

Koronálne lúče, kozmické žiarenie a geomagnetické pole I. (metóda redukcie geomagnetických meraní)

M. Rybanský a T. Pintér, Slovenská ústredná hviezdáreň, Hurbanovo

Abstrakt.

V príspevku sa popisuje priebeh a vlastnosti zmien geomagnetického poľa (GMP), pričom sa predpokladá, že sporadické poruchy sú spôsobené aj prúdom nabitých častíc v koronálnych lúčoch alebo pohybom ionizovanej hmoty vo výronoch koronálnej hmoty (CME).

Využitie sú pritom pozorovania pozemných staníc (Hurbanovo a Fürstenfeldbruck) družíc GOES, ktoré sa nachádzajú na geostacionárnych dráhach nad východným a západným pobrežím USA a družice ACE, ktorá sa nachádza cca 1,5 milióna km smerom k Slnku.

V tejto časti sú opísané redukcie geomagnetického poľa vo všetkých meracích miestach, ktoré umožnia abstrahovať z meraných zložiek príspevok, ktorý pochádza zo Slnka, t.j. spôsobujú ho spomínané prúdy. Tieto redukcie spočívajú v odstránení sekulárnej zložky a v čiastočnom odstránení zložky spôsobenej prúdmi v ionosfére, ktorá má dennú periódu (S_q alebo S_d). V dotatku je opísaná dynamika CME, ak uvažujeme iba gravitačné pôsobenie Slnka.

Úvod

Systematické pozorovania vonkajšej koróny pomocou prístrojov LASCO na kozmickej sonde SOHO úplne zmenili naše nazeranie na procesy, ktoré prebiehajú v medziplanetárnom priestore a ktoré spôsobujú poruchy GMP. Predstavu o nich môže čitateľ ľahko získať z animácií, ktoré pripravilo konzorcium SOHO a ktoré sú na priloženom CD (C2_may98sm.mpeg a C3_may98sm.mpeg <http://soho...>).

Záujem o štúdium týchto porúch je u nás spojený, okrem iného aj s pokusmi o určenie príčiny Forbushovho efektu v kozmickom žiarení a o úlohe, ktorú pri tomto jave hrajú poruchy GMP.

Je celkom možné (a vychádzame z takého predpokladu), že Forbushov efekt spôsobuje absorpcia galaktických častíc – hmotové zatienenie buď koronálnym lúčom, magnetickým oblakom alebo CME, pokiaľ to nie je jedno a to isté.

Predpokladáme, že geomagnetická porucha spôsobená snečnou aktivitou (SA), vo vektorovom vyjadrení, pozorovaná z viacerých, dostatočne vzdialených miest môže pomôcť určiť polohu jej zdroja, ktorý môže byť buď magnetickým oblakom (Nieves-Chinchilla at al., 2005) alebo elektrickým prúdom – prúdom nabitých častíc.

Keď sme počúvali o magnetickej poruche ako o „geomagnetickej búrke“ predstavovali sme si mohutný prírodný úkaz. V skutočnosti ide o nepatrnú odchýlku od strednej hodnoty. Magnetická indukcia v našich šírkach dosahuje hodnotu okolo 48000 nT a zmeny zriedka dosahujú 100 nT. Ide teda zmeny na úrovni

menšej ako 0,2%. Tu by sme radi poznamenali, že magnetické merania patria ku najpresnejším, s ktorými prichádzame do styku. Môžeme uvažovať o šiestich platných cifrách pri minútovom rozlíšení, čo je viac, ako dosahujú kozmické aparáty pri meraní integrálneho žiarenia Slnka.

Otázkou zdroja magnetického poľa Zeme sa nebudeme zaoberať. Stačí, keď povieme, že jeho zmeny sú vzhľadom k poruchám, ktoré nás zaujímajú pomalé. Na toto pomaly premenné pole sa nakladá pole spôsobené ionosférickými prúdmi a pole snečných porúch. Našou úlohou je získať údaje iba o poli, ktoré má zdroj na Slnku. Pre našu analýzu sme použili údaje jednak z pozemných staníc a jednak z meraní na kozmických observatóriách.

