

UNIVERZITA PAVLA JOZEFA ŠAFÁRIKA V KOŠICIACH
PRÍRODOVEDECKÁ FAKULTA

POHYB ČASTÍC KOZMICKÉHO ŽIARENIA
V MAGNETOSFÉRE ZEME

Diplomová práca

Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach

Prírodovedecká fakulta

POHYB ČASTÍC KOZMICKÉHO ŽIARENIA V MAGNETOSFÉRE ZEME

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Študijný odbor:	Jadrová a subjadrová fyzika
Školiace pracovisko:	Ústav fyzikálnych vied
Vedúci záverečnej práce:	RNDr. Pavol Bobik, PhD.
Konzultant:	RNDr. Blahoslav Pastirčák, CSc.

Košice 2020

Bc. Patrik Jakab

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce RNDr. Pavlovi Bobikovi, PhD. za obetavosť a cenné rady počas tvorby mojej diplomovej práce. Taktiež by som sa chcel poďakovať svojmu konzultantovi RNDr. Blahoslav Pastirčák, CSc. za usmernenie a pripomienky.



Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach
Prírodovedecká fakulta

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

- Meno a priezvisko študenta:** Bc. Patrik Jakab
Študijný program: Jadrová a subjadrová fyzika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: Fyzika
Typ záverečnej práce: Diplomová práca
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický
- Názov:** Pohyb častíc kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme
Názov EN: Cosmic ray motion in Earth's magnetosphere
Cieľ:
1. Oboznámiť sa s fyzikálnou problematikou pohybu častíc kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme pri rôznych stupňoch jej narušenia.
 2. Oboznámiť sa s modelmi interného (IGRF) a externého (séria Tsyganenkových modelov) geomagnetického poľa a numerickým modelom výpočtov trajektórii nabitých častíc v kombinovanom magnetickom poli týchto modelov.
 3. Porovnať výsledky modelov geomagnetických polí s meraniami geomagnetického poľa sieťou INTERMAGNET.
 4. Odhadnúť vplyv odchýlok hodnôt geomagnetického poľa v použitých modeloch od meraní geomagnetického na prechod kozmického žiarenia magnetosférou Zeme pre vybrané stanice NMDB siete.
 4. určiť priepustnosti magnetosféry pre častice kozmického žiarenia v COR modeli na vybraných staniciach NMDB siete..
 5. Realizovať simulácie priepustnosti magnetosféry pre častice kozmického žiarenia na vybraných pozemných staniciach, napríklad pre stanice Lomnický štít a Oulu.
- Literatúra:** Long-Term Variations of Geomagnetic Rigidity Cutoffs, Solar Physics, Volume 224, Issue 1-2, pp. 423-431, 2004
Magnetospheric transmission function approach to disentangle primary from secondary cosmic ray fluxes in the penumbra region, Journal of Geophysical Research, Volume 111, A5, A05205, 2006
Fluxes and nuclear abundances of cosmic rays inside the magnetosphere using a transmission function approach, Advances in Space Research, Volume 43, Issue 3, p. 385-393., 2009
Protons in Near Earth Orbit, Phys. Lett. B472, 215-226, 2000
Search for Antihelium in Cosmic Rays, Phys. Lett. B461, 387-396, 1999
The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station, Part I, Results from the test flight on the Space Shuttle, Physics Reports, vol. 366/6, pp.331-404, 2002
Introduction to the Physics of Space, Bruno B. Olbert, Stanislaw Rossi, McGraw-Hill Book Co., 1970
- Anotácia:** Práca je zameraná na štúdium pohybu nabitých častíc kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme. Priepustnosť magnetosféry pre častice kozmického žiarenia sa určuje simuláciami pre určené miesta a orbity Zeme. Špecificky



Univerzita P. J. Šafárika v Košiciach Prírodovedecká fakulta

sa zameria na určenie vplyvu odchýlky medzi meranými hodnotami geomagnetického poľa a hodnotami z modelov geomagnetických polí na početnosť registrovaných častíc kozmického žiarenia na vybraných miestach na povrchu Zeme (sieť neutrónových monitorov NMDB).

Kľúčové

slová: kozmické žiarenie, geomagnetické pole

Vedúci: RNDr. Pavol Bobik, PhD.

Konzultant: RNDr. Blahoslav Pastirčák, CSc.

Ústav : ÚFV - Ústav fyzikálnych vied

Riaditeľ ústavu: prof. RNDr. Peter Kollár, DrSc.

Spôsob sprístupnenia elektronickej verzie práce: bez obmedzenia

Dátum schválenia: 04.12.2019

Abstrakt

Práca je venovaná rozvoju metodiky určovania vplyvu nepresnosti modelov geomagnetického poľa na simulácie kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme. Nepresnosť je určená z porovnania výsledkov modelov geomagnetického poľa a meraní vybraných geomagnetických staníc siete INTERMAGNET. Odhad vplyvu nepresnosti určenia hodnoty geomagnetického poľa, ktorá je vstupnou hodnotou pre simulácie trajektórii je testovaný na základe hypotéz pôvodu nepresnosti. Výsledky ukazujú, že chyba vo vyjadrení geomagnetického poľa by nemala spôsobiť nepresnosť v odhade intenzity kozmického žiarenia na povrchu Zeme väčšiu než niekoľko percent, v prípade nepresnosti interného geomagnetického poľa na vysokých geomagnetických šírkach. V prípade nižších geomagnetických šírok je tento vplyv menší. V prípade pôvodu nepresnosti v lokálnych poliach, ako je krustálne geomagnetické pole, by chyba mohla byť vyššia.

Kľúčové slová: geomagnetické pole, kozmické žiarenie, odrazová rigidita, IGRF, Tsyganenko, COR

Abstract

The thesis is devoted to the development of a methodology for determining the influence of the geomagnetic field models uncertainties on simulations of cosmic rays in the Earth's magnetosphere. The uncertainties are determined from a comparison of the results of geomagnetic field models and measurements of selected geomagnetic stations of the INTERMAGNET network. The estimation of the influence of the uncertainty, which is the input value for trajectory simulations, is tested based on hypotheses of the origin of the inaccuracy.

The results show that an error in the expression of the geomagnetic field does not cause an error in the estimation of the intensity of cosmic radiation on the Earth's surface greater than a few percents at high geomagnetic latitudes, in the case of a source of uncertainties in the internal geomagnetic field. In the case of lower geomagnetic latitudes, this effect is smaller. In the case of the origin of uncertainties in local fields, such as a crustal geomagnetic field, the error could be higher.

Key words: geomagnetic field, cosmic rays, cut-off rigidity, IGRF, Tsyganenko, COR

Obsah

1	Kozmické žiarenie	20
1.1	Objav kozmického žiarenia	20
1.2	Energetické spektrum kozmického žiarenia	22
1.3	GZK limit	25
1.4	Zloženie kozmického žiarenia	25
2	Magnetosféra Zeme	28
2.1	Vlastnosti a pôvod Zemskej magnetosféry	28
2.2	Geometria magnetosféry Zeme	29
2.2.1	Magnetický dipól	31
2.2.2	Elementy Zemského magnetického poľa	32
2.2.3	Geometria magnetického poľa Zeme	34
2.2.4	Magnetosféra	35
2.3	INTERMAGNET	39
3	Simulačné programy na modelovanie magnetického poľa Zeme a pohybu kozmického žiarenia v tomto poli	41
3.1	IGRF	41
3.1.1	Matematická formulácia modelu IGRF	42
3.2	Tsyganenko	44
3.2.1	Prehľad aproximácii modelu poľa	46
3.3	COR	49
4	Výsledky v simulácii magnetického poľa a prechodu kozmického žiarenia týmto poľom	51
4.1	Porovnanie simulovaného magnetického poľa s reálne nameranými hodnotami	51
4.2	Rigidita a intenzita kozmického žiarenia	57

4.3 Vizualizácia prechodu kozmického žiarenia v systéme COR	63
A Vývoj celkového magnetického poľa pre vybrané stanice a pre dané roky	72
B Vývoj efektívnej odrezávacej rigidity a celkovej intenzity kozmického žiarenia dňa 10.10. pre vybrané stanice a pre nami zvolené roky	83

Zoznam obrázkov

1.1	Spektrum kozmického žiarenia. [4]	23
1.2	Energetické spektrum jednotlivých zložiek kozmického žiarenia. Boli použité rôzne škálovacie faktory, aby sa mohlo zobrazíť na jednom diagrame. [15]	26
2.3	Idealizované zobrazenie Zemského magnetického dipólu. Čiary znázorňujú silové čiary a smer magnetického poľa, N je severný a S južný magnetický pól.	30
2.4	Silové čiary magnetického poľa vytvorené dipólom. Smerovanie čiar naznačuje dipólové pole, $\mathbf{r}$ je rádius vektora, θ je košírka (z angličtiny colatitude) ako ukazuje na bod P v polárnych súradniciach.	31
2.5	Elementy Zemského magnetického poľa. F je celková intenzita magnetického poľa, H je horizontálna časť, D je deklinácia a I je inklinácia.	33
2.6	Hypotetický permanentný magnet ako prvá aproximácia dipólového opisu Zemského magnetického poľa. [19]	35
2.7	Magnetosféra Zeme s príslušnými oblasťami. [22]	36
2.8	Magnetosférický systém elektrických prúdov (červené čiary) a magnetické siločiar (modré čiary). [31]	38
2.9	Geomagnetické informačné uzly (GINs), satelity využité GINs-om a ich pokrytie dostupné na https://intermagnet.org/ .	40
2.10	Rozmiestnenie observatórií na meranie magnetického poľa Zeme. [34]	40
4.11	Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	53
4.12	Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	54

4.13	Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	55
4.14	Vývoj nameraných dát celkového magnetického poľa Zeme z INTERMAGNET-u pre stanicu Kourou pre rok 2001. Homogénne, rovné časti sú výsledkom lineárnej regresie použitej na zvyšné dáta a nahradené na chýbajúce časti.	55
4.15	Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	59
4.16	Vývoj efektívnej odrezávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	60
4.17	Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	60
4.18	Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	61
4.19	Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	61
4.20	Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	62
4.21	Výpočet odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 29.03.2001 v systéme COR (vľavo), vizualizácia smeru dopadu kozmického žiarenia (vpravo).	63
4.22	Výpočet celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 29.03.2001 v systéme COR a vizualizácia dopadu kozmického žiarenia. .	64
A.23	Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	72
A.24	Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	73
A.25	Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	73

A.26 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	74
A.27 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	74
A.28 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	75
A.29 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kakadu v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	75
A.30 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kakadu v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	76
A.31 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kakadu v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	76
A.32 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kourou v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	77
A.33 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kourou v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	77
A.34 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kourou v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	78
A.35 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Lerwick v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	78
A.36 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Lerwick v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).	79

A.37 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Lerwick v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne namera- ných dát (červená čiara).	79
A.38 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne namera- ných dát (červená čiara).	80
A.39 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne namera- ných dát (červená čiara).	80
A.40 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne namera- ných dát (červená čiara).	81
A.41 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Ti-hany v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne namera- ných dát (červená čiara).	81
A.42 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Ti-hany v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne namera- ných dát (červená čiara).	82
A.43 Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Ti-hany v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne namera- ných dát (červená čiara).	82
B.44 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Barrow dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	83
B.45 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Barrow dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	84
B.46 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Barrow dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	84
B.47 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Barrow dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	85
B.48 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Barrow dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	85
B.49 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Barrow dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	86

B.50 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	86
B.51 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	87
B.52 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	87
B.53 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	88
B.54 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	88
B.55 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	89
B.56 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	89
B.57 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	90
B.58 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	90
B.59 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	91
B.60 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	91
B.61 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	92
B.62 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kourou dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	92
B.63 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kourou dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	93
B.64 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kourou dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	93
B.65 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kourou dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	94
B.66 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kourou dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	94

B.67 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kourou dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	95
B.68 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	95
B.69 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	96
B.70 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	96
B.71 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	97
B.72 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	97
B.73 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	98
B.74 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu San Juan dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	98
B.75 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu San Juan dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	99
B.76 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu San Juan dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	99
B.77 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu San Juan dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	100
B.78 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu San Juan dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	100
B.79 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu San Juan dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	101
B.80 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	101
B.81 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	102
B.82 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	102
B.83 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	103

B.84 Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	103
B.85 Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.	104

Zoznam tabuliek

1.1	Zmena inozácie atmosféry nameraná počas Kolhörsterovho balónového letu do výšky 9000 metrov.[3]	22
1.2	Percentuálne zastúpenie zložiek kozmického žiarenia na povrchu atmosféry medzi energiami od $10^8 eV$ do $10^{10} eV$. [3]	25
4.1	Zoznam nami zvolených staníc pre nami zvolené roky s príslušnými geografickými a geomagnetickými súradnicami.	52
4.2	Percentuálne rozdiely medzi simulovanými (IGRF-T04) a reálnymi dátami (INTERMAGNET) pre vybrané stanice a nami zvolené roky.	56
4.3	Veľkosť krustálneho poľa pre jednotlivé stanice.	56

Úvod

Simulácie kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme sú rozvíjanou témou na ÚEF SAV v posledných desaťročiach, čo vo finálnej fáze viedlo k vzniku modelu COR [53]. Tieto simulácie využívajú externé modely geomagnetického poľa vyvíjané medzinárodnými organizáciami, ako v prípade interného poľa modelom IGRF, a vedeckou komunitou ako je to v prípade externého poľa a modelu Tsyganenko. Otvorenou otázkou je ako vplývajú nepresnosti hodnôt magnetického poľa modelov na simulácie kozmického žiarenia v magnetosfére. Úlohou práce bolo osvetliť a začať rozvíjať metodiku na vyjadrenie tohto vplyvu. Nepresnosti modelov geomagnetického poľa sú pre simulácie kozmického žiarenia v ňom vstupnou chybou, ktorej vplyv je užitočné zistiť.

Záverečná práca je rozdelená do štyroch kapitol a obsahuje dva dodatky.

Prvá kapitola obsahuje základné informácie o kozmickom žiarení, jeho objave, energetickom spektre a zložení.

Druhá kapitola je venovaná magnetickému poľu Zeme. Sú opísané vlastnosti a pôvod Zemskej magnetosféry, geometria, ktorú nadobudne, jeho zložky a spôsob merania pomocou siete INTERMAGNET.

V tretej kapitole nájdeme simulačné programy potrebné na simuláciu vnútorného a vonkajšieho magnetického poľa a pohyb kozmického žiarenia v týchto poliach. Hlavne sme sa zamerali na modely IGRF, Tsyganenko a COR.

Výsledky našej práce sú prezentované v štvrtej kapitole.

Záverečná práca obsahuje aj dodatky A a B, v ktorom sú ucelene uvedené všetky naše doterajšie výsledky.

Kapitola 1

Kozmické žiarenie

Kozmické žiarenie (z ang. cosmic ray - CR) je izotropné žiarenie, ktoré neustále z každého smeru naráža do zemskej atmosféry. Je tvorený hlavne protónmi, alfa časticami, elektrónmi a ťažkými jadrami. Vyznačuje sa veľmi veľkým rozsahom energetického spektra v rozsahu energií od $10^8 eV$ až do niekoľkých $10^{21} eV$. Zahŕňa v sebe až 13 rádov energie. Pôvod častíc s energiami nad $10^{15} eV$ ešte stále nie je jasný a panujú búrlivé diskusie nad ich zdrojmi. K záhade prispieva ešte aj fakt, že kozmické žiarenie nad energiou $5 \cdot 10^{19} eV$ nemôže pochádzať z vyššej vzdialenosti ako 75 Mpc [1], čiže z astronomického hľadiska ide o lokálny zdroj. Vysokoenergetické kozmické žiarenie na vyšších vzdialenostiach by interagovalo s kozmickým mikrovlnným pozadím (z ang. cosmic microwave background - CMB, CMBR).

Dodnes neexistuje vyhovujúci fyzikálny model, ktorý by vysvetľoval urýchľovanie častíc na také vysoké hodnoty energie.

1.1 Objav kozmického žiarenia

Za zrodenie výskumu v oblasti kozmického žiarenia ďakujeme V. Hessovi¹, ktorý svojimi balónovými letmi medzi rokmi 1911-1913 dokázal, že s narastajúcou nadmorskou výškou ionizačný efekt atmosféry rastie.

V tej dobe, krátko po objave rádioaktivity bol elektroskopom ukázaný aj ionizačný efekt atmosféry. Elektroskop je jednoduché zariadenie, ktoré reaguje na prítomnosť elektrického poľa. Vo svojej najjednoduchšej forme sú to dve ľahké nevodivé guľičky,

¹Victor Franz Hess - rakúsko-americký fyzik, narodený 24. júna 1883 v Schloss Waldstein, Rakúsko, zomrel 17. decembra 1964 v Mount Vernon, New York, USA; V roku 1936 získal Nobelovú cenu za fyziku.

zavesené voľne do priestoru na bavlnených vláknach, na ktorý bol prenesený náboj dotykcom nabitou ebonitovou tyčou. Pokročilejšou verziou prístroja, s ktorou prišiel v roku 1787 Abraham Bennet, bol elektroskop, ktorý využíval na detekciu dve tenké plátky zlata. Celé zariadenie navyše bolo ešte uzavreté v sklenenej nádobe, čím bol eliminovaný rušivý vplyv prúdenia vzduchu.

Keď sa elektroskop nabil, zlaté plátky sa od seba rozostúpili. Ak sa na elektroskop naniesol rovnaký náboj, zlaté plátky sa rozostúpili na rovnakú vzdialenosť. Avšak stačilo počkať určitú dobu a zlaté plátky sa dostali naspäť na pôvodné miesto. Bol to až fyzik C. T. R. Wilson², ktorý na konci 19. storočia vysvetlil daný jav pomocou ionizácie vzduchu. Príčinou vybíjania boli teda ióny atómu, ktoré dopadali na zlaté plátky a postupne vyrovnávali nábojový rozdiel medzi jednotlivými plátkami. V tej dobe sa predpokladalo, že zdrojom týchto atómov je pôda, čiže predtým objavená prirodzená rádioaktivita H. Becquerelom³. [2]

To, že prirodzená rádioaktivita nemusí byť výlučným zdrojom vybíjania, poukázal svojimi pokusmi nemecký fyzik Theodor Wulf, ktorý ku svojim pokusom zostrojil vlastný merací prístroj, tzv. Wulfov elektrometer. Avšak prelomový dôkaz priniesol až Victor Hess, keď 17. Apríla 1912 počas čiastočného zatmenia Slnka uskutočnil balónový let až do výšky 5000 metrov a zistil, že na narastajúcu ionizáciu slnečná aktivita nemá vplyv. Žiarenie, ktoré spôsobuje ionizáciu vzduchu teda musí pochádzať z vesmíru.

Hessove meranie potvrdil aj následný let nemeckého fyzika Wernera Heinricha Gustava Kolhörstera do výšky 9000 metrov. Ním namerané hodnoty sú znázornené v Tabuľke 1.1. [3]

Názov kozmické žiarenie bol zavedený fyzikom R. Millikanom⁴, ktorý bol v spočiatku skeptický k hypotéze o kozmickom pôvode žiarenia, ale aj jeho vlastné merania túto skutočnosť potvrdili. Názov vznikol na základe vtedy známeho γ žiarenia, totiž z energetického hľadiska sa kozmické žiarenie zdalo ako nejaký ultraenergetický typ elektromagnetického γ žiarenia. Aj keď elektromagnetický pôvod sa nepotvrdil a ide hlavne o časticovú záležitosť, názov sa vo vedomí ľudí zachoval.

