrezávacích rigidít na dráhe družice) a zmeny priepustnosti boli porovnané s posuvom vonkajšej hranice prieniku protónov s energiou nad 50 MeV do zemskej magnetosféry (Kuznetsov et al, 2006).

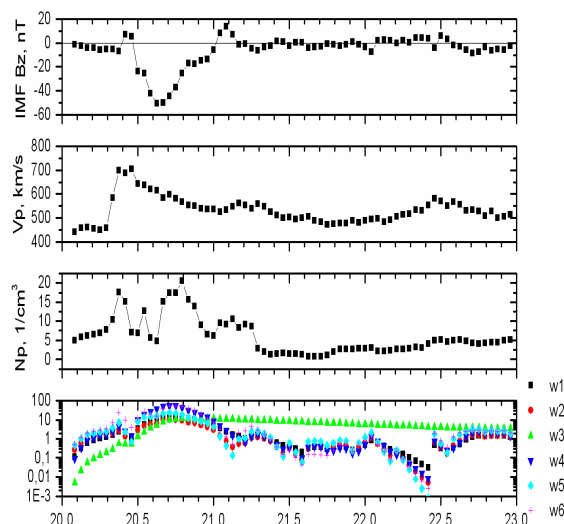
B. Interval 2 (20-23. november 2003)

Najväčší pokles Dst za obdobie rokov 2002-2005 bol zaznamenaný 20. novembra 2003 ($Dst = -471 \text{ nT}$). Táto porucha ovplyvnila významne transmisivitu magnetosféry pre KŽ a podobne ako v prvom poklese Dst v intervale 1 ako aj v iných udalostiach predtým uvedených (napr. v prácach Miyasaka et al, 2003; Kudela a Storini, 2002) spôsobila vzrast intenzity KŽ na staniciach s vysokou nominálnou odrezácou rigiditou. Je to ukázané na obr. 2.



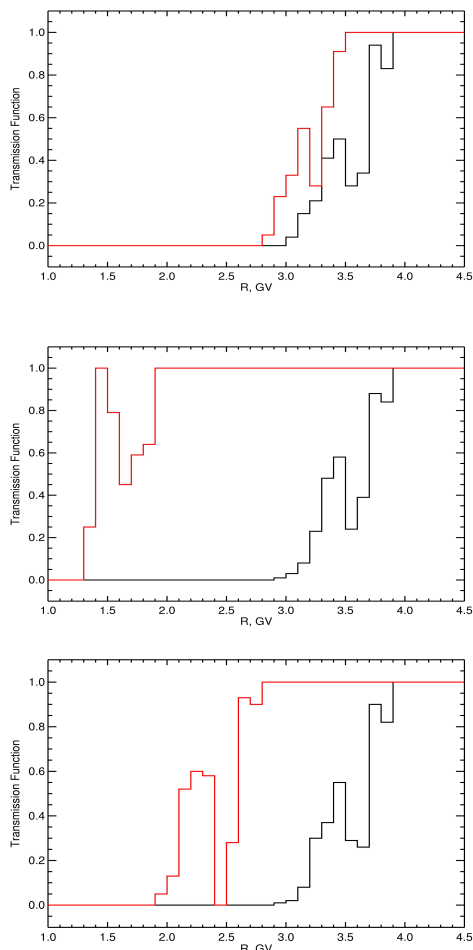
Obr.2. Horný panel: časový profil Dst. Dolný panel: Intenzita KŽ meraná neutrónovými monitormi na 4 európskych staniciach (Oulu, Lomnický štít, Rím, Atény) počas intervalu 20-21 novembra 2003. Hodnoty sú normalizované k priemeru v intervale 00-12 UT 20. novembra 2003.

Na rozdiel od intervalu 1 sú pre interval 2 dostupné dáta meraní slnečného vetra a medziplanetárneho magnetického poľa (na stránke <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/>). Preto možno výpočty odrezávacích rigidít spraviť aj pre model (3). Vstupné dáta k modelu (3) ukazujú obr. 3.



Obr.3. Vstupné parametre W1-W6 charakterizujúce jednotlivé prúdové systémy magnetosféry konštruované z profilov koncentrácie slnečného vetra N_p , rýchlosti V_p , a severojužnej zložky medziplanetárneho poľa podľa formuly (7) v práci Tsyganenko a Sitnov, 2005, modifikované pre hodinové dáta v intervale 20.-22. novembra 2003.

Porovnanie funkcie transmisivity (TF) vypočítanej pre tri modely geomagnetického poľa pred poruchou a v dobe minima Dst je ukázané na obr. 4. TF je definovaná ako pravdepodobnosť toho, že častica ktorá má rigiditu v intervale $(R, R+dR)$ dosiahne detektor zo smeru zenitu (vertikálny prístup). Detailnejšie o TF pojednávajú práce (Bobík, 2002; Kudela a Usoskin, 2004). Hodnota dR tu použitá je 0.1 GV.