Náš pôvodný zámer sme museli redukovať, lebo sa ukázalo, že bol veľmi rozsiahly. Preto jeho spracovanie rozdelíme na niekoľko častí. V tejto časti opisujeme iba zdroje meraných dát a spôsob ich redukcie na jednotný spôsob, aby ich bolo možné porovnávať. Interpretácie budeme skúmať v ďalšej etape práce.

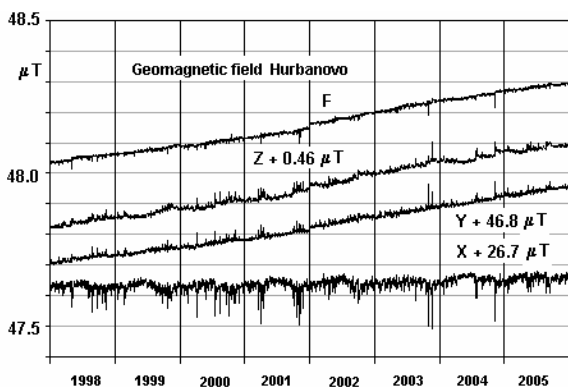
Okrem toho, v tejto časti, v **Dotatku** opisujeme dynamiku pohybu CME v gravitačnom poli Slnka.

Dáta a ich redukcia

Hlavným zdrojom dát sú pre nás merania v XYZ zložkách, s rozlíšením 1 minúta (www.intermagnet..) z geomagnetického observatória GfÜ SAV v Hurbanove ($\lambda = 18,19^\circ\text{E}$, $\varphi = 47,87^\circ\text{N}$). Pre overenie presnosti sme použili analogické dáta s rozlíšením 1 hodina z observatória Fürstenfeldbruck ($\lambda = 11,28^\circ\text{E}$, $\varphi =$

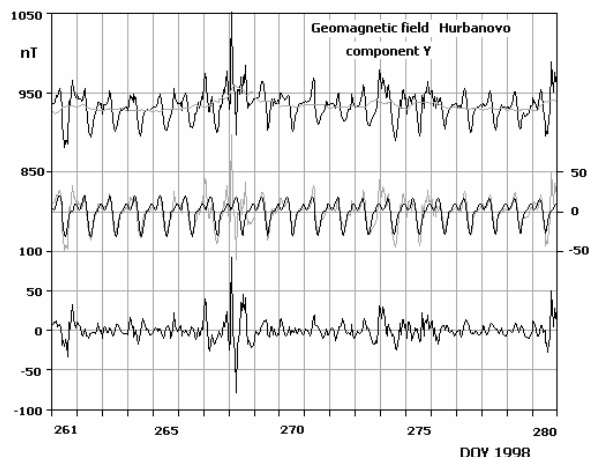
48,17°N). Ďalej sme použili dáta z družíc GOES (<http://goes...>) s rozlíšením 5 minút (dvojica geostacionárnych družíc s $\lambda = 75^\circ\text{W}$ a $\lambda = 135^\circ\text{W}$, ktoré merajú magnetické pole od roku 1986) a magnetické merania družice ACE (www.srl.caltech...) s rozlíšením 64 s a 16 s (družica je umiestnená v Lagrangeovom bode, 1,5 milióna km smerom k Slnku od r. 1997).

Úlohou redukcie dát je získať v „čistom stave“ iba hodnotu poruchy, ktorá je spôsobená SA a transformovať ju na súradnice, ktoré sú spojené so Slnkom a nie sú ovplyvnené rotáciou Zeme. Výsledné variácie poľa sú výsledkom superpozície jednotlivých zložiek. Sekulárne zmeny poľa majú pravdepodobne vnútornú (zemskú príčinu) a nebudeme sa nimi zaoberať. Pre merania z Hurbanova sme ich znázornili na obr. 1.



Obr. 1 Sekulárne zmeny geomagnetického poľa v Hurbanove

Redukciu dát sme robili na priemerných hodinových hodnotách zložiek. Postup si vysvetlíme podľa obrázku 2, kde je priebeh dát vybraného úseku (zložka y , dni 261 – 280 z roku 1998).