²Charles Thomson Rees Wilson - škótsky fyzik narodený 14. februára 1869 v Midlothian, Spojené kráľovstvo, zomrel 15. novembra 1959 v Edinburghu; V roku 1927 získal Nobelovu cenu za fyziku.

³Henri Becquerel - francúzsky fyzik narodený 15. decembra 1852 v Paríži, zomrel 25. augusta 1908 v Le Croisic; V roku 1903 získal Nobelovu cenu za fyziku

⁴Robert Andrews Millikan - bol americký experimentálny fyzik narodený 22. Marca 1868 v Morrisone, štát Illinois, USA, zomrel 19. decembra 1953 v San Marine, štát Kalifornia, USA; V roku 1923 získal Nobelovu cenu za fyziku.

Výška (km)	Δ ión (ión na m^3)
0	0
1	-1,5
2	+1,2
3	+4,2
4	+8,8
5	+16,9
6	+28,7
7	+44,2
8	+61,3
9	+80,4

Tabuľka 1.1: Zmena inozácie atmosféry nameraná počas Kolhörsterovho balónového letu do výšky 9000 metrov.[3]

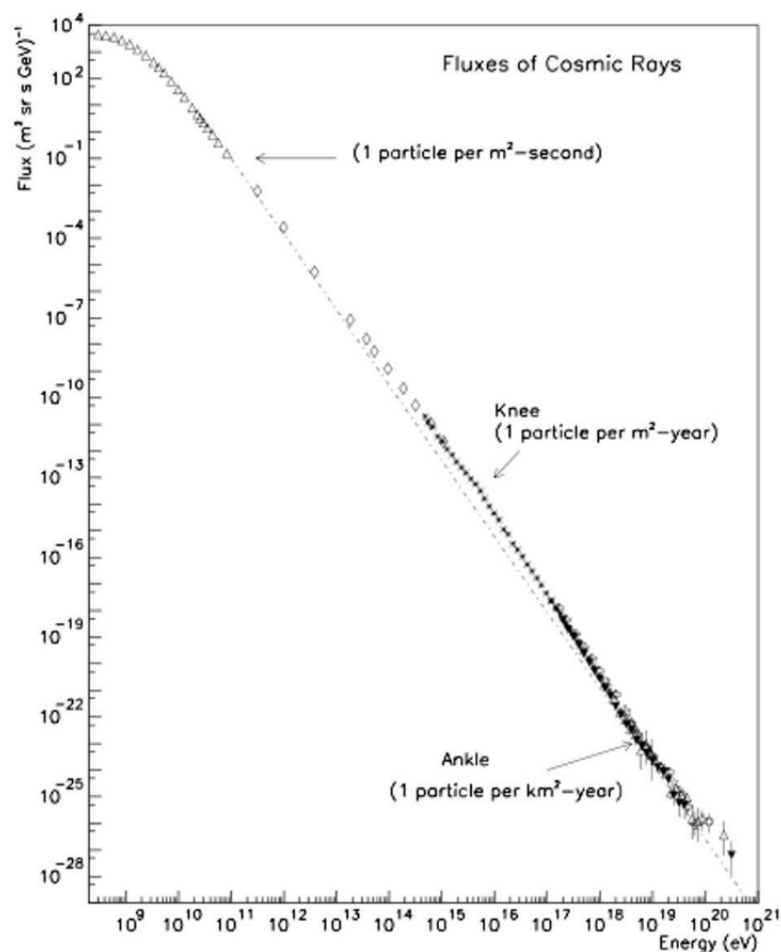
Iným veľmi dôležitým míľnikom bolo meranie sovietskeho fyzika Dmitria Vladimiroviča Skobelčyna v roku 1929, ktorý použitím Wilsonovej hmlovej komory zaregistroval dráhy kozmického žiarenia. Navyše v roku 1928 nemeckí fyzici Johannes Wilhelm Geiger a Walther Müller predstavili svoj zdokonalený detekčný prístroj, ktorý poznáme ako Geiger-Müllerov počítač. Princíp fungovania detektoru je podobný ako u ionizačných hmlových komôr, t.j. že nabitá častica spôsobí ionizáciu v trubici naplnenej vzácnym plynom. Náboj je zachytený na potenciálovom rozdiely medzi dvoma elektródami a zmena v prúde indikuje prechod nabitej častice cez trubicu. Najväčšou inováciou tohto prístroja bol fakt, že vedel namerať aj jednu jedinú nabitú časticu, ďalej kombinoval vysokú citlivosť, prenosnosť a veľkú kapacitu. Nevýhodami boli však neschopnosť povedať niečo o type, energii a smere dopadu častíc.[3]

1.2 Energetické spektrum kozmického žiarenia

Kozmické žiarenie zaberá veľký rozsah energii až 13 rádov od $10^8 eV$ do $10^{21} eV$ a veľký rozsah toku častíc až 32 rádov od 10^{-28} častíc $\cdot (m^2 \cdot sr \cdot GeV \cdot s)^{-1}$ do 10^4 častíc $\cdot (m^2 \cdot sr \cdot GeV \cdot s)^{-1}$.

Energetické spektrum kozmického žiarenia je znázornené na Obr. 1.1.

Spektrum klesá podľa mocninovej závislosti so sklonom úmerným približne x^{-3} . Okolo energií približne $10^9 eV$ tok prichádzajúcich častíc je možné merať rádovo v



Obr. 1.1: Spektrum kozmického žiarenia. [4]

stovkách až tisícoch častíc na meter štvorcový za sekundu. Na druhej strane spektra pri energiách 10^{20}eV zas tok častíc klesne na menej ako jednu časticu na kilometer štvorcový za tisícročie. Začínajúc od najmenších energií energetického spektra možno pozorovať niekoľko charakteristických črt. Po prvé spektrum má v oblasti nízkych energií menší sklon. Toto je spôsobené aktivitou Slnka. Existencia slnečného vetra a magnetického poľa Slnka zabráňujú preniknutiu časti galaktického kozmického žiarenia do našej slnečnej sústavy.[5] Pri energiách niekoľko desiatok elektrónvoltov spektrum je schopné znova zosilňovať, tomuto javu sa hovorí anomálne kozmické žiarenie. Vyniká ionizáciou neutrálnych atómov z medzihviezdneho prostredia UV žiarením vo vnútornej heliosfére a následným urýchlením na terminačnom "šoku".[6]

Navyše pod energiami menšími ako 10^{10}eV energetické spektrum vykazuje časovú závislosť, ktorá antikoreluje so slnečným cyklom. Silnejšia slnečná aktivita vedie k zvýšenému výskytu častíc zo Slnka (solárneho kozmického žiarenia), ktoré dosiahnú Zem. Slnečný cyklus alebo solárna modulácia je schopná vyvolať rôzne tvary energie-

tického spektra pre nízkoenergetickú oblasť. Pri vyšších energiách, približne nad 100 GeV, už slnečný cyklus nemá vplyv na tvar energetického spektra dopadajúceho kozmického žiarenia. Nad energiami niekoľkých desiatok gigaelektrónvoltov energetické spektrum nadobúda mocninový pokles, ktorý potrvá až do energie približne 10^{15} eV . Veľkosť sklonu mocninného poklesu je v tejto oblasti približne 2.7.

V okolí energii 10^{15} eV sa nachádza oblasť nazývaná koleno spektra kozmického žiarenia. Vyznačuje sa tým, že sa tu mení charakter spektra na jemnejší a mení sa aj sklon mocninného poklesu na hodnotu okolo čísla 3. Je veľa možných teórií opisujúcich tento jav, napríklad strata efektívnosti produkcie protónov, menšie prenikanie kozmického žiarenia z našej galaxie, interakcia kozmického žiarenia s medzihviezdny prostredím alebo drastická zmena interakčných vlastností medzi kozmickým žiarením a Zemskou atmosférou. Najviac uznávanými teóriami sú prvé dve, kde zmenu vysvetľujú so znižujúcou sa magnetickou rigiditou kozmického žiarenia. Takúto strmosť spektra je možné pozorovať až do energie približne 10^{17} eV . Nad touto energiou je ďalšia zmena mocninného sklonu spektra, kde dosahuje hodnotu 3.2 až 3.3. Táto oblasť sa nazýva aj druhým kolenom a dodnes sa nevie, čo spôsobuje tento jav. Druhé koleno bolo pozorované v niekoľkých experimentoch ako sú Akeno [7], Fly's Eye [8] and Haverah Park detectors [9]. Možným vysvetlením je menšia efektívnosť urýchľovacieho mechanizmu na ťažšie jadrá. Taktiež podobný efekt môže nastať ako pri prvom kolene a to inou magnetickou rigiditou ťažších jadier. Pri energii okolo $4 \cdot 10^{18}$ sa spektrum znova mení a mocninný sklon sa stabilizuje na hodnotu 2.7 až 2.8. Táto oblasť sa nazýva členok spektra kozmického žiarenia. Je vnímaný ako začiatok extragalaktického kozmického žiarenia, pretože nebol pozorovaný žiadny zdroj v našej galaxii, ktorý by mohol urýchľovať tieto častice na také energie. Objaví sa tu teda problém s modelmi, ktoré predpokladajú výrazný skok pre možné energie kozmického žiarenia dosiahnuté galaktickými zdrojmi a tokom extragalaktického kozmického žiarenia. Niekoľko možných vysvetlení opisuje toto sploštenie spektra interakciou kozmického žiarenia s kozmickým mikrovlnným pozadím [10]. Všeobecnejší problém je definícia oblasti prechodu galaktického kozmického žiarenia na extragalaktické. Táto problematika je dodnes objektom mnohých debát a diskusií. Avšak je tu všeobecná dohoda, že prechodová oblasť je viacmenej medzi energiami 10^{17} eV až 10^{18} eV . Pri energiách $2 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ až $3 \cdot 10^{19} \text{ eV}$ je možné sledovať výrazné ostré prerušenie v spektre namerané experimentami Pierre Auger observatory [11] a HiRes [12]. Nie je stále jasné, že či toto prerušenie spôsobuje dosiahnutie Greisen-Zatsepin-Kuzminovho limitu (GZK limit) [13] alebo podstatná strata efektivity produkčného mechanizmu. Veľmi dôleži-

tou vlastnosťou spektra je jeho izotropia voči smeru dopadu až ku energiám približne $5 \cdot 10^{19} eV$. Táto vrchná hodnota energie závisí od prítomnosti galaktického alebo extragalaktického magnetického poľa počas prechodu kozmického žiarenia daným prostredím a vysokou magnetickou rigiditou častíc.

1.3 GZK limit

Po objave kozmického mikrovlnného žiarenia sa fyzici domnievali, že musí existovať nejaká odrezávacia limita pre pozorované energetické spektrum kozmického žiarenia. Počas šesťdesiatich rokov dvadsiateho storočia K.Greisen, G.T. Zatsepin a V.A. Kuzmin poukázali na to, že fotónový sirup (z angličtiny photonic molasses), ktorý vznikol po veľkom tresku, spôsobuje nepriepustnosť vesmíru pre protóny s dostatočne vysokou energiou, t.j. pre protóny s energiami vyššími ako prah foto-piónovej produkcie:

$$E_{p\gamma CMB}^{th} = \frac{m_\pi(m_p + m_\pi/2)}{\varepsilon_{CMB}} \approx 6.8 \times 10^{19} \left(\frac{\varepsilon_{CMB}}{10^{-3} eV}\right)^{-1} eV, \quad (1.1)$$

kde m_p je hmotnosť protónu, m_π je hmotnosť píónu a $\varepsilon_{CMB} \sim 10^{-3} eV$ je typická hodnota energie fotónu kozmického mikrovlnného pozadia. Po produkcii píónov, protón (respektíve neutróny, závisí to o type vytvoreného píónu) má približne 50% energie ako mal pred interakciou. [13]

1.4 Zloženie kozmického žiarenia

Zloženie kozmického žiarenia medzi energiami od $10^8 eV$ do $10^{10} eV$ možno nájsť v Tabuľke 1.2.

Typ častice	Percentuálne zastúpenie
protón	86%
alfa častica	11%
elektrón	2%
ťažký ión	1%

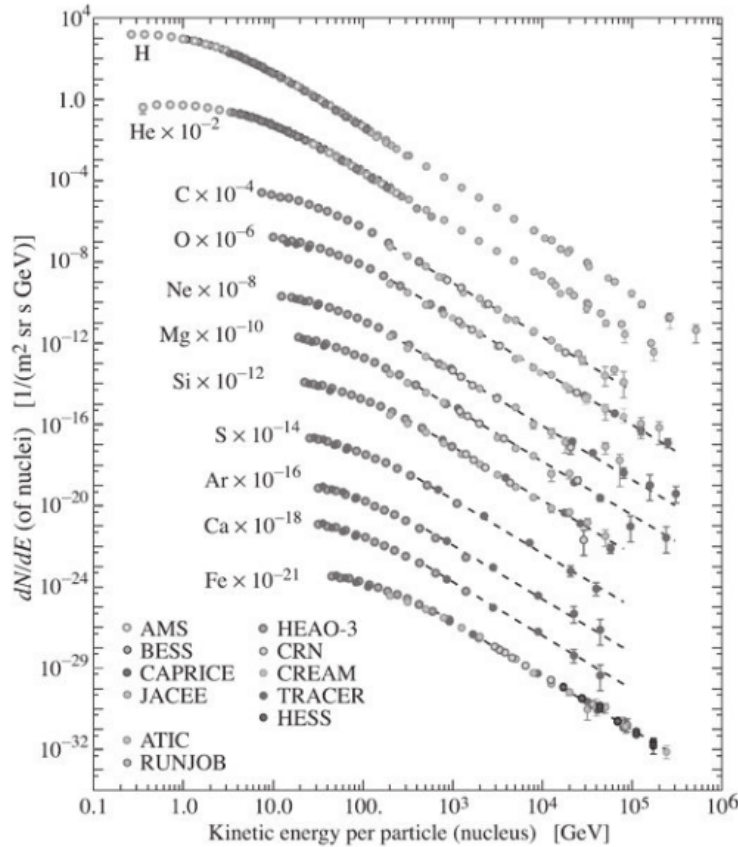
Tabuľka 1.2: Percentuálne zastúpenie zložiek kozmického žiarenia na povrchu atmosféry medzi energiami od $10^8 eV$ do $10^{10} eV$. [3]

Diferenciálne energetické spektrum kozmického žiarenia pre jednotlivé zložky je veľmi dobre reprezentované mocninovými distribúciami vo forme:

$$N(E)dE = KE^{-x}dE \quad (1.2)$$

v energetickom rozmedzí od niekoľkých desiatok gigaelektrónvoltov až po 10^4 GeV na nukleón.[15]

Energetické spektrum kozmického žiarenia pre jednotlivé zložky možno nájsť na Obr.1.2.



Obr. 1.2: Energetické spektrum jednotlivých zložiek kozmického žiarenia. Boli použité rôzne škálovacie faktory, aby sa mohlo zobrazit' na jednom diagrame. [15]

Pri vyšších energiách je energetické spektrum jednotlivých zložiek získané zo spŕšok kozmického žiarenia, teda z druhotných rozpadových častíc a ich energií. Intenzita primárnych nukleónov v energetickom rozmedzí medzi niekoľkými gigaelektrónvoltami až niekoľko stoviek teraelektrónvoltov je približne opísateľná funkciou:

$$I_N(E) \approx 1.8 \times 10^4 E^{-x} \text{ nukleónov } m^{-2} s^{-1} sr^{-1} GeV^{-1}, \quad (1.3)$$

kde $x = 2.7$ a E je energia na nukleón v gigaelektrónvoltoch.[15]

Je tu avšak značný rozdiel medzi energetickými spektrami jednotlivých zložiek kozmického žiarenia pre rôzne prvky. Všeobecným trendom je, že typy prvkov, ktoré

sú identifikované ako primárne majú rovnejšie energetické spektrum ako tie, ktoré boli identifikované ako druhotné (sekundárne). Primárnym typom prvkov kozmického žiarenia nazývame tie prvky, ktoré boli urýchľované priamo zdrojom. Sekundárnym alebo druhotným typom prvkov kozmického žiarenia nazývame tie prvky, ktoré vznikli jadrovou kolíziou, interakciou primárnych typov prvkov s atómami a nukleónmi tvoriacimi medzihviezdny prach v procese známom ako spalácia. [16]

Kapitola 2

Magnetosféra Zeme

Zemské magnetické pole zohrávalo dôležitú úlohu pri tvorbe a dodnes zohráva veľmi dôležitú úlohu pri udržiavaní života na Zemi. Oblasť kde je najväčším magnetickým poľom zemské magnetické pole sa nazýva magnetosféra. Vytvorila sa hneď pri formovaní sa našej Zeme pred štyri a pol miliardami rokov [17], menila sa, pretvárala a dodnes sa neustále mení. Chráni nás pred nebezpečnou radiáciou a vysokoenergetickou plazmou pochádzajúcou zo Slnka.

2.1 Vlastnosti a pôvod Zemskej magnetosféry

Zem disponuje magnetickým poľom, ktorý sa vytvára hlavne v jej vnútri. Magnetosféra siaha na strane smerujúcej k Slnku do vzdialenosti 65 tisíc kilometrov. Ako už bolo spomenuté, magnetosféra chráni život na Zemi tým, že blokuje a odkláňa vysoko energetické a veľmi nebezpečné častice pochádzajúce zo Slnka a taktiež chráni atmosféru Zeme pred odľuknutím, ktorá môže byť spôsobená slnečným vetrom ¹.