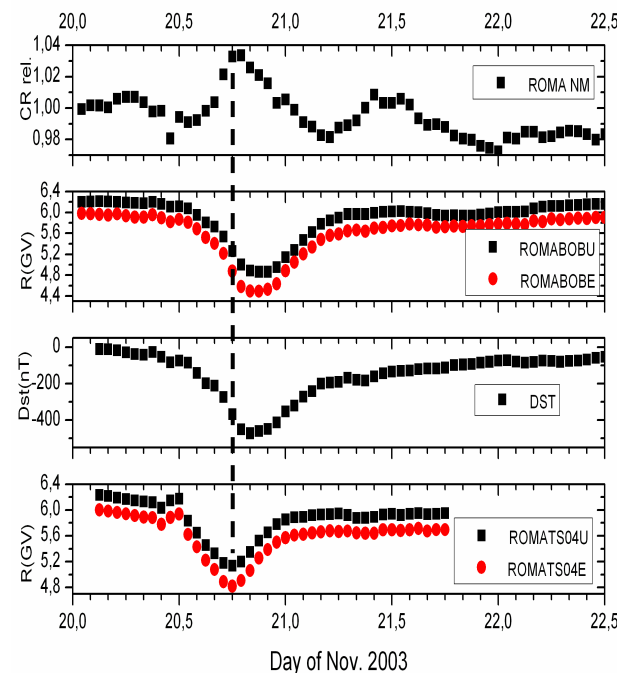


Obr. 4. TF vypočítaná podľa modelov porušenej magnetosféry 1,2,3 (poradie panelov zhora) pre vertikálny smer príjmu pre Lomnický štít pred začiatkom búrky (20.11.2003, 02 UT profily vpravo) a v čase minima Dst (19 UT, profily vľavo).

Rozdiely v transmisnej funkcii, v časovaní minima odrezávacej rigidity a v asymptotických smeroch príjmu sú diskutované v práci (Kudela a Bučík, 2005). Obr. 4 ukazuje, že v danej geomagnetickej poruche pre Ts04 model (3) je zlepšenie transmisivity slabšie než v modeli (2) a silnejšie než v modeli (1), ktorý je založený len na 3hodinovom indexe K_p . Takáto tendencia bola zistená aj pre iné porušené intervaly.

Obr. 5 indikuje pre tento interval lepší súhlas medzi časom minima odrezávacej rigidity a časom maxima vzrastu KŽ spôsobeným zlepšením priepustnosti

magnetosféry pre NM Rím v prípade Ts04 modelu (3) než za predpokladu modelu (2). Podobný súhlas v časoch bol zistený je aj pre dve nízkošírkové stanice NM a to Mexiko and Haleakala.



Obr.5. Časový profil intenzity KŽ na NM Rím normalizovaný k priemeru 12-24 UT dňa 19.11.2003 (horný panel) porovnaný s hornou a efektívnou prahovou rigiditou získanou z výpočtov trajektórií v modelových poliach. Druhý a štvrtý panel ukazujú hornú a efektívnu prahovú rigiditu pre model (2) a pre model (3). Dst je v treťom paneli.

C. Interval 3 (November 7-12, 2004)

Pre tento interval s vysokou geomagnetickou aktivitou sú tiež dostupné dáta potrebné pre vytvorenie vstupov do modelu (3). V KŽ je pozorovaný na Lomnickom štíte pomerne komplexný pokles s návratom do predbúrkevej úrovne až na konci novembra (Kudela a Bučík, 2005). Na rozdiel od intervalu 2 výpočty trajektórií nedávajú lepší súhlas medzi časovaním minima odrezávacej rigidity a maxima vzrastu KŽ podľa modelu (3) než podľa modelu (2). To bolo ukázané pre strednošírkovú stanicu Rím. Podobné časové profily boli pozorované pre niekoľko ďalších strednošírkových staníc ako aj pre stanice KŽ na malých šírkach. Veľmi komplikovaná štruktúra (a) dovolených a zakázaných trajektórií ako aj (b) asymptotických smerov príjmu počas tohto intervalu, ktoré sú odlišné pre model (2) a (3) boli zistené výpočtami pre pozíciu NM Mexiko (Kudela a Bučík, 2005). To ukazuje, že koncept jedinej odrezávacej rigidity (efektívnej alebo hornej) nie je dostatočným priblížením pri aproximácii transmisie KŽ cez porušenú magnetosféru na nízkošírkových NM počas intervalov so silnou geomagnetickou aktivitou.