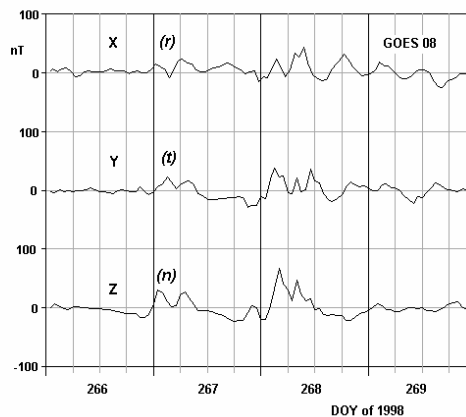
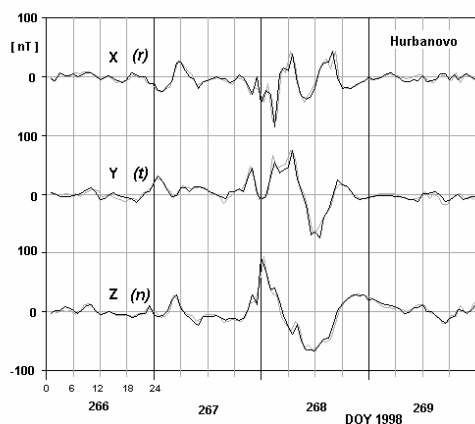
Obr. 2. Postup pri redukcii geomagnetických dát. Podrobnosti v texte

V prvom kroku sme z dát určili 25 hodinový kľzavý priemer (hrubšou čiarou, horný priebeh). Tieto hodnoty sme odčítali od nameraných hodnôt (tenšia čiar, horný priebeh). Rozdiel je znázornený tenšou čiarou v strede obrázku. Od tohto rozdielu odčítame dennú variáciu S_q , ktorá je tom istom mieste znázornená hrubšou čiarou. Výsledok je znázornený v spodnej časti. Tento priebeh odpovedá vplyvu vonkajších (slnčných) príčin.

Zložky tohto výsledku transformujeme potom z miestnej sústavy súradníc, ktoré rotujú spolu so Zemou do sústavy rtn , kde zložka r smeruje od Slnka k Zemi, zložka n smeruje k pólu ekliptiky a zložka t tvorí s nimi pravotočivú sústavu súradníc. Výsledný priebeh pre dni 266 – 269 v roku 1998 je na obr. 3.

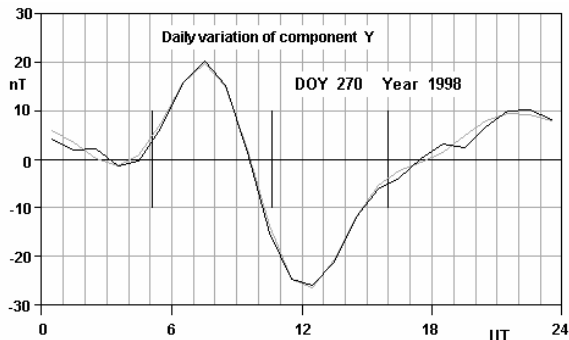
Rovnakým postupom redukujeme aj dáta z družíc GOES, hoci denné variácie v tomto prípade môžu mať celkom iné príčiny.

Denná variácia S_q je dosť neurčito definovaná ako vplyv ionosférických prúdov v období nízkej slnečnej aktivity, preto ani nemáme obecný postup na jej určenie.



Obr. 3. Priebeh rtn zložiek geomagnetického poľa po redukcii naľavo z observatória Hurbanovo, napravo z družice GOES 08. Tenkou čiarou je na ľavom obrázku rovnakým postupom získaný priebeh z observatória Fürstentfeldbruck.

V tejto práci sme postupovali nasledovne: pre 30 dňové obdobie sme určili *priemerný denný rozkmít* – (rozdiel maximálnej a minimálnej hodnoty) pre každú zložku poľa a jeho σ . Zo súboru sme vylúčili dni, v ktorých bol denný rozkmít väčší ako $d + \sigma$. Priemer zo zostávajúcich dní považujeme za dennú variáciu pre dané obdobie. Priebeh tohto priemeru rozložíme do Fourierovho radu. Dostatočnú presnosť dostaneme, ak vezmeme 4 členy. Daný rok takto rozdelíme na 12 častí a pre každú časť dostaneme príslušné hodnoty variácie.