Celkové magnetické pole Zeme, ktoré je možné pozorovať nazývame geomagnetické pole. Je superpozíciou magnetických polí z rôznych zdrojov. Pole generované magnetickým dynamo efektom [18] v tekutom jadre Zeme sa nazýva hlavné pole (z angličtiny *main field*) a je najdominantnejšou zložkou. Magnetické pole generované rôznymi magnetickými horninami v litosfére Zeme sa nazýva horninové alebo krustálne pole (z angličtiny *crustal field*). Hlavné aj krustálne pole spolu tvoria zložku magnetického poľa nazývanú vnútorné pole (z angličtiny *internal field*). Vnútorné pole sa iba máľčko mení časom a je viacmenej stabilné. Okrem vnútorného poľa

¹Predpokladá sa, že planéta Mars po strate svojho magnetického poľa postupne strácala svoju atmosféru a marťanská atmosféra sa tak stenšila na hrúbku akú pozorujeme dnes.

existuje aj vonkajšie pole (z angličtiny *external field*). Vonkajšie magnetické pole je vytvorené poľom vyvolaným elektrickým tokom v ionosfére a v magnetosfére. Taktiež môže nastať indukovaný elektrický tok v kôre, ktorá taktiež vytvorí magnetické pole. Ak zosumarizujeme, celkové geomagnetické pole tvorí hlavné, vonkajšie a indukované pole. [19]

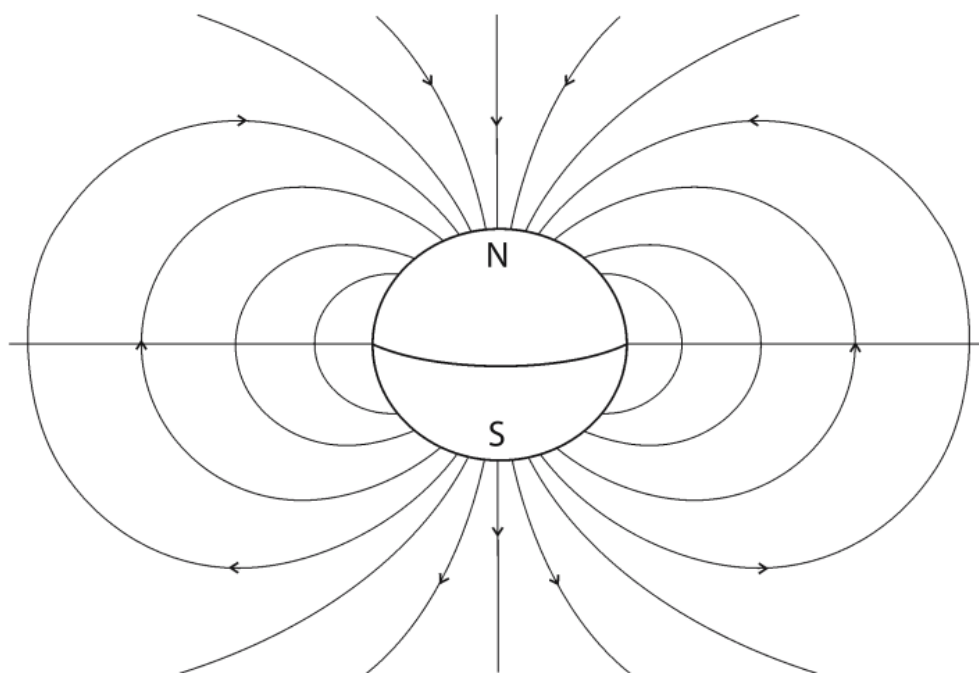
Ako už bolo spomenuté, hlavné pole sa generuje v jadre Zeme. Zemské jadro je zložené hlavne zo železa a v nepatrnom množstve z niklu. Skladá sa z dvoch hlavných častí: vonkajšie a vnútorné. Domnievame sa, že vnútorné jadro je tuhá masa železa, pričom vonkajšie jadro sa nachádza v tekutom stave roztaveného železa a niklu. Magnetické pole je vytvorené prúdením elektrického toku vo vysokovodivom vonkajšom jadre. Komplexné prúdenie elektrického toku (respektíve tu možno hovoriť aj o tekutom vodivom materiály) je poháňané konvekčným prúdením a veľkou rotáciou Zeme [20]. Verí sa, že relatívne vysoká rotácia Zeme je hlavnou príčinou Zemského magnetického poľa a vytvorením dynamo efektu v jej jadre, pretože susedná planéta Venuša nemá magnetické pole [21]. Predpokladá sa, že energia potrebná na udržanie tohto dynamu vzniká procesom solidifikácie, t.j. ztuhnutia, keď ťažšie prvky vymrznú do tuhého vnútorného jadra a ľahšie prvky sa uvoľňujú, čo spôsobuje už spomínanú konvekciu. Nehomogénnosť elektrických tokov spôsobuje regionálne magnetické anomálie na Zemskom povrchu a variácie hlavného magnetického poľa sú spojené s variáciami v rýchlostiach toku tekutého jadra Zeme [22].

Možno zaznamenať, že pred teóriou netriviálneho dynamu v Zemskom jadre existovala predstava, že Zemské magnetické pole spôsobuje silný permanentný magnet v strede Zeme. Avšak feromagnetické materiály ako napríklad železo v Zemskom jadre nemôže byť magnetizované nad jeho Curieho teplotou, t.j. teplotou, kde magnet stráca svoju magnetizáciu [23]. Teplota v Zemskom jadre dosahuje oveľa vyššie hodnoty (približne 5700 K) ako je Curieho teplota pre železo (1043 K).

2.2 Geometria magnetosféry Zeme

Ako sme už spomínali, magnetosféra Zeme sa skladá z hlavného, krustálneho, externého a indukovaného poľa. Taktiež sme spomenuli, že ho z hlavnej časti vytvára dynamo vo vonkajšom jadre Zeme. Toto dynamo vytvára dipólové magnetické pole, ktorého idealizovaný tvar možno nájsť na Obr. 2.3. [22]

Zemské magnetické pole ale neukazuje typické priestorové vlastnosti dipólu. Neustále sa v čase mení, vykazuje časové variácie. Tieto variácie, je možné rozdeliť do dvoch



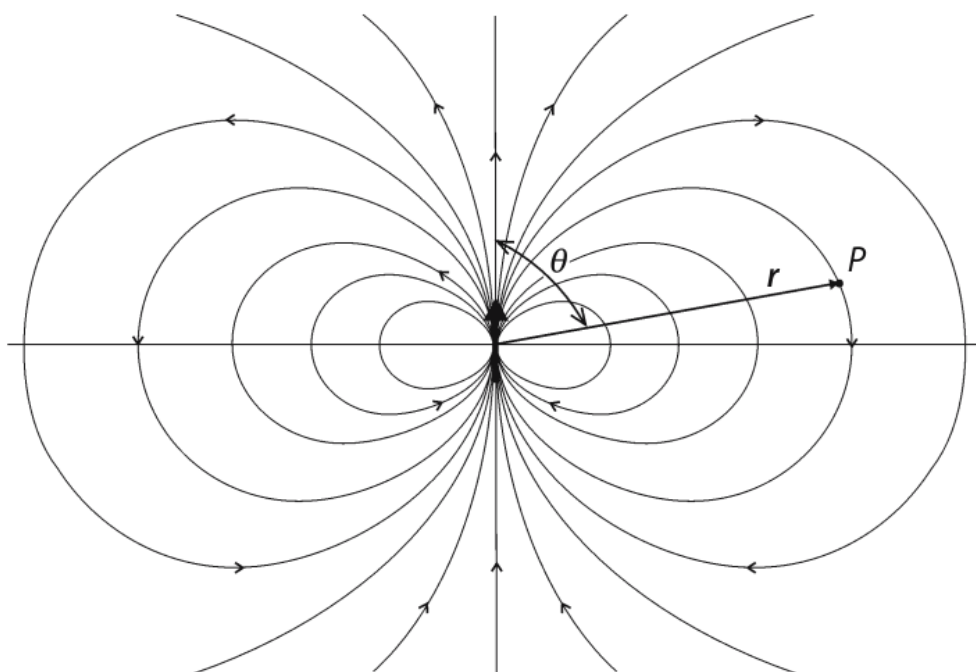
Obr. 2.3: Idealizované zobrazenie Zemskeho magnetického dipólu. Čiary znázorňujú silové čiary a smer magnetického poľa, N je severný a S južný magnetický pól.

hlavných skupín: dlhotrvajúce (z angličtiny long-term) a krátkotrvajúce (z angličtiny short-term) časové variácie. Dlhotrvaťúce časové variácie alebo inak nazvané sekulárne variácie môžu byť detegované len ak sa pozrieme na vývoj nameraných dát v časovom rozmedzí 5 - 10 rokov, aj viac. Táto variácia je spôsobená hlbokými zdrojmi v strede Zeme, čiže rovnakými zdrojmi, ktoré tvoria hlavnú časť magnetického poľa. Krátkotrvajúce časové variácie majú mimozemský pôvod a sú pozorovateľné na kratšiu časovú periódu ako dlhotrvajúce. Môžu trvať od niekoľkých sekúnd až do pár rokov. Nakoniec magnetické pole spôsobené elektromagnetickou indukciou generovanou elektrickými tokmi indukovanými v zemskej kôre a vo vrchnej časti zemskeho plášťa pomocou časovej variácie externého magnetického poľa. Toto sa môže udiť, lebo Zem je veľký konduktor (vodič) a elektrické toky môžu byť indukované na vodivých častiach. Druhotné alebo sekundárne magnetické pole generované takýmto spôsobom sa následne pripočítava k ostatným zdrojom. [22]

2.2.1 Magnetický dipól

Základnou podstatou štúdia magnetizmu je dipól. Dipól je systém pozostávajúci z dvoch magnetických nábojov alebo más s rovnako veľkou intenzitou ale opačnou polaritou. Je známym faktom, že neexistuje magnetický monopól, t.j. ak aj zlomíme magnetickú tyč alebo iný permanentný magnet, vzniknú dva dipóly a nie dva monopóly s opačným pólovaním. Fyzikálny pôvod magnetizmu spočíva v elektrických vlastnostiach látok. Elektrón pohybujúci na svojom orbitály generuje magnetické pole rovnaké ako v magnetickej tyči.

Najjednoduchším spôsobom zobrazenia magnetického potenciálu V , produkovaný magnetickým dipólom zobrazeným na Obr. 2.4,



Obr. 2.4: Silové čiary magnetického poľa vytvorené dipólom. Smerovanie čiar naznačuje dipólové pole, $\mathbf{r}$ je rádius vektora, θ je košírka (z angličtiny colatitude) ako ukazuje na bod P v polárnych súradniciach.

na bod P s polárnymi súradnicami (r, θ) v rovine kde polárne osi koincidujú, t.j. zhodujú sa v smere aj v protismere, s magnetickým momentom dipólu $\mathbf{M}$ začínajúcim v strede je brané:

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M \cos(\theta)}{r^2}, \quad (2.1)$$

kde

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Henry } m^{-1} \quad (2.2)$$

je magnetická permeabilita vákua. IAGA - Medzinárodná organizácia geomagnetizmu a aerónómie (z angličtiny International Association of Geomagnetism and Aeronomy) definovala preferované používanie jednotiek na meranie Zemského magnetického poľa magnetickú indukciu $\mathbf{B}$ oproti intenzite magnetického poľa $\mathbf{H}$. [24]

Podobne použitím $\mathbf{r}$ ako radiálneho vektoru, formulácia cez gradient taktiež môže byť použitá:

$$V = \frac{\mu_0}{4\pi} \mathbf{M} \nabla \left(\frac{1}{r} \right). \quad (2.3)$$

Kvôli axiálnej symetrii voči azimutu vzorce 2.1 a 2.3 sa môžu použiť vo všetkých rovinách cez polárne osi pre dipól. Vektor magnetického poľa $\mathbf{F}$ sa potom definuje ako:

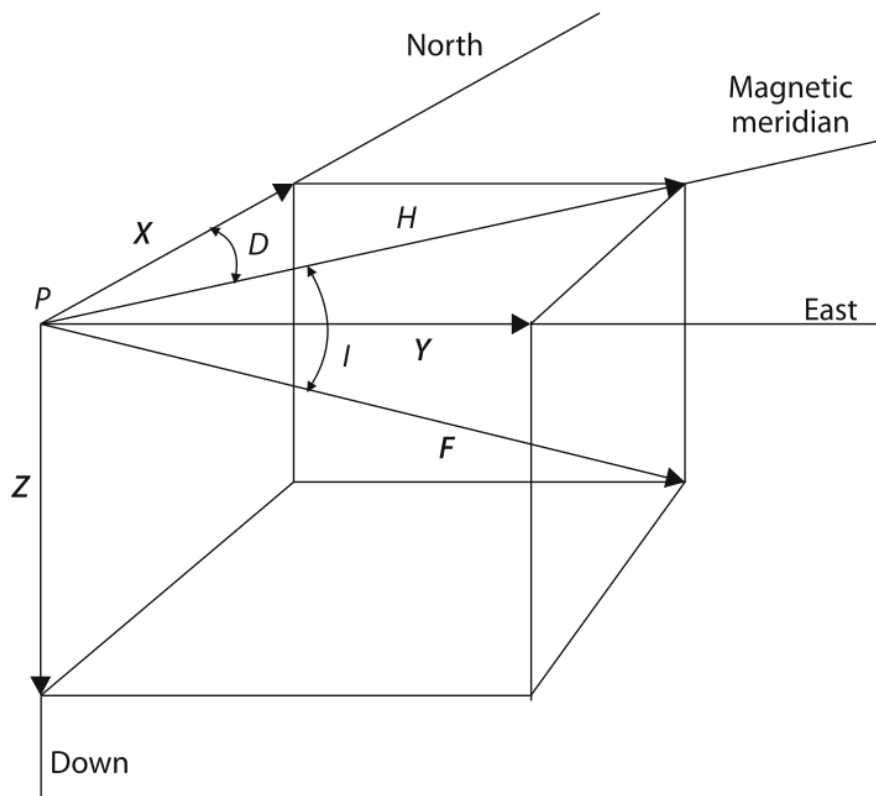
$$\mathbf{F} = -\nabla V. \quad (2.4)$$

2.2.2 Elementy Zemského magnetického poľa

Zemské magnetické pole má smerovanie a veľkosť t.j. magnitúdu do všetkých smerov priestoru a preto je vektorovým poľom. Tri parametre sú potrebné na opísanie takéhoto poľa a to magnetický vektor poľa $\mathbf{F}$ v bode P na Zemskom povrchu. Bod P je vhodné položiť do centra Karteziánskej (klasickej alebo pravouhlej) súradnicovej sústavy, kde x-ová súradnica smeruje na geografický sever, y-ová os smeruje na východ a z-ová os je na nich kolmá a smeruje do stredu Zeme (dole). Severnú, východnú a smerujúcu do stredu komponentov vektorového poľa bude označovať X, Y a Z. Danú geometriu možno nájsť na Obr. 2.5. [22]

Zaužívaným spôsobom ako opísať Zemské magnetické pole je definovať celkovú intenzitu magnetického poľa F , inklináciu I a deklináciu D . Inklinácia I je uhol medzi horizontálnou rovinou a vektorom. Deklinácia D je uhol medzi x-ovou osou a komponentom H , ktorý je horizontálnou časťou F .

Ďalším spôsobom ako opísať Zemské magnetické pole je definovať horizontálny komponent H , vertikálny komponent Z a deklináciu D . Orientáciu a umiestnenie jednotlivých komponentov možno nájsť na Obr. 2.5. Vzťahy medzi jednotlivými komponentami sú opísané v nasledujúcich rovniciach:



Obr. 2.5: Elementy Zemského magnetického poľa. F je celková intenzita magnetického poľa, H je horizontálna časť, D je deklinácia a I je inklinácia.

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (2.5)$$

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (2.6)$$

$$I = \arctang\left(\frac{Z}{H}\right), \quad (2.7)$$

$$D = \arctang\left(\frac{Y}{X}\right). \quad (2.8)$$

Komponenty v Karteziánskom súradnicovom systéme:

$$X = H \cos(D), \quad (2.9)$$

$$Y = H \sin(D), \quad (2.10)$$

$$Z = F \sin(I). \quad (2.11)$$

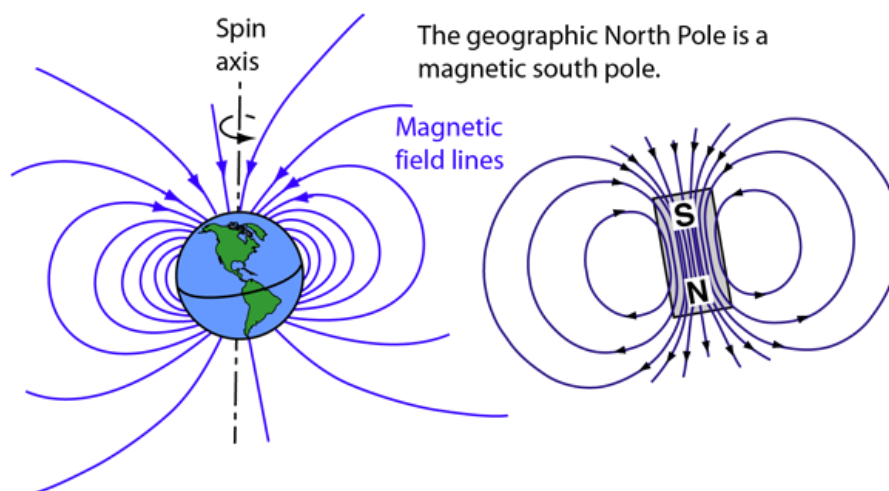
Komponenty geomagnetického poľa X, Y, Z a H sa udávajú v jednotkách nanotesla (nT), pričom inklinácia I a deklinácia D sú udávané v uhloch, prípadne v arcminútach alebo arcsekundách. Arcminúta je jedna šesťdesiatina uhlu a arcsekunda zas jedna šesťdesiatina arcminúty. Využívaným grafom, kde si môžeme zobraziť denné merania veľkosti magnetického poľa namerané magnetickými observatóriami voči času merania sa nazýva magnetogram. [22]

2.2.3 Geometria magnetického poľa Zeme

Veľkosť celkového magnetického poľa na povrchu Zeme sa pohybuje medzi 23000 nT a 62000 nT [25]. Najsilnejšia je v okolí pólův a najslabšia okolo rovníka, ale medzi pólmi a rovníkom sa veľkosť sily magnetického poľa nemení lineárne. Pole sa mení v čase i v priestore. V polárnych regiónoch magnetické pole pozostáva viacmenej len z vertikálnej zložky a pre rovník zas pozostáva z horizontálnej zložky magnetického poľa. Miesta, kde magnetické pole pozostáva len čisto z vertikálnej zložky sa nazýva južný a severný magnetický pól. Netreba si ich mýliť s geografickými pólmi zvyčajne označenými pri rotačnej osi Zeme. Ako bolo spomenuté, Zemské magnetické pole je dipólového typu, pričom magnetické dipólové pole funguje iba ako prvá aproximácia, priblíženie. Jednoduchý dipól opisuje len približne 90% pozorovaného reálneho tvaru magnetického poľa Zeme. [26]

Predstaviť si ho môžeme, keby sme do stredu Zeme pridali obrovský tyčový alebo permanentný magnet vychýlený o 11.5% od Zemskej rotačnej osi. Tento hypotetický permanentný magnet by mohol byť orientovaný tak ako je znázornené na Obr. 2.6.