3. DISKUSIA A ZÁVER

Predtým než boli konštruované modely geomagnetického poľa s vonkajšími prúdovými systémami, boli zmeny odrezávacích rigidít na rôznych dĺžkach počas geomagnetických porúch analyzované (napr. Flückiger et al, 1983) a spájané s efektami prstencového prúdu. Zmeny odrezávacích rigidít a asymptotických smerov v závislosti od dĺžky počas zvýšenej geomagnetickej aktivity boli opísané v práci (Flückiger et al, 1986). Práca (Kudo et al, 1987) ukazuje na závislosť vzrastov KŽ v dôsledku zlepšenia priepustnosti magnetosféry na miestnom čase pre 17 magnetických búrok.

V uplynulých dvoch desaťročiach boli konštruované nové modely geomagnetického poľa pre porušenú magnetosféru Zeme. Znovu sa objavuje otázka: môžu merania KŽ v sieti NM byť užitočné pre testovanie platnosti modelov geomagnetického poľa v dobe zvýšenej aktivity? Ilustrovali sme, že odlišné modely magnetického poľa (vonkajšie zdroje) počas silných búrok dávajú odlišné odhady pre (a) časový profil odrezávacích rigidít na NM; (b) transmisnú funkciu pre častice prichádzajúce z oblastí za magnetosférou a (c) asymptotické smery príjmu.

KŽ na pozadí Forbushových poklesov vzrastá na NM so strednou a vysokou nominálnou hodnotou odrezávacej rigidity počas magnetických búrok. Z našich výpočtov sa ukazuje, že model s prehistóriou (model 3) a model s Dst (model 2) dávajú pre dva rôzne intervaly (interval 2 a 3) rôzne výsledky. Zatiaľčo pre interval (2) vidno lepší súhlas časov predpovedaného poklesu odrezávacej rigidity a vzrastu KŽ, pre interval (3) takýto trend nevidno. Nemožno preto robiť zatiaľ obecné závery o vhodnosti modelov (2) a (3) pre opis vzrastov KŽ spôsobených zlepšením priepustnosti magnetosféry počas magnetických búrok.

Ako by bolo možné využiť meraní KŽ na NM (osobitne na stredných a nízkych šírkach) pre testovanie platnosti jestvujúcich modelov geomagnetického poľa počas geomagnetických búrok? Časovanie minima odrezávacej rigidity a maxima vzrastu KŽ na viacerých stanicách je len jednou, pomerne zjednodušenou možnosťou takého testovania. Súbežne so zmenami priepustnosti v magnetosfére dochádza aj k zvýšeniu anizotropie KŽ v medziplanetárnom priestore keď v blízkosti Zeme prechádza CME a preto je profil intenzity KŽ na NM určený kombináciou dvoch efektov. Experiment s názvom Spaceship Earth (Bieber a Evenson, 1995) používa prsteneц vysokošírkových NM na určenie anizotropie KŽ relatívne nízkych energií v medziplanetárnom priestore. Tieto merania nie sú silne ovplyvnené magnetosferickými poruchami nakoľko ich asymptotické smery príjmu sú relatívne úzke v dĺžkovej škále a zmeny počas búrok ovplyvňujú častice s energiami pod atmosferickým prahom. Z týchto meraní môže byť získaná anizotropia

nízkoenergetickej časti KŽ v medziplanetárnom priestore. Na druhej strane energetického spektra, tj. pri energiách vyše citlivosti NM, môže sieť mezónových teleskopov (Munakata et al, 2000) poskytnúť odhad anizotropie v medziplanetárnom priestore. Táto oblasť energií KŽ taktiež nie je podstatne ovplyvnená zmenami v magnetosfére. Z týchto dvoch typov meraní možno predpokladať získanie odhadu anizotropie KŽ pri energiách ku ktorým sú citlivé NM na nízkych a stredných šírkach.

S využitím (1) odhadu anizotropie v medziplanetárnom priestore pri stredných energiách, ktorá je zohľadnená ako vstup KŽ na hranici magnetosféry v rôznych modeloch geomagnetického poľa počas magnetických búrok a (2) predpovedí získaných podľa výpočtov trajektórií v rôznych modeloch geomagnetického poľa počas magnetických búrok (prenosová funkcia, zmeny odrezávacích rigidít a asymptotických smerov príjmu) je vhodné v budúcnosti pri porovnaní s meraniami NM na stredných a nízkych šírkach pokúsiť sa otestovať platnosť jestvujúcich modelov geomagnetického poľa v obdobiach silných porúch zemskej magnetosféry

Podakovanie.