Obr. 4. Priebeh dennej variácie zložky Y geomagnetického poľa. Tenkou čiarou znázornený priebeh aproximovaný štyrmi členami Fourierovho radu.

Spracovaný priebeh pre celý rok 1998 je ako príklad uvedený na obr. 5. Takéto redukcie sme urobili pre všetky tri zložky a pre roky 1998 – 2005.

Pre ďalšiu analýzu budeme vyberať také poruchy, v ktorých hodnota vektora variácie presiahne 40 nT. V uvažovanom období 1998 – 2005 ich je okolo 80, pričom nie je veľký rozdiel medzi rokmi s nízkou a vysokou úrovňou SA.

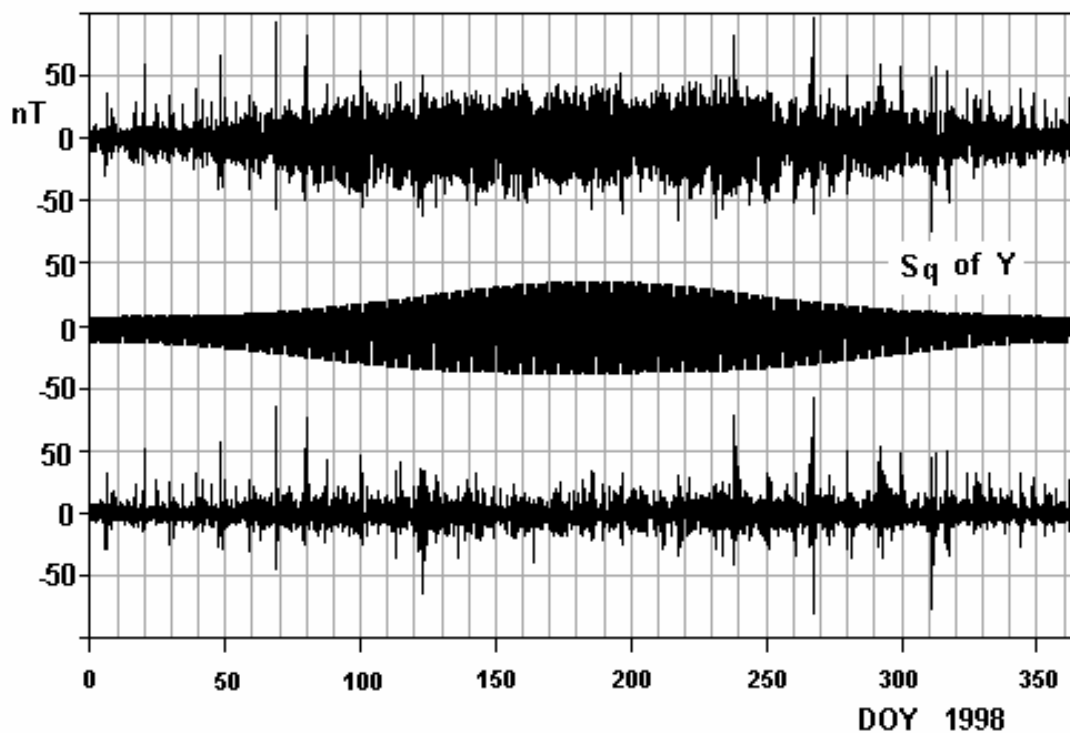
Pre ďalšiu analýzu budeme vyberať také poruchy, v ktorých hodnota vektora variácie presiahne 40 nT. V uvažovanom období 1998 – 2005 ich je okolo 80, pričom nie je veľký rozdiel medzi rokmi s nízkou a vysokou úrovňou SA.

Podrobnejšiu analýzu jednotlivých prípadov uvidíme v ďalšej časti. Predbežný pohľad na priebeh úrovne kozmického žiarenia ukazuje, že asi v polovici prípadov sa spolu s poruchou GMP vyskytuje aj Forbushov efekt. Vtedy je zároveň na ACE zaznamenaný vzrast hustoty slnečného vetra.

Literatúra

Nieves-Chinchilla T., Hidalgo M.A., Sequeiros J.: 2005, *Solar Physics* **232**, 105 – 126.