Miesta, kde by sa magnetické póly nachádzali, keby Zemské magnetické pole bolo čisto dipólové a produkované len s tým hypotetickým permanentným magnetom voláme geomagnetickými pólmi. Jednoduchý a časovo nezávislý model permanentného magnetu je nevhodný na opis zložitejších, t.j. komplexných vlastností Zemského magnetického poľa ako sú napríklad magnetické anomálie, obrátenie poľa, presun geomagnetických pólův a iné časové variácie magnetického poľa. Najvýraznejšou odlišnosťou od dokonalého dipólového magnetického poľa je fakt, že Zemské magnetické póly nie sú umiestnené presne oproti sebe. [25]

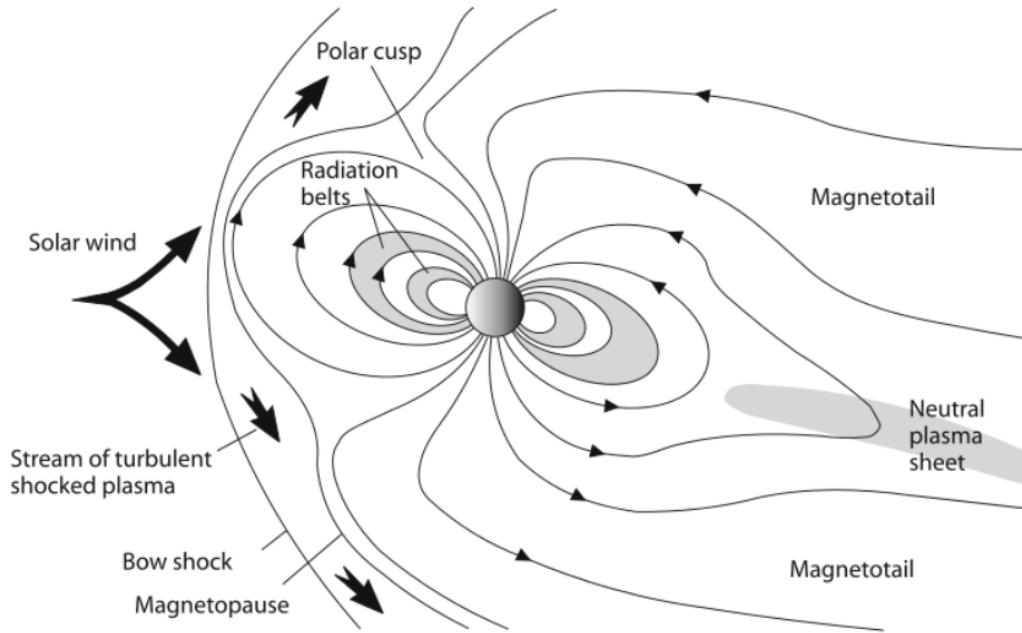


Obr. 2.6: Hypotetický permanentný magnet ako prvá aproximácia dipólového opisu Zemského magnetického poľa. [19]

2.2.4 Magnetosféra

Zem a Zemské magnetické pole je výrazne ovplyvnené našou najbližšou hviezdou, Slnkom. Slnko neustále vysiela, t.j. emituje ionizovaný plyn, plazmu obsahujúcu hlavne elektróny, ionizované atómy vodíku a hélia s priemernou hustotou pri Zemi približne 7 iónov na centimeter kubický. Toto konštantné prúdenie plazmy pohybujúcou sa rýchlosťou medzi 250 až 2500 kilometrov za sekundu sa nazýva slnečný alebo solárny vietor (z angličtiny solar wind) [27]. Niekedy sa zvykne nazývať aj po vedcovi, ktorý vytvoril matematický aparát na opis tohto prúdenia Parkerovým vetrom (z angličtiny Parker wind) [28]. Vždy smeruje od Slnka, ale môže meniť svoju rýchlosť a hustotu v závislosti od zmeny slnečnej aktivity. Parkerov vietor opisuje správanie sa magnetického poľa v interplanetárnom priestore a nazýva sa interplanetárne magnetické pole (z angličtiny interplanetary magnetic field - IMF). Nízkohustotná plazma v slnečnom vetri a magnetické pole Slnka taktiež formujú vonkajší tvar Zemského magnetického poľa. Miesto, kde Zemské magnetické pole dominuje voláme magnetosféra. Magnetosféra Zeme je zobrazené na Obr.2.7.

Na slnečnej strane Zeme je magnetosféra stlačená slnečným vetrom a jej hranica nazývaná magnetopauza má parabolický tvar. Magnetopauza je vonkajšia limita magnetosféry, pretože v tejto oblasti približne $10 R_E$ (desať polomerov Zeme, počítaný od stredu Zeme) tlak častíc prichádzajúcich od Slnka sa vyrovná Zemskému magnetickému tlaku. Ak supersonický solárny vietor, ktorý sa pohybuje priemernou rýchlosťou okolo 400 km s^{-1} vzhľadom na Zem, narazí do magnetosféry a vytvára takzvaný ob-



Obr. 2.7: Magnetosféra Zeme s príslušnými oblasťami.[22]

lúčový šok (z angličtiny bow shock). Toto sa deje vo vzdialenosti približne $13 R_E$.

Na tmavej, od slnka odvrátenej strane Zeme sa magnetické pole rozťahne na viac ako $100 R_E$ a formuje tým magnetický chvost (z angličtiny magnetotail). Vo vnútri chvostu je pásmo plazmy často označované ako neutrálne pásmo (z angličtiny neutral sheet), pretože sa tu nachádza veľmi slabá intenzita magnetického poľa. V neutrálnom pásme je elektrický tok, ktorý ovplyvňuje geometriu magnetického chvostu.

Magnetosféra predstavuje štít voči slnečnému vetru, ale vždy je tu kvantum elektrónov a iónov, ktoré preniknú cez tento štít a stávajú sa súčasťou magnetosféry. Trajektóriu nabitých častíc v magnetosfére opisuje Lorentzovská sila $\mathbf{F}_L$, ktorá pôsobí na nabitú časticu s nábojom q a s rýchlosťou $\mathbf{v}$ pohybujúcu sa vo vonkajšom magnetickom poli $\mathbf{B}$ [29]:

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}. \quad (2.12)$$

Lorentzovská sila spôsobuje špirálovitú trajektóriu nabitých častíc pozdĺž magnetických siločiar pohybujúcich sa dopredu a dozadu medzi takzvanými zrkadlovými bodmi v blízkosti pólů. Keď sa nabité častice dostanú k polárnej oblasti, kde magnetické siločiar sú hustejšie a pole silnejšie, spomalia sa a sú odrazené späť na opačnú hemisféru. Potom celý proces začína odznova. Tieto častice obklopujúce Zem a cestujúce tam aj späť medzi hemisférami tvoria radiačné pásy (z angličtiny radiation belts).

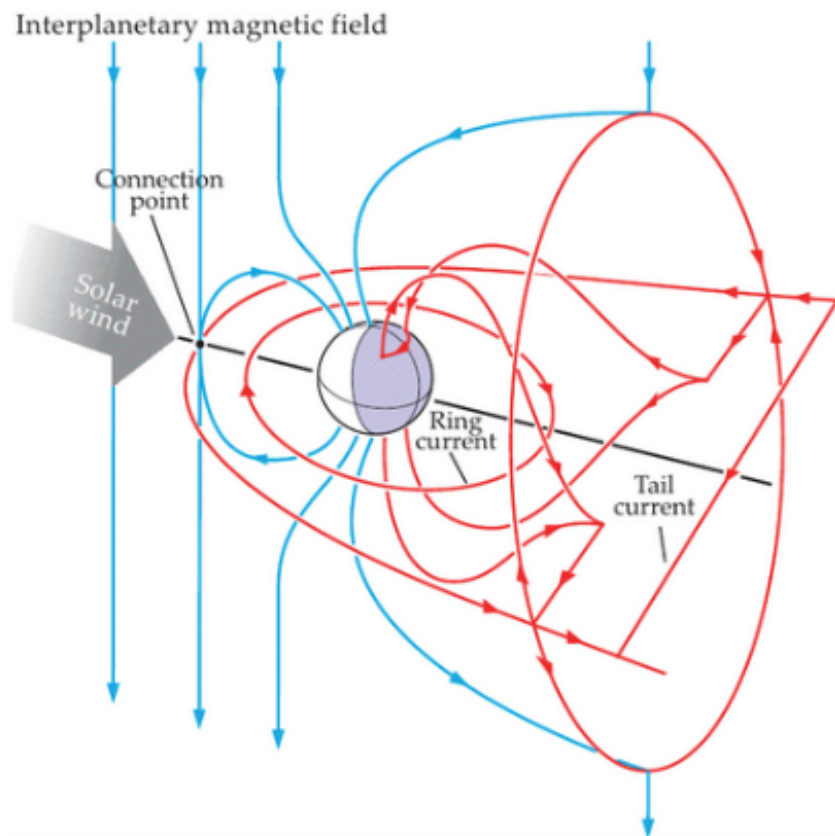
Existujú dve hlavné oblasti, kde sú tieto častice uviaznuté a to vonkajší a vnútorný Van Allenový radiačný pás. Sú pomenované po kozmickom vedcovi Jamesovi Alfredovi Van Allenovi, ktorý skúmal radiáciu kozmického žiarenia v okolí Zeme.

Niektoré častice majú dostatočnú energiu, aby prenikli a dostali sa až k povrchu atmosféry. Tam interagujú s časticami atmosféry a strácajú energiu. Atómy v Zemskej atmosfére sa excitujú a následne deexcitujú, pričom emitujú, t.j. vypúšťajú elektromagnetické žiarenie vo viditeľnej časti spektra. Toto svetlo poznáme pod názvom polárna žiara alebo aurora.

Tvar magnetosféry závisí od slnečnej aktivity. Keď je vysoká aktivita, t.j. rýchlejší slnečný vietor s väčším dynamickým tlakom, slnečná strana magnetosféry sa viac stláča a chvost sa viac natiahne. Viac častíc je schopných preniknúť a spôsobiť komplikovaný systém elektrických prúdov a krátke poruchy v Zemskom magnetickom poli.

Iným spôsobom ako opísať magnetosféru Zeme je cez definíciu rôznych komponentov elektrických prúdov. Magnetosférický systém elektrických prúdov je znázornený na Obr.2.8.

Magnetosférický systém elektrických prúdov možno rozdeliť do troch podsystémov: systém elektrických prúdov magnetopauzy, prstencový systém elektrických prúdov a systém elektrických prúdov chvosta magnetosféry. Systém elektrických prúdov magnetopauzy je definovaný cez drift (odchýlenie) nabitých častíc, ktoré produkujú východoelektrický prúd (z angličtiny eastward current) blízko ekvatoriálnej, rovníkovej roviny. Systém elektrických prúdov chvosta magnetosféry zas obsahuje oblasť západoelektrického (v angličtine westward) prúdu v ekvatoriálnej rovine. Prstencový elektrický prúd sa nachádza medzi dvoma až siedmymi polomermi Zeme. Je spôsobený zachytenými nabitými časticami v radiačných pásmach, pretože ióny majú drift v smere na západ a elektróny zas v smere na východ. Tento longitudiálny, dĺžkový drift vytvára sieť oblastí východoelektrických prúdov. Vnútorný okraj magnetosféry siaha až po vrchnú časť ionosféry. Ionosféra Zeme sa nachádza vo výške medzi 50 až 600 km a je to elektricky vodivá časť Zemskej atmosféry. Ultrafialové žiarenie zo Slnka je príčinou ionizácie atmosféry. Ionosféra Zeme sa rozdeľuje do rôznych regiónov závislých od výšky a veľkosti ionizácie. Nazývajú sa D, E a F regióny. Ionizácia je najväčšia vo výške okolo 300 km v F regióne. V ionosfére sa vedľa produkovať veľké elektrické prúdy, najmä v F regióne, kde nabité častice podliehajú elektromagnetickým silám. Nabité častice v ionosfére sú ešte ovplyvňované aj prílivovými silami (z angličtiny tidal forces) a termálnymi, tepelnými efektami, ktoré môžu spôsobovať ďalšie dodatočné



Obr. 2.8: Magnetosférický systém elektrických prúdov (červené čiary) a magnetické siločiar (modré čiary). [31]

elektrické prúdenie.[30]

2.3 INTERMAGNET

Európsky program pre vesmírne počasie (z angličtiny European Space Weather Programme) sa spolieha na dostupnosť krátkočasových dát dostupných v reálnom čase. Tie využíva na monitorovanie a predpovedanie kozmického počasia opisujúceho reakciu Zeme na aktivitu Slnka a vývoj vlastností prostredia okolitého vesmíru v blízkosti Zeme. Veľa dôležitých datasetov je odvodených z meraní magnetického poľa na povrchu Zeme, v rámci programu, ktorý sa nazýva INTERMAGNET (Medzinárodná sieť reálnečasových observatórií na meranie magnetického poľa, z angličtiny International Real-Time Magnetic Observatory Network) [32]. Observatóriá na meranie magnetického poľa sú riadené tak, aby posielali jednominutové dáta do kolektívneho centra skoro reálnych časových dát budované tak Geomagnetické informačné uzly (z angličtiny Geomagnetic Information Nodes - GINs). Mnohé observatóriá posielajú svoje merania geomagnetickým informačným uzlom každú hodinu, dokonca niektoré každú minútu. V roku 2001 bolo celosvetovo 80 observatórií súčasťou INTERMAGNET-u, dnes v roku 2020 je to už 154 observatórií a je naplánované vybudovanie ďalších. V súčasnosti INTERMAGNET využíva 5 geomagnetických informačných uzlov a to:

Edinburgh , United Kingdom – British Geological Survey

Golden , United States of America – United States Geological Survey

Kyoto , Japan – Kyoto University

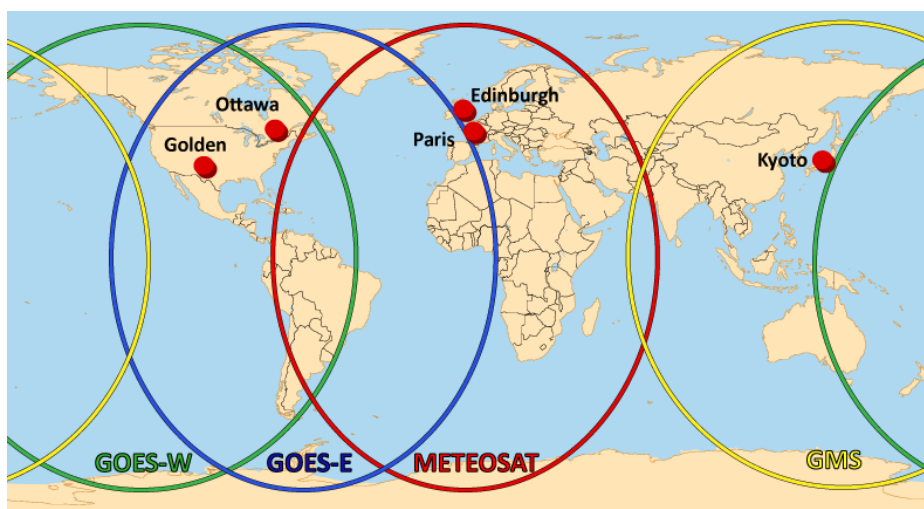
Ottawa , Canada – Geological Survey of Canada

Paris , France – Institut de Physique du Globe de Paris .

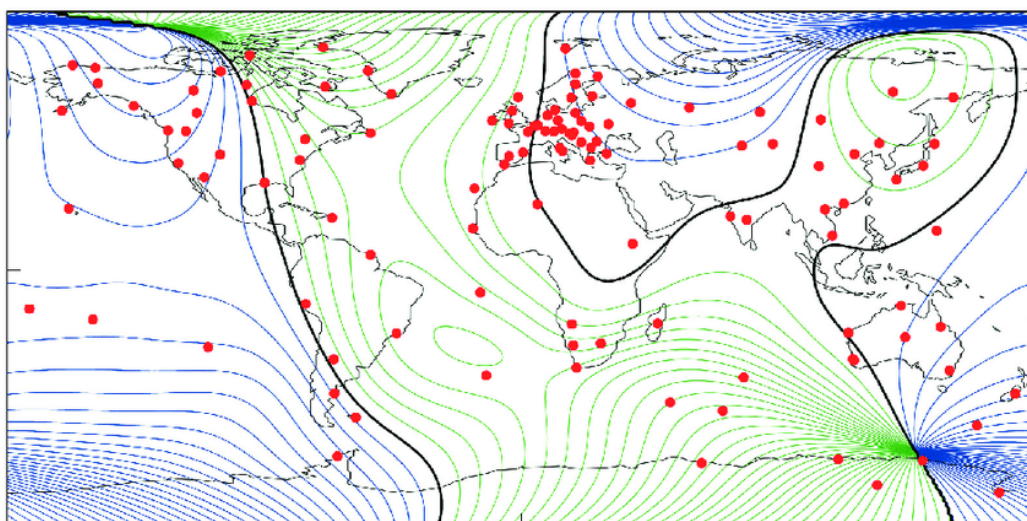
Ako vidíme dve sú situované v Európe, dve v Severnej Amerike a jedno v Ázii. Na rýchlu komunikáciu využívajú satelity a to tieto: GOES-E, pokrývajúce východ Ameriky, GOES-W, pokrývajúce západ Ameriky, METEOSAT, pokrývajúce Európu a Afriku, GMS, pokrývajúce Áziu. Umiestnenie geomagnetických informačných uzlov a pokrytie príslušných satelitov je zobrazené na Obr. 2.9 .

Rozmiestnenie staníc možno nájsť na Obr.2.10.

Všetky dáta, zoznam observatórií a ďalšie informácie o INTERMAGNETE sú dostupné na stránke <https://intermagnet.org/>. [33]



Obr. 2.9: Geomagnetické informačné uzly (GINs), satelity využité GINs-om a ich pokrytie dostupné na <https://intermagnet.org/>.



Obr. 2.10: Rozmiestnenie observatórií na meranie magnetického poľa Zeme.[34]

Kapitola 3

Simulačné programy na modelovanie magnetického poľa Zeme a pohybu kozmického žiarenia v tomto poli

3.1 IGRF

Medzinárodné geomagnetické referenčné pole (z angličtiny International Geomagnetic Reference Field - IGRF) je rad matematických modelov opisujúcich veľkoškálovú vnútornú časť Zemského magnetického poľa medzi obdobiami 1900 nášho letopočtu až po súčasnosť. Medzinárodné geomagnetické referenčné pole bolo vyvíjané medzinárodnou skupinou vedcov pod patronátom Medzinárodnej asociácie geomagnetizmu a letectva IAGA od roku 1965 [35]. Je výsledkom kolaborácie medzi výskumníkmi zaoberajúcimi sa modelovaním magnetického poľa, inštitúciami vyvíjajúcimi a merajúcimi magnetické pole z observatórií, zemskými pozorovateľmi a nízkoorbitálnymi satelitmi (z angličtiny low Earth orbiting - LEO). Medzinárodné geomagnetické referenčné pole je používané vedcami v rôznych oblastiach výskumu, napríklad opis dynamiky magnetického poľa v Zemskom jadre, predpoveď vesmírneho počasia alebo poukázanie na lokálne magnetické anomálie, ktoré môžu byť spôsobené krustálnym poľom. [36]

Medzinárodné geomagnetické referenčné pole sa musí pravidelne aktualizovať, aby presne opisovalo spojené časové zmeny geomagnetického poľa generované vonkajším jadrom Zeme. Perióda medzi opravami je dostatočne krátka, aby sa zachovala funkčnosť tohto referenčného modelu v aplikáciách požadujúcich fixný referenčný štandard. V súčasnosti každá generácia modelu obsahuje tri konštituentné modely. Jeden z nich

je navrhnutý ako Definitívne geomagnetické referenčné pole (z angličtiny Definitive Geomagnetic Reference Field - DGRF). Slovo definitívne je použité kvôli tomu, pretože ďalšie vylepšenia retrospektívnych modelov sú nepravdepodobné. Druhým konštituentom je nedefinitívny model, ktorý pri ďalšej revízii modelu môže nahradiť definitívny konštituent. Posledným konštituentom je takzvaná dlhodobá variácia alebo zmena (z angličtiny secular variation - SV). Je zahrnutá do predpovede časovej variácie geomagnetického poľa na veľkých škálach pre nasledujúcich 5 rokov po poslednej úprave IGRF. V tejto práci sme použili dvanástu generáciu IGRF, ktorá bola schválená v decembri v roku 2014 [37]. Najnovšiu verziu kódu a podrobnejšie informácie môžete nájsť na stránke <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.