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-51-053805. Autor ďakuje R. Bučíkovi a P. Bobíkovi za výpočty a diskusie ako aj pracovníkom oddelenia kozmickej fyziky ÚEF SAV na Lomnickom štíte za zabezpečenie nepretržitého merania neutrónovým monitorom.

LITERATÚRA

- Bieber, J.W., P. Evenson, Proc. 24th ICRC, Rome, vol. 4, 1995, pp1316-1319
- Boberg, P.R., A.J.Tylka, J.H.Adams Jr. et al, Geomagnetic Transmission of Solar Energetic Protons during the Geomagnetic Disturbances of October 1989, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 1995, pp1133-1136
- Bobík, P., *PhD dizertácia, Univerzita P.J. Šafárika, Košice*, 2002
- Cooke, D.J., J.E.Humble, M.A.Shea et al, On cosmic-ray cutoff terminology, *Il. Nuovo Cimento C*, 14, 1991, pp213-234
- Flückiger, E.O., D.F. Smart, M.A. Shea, A procedure for estimating the changes in cosmic ray cutoff rigidities and asymptotic directions at low and middle latitudes during periods of enhanced geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, vol. 91, No A7, 1986, pp7925-7930
- Flückiger, E.O., D.F. Smart, M.A. Shea, The effect of local perturbations of the geomagnetic field on cosmic ray cutoff rigidities at Jungfrauoch and Kiel, *J. Geophys. Res.*, vol. 88, No A9, 1983, pp6961-6968
- Kaššovicová, J., K.Kudela. *Preprint IEP SAS*, Kosice, Slovakia, 1995, pp45
- Kudela, K., I.G.Usoskin. On Magnetospheric Transmissivity of Cosmic Rays, *Czech. J. Phys.*, 54, 2004, pp239-254
- Kudela, K., M. Storini, Direct and Indirect Relations of Cosmic Rays to Space Weather, *ESA SP-477*, 2002, pp289-292
- Kudela, K., R. Bučík, Low Energy Cosmic Rays and the Disturbed Magnetosphere, Proc. Of the Workshop Solar Extreme Events, ed. A. Chilingaryan, Yerevan, Armenia, 2005

- Kudo, S., M. Wada, P. Tanskanen et al, Local time and cutoff rigidity dependences of storm time increase associated with geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, vol. 92, No A5, 1987, pp4719-4724
- Kuznetsov, S.N., B.Y. Yushkov, J. Kaššovicová et al, Changes of geomagnetic transmissivity in the disturbed magnetosphere: ground based and CORONAS-F observations, *Czech. J. Phys.*, vol. 56, No 6, 2006, pp 629-639
- Leske, R.A., R.A.Mewaldt, E.C.Stone, et al, Observations of Geomagnetic Cutoff Variations during Solar Energetic Particle Events and Implications for the Radiation Environment at the Space Station, *J. Geophys. Res.*, 106, 2001, pp30011-30022
- Miyasaka, H., K.Kudela, S.Shimoda et al, Geomagnetic Cutoff Variation Observed with TIBET Neutron Monitor, *Proc. 28th ICRC*, Tsukuba, JP, Universal Academy Press, Inc. ed. T. Kajita et al., vol.6, 2003, pp3609-3612
- Munakata, K. et al, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, *J. Geophys. Res.* 105 (A12), 2000, pp27457 -27468
- Shea, M.A., D.F.Smart, K.G.McCracken, A Study of Vertical Cutoff Rigidity Using Sixth Degree Simulations of the Geomagnetic Field, *J. Geophys. Res.*, 70, 1965, pp4117-4130
- Smart, D.F., M.A.Shea, M.J.Golightly et al, Evaluation of the Dynamic Cutoff Rigidity Model Using Dosimetry Data from the STS-28 Flight, *Adv. Space Res.*, 31, 2003, pp841-846
- Smart, D.F., M.A.Shea. A comparison of the Tsyganenko Model Predicted and Measured Geomagnetic Cutoff Latitudes, *Adv. Space Res.*, 28, 2001, pp1733-1738
- Tsyganenko, N.A., A Magnetospheric Magnetic Field Model with a Warped Tail Current Sheet, *Planet. Space Sci.*, 37, 1989, pp5-20
- Tsyganenko, N.A., M.I.Sitnov, Modeling the Dynamics of the Inner Magnetosphere during Strong Geomagnetic Storms", *J. Geophys. Res.*, 110, 2005, A03208, doi:10.1029/2004JA010798
- Tyasto, M.I., O.A.Danilova, N.G.Ptitsyna et al, Cosmic Ray Cutoff Rigidities during Geomagnetic Storms: A Comparison of Magnetospheric Models, *Geomagn. Aeronomy*, 44, 2004, pp270-276