<http://soho.nascom.nasa.gov>
<http://goes.ngdc.noaa.gov/data/>
<http://www.srl.caltech.edu/ACE/>
http://www.intermagnet.org/Data_e.html



Obr. 5. Ročný priebeh variácie zložky Y (horná čiara). Denná variácia S_q - v strede. Po jej odčítaní - spodná čiara.

Dodatok

Pohyb tranzientu (CME) pod vplyvom gravitačného poľa Slnka

Príčiny vzniku CME, ani sily, pod vplyvom ktorých sa pohybuje v počiatočnom štádiu v blízkosti Slnka. Môžeme však predpokladať, že vo väčších vzdialenostiach sa hmota CME pohybuje iba pod vplyvom gravitačného pôsobenia Slnka. Ďalej odvodené rovnice pohybu CME sú založené na takom predpoklade.

Slnko pokladáme za guľu s polomerom $r_0 = 695990$ km s gravitačným zrýchlením na povrchu $g_0 = 274,1 \text{ ms}^{-2}$. Hmota m sa pohybuje radiálne od r_0 po r , počiatočnou rýchlosťou v_0 . Podľa gravitačného zákona ubúda g so štvorcom vzdialenosti :

$$1) \quad g = g_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad \text{a podľa zákona sily platí}$$

$$2) \quad m \frac{d^2 r}{dt^2} = -mg = -mg_0 r_0^2 \frac{1}{r^2}$$

Po vykrátení m , vynásobením dr/dt a zohľadnení, že :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = 2 \frac{dr}{dt} \frac{d^2 r}{dt^2} ; \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{1}{r^2} \frac{dr}{dt}$$

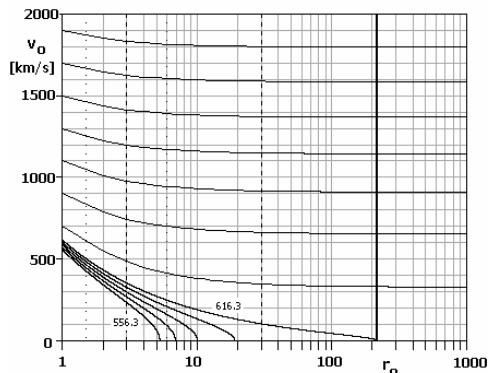
a dosadením do (2) dostaneme:

$$3) \quad \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 - g_0 r_0^2 \frac{1}{r} \right] = 0$$

a po integrovaní dostaneme

$$4) \quad v^2 - 2g_0 r_0^2 \frac{1}{r} = \text{const} = v_0^2 - 2g_0 r_0$$

Priebehy rýchlostí pohybu pre rôzne v_0 sú uvedené na obr. 1a



Obr. 1a) Priebehy rýchlostí CME pre rôzne počiatočné rýchlosti v_0 . Úniková (parabolická) rýchlosť zo slnečnej sústavy je $617,69 \text{ km/s}$. Ak je počiatočná rýchlosť menšia, ako $616,25 \text{ km/s}$, potom CME nedosiahne Zem. Na osi x je vzdialenosť v slnečných polomeroch. Vzdialenosť Zeme je $215r_0$.

Pre riešenie závislosti r od t musíme voliť rôzny postup pre $v_0 \geq 617,69$ a pre $v_0 < 617,69$.

$$A) \text{ Prípád } v_0 \geq 617,69 \text{ km/s} = \sqrt{2g_0 r_0}$$

V tom prípade zavedieme substitúciu:

$$v^2 - 2g_0 r_0^2 \frac{1}{r} = b^2 \quad \text{a označíme} \quad 2g_0 r_0 = a^2$$

potom dostaneme diferenciálnu rovnicu:

$$5) \quad \sqrt{\frac{r}{b^2 r + a^2 r_0}} dr = dt$$

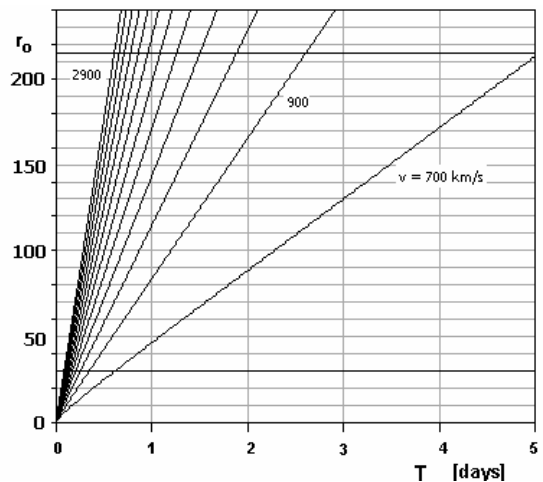
Jej riešenie môžeme napísať v tvare:

$$6) \quad t = \frac{a^2 r_0}{b^3} \left(\frac{(x-x_0)(1-xx_0)}{(1-x^2)(1-x_0^2)} + \ln \sqrt{\frac{(1+x_0)(1-x)}{(1-x_0)(1+x)}} \right), \text{ kde}$$

$$x = b \sqrt{\frac{r}{b^2 r + a^2 r_0}} \quad \text{a} \quad x_0 = b \sqrt{\frac{1}{b^2 + a^2}}$$

Analytické riešenie sa nedá napísať v obvyklom tvare $r = f(t)$.

Graficky je riešenie znázornené na obr 2a.



Obr. 2a) Závislosť dráhy r od času t pre rôzne počiatočné rýchlosti (väčšie ako úniková).. Hrubými čiarami označené vzdialenosti Zeme (215 sln. polomerov) a hranica koronografu C3 na SOHO ($30 r_0$).

Z obr. 1a môžeme zistiť napr., že ak pre CME nameriame pri Zemi rýchlosť 320 km/s , mal pri Slnku počiatočnú rýchlosť okolo 700 km/s . Z obr. 2a vidíme, že CME s počiatočnou rýchlosťou 900 km/s putuje k Zemi približne $2,5$ dňa.

B) Prípád $v_0 < 617,69 \text{ km/s} = \sqrt{2g_0 r_0}$

V tom prípade zavedieme analogickú substitúciu:

$$2gr_0^2 \frac{1}{r} - v^2 = b^2 \quad \text{a označíme:} \quad 2g_0 r_0 = a^2$$

dostaneme diferenciálnu rovnicu:

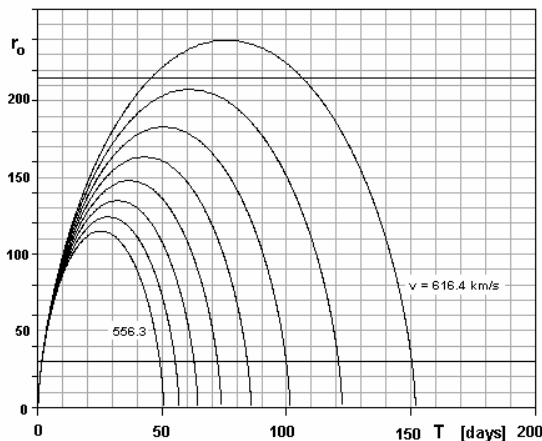
$$7) \quad \sqrt{\frac{r}{a^2 r_0 - b^2 r}} dr = dt$$

Jej riešenie môžeme vyjadriť v tvare:

$$8) \quad t = \frac{a^2 r_0}{b^3} \left(\operatorname{arctg} \frac{x - x_0}{1 + xx_0} + \frac{(x - x_0)(xx_0 - 1)}{(1 + x^2)(1 + x_0^2)} \right) ; \text{ kde}$$

$$x = b \sqrt{\frac{r}{a^2 r_0 - b^2 r}} \quad \text{a} \quad x_0 = b \sqrt{\frac{1}{a^2 - b^2}}$$

Graficky je riešenie znázornené na obr. 3a.



Obr. 3a)) Závislosť dráhy r od času t pre rôzne počiatočné rýchlosti (menšie ako úniková). Hrubými čiarami sú označené vzdialenosti Zeme (215 sln. polomerov) a hranica koronografu C3 na SOHO (30 r_0).

Z obr. 3a môžeme vidieť, že tranzient s počiatočnou rýchlosťou okolo 610 km/s dosiahne oblasť Zeme až približne po 40 dňoch **a pri pomalej difúzii môže ovplyvňovať úroveň kozmického žiarenia na Zemi aj niekoľko mesiacov**, čo sa často po Forbushovom poklese pozoruje.