3.1.1 Matematická formulácia modelu IGRF

Medzinárodné geomagnetické referenčné pole je rad matematických modelov vnútorného, interného geomagnetického poľa $\vec{B}(r, \theta, \phi, t)$ ukazujúcich jeho každoročné tempo zmeny (dlhodobá variácia). Nad zemským povrchom je magnetické pole $\vec{B}$ definované cez magnetický skalárny potenciál $\vec{B} = \nabla V$. Sférické polárne koordináty (súradnice) skalárneho potenciálu V sú aproximované nasledujúcim konečným radom¹:

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} \times [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta), \quad (3.1)$$

kde r predstavuje radiálnu vzdialenosť od centra Zeme, $a = 6371.2 \text{ km}$ je stredný geomagnetický konvenčný, štandardný referenčný sférický polomer Zeme (z angličtiny geomagnetic conventional Earth's mean reference spherical radius), θ je geocentrická košírka (z angličtiny geocentric co-latitude) a ϕ predstavuje východnú dĺžku (z angličtiny east longitude). Funkcie $P_n^m(\cos \theta)$ sú Schmidtové kvázi-normalizované pridružené Legendreove funkcie n -tého stupňa a m -tého rádu. Gaussovské koeficienty g_n^m a h_n^m sú funkciami času a sú zvyčajne udávané v jednotkách nanotesla (nT).

V modeli IGRF-12 Gaussovské koeficienty g_n^m a h_n^m sú poskytnuté pre hlavné pole (z angličtiny main field - MF) na obdobie medzi rokmi 1900 a 2015 nášho letopočtu rozdelené po 5 rokoch. Časová závislosť Gaussovských koeficientov vykazuje lineárnosť cez 5 ročný interval a je špecifikovaná nasledovne:

¹V článku [37] je chybné umiestnená zátvorka. Legendreove polynómy pôsobia na oba členy ako je uvedené na stránke <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>.

$$g_n^m(t) = g_n^m(T_0) + g_n^m(T_0)(t - T_0), \quad (3.2)$$

$$h_n^m(t) = h_n^m(T_0) + h_n^m(T_0)(t - T_0), \quad (3.3)$$

kde g_n^m (h_n^m) sa udávajú v jednotkách nanotesla na rok (nT/rok) reprezentujúci priemer prvej časovej derivácie 5 ročného časového intervalu (lineárna sekulárna variácia) Gaussovských koeficientov, t je čas udávaný v rokoch a T_0 je obdobie v ktorom sa nachádza náš udaný čas t , t.j. interval $T_0 \leq t \leq T_0 + 5$. Ak modely vnútorného poľa existujú pre obe obdobia T_0 a $T_0 + 5$, tak koeficienty $g_n^m(T_0)$ je možné vypočítať ako:

$$g_n^m(T_0) = \frac{g_n^m(T_0 + 5) - g_n^m(T_0)}{5}. \quad (3.4)$$

Platnosť modelu pre posledných 5 rokov (pre IGRF-12 je to medzi 2015-2020), koeficienty $\dot{g}_n^m$ a $\dot{h}_n^m$ sú explicitne poskytnuté ako prediktívny, predpokladaný priemer dlhodobej variácie. Geocentrické komponenty magnetického poľa pre zložku smerujúcu na sever, smerujúcu na východ a smerujúcu do stredu Zeme (X, Y, Z) dostaneme z koeficientov modelu použitím rovnice 3.1 aplikovaním gradientu na potenciál V vo sférických polárnych súradniciach:

$$X = \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}, \quad (3.5)$$

$$Y = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi}, \quad (3.6)$$

$$Z = \frac{\partial V}{\partial r}. \quad (3.7)$$

Pre niektoré aplikácie sa zavádzajú deklinácia D , inklinácia I , horizontálna intenzita H a celková intenzita F . Prevedenie na túto sústavu zo známych komponentov možno nájsť v rovniciach 2.5 až 2.8.

V rovnici 3.1 maximálny sférický harmonický stupeň rozvoja N sa môže meniť z obdobia na obdobie. Maximálny stupeň $N = 10$ bolo do roku 1995 vrátane a koeficienty boli udávané presnosťou na 1 nT. Pre obdobie začínajúc od roku 2000 koeficienty sú udávané na presnosť 0.1 nT a maximálny stupeň rozvoja bol zvýšený na 13. Pre obdobie začínajúc od roku 2005 sa presnosť zlepšila na 0.01 nT pre DGRF a ostala

0.1 nT pre nedefinitívny IGRF pre získanie výhod na dát vyššej kvality a dobrého pokrytia vďaka misiám LEO satelitov. [38]

Aj keď stupeň rozvoja dosiahol úroveň 13, stále nie sú zahrnuté príspevky krustálneho magnetického poľa aj keď začína dominovať pri vyšších stupňoch. Predpokladané dlhodobé variačné koeficienty $\dot{g}_n^m$ a $\dot{h}_n^m$ sú brané pre 8. stupeň a sú udávané na presnosť 0.1 nT/rok. [37]

3.2 Tsyganenko

Veľké magnetosférické poruchy boli vždy stredobodom štúdia prepojenia Slnka a Zeme. Magnetosférické poruchy sú nepochybne najzaujímavejším fenoménom vo vesmírnej fyzike a hlavným subjektom kozmického počasia. Majú dramatický dopad na povrch atmosféry, ionosféry a aj vnútornej magnetosféry. Modelovanie efektov veľkých búrok je veľmi dôležité či z teoretického alebo praktického hľadiska. [39]

Okrem slnečných búrok magnetosféru neustále ovplyvňuje slnečný vietor, ktorý určuje tvar magnetosféry opísaný v 2.2.3. Najznámejším modelom na opis narušení magnetosféry, na popis poľa vonkajších zdrojov je séria modelov Tsyganenko. Tieto modely sú pomenované po vedcovi, ktorý vytvoril tento model Nikolaiovi A. Tsyganenkovi.

Poprvé musíme zvoliť jednoduchý a dostatočne flexibilný model principiálneho poľa, ktorý bude reagovať na vonkajšie vplyvy. Každý magnetosférický systém elektrických prúdov má dva typy reakcií na vonkajšie vplyvy. Prvá je zvyčajne spojená s variáciami tlaku slnečného vetra, rapídne sa šíriacimi cez Alfvénové vlny vo vnútri magnetosféry. Ak sa pozrieme na časovú škálu búrky, toto je okamžitá reakcia, ktorá môže byť jednoducho zreprodukovateľná napríklad zahrnutým približným tlakovo-závislým faktorom vo veľkosti magnetopauzy a príslušnou silou Chapman-Ferrarovho poľa. [40]

Druhý typ odozvy je spojený s pomalšími procesmi ako sú rekonekcia v magnetopauze, konvekcia plazmy, strata častíc spojené s difúziou a zmenou náboja, atď. Tieto efekty sa dajú len empiricky modelovať zahrnutím extra člena W v celkovej sile poľa zdrojov. Magnitúda tohto člena závisí od času nasledovným spôsobom:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = S - L, \quad (3.8)$$

kde kvantita S a L na pravej strane rovnice sú zdrojová funkcia (z angličtiny source

function) a funkcia straty (z angličtiny loss function). Zdrojový člen S predstavuje stupeň rastu systému elektrických prúdov cez prichádzajúci slnečný vietor, ktorý môže byť empiricky opísaný cez funkciu vonkajších hnacích faktorov. Napríklad:

$$S = aN^\lambda V^\beta B_S^\gamma, \quad (3.9)$$

kde N je hustota slnečného vetra, V je rýchlosť slnečného vetra, B_S je komponenta vnútorného magnetického poľa smerujúca na východ, koeficient a a mocninové indexy λ , β a γ sú neznáme parametre hnacej funkcie.

Stratová časť L môže mať iný fyzikálny význam, závisí od toho, v ktorom systéme elektrických prúdov sa nachádzame. Interpretácia je najjasnejšia pre symetrickú časť prstencového systému elektrických prúdov. V tomto prípade je úzko súvisiaca s disipáciou, stratou energetických častíc cez ich nábehového uhlu (z angličtiny pitch angle) a radiálnej difúzie rovnako ako procesom zmeny náboja. Jedným spôsobom opisu stratovej časti L je cez úmeru zmeny medzi prúdovou hodnotou W a jej reziduálneho, zostatkového stupňa počas období s nenarušenou magnetosférou (z angličtiny quite-time) stupňa W_0 nasledovne:

$$L = r(W - W_0), \quad (3.10)$$

ktorá vedie k jednoduchému riešeniu:

$$W(t) = W_0 + \int_0^t S(\tau) \exp[r(\tau - t)] d\tau, \quad (3.11)$$

kde r je miera rozpadu, a hranice integrálu sú od začatia udalosti $\tau = 0$ až po terajší časový moment $\tau = t$.

Tento jednoduchý formalizmus je možné doplniť opisom dynamiky všetkých hlavných zdrojov magnetosférického poľa zahrnutím parciálnej časti kruhového systému elektrických prúdov, cez-chvostný (z angličtiny cross-tail) prúd a Birkelandský prúd. Birkelandský systém elektrických prúdov spája magnetosféru Zeme s ionosférou vo vyšších nadmorských výškach atmosféry Zeme. [41]

Formálne, miera rozpadu r môže byť uvažovaná ako inverzná (opačná) miera relaxačného času spoločného zdroja poľa:

$$T = \frac{1}{r}. \quad (3.12)$$

Väčšia (menšia) hodnota r vedie k rýchlejšej (pomalšej) reakcie magnetosférického systému elektrických prúdov na vonkajšiu poruchu a jeho rýchlejší (viac postupný) návrat k pôvodnej hladine poľa po zmiznutí budiaceho poľa. [41]

3.2.1 Prehľad aproximácii modelu poľa

Model vonkajšieho poľa je aproximovaný lineárnou kombináciou siedmych vektorov:

(1) Chapmanovo-Ferraro pole $\mathbf{B}_{CF}$, opisujúce vnútorné pole Zeme spolu s magnetopauzou,

(2) pole chvosta $\mathbf{B}_T$,

(3) pole symetrickej časti kruhového systému elektrických prúdov $\mathbf{B}_{SCR}$,

(4) pole parciálnej časti kruhového systému elektrických prúdov $\mathbf{B}_{PRC}$,

(5) - (6) pole regiónov 1 a 2 Birkelandovho systému elektrických prúdov $\mathbf{B}_{R1}$ a $\mathbf{B}_{R2}$,

(7) prenikajúca zložka vnútorného magnetického poľa dané výrazom $\mathbf{B}_{int} = \epsilon \mathbf{B}_{\perp}^{IMF}$.

Aproximácia pre Chapman-Ferraro pole $\mathbf{B}_{CF}$ je konštruovaná ako flexibilná kombinácia nerotačných polí založené na gradientoch skalára potenciálu vo forme:

$$\exp \left(X \sqrt{\frac{1}{p^2} + \frac{1}{q^2}} \right) \cos \frac{Y}{p} \begin{cases} \sin \frac{Z}{q} \\ \cos \frac{Z}{q} \end{cases} . \quad (3.13)$$

Horné potenciály boli použité v rozvoji s korešpondujúcimi váhovými koeficientami a nelineárnymi škálovacími parametrami p a q nájdenými v posledných štvorcach na minimalizáciu reziduí kvadratického priemeru (z angličtiny root mean square - RMS) normálovej zložky $\langle B_n^2 \rangle$ z bodov distribuovaných cez model magnetopauzy až po vzdialenosť chvosta $70 R_E$.

Pole chvosta $\mathbf{B}_T$ je reprezentované rovnakou analytickou aproximáciou ako pre Chapman-Ferraro pole, len pre systém prúdov v rovníkovej oblasti s konečnou premenlivou hrúbkou. Hustota prúdov v tejto oblasti je nepodstatne malá blízko Zeme, ale rapídne stúpa s narastajúcou vzdialenosťou. Vrchol dosahuje blízko miesta vnútorného kraja cez-chvostného prúdu a postupne sa znižuje v smere pozdĺž chvosta. Pole chvosta ešte obsahuje tieniacu zložku poľa reprezentovanú kombináciou potenciálnych polí matematicky podobných harmonickým zložkám $\mathbf{B}_{CF}$. Aby pole chvosta bolo dostatočne flexibilné aj pre odvrátenú časť Zeme od Slnka, sa zavádza lineárna kombinácia dvoch polí $\mathbf{B}_{T1}$ a $\mathbf{B}_{T2}$ s rôznymi priestorovými variačnými škálami pozdĺž osí chvosta predstavujúcimi vonkajšiu a vnútornú časť cez-chvostných prúdov.

Ako bolo spomenuté, príspevok z kruhového systému prúdov sa delí na dve časti korešpondujúce s jeho axiálnou symetrickou časťou $\mathbf{B}_{SRC}$ a parciálnou časťou kruhového systému prúdov $\mathbf{B}_{PRC}$ zahrňujúci efekt poľovo-súosových prúdov spojených s lokálnou časovou asymetriou azimutálneho prúdu blízko rovníkovej oblasti.

Modelovanie príspevkov Birkelandovských prúdov je založené na takzvanom kužeľovitom modeli (z angličtiny conical model) magnetického poľa súvisiaceho s distribúciou radiálnych prúdov tečúcich na kužeľovitom povrchu, ktorá pretína Zem pozdĺž čiar geomagnetických širok. Staršie kužeľovité modely museli byť prerobené, pretože radiálne prúdy sú značne rozličné v geometrii voči súčasným Birkelandovským prúdom tečúcim do vnútornej magnetosféry pozdĺž kvázi dipolárnych silových čiar. Nekonzistentnosť modelu bola redukovaná aplikovaním deformácii v súradnicovom systéme, aby tvar prúdnic bol čo najrealistickejší. Príspevky zo systému Birkelandovských prúdov regiónu 1 a 2 sú rozdelené do sumy dvoch výrazov. Prvý výraz predstavuje principiálny mód, založený na sínuse zemepisnej dĺžky ϕ (tento poukazuje na súosové prúdy poľa v nižších výškach, kde vrchol dosahujú pri úsvite a súmraku). Zavedenie druhého členu úmerného k $\sin 2\phi$, nám umožní posunutie vrcholov na poludnie a polnoc. [41]

Všetky spomenuté vektory vstupujú do celkového modelu poľa (okrem $\mathbf{B}_{CF}$) normalizované, s osobitným brániacim efektom vo vnútri modelu magnetopauzy a vynásobenými skalárnymi koeficientami, reprezentujúcimi magnitúdy jednotlivých zdrojov ako funkcie stavových prúdov v medziplanetárnom prostredí a predchádzajúcou históriou vonkajšieho vzruchu.

Celkové pole magnetosférických zdrojov potom má nasledovný tvar:

$$\mathbf{B}^{(mod)} = \mathbf{B}_{CF} + t_1 \mathbf{B}_{T1} + t_2 \mathbf{B}_{T2} + s \mathbf{B}_{SRC} + p \mathbf{B}_{PRC} + b_1 \mathbf{B}_{R1} + b_2 \mathbf{B}_{R2} + \epsilon \mathbf{B}_{\perp}^{IMF}. \quad (3.14)$$

Chapman-Ferraro pole $\mathbf{B}_{CF}$ hraničí s poľom Zeme vo vnútri magnetopauzy. Je plne definované veľkosťou sily a uhlom sklonu Zemského dipólu a z tvaru a veľkosti hranice. [43]

Koeficienty magnitúd v rovnici 3.14 sú definované nasledovnými spôsobmi:

$$t_1 = t_1^{(0)} + t_1^{(1)} \frac{W_{t1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_{t1}}{W_{t1c}}\right)^2}} + t_1^{(2)} \left(\frac{P_d}{P_{d0}}\right)^{\alpha_1}, \quad (3.15)$$

$$t_2 = t_2^{(0)} + t_2^{(1)} \frac{W_{t2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_{t2}}{W_{t2c}}\right)^2}} + t_2^{(2)} \left(\frac{P_d}{P_{d0}}\right)^{\alpha_2}, \quad (3.16)$$

$$s = s^{(0)} + s^{(1)} \frac{W_s}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_s}{W_{sc}}\right)^2}}, \quad (3.17)$$

$$p = p^{(0)} + p^{(1)} \frac{W_p}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_p}{W_{pc}}\right)^2}}, \quad (3.18)$$

$$b_1 = b_1^{(0)} + b_1^{(1)} \frac{W_{b1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_{b1}}{W_{b1c}}\right)^2}}, \quad (3.19)$$

$$b_2 = b_2^{(0)} + b_2^{(1)} \frac{W_{b2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_{b2}}{W_{b2c}}\right)^2}}, \quad (3.20)$$

kde tlak nárazu slnečného vetra P_d normalizovaný cez jeho priemernú hodnotu kľudového času $P_{d0} = 2 \text{ nPa}$, hnacie premenné W_{t1} , W_{t2} , W_s , W_p , W_{b1} , W_{b2} a ich príslušnými saturačnými hladinami W_{t1c} , W_{t2c} , W_{sc} , W_{pc} , W_{b1c} , W_{b2c} . [41]

Pridanie tlakovo závislého člena ku koeficientom t_1 a t_2 má zmysel v opise reakcie poľa chvostu na slnečný vietor a variáciu vnútorného magnetického poľa zahrňajúcu obe, ako okamžitú, tak aj oneskorenú komponentu [42]. Variácia laloku chvostového poľa takmer okamžite reaguje na zmeny v tlaku slnečného vetra, kým efekty vnútorného magnetického poľa v rovnakom poli značne zaostávajú od vonkajšieho inputu.

Jednotlivé premenné W sú definované nasledovným spôsobom:

$$W(t_i) = \frac{r}{12} \sum_{k=1}^i S_k \exp \left[\frac{r}{60} (t_k - t_i) \right], \quad (3.21)$$

kde

$$S_k = \left(\frac{N_k}{5} \right)^\lambda \left(\frac{V_k}{400} \right)^\beta \left(\frac{B_{sk}}{5} \right)^\gamma. \quad (3.22)$$

Sumácia v rovnici 3.21 je opísaná cez 5 minútové intervaly od začiatku búrky $t = t_1$ až po prítomný čas $t = t_i$. Taktiež je použitá inverzná časová škála r (miera relaxácie), ktorá je udávaná na hodinu, kým čas t je v minútach, preto sú tam škálovacie faktory dvanástina a šesťdesiatina. Z rovnakej príčiny hustota slnečného vetra N_k , rýchlosť slnečného vetra V_k a magnitúda komponenty vnútorného magnetického poľa smerujúceho na juh B_{sk} sú delené ich charakteristickými faktormi. [41]

3.3 COR

Systém COR (Cut-Off Rigidity) slúži na automatizáciu výpočtov trajektórií kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme, určenie vertikálnej odrezávacej rigidity a odrezávacích rigidít v ostatných smeroch, na základnú analýzu týchto výsledkov, ich vizualizáciu a pre edukatívne účely pri štúdiu fyziky kozmického žiarenia a súvisiacich oblastí. [44]

Výpočet trajektórie sa realizuje pomocou rovnice 2.12, pričom je udaný opačný smer a opačný náboj častice. Takto sa počíta trajektória antičastice s rovnakou energiou v opačnom smere z bodu dopadu naspäť na hranicu magnetosféry. Tá je identická s hľadanou trajektóriou častice. Rovnica je riešená metódou Runge-Kutta 6. rádu.

Rigidity R je úmerná hybnosti častice na jednotku náboja.

$$R = \frac{pc}{Ze}, \quad (3.23)$$

kde Ze je celkový náboj nabitkej častice, e je elementárny náboj, p je hybnosť nabitkej častice korešpondujúca na kinetickej energii E_k na nukleón a c je rýchlosť svetla vo vákuu. Udáva sa vo voltoch. Odrezávacia (z angličtiny cut-off) rigidity opisuje energetický prah, hranicu pre príchod nabitých častíc na vybranú pozíciu v magnetosfére. Častice s nižšou rigiditou ako odrezávacia sa na dané miesto nedostanú. Odrezávacia rigidity tak popisuje možnosť prechodu nabitých častíc cez magnetosféru. [45]

V systéme COR sú odrezávacie rigidity vypočítavané pre rôzne smery, dokopy z 577 smerov zahrňujúci aj vertikálny smer. Celková simulácia pre jeden konkrétny bod s krokom 0.01 GV trvá aj niekoľko hodín. Model COR využíva kombináciu modelov IGRF na opis vnútorného geomagnetického poľa a model Tsyganenko 96 alebo Tsyganenko 05 na opis vonkajšieho geomagnetického poľa.

Na spustenie novej simulácie je nutné zvoliť nasledujúce údaje:

- (1) verzia modelu externého geomagnetického poľa (Tsyganenko 96 alebo Tsyganenko 05),
- (2) stupeň optimalizácie (bez optimalizácie, základné optimalizácie alebo vlastné optimalizácie),
- (3) spektrum kozmického žiarenia vo vzdialenosti jednej astronomickej jednotky 1 AU (z angličtiny Astronomical Unit) v medziplanetárnom prostredí (modelované z jednodimenzionálneho heliosferického modelu alebo namerané spektrum pomocou AMS-01 [46]),
- (4) dátum simulácie,

- (5) čas simulácie,
- (6) geografická šírka (v rozmedzí od -88.0° do 88.0°)
- (7) geografická dĺžka (v rozmedzí 0° až 360°)
- (8) krok v narastajúcej rigidite v GV (0.01 , 0.02 , 0.05 alebo 0.1),
- (9) rádius v jednotkách Zemského polomeru R_e (z $1 R_e$ do $10 R_e$, pričom $1 R_e = 6371.2 \text{ km}$).

Ďalšie informácie a samotný model možno nájsť na <http://cor.crmodels.org/>.

Kapitola 4

Výsledky v simulácii magnetického poľa a prechodu kozmického žiarenia týmto poľom

4.1 Porovnanie simulovaného magnetického poľa s reálne nameranými hodnotami

Na simuláciu tvaru magnetického poľa boli použité nasledovné modely:

- (1) IGRF na opis vnútorného magnetického poľa opísané v 3.1,
- (2) Tsyganenko verzia 04 opisujúce vonkajšie magnetické poľa opísané v 3.2.

V ďalšom sa spomínajú spolu ako simulácia celkového magnetického poľa alebo magnetosféry (IGRF-T04) a ich výsledky ako simulované dáta.

Reálne dáta z meraní magnetického poľa Zeme na povrchu Zeme boli získané zo zvolených meracích staníc INTERMAGNET-u (pozri 2.3) a pre nami určené roky. Nami zvolené stanice a nami určené roky s ich geografickými a geomagnetickými¹ súradnicami možno nájsť v Tab.4.1.

Geomagnetická dĺžka a šírka sa neustále menia kvôli zmene Zemského dynama a následnou migráciou geomagnetických pólov [22].

Na spracovanie a vizualizáciu dát bol použitý objektovo orientovaný program ROOT [47]. Porovnávali sme vývoj celkového (totálneho) magnetického poľa Zeme za rok pre simulované dáta (IGRF-T04) s vývojom nameraných dát za ten istý rok na jednotlivých staniách (INTERMAGNET).

¹Geomagnetická šírka a dĺžka boli vypočítané na <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm/>.

Stanica	Geograf. šírka	Geograf. dĺžka	Geomagn. šírka	Geomagn. dĺžka	Rok
Barrow	71.32°	203.38°	69.39°	245.77°	2001
Barrow	71.32°	203.38°	69.51°	246.65°	2008
Barrow	71.32°	203.38°	69.75°	247.87°	2012
Hurbanovo	47.86°	18.19°	46.68°	101.04°	2001
Hurbanovo	47.86°	18.19°	46.68°	101.05°	2008
Hurbanovo	47.86°	18.19°	46.65°	101.18°	2012
Kakadu	-12.69°	132.47°	-22.11°	205.44°	2001
Kakadu	-12.69°	132.47°	-21.91°	205.62°	2008
Kakadu	-12.69°	132.47°	-21.52°	206.14°	2012
Kourou	5.21°	307.27°	15.06°	19.45°	2001
Kourou	5.21°	307.27°	14.85°	19.68°	2008
Kourou	5.21°	307.27°	14.45°	20.22°	2012
Lerwick	60.09°	358.82°	61.86°	89.02°	2001
Lerwick	60.09°	358.82°	61.82°	88.87°	2008
Lerwick	60.09°	358.82°	61.71°	88.71°	2012
San Juan	18.11°	293.85°	28.40°	5.86°	2001
San Juan	18.11°	293.85°	28.20°	6.10°	2008
San Juan	18.11°	293.85°	27.80°	6.69°	2012
Tihany	46.90°	17.89°	45.80°	100.39°	2001
Tihany	46.90°	17.89°	45.80°	100.41°	2008
Tihany	46.90°	17.89°	45.77°	100.55°	2012

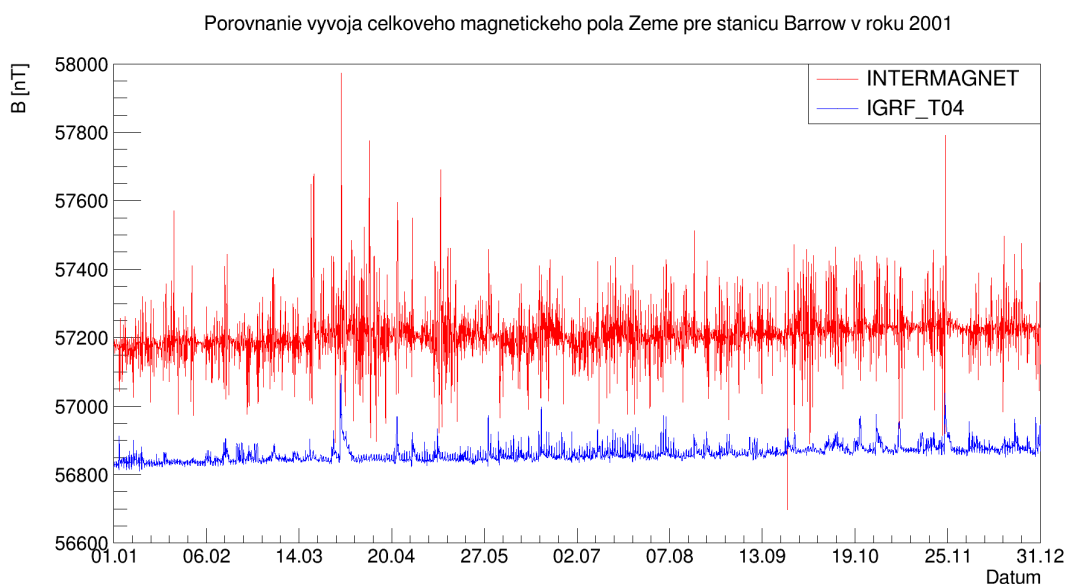
Tabuľka 4.1: Zoznam nami zvolených staníc pre nami zvolené roky s príslušnými geografickými a geomagnetickými súradnicami.

Vývoj a porovnanie celkového magnetického poľa pre stanicu s vysokou geografickou šírkou (vysokošírkovou) pre rok 2001 je zobrazené na Obr.4.11.

Vývoj a porovnanie celkového magnetického poľa pre stanicu so strednou geografickou šírkou (stredošírkovou) pre rok 2001 je zobrazené na Obr.4.12.

Vývoj a porovnanie celkového magnetického poľa pre stanicu s nízkou geografickou šírkou (nízkošírkovou) pre rok 2001 je zobrazené na Obr.4.13.

Na obrázkoch 4.11, 4.12 a 4.13 je možné vidieť medzi dátumami 14.03 a 20.04, t.j. značný rozruch v magnetickom poli, ktorý okrem reálnych dát krásne ukazujú aj simulované dáta. Daný rozruch, disturbancia v poli je spôsobená silnou slnečnou búrkou,



Obr. 4.11: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).

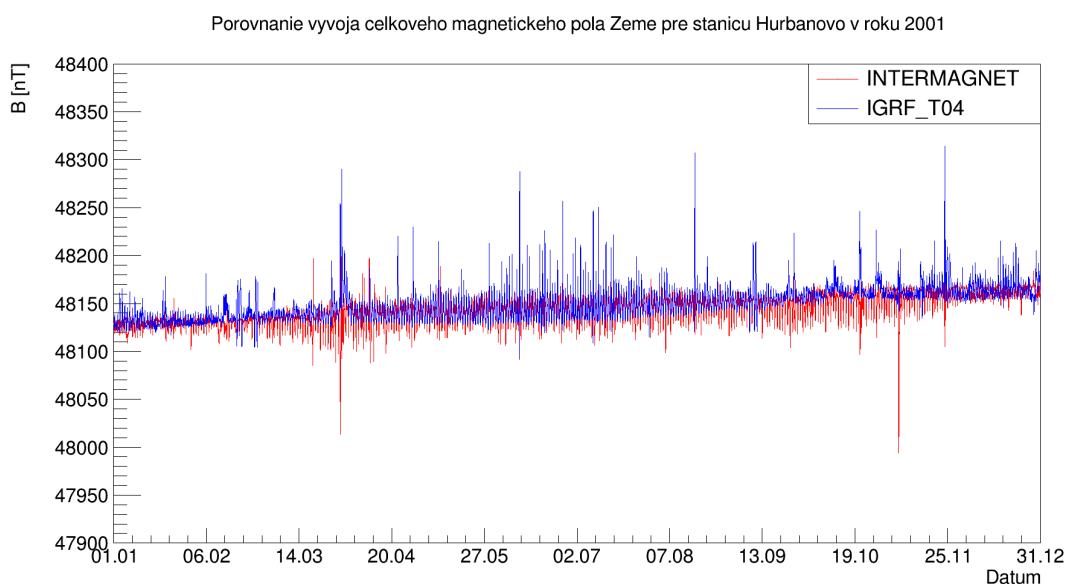
ktorá sa udiala v Marci v roku 2001. Taktiež je zjavné, že pre vysoko a nízkošírkové stanice simulované dáta sú posunuté voči reálnym. Mieru chyby, percentuálny rozdiel medzi reálnymi a simulovanými dátami sme určili nasledovným spôsobom:

$$P = 100 \times \frac{\mathbf{B}_{sim} - \mathbf{B}_{data}}{\mathbf{B}_{data}}. \quad (4.1)$$

Percentuálne rozdiely medzi simulovanými (IGRF-T04) a reálnymi dátami (INTERMAGNET) sú uvedené v Tab.4.2.

Záporné čísla percentuálnych rozdielov predstavujú podhodnotené simulované dáta vzhľadom k reálnym, t.j. simulované dáta majú nižšie hodnoty. Kladné čísla percentuálnych rozdielov zas predstavujú nadhodnotené simulované dáta voči reálnym. Hodnoty simulovaných dát sú v tomto prípade vyššie než v reálnych dát.

Nie vždy sme mali k dispozícii čisté dáta namerané na meracích stanicach. Niekedy sa stalo, že daná meracia stanica nebola v prevádzke, resp. mala poruchu a kvôli tomu nemerala. Vtedy sú zapisované alebo nulové dáta alebo sa zapisuje vopred predurčená kalibračná hodnota, ktorá pre stanice INTERMAGNET-u je daná na 99999.9 nT . Pri zobrazovaní vývoja celkového magnetického poľa tieto dáta museli byť očistené a nahradené. Ako náhradu za nesprávne alebo chýbajúce dáta sme použili hodnoty získané pomocou lineárnej regresie použitej medzi bodmi ohraničujúcimi chýbajúce dáta. Vývoj takéhoto celkového magnetického poľa možno nájsť na Obr.4.14.



Obr. 4.12: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).

Rozdiely medzi simulovanými dátami z modelu IGRF-T04 voči reálne nameranými dátami zo staníc INTERMAGNET-u mohli byť spôsobené:

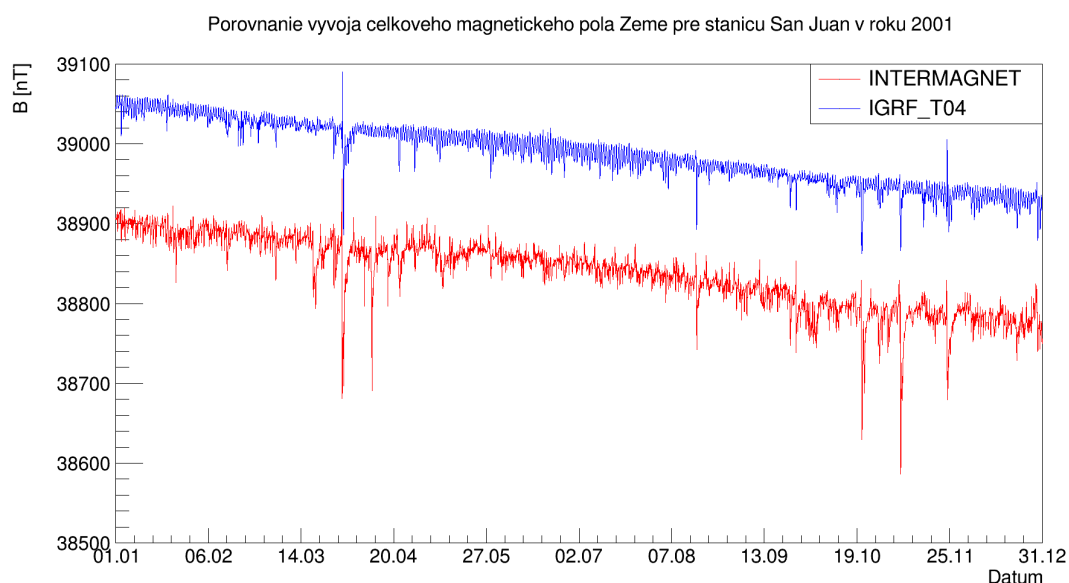
- (1) neaktuálnou verziou programu pre výpočet geomagnetického poľa (v roku 2020 vyšla verzia IGRF 13, my sme použili verziu 12, ktorá je súčasťou modelu T04),
- (2) absenciou krustálneho poľa v modeli Tsyganenko 04, ktoré mohlo posilniť alebo zoslabiť reálne magnetické pole,
- (3) verziou kompilátora f95 pri kompilácii fortranovského kódu.

Krustálne polia pre jednotlivé stanice sú uvedené v Tab.4.3.

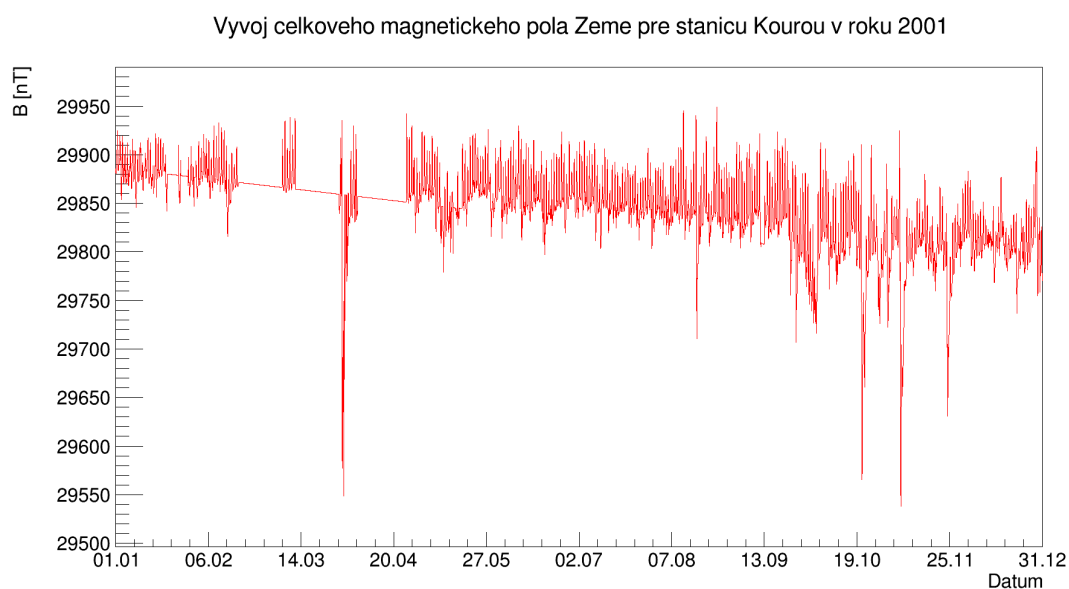
Ako je možné vidieť v Tab.4.3, samotná veľkosť krustálneho poľa nie je dostávajúca na vysvetlenie veľkosti posunu spektra vývoja celkového magnetického poľa pre simulované dáta voči reálnym dátam. Veľkosti krustálneho poľa boli získané z webovej stránky:

<http://www.spacecenter.dk/files/magnetic-models/LCS-1/>.

Všetky získané vývoje geomagnetického poľa možno nájsť v Dodatku A.



Obr. 4.13: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



Obr. 4.14: Vývoj nameraných dát celkového magnetického poľa Zeme z INTERMAGNET-u pre stanicu Kourou pre rok 2001. Homogénne, rovné časti sú výsledkom lineárnej regresie použitej na zvyšné dáta a nahradené na chýbajúce časti.

Stanica	Rok	Percentuálny rozdiel P
Barrow	2001	-0.61%
Barrow	2008	-0.26%
Barrow	2012	-0.25%
Hurbanovo	2001	0.01%
Hurbanovo	2008	0.38%
Hurbanovo	2012	0.36%
Kakadu	2001	1.03%
Kakadu	2008	0.62%
Kakadu	2012	0.59%
Kourou	2001	0.22%
Kourou	2008	-1.19%
Kourou	2012	-1.15%
Lerwick	2001	-0.41%
Lerwick	2008	-0.09%
Lerwick	2012	-0.08%
San Juan	2001	0.39%
San Juan	2008	-1.52%
San Juan	2012	-1.47%
Tihany	2001	0.06%
Tihany	2008	0.41%
Tihany	2012	0.40%

Tabuľka 4.2: Percentuálne rozdiely medzi simulovanými (IGRF-T04) a reálnymi dátami (INTERMAGNET) pre vybrané stanice a nami zvolené roky.

Stanica	Geografická šírka	Geografická dĺžka	Krustálne pole [nT]
Barrow	71.32°	203.38°	-5.67463159561
Hurbanovo	47.86°	18.19°	-19.8191871643
Kakadu	-12.69°	132.47°	-27.0059356689
Kourou	5.21°	307.27°	0.45580893755
Lerwick	60.09°	358.82°	16.6098632812
San Juan	18.11°	293.85°	23.7864093781
Tihany	46.90°	17.89°	-38.2978935242

Tabuľka 4.3: Veľkosť krustálneho poľa pre jednotlivé stanice.

4.2 Rigidita a intenzita kozmického žiarenia

Na simuláciu prechodu kozmického žiarenia magnetosférou Zeme sme použili verziu Fortranovského [48] kódu s názvom:

```
T04_jul2012_arg_divInfil.f
```

Kód je pred spustením nutné kompilovať pomocou Fortran 95 kompilátora, prostredníctvom príkazu:

```
f95 -fno-automatic T04_jul2012_arg_divInfil.f
```

Na následné spustenie je ale nutné disponovať súborom infil, ktorý obsahuje požadované vstupné hodnoty výpočtu v špecifickom formáte usporiadania. Tieto hodnoty budú pri spustení skompilovaného kódu vyčítané z infil súbora, kde poslúžia ako parametre simulácie. Na začatie tohto procesu slúži nasledujúci príkaz:

```
./a.out <infil súbor> <outfil súbor>
```

Príklad infil súbora môžeme vidieť v nasledujúcom výpise:

```
0.0100   -1.    20.0000
1.00      46.9    17.89
           46.9    17.89
2001 10 10 283 01 00 00
   100    1    1    0.01
-14     2.13    0.90   -0.90
   0.15    0.13    0.22    0.09    0.11    0.13
-1.00
```

Súbor infil obsahuje:

- (1) štartovacia rigidita, hodnota určujúca druh častice, -1 pre protón, koncová rigidita,
- (2) rádius v jednotkách R_e , t.j. zemských polomerov, geografická šírka a dĺžka počiatočného bodu trajektórie,
- (3) dĺžka a šírka pre smer príchodu častice v geografickej sústave,
- (4) rok, mesiac, deň, deň v roku, hodiny, minúty a sekundy,
- (5) prvé tri čísla predstavujú počiatočné parametre delenia trajektórie a štvrté číslo opisuje krok v rigidite,

(6) hodnota Dst indexu v jednotkách nT, hodnota p_{dyn} dynamického tlaku slnečného vetra v nPa v danom dátume a čase, a intenzita y-ovej, a z-ovej zložky medziplanetárneho poľa v danom dátume a čase,

(7) vstupné parametre W1 až W6 modelu externého geomagnetického poľa, určujúce prehistóriu geomagnetického poľa,

(8) -1.00 označuje koniec infil súbora. [49]

Dst index určuje narušenosť geomagnetického poľa. [50]

Na výpočet prechodu kozmického žiarenia magnetosférou Zeme okrem základného kódu

T04_jul2012_arg_divInfil.f

sme použili aj dve modifikácie tohto kódu

T04_jul2012_arg_divInfil_modifikacia_1.f,

T04_jul2012_arg_divInfil_modifikacia_2.f.

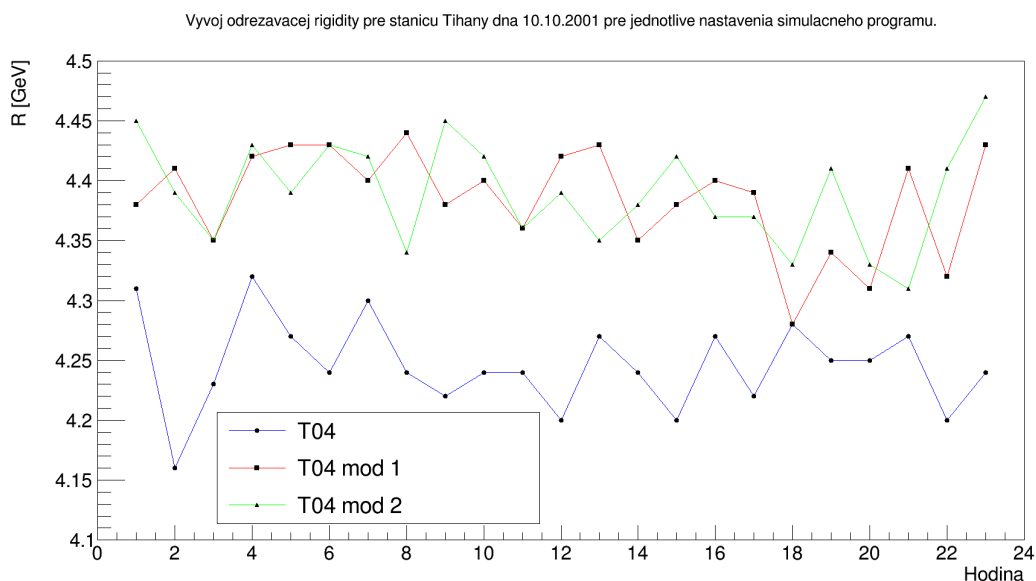
Prvá modifikácia opisuje prvý odhad toho, ako by sa geomagnetické pole správalo v prípade, že chyba je chybou interného geomagnetického poľa, t.j. poľa vnútorných zdrojov. Druhá modifikácia opisuje prípad, keď chyba pochádza z odhadu krustálneho poľa, teda poľa so zdrojom relatívne blízko pri meracej stanici. Modifikácie simulujú geomagnetické pole v oboch prípadoch.

Výpočty prechodu kozmického žiarenia magnetosférou boli robené pre nami zvolený dátum 10.10. pre roky 2001, 2008 a 2012. Boli spravené vývoje jednak pre efektívnu odrezávaciu rigiditu, jednak pre celkovú intenzitu kozmického žiarenia pre jednotlivé hodiny pre 2π hemisféru.

Celodenný vývoj efektívnej odrezávacej rigidity pre stanicu Tihany je zobrazené na Obr. 4.15.

Ako je vidieť na Obr.4.15 jednotlivé modifikácie viedli k zvýšeniu odhadu odrezávacej rigidity. Takáto tendencia je pozorovateľná aj pre ďalšie roky a pre ďalšie stanice s rôznymi geografickými súradnicami. Vývoj efektívnej odrezávacej rigidity pre vysokošírkovú stanicu je zobrazené na Obr.4.16 a pre nízkošírkovú stanicu na Obr.4.17.

Okrej efektívnej odrezávacej rigidity nás zaujímali aj vývoje celkovej intenzity kozmického žiarenia dňa 10.10. pre vybrané stanice a nami zvolené roky. Pre zachovanie postupnosti, vývoje celkových odrezávacích rigidít príslušných staníc sú zobrazené na:

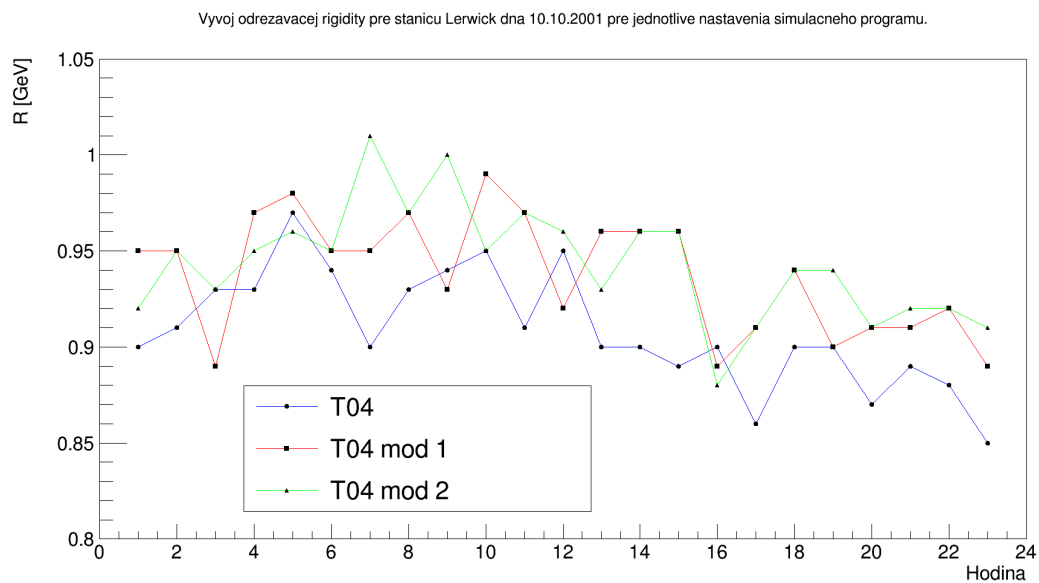


Obr. 4.15: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.

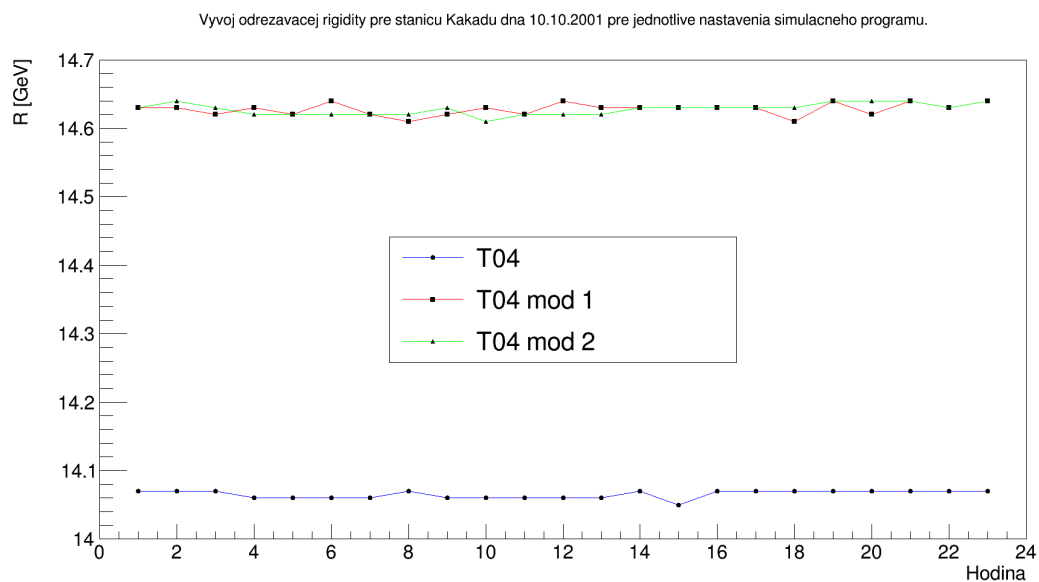
pre vysokošírkovú stanicu Obr.4.18, pre stredošírkovú stanicu Obr.4.19 a pre nízkošírkovú stanicu na Obr.4.20.

V tomto prípade je možné pozorovať tendenciu posunu vývoja celkovej intenzity kozmického žiarenia od nízkych hodnôt pre vysokošírkové stanice pre čoraz vyššie až najvyššiu dosahuje pri nízkošírkových staniach. Je to spôsobené tým, že druhá modifikácia simulačného programu už zahŕňa efekty krystalného poľa na odhad výpočtu celkovej intenzity kozmického žiarenia na povrchu Zeme.

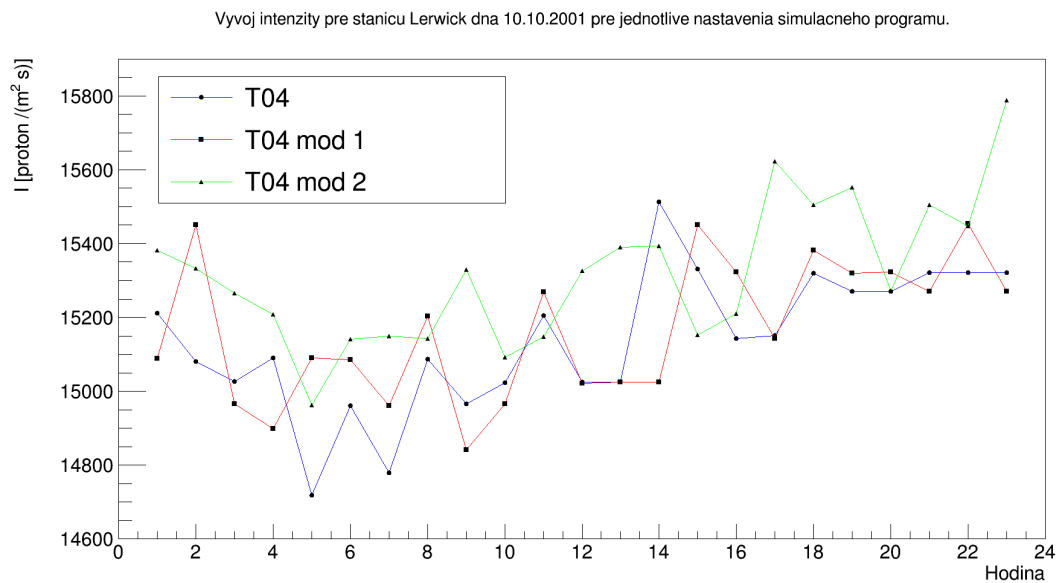
Vývoj všetkých efektívnych odrezávacích rigidít a celkových intenzít kozmického žiarenia pre deň 10.10. a pre vybrané roky 2001, 2008 a 2012 pre zvolené stanice možno nájsť v Dodatku B.



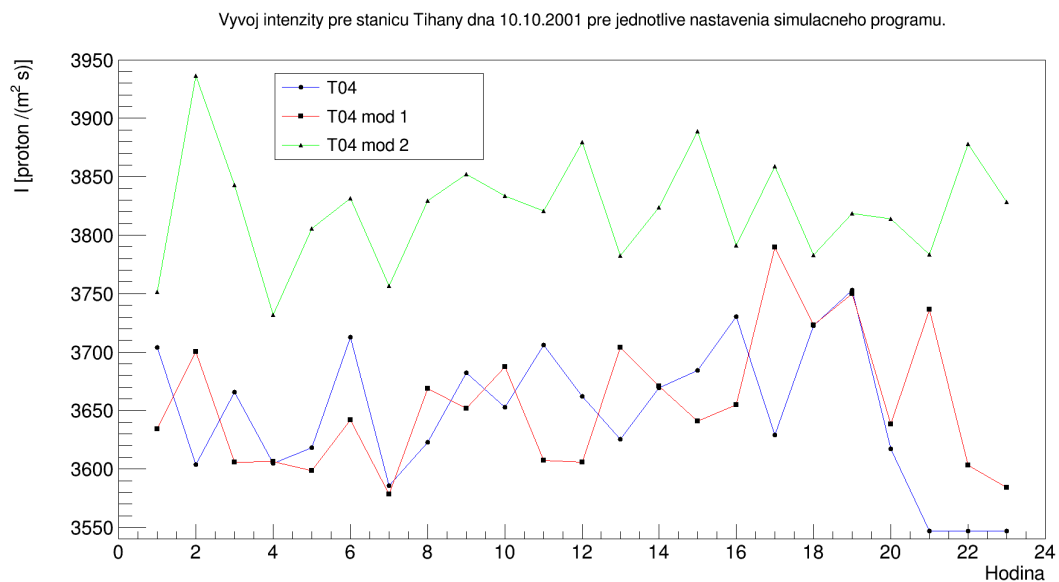
Obr. 4.16: Vývoj efektívnej odrezávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



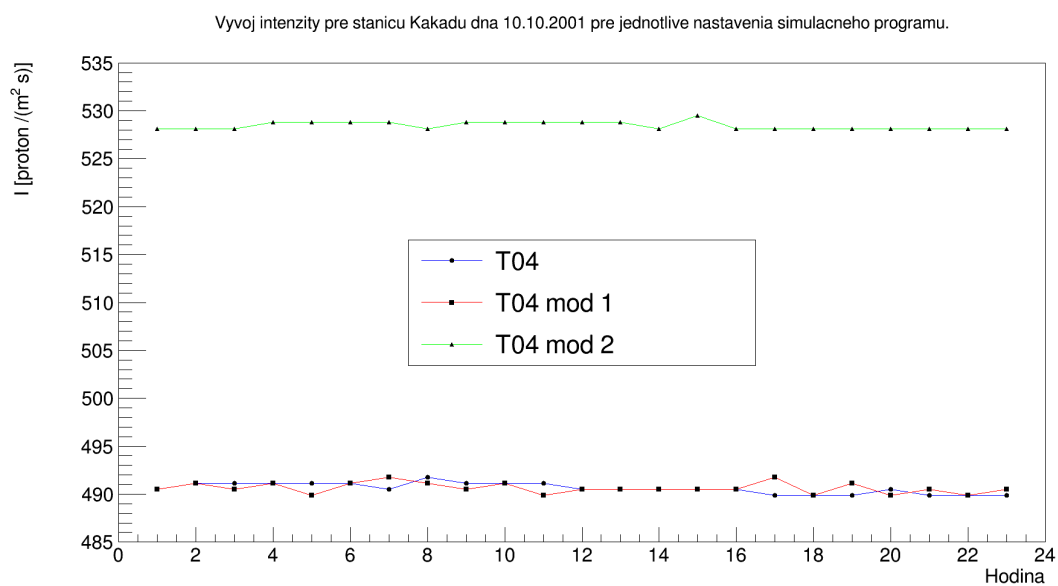
Obr. 4.17: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



Obr. 4.18: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



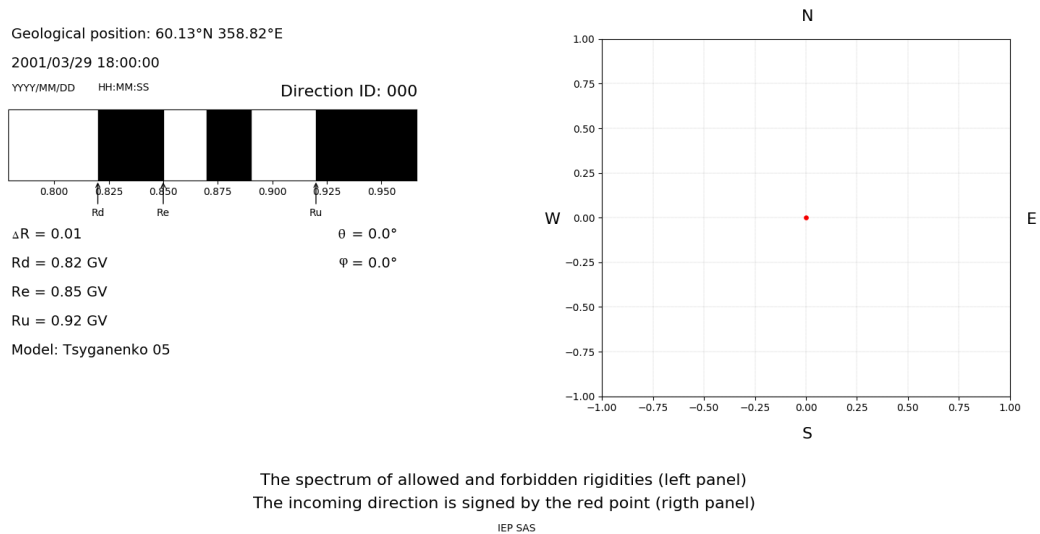
Obr. 4.19: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



Obr. 4.20: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.

4.3 Vizualizácia prechodu kozmického žiarenia v systéme COR

Systém COR využíva rovnaký program, ktorý bol opísaný v predošlej sekcii, len je urobená automatizácia a spravené grafické rozhranie pre ľahšie užívateľské prostredie. Viac o COR-e nájdete v 3.3. Bola spustená simulácia na výpočet odrezávacej rigidity a celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 29. Marca 2001 pre 18-tu hodinu vo vertikálnom smere. Výstup z COR-u možno nájsť na Obr. 4.21.



Obr. 4.21: Výpočet odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 29.03.2001 v systéme COR (vľavo), vizualizácia smeru dopadu kozmického žiarenia (vpravo).

Magnetické pole magnetosféry z hľadiska dostupnosti oblastí v nej pre kozmické žiarenie rôznych energií delí povrch Zeme na dve skupiny regiónov. Na oblasti kde sa od určitej hraničnej rigidity (energie) dostane každá častica s vyššou rigiditou. Druhá skupina oblastí je, kde medzi prvou dovolenou trajektóriou a trajektóriou po ktorej má každá častica s vyššou rigiditou dovolenú trajektóriu existuje zmes povolených a zakázaných trajektórii. Takejto oblasti sa hovorí polotieň. Z dôvodu existencie oblasti polotieňa sa zaviedli tri odrezávacie rigidity:

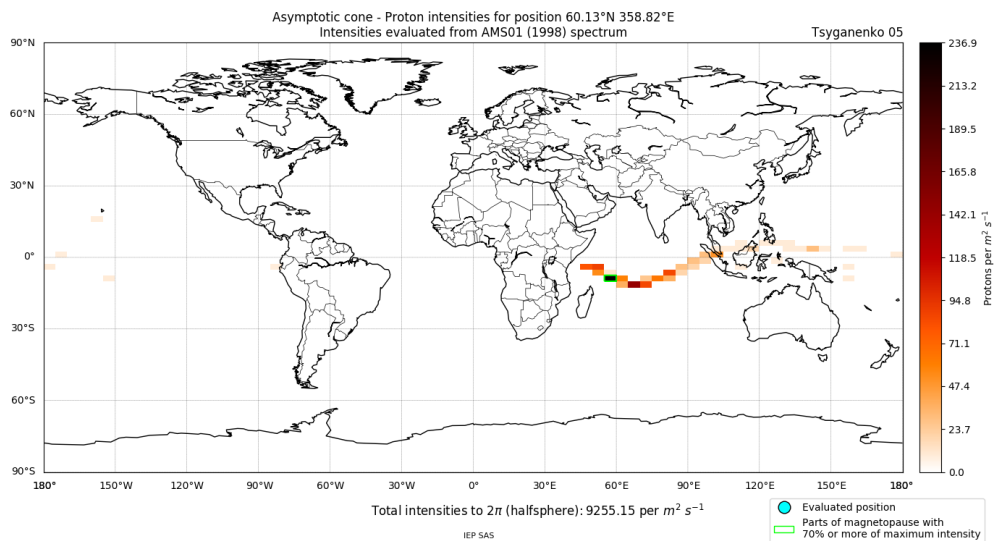
- (1) R_u - horná rigidita - najvyššia hodnota rigidity povoleného/zakázaného prechodu častíc v spektre dovolených a zakázaných trajektórii
- (2) R_d - dolná rigidita - najnižšia hodnota rigidity povoleného/zakázaného prechodu častíc
- (3) R_e - efektívna rigidita – je určená šírkou a štruktúrou oblasti polotieňa

Efektívna rigidita je počítaná ako:

$$R_e = R_u - \sum N_D \Delta R, \quad (4.2)$$

kde N_D je počet dovolených rigidít medzi R_u a R_d , ΔR je krok v narastajúcej rigidite.

Ďalším výstupom systému COR je výpočet smeru a celkovej intenzity dopadajúceho kozmického žiarenia zobrazené na Obr. 4.22.



Obr. 4.22: Výpočet celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 29.03.2001 v systéme COR a vizualizácia dopadu kozmického žiarenia.

Záver

Práca bola zameraná na zistenie vplyvu chyby modelovaných hodnôt geomagnetického poľa na simulácie trajektórií kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme. Simulácie trajektórií sa realizujú v kombinovanom geomagnetickom poli interných a externých zdrojov. V rámci práce sa z porovnaní modelov s meraniami geomagnetického poľa odvodila chyba modelov, ktoré boli doteraz používané pre COR model. Cieľom bolo určiť ako táto chyba môže ovplyvniť výpočty základných parametrov kozmického žiarenia, špecificky na povrchu Zeme, napríklad intenzity kozmického žiarenia.

Na simulácie geomagnetického poľa sme využili model IGRF, ktorý simuluje tvorbu a zmeny vnútorného magnetického poľa a model Tsyganenko, ktorý opisuje vonkajšie magnetické pole. Následne sme výstup z modelu porovnali s hodnotami nameranými geomagnetickými observatóriami organizácie INTERMAGNET. Chyby medzi modelom a reálnymi meraniami boli do 1.5%. Chyby mohli byť spôsobené vstupnými chybami modelu, nesprávnym kompilovaním alebo prítomnosťou krustálneho poľa, s ktorým model nepočíta. Aj keď krustálne pole prispieva v daných prípadoch malým príspevkom, na niektorých miestach Zeme to môže byť odlišné.

V práci boli overené základné hypotézy vplyvu rôznych typov chýb vo výpočte geomagnetického poľa na registrované intenzity kozmického žiarenia. Analýza ukázala, že v prípade, že ak má nájdená nepresnosť pôvod v internom geomagnetickom poli, tak na vysokých geomagnetických šírkach nespôsobí nepresnosť v odhade intenzity kozmického žiarenia na povrchu Zeme väčšiu než niekoľko percent. V prípade nižších geomagnetických šírok je tento vplyv výrazne menší. V prípade pôvodu nepresnosti v lokálnych poliach, ako je krustálne geomagnetické pole, by chyba mohla byť vyššia.

Dôležitým výsledkom je vývoj metodiky pre testovanie vplyvu presnosti geomagnetických modelov na simulácie trajektórií kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme.

V budúcnosti bude práca pokračovať testovaním novších modelov geomagnetického poľa ako je IGRF 13, ktorý bol publikovaný v záverečnej fáze prác na diplomovej práci a modelov ako CHAMP [51], ktoré aproximujú geomagnetické pole na škálach

kratších ako 5 rokov. Ďalej sa budú testovať rôzne kompilátory fortranu, aby sa určil ich vplyv na presnosť vyjadrenia geomagnetického poľa. Ďalším zámerom je realizovať testovanie vplyvu krustálneho poľa na intenzity prichádzajúceho kozmického žiarenia pre vybrané miesta na povrchu Zeme.

Zoznam použitej literatúry

- [1] MERNIK, Thomas. *Reconstruction of UHERC Events for the JEM-EUSO Mission*: diplomová práca. Tuebingen: University of Tuebingen, 2010.
- [2] BLASCHKE, Filip. *Analýza korelovaných spršiek kosmického zářeni* : diplomová práca. Opava: Slezská univerzita v Opavě, 2009.
- [3] FENU, Francesco. *A Simulation Study of the JEM-EUSO Mission for the Detection of Ultra-High Energy Cosmic Rays* : dizertačná práca. Tübingen: Eberhard Karls Universität, 2013.
- [4] SWORDY, S. P. , *The energy spectra and anisotropies of Cosmic Rays*, Space Science Reviews 99:85-94. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [5] JAKAB, P., BRANDENBURG, A. *The effect of a dynamo-generated field on the Parker wind*, arXiv:2006.02971v1 [astro-ph.SR] 3 Jun 2020.
- [6] FISK, L. A. *An Interpretation of the Observed Oxygen and Nitrogen Enhancements in Low-Energy Cosmic Rays*, Astrophysical Journal, vol. 190, p.L35, 1974.
- [7] NAGANO, M. *Energy spectrum of primary cosmic rays above 10^{17} eV determined from the extensive air shower experiments at Akeno*, J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 18, 423-442, 1992.
- [8] BIRD, D. J. *Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies*, Phys. Rev. Lett. 71, 3401–3404, 1993.
- [9] AVE, M., KNAPP, J. a kol. *The Energy Spectrum of Cosmic Rays in the Range 3×10^{17} - 4×10^{18} eV as Measured with the Haverah Park Array*, arXiv:astro-ph/0112253v2 11 Mar 2002.
- [10] BEREZINSKY, V. a kol. *On astrophysical solution to ultrahigh energy cosmic rays*, Phys. Rev. D 74, 043005, 2006.

- [11] Pierre Auger Collaboration, *Highlights from the Pierre Auger Observatory*, arXiv:1909.10791v1 [astro-ph.HE] 24 Sep 2019.
- [12] The High Resolution Fly's Eye Collaboration, *Measurement of the Flux of Ultra High Energy Cosmic Rays by the Stereo Technique*, arXiv:0904.4500 [astro-ph.HE] 28 Apr 2009
- [13] TORRES, D. F., ANCHORDOQUI, A. L. *Astrophysical Origins of Ultrahigh Energy Cosmic Rays*, arXiv:astro-ph/0402371v3 13 Jul 2004 .
- [14] ZATSEPIN, G. T., KUZMIN, V. A. *Upper Limit of the Spectrum of Cosmic Rays*, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, Vol. 4, p.78, 1966.
- [15] LONGAIR, M. S. *High Energy Astrophysics*, Third Edition, Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-0-521-75618-1.
- [16] BLASI, P. *On the spectrum of stable secondary nuclei in cosmic rays*, arXiv:1707.00525v1 [astro-ph.HE] 3 Jul 2017.
- [17] MERRILL, R.T., MCELHINNY, M.W. *The Earth's Magnetic Field - Its History, Origin and Planetary Perspective*. Orlando: Academic Press, Inc., 1983.
- [18] PARKER, E. N. *Hydromagnetic Dynamo Models*, Astrophysical Journal, vol. 122, p.293, 1955ApJ...122..293P, 1995.
- [19] GUNNARSDÓTTIR, E. L. *The Earth's magnetic field* : bakalárska práca, Reykjavik: Univerity of Iceland, 2012.
- [20] PATOČKA, V., ŠRÁMEK, O., TOSI, N. *Minimum heat flow from the core and thermal evolution of the Earth*, Physics of the Earth and Planetary Interiors 305 (2020) 106457, <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106457>, 2020.
- [21] KARTTUNEN, H. a kol. *Fundamental Astronomy*, Fifth Edition, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. ISBN 978-3-540-34143-7.
- [22] LANZA, R., MELONI, A. *The Earth's Magnetism - An Introduction for Geologists*, Springer Berlin Heidelberg New York, 2006. ISBN 978-3-540-27979-2.
- [23] TEOH, W. a spol. *ELECTRICAL RESISTIVITY OF IRON-VANADIUM ALLOYS BETWEEN 78 AND 1200 K*, North-Holland Publishing Company, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 3, 260-263, 1976.

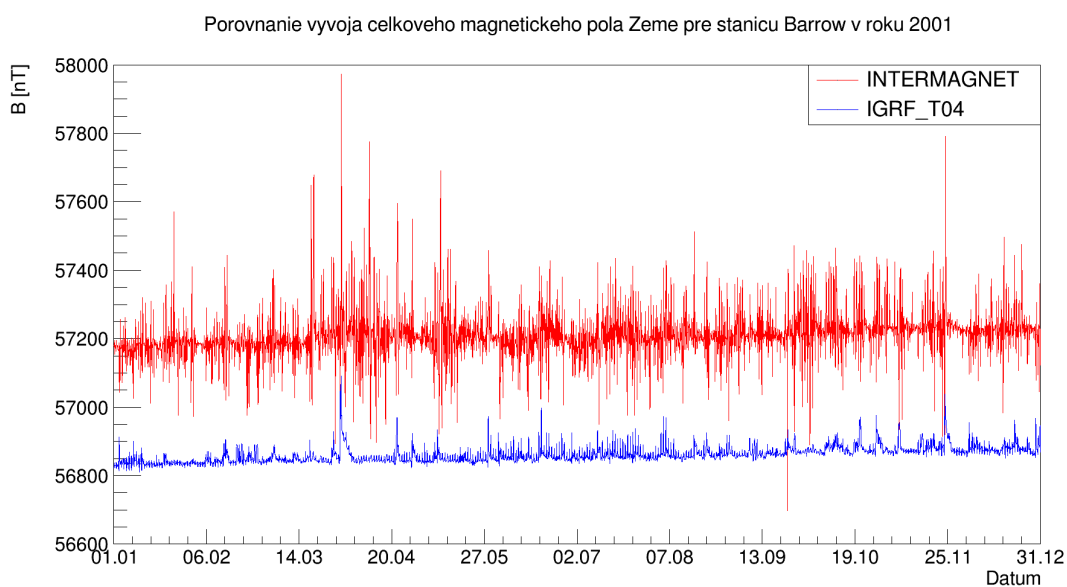
- [24] LOWRIE, W. *Fundamentals of Geophysics*, Second Edition, Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Cambridge, 2007. ISBN 978-0-511-35447-2.
- [25] MATZKA, J. a kol. *Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space*, Space Sci Rev, DOI 10.1007/s11214-010-9693-4, 2010.
- [26] JANKOWSKY, J. *GUIDE FOR MAGNETIC MEASUREMENTS AND OBSERVATORY PRACTICE*, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Zespól Wydawniczy Centrum Badm Kosmicznych PAN ul. Bartycka 18a. 00-716 Warszawa, Poland, 1996. ISBN: 0-9650686-2-5
- [27] PARKER, E. N. *Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields*, Astrophysical Journal, vol. 128, p.664, 1958ApJ...128..664P, 1958.
- [28] KOPP, A. a kol. *Cosmic-Ray Transport in Heliospheric Magnetic Structures. II. Modeling Particle Transport through Corotating Interaction Regions*, The Astrophysical Journal, 837:37, 2017. Dostupné na <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa603b>.
- [29] BOBIK, P. a kol. *Magnetospheric transmission function approach to disentangle primary from secondary cosmic ray fluxes in the penumbra region*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, Volume 111, Issue A5, CiteID A05205, 2006.
- [30] MERRILL, R. T., MCELHINNY, M. W. *The Earth's Magnetic Field - Its History, Origin and Planetary Perspective*, ACADEMIC PRESS, London, 1983. ISBN: 978-0-12-491240-3
- [31] LOVE, J. J. *Magnetic monitoring of Earth and space*, Physics Today, American Institute of Physics, S-0031-9228-0802-010-3, 2008.
- [32] LOVE, J.J. *An International Network of Magnetic Observatories*, Eos, Transactions American Geophysical Union, Volume 94, Issue 42, pp. 373-374, 2013.
- [33] KERRIDGE, D. *INTERMAGNET: WORLDWIDE NEAR-REAL-TIME GEOMAGNETIC OBSERVATORY DATA*, British Geological Survey, Murchison House, West Mains Road, Edinburgh, EH9 3LA, UK, 2001.
- [34] GVISHIANIA, A. D., LUK'YANOVAA, R. YU. *Geoinformatics and observations of the Earth's magnetic field: The Russian segment*, Physics of the Solid Earth, 2015, Vol. 51, No. 2, pp. 157–175, Pleiades Publishing, Ltd, ISSN 10693513, 2015.

- [35] BARRACLOU, D. R., IAGA DIVISION I WORKING GROUP 1. *International Geomagnetic Reference Field Revision 1987*, J. Geomag. Geoelectr., 39, 773-779, 1987.
- [36] BARTON, C. E. *International Geomagnetic Reference Field: The Seventh Generation*, J. Geomag. Geoelectr., 49, 123-148, 1997.
- [37] THÉBAULT, E. a kol. *International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation*, Earth, Planets and Space (2015) 67:79, DOI 10.1186/s40623-015-0228-9.
- [38] FINLAY, C. C. *Evaluation of candidate geomagnetic field models for IGRF-11*, Earth Planets Space, 62, 787–804, 2010.
- [39] TSYGANENKO, A. N. a kol. *Storm-time distortion of the inner magnetosphere: How severe can it get?*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 108, NO. A5, 1209, doi:10.1029/2002JA009808, 2003.
- [40] STERN, D. P. *A Brief History of Magnetospheric Physics Before the Spaceflight Era*, Reviews of Geophysics, 27, 1989, p. 103-114. Dostupné na <https://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/bh1-3.html>.
- [41] TSYGANENKO, A. N., SITNOV, M.I. *Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 110, A03208, doi:10.1029/2004JA010798, 2005.
- [42] COLLIER, M. R. a kol. *Multispacecraft observations of sudden impulses in the magnetotail caused by solar wind pressure discontinuities: Wind and IMP 8*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 103, NO. A8, PAGES 17,293-17,305, AUGUST 1, 1998.
- [43] SHUE, J. H. a kol. *Magnetopause location under extreme solar wind conditions*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 103, NO. A8, PAGES 17,691-17,700, AUGUST 1, 1998.
- [44] GECÁŠEK, D. *Softvérový rámec pre COR model výpočtov trajektórii častíc v magnetosfére Zeme: diplomová práva*. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2019.
- [45] BOBIK, P. a kol. *Fluxes and nuclear abundances of cosmic rays inside the magnetosphere using a transmission function approach*, Advances in Space Research 43 (2009) 385–393. Dostupné na <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.11.020>.

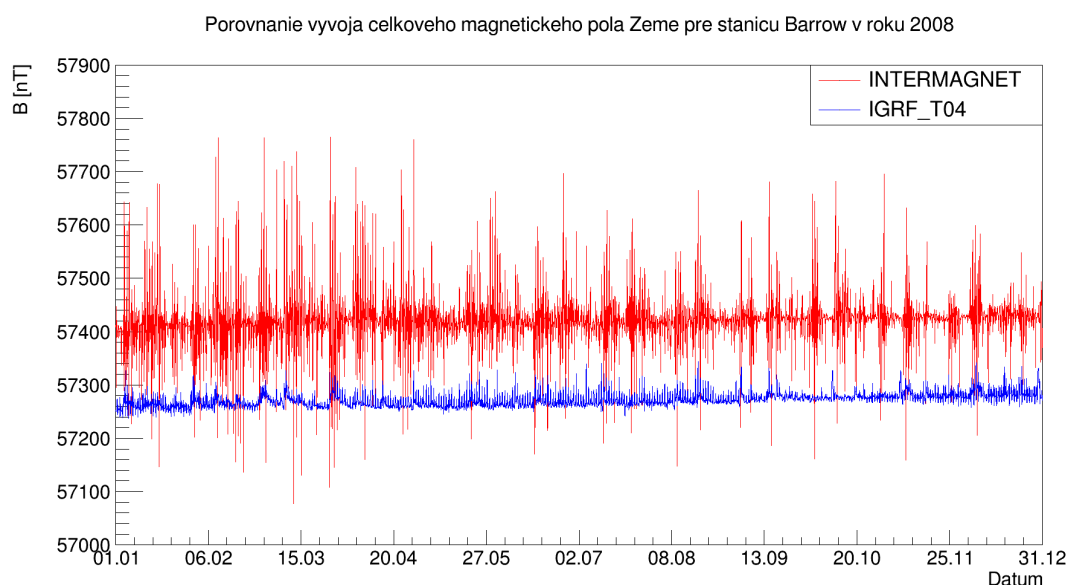
- [46] The AMS-01 Collaboration, *Cosmic-ray positron fraction measurement from 1 to 30 GeV with AMS-01*, arXiv:astro-ph/0703154v2 27 Mar 2007.
- [47] BRUN, R., RADEMAKERS, F. *ROOT — An object oriented data analysis framework*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, Volume 389, Issue 1, p. 81-86., 1997.
- [48] GRIMM, E. C. *CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares*, Computers and Geosciences Volume 13, Issue 1, 1987, Pages 13-35, [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(87\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(87)90022-7)
- [49] VASKO, M. *Refaktorizácia kódov pre výpočet trajektórii častíc kozmického žiarenia v magnetosfére Zeme*: diplomová práca. Košice: Technická univerzita v Košiciach, 2019.
- [50] AHN. B. H. a kol. *Universal time variation of the Dst index and the relationship between the cumulative AL and Dst indices during geomagnetic storms*, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 107, NO. A11, 1409, doi:10.1029/2002JA009257, 2002.
- [51] SAKABA, T. J., FINLAY, C. C. a kol. *CM6: a comprehensive geomagnetic field model derived from both CHAMP and Swarm satellite observations*, Earth, Planets and Space, Volume 72, Issue 1, article id.80, 2020. Dostupné na <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01210-5>.
- [52] The AMS Collaboration, *Protons in Near Earth Orbit*, Phys. Lett. B 472 (2000) 215-226, DOI: 10.1016/S0370-2693(99)01427-6, 2020. Dostupné na <http://cds.cern.ch/record/427775/files/0002049.pdf?version=1>.
- [53] <http://cor.crmodels.org/>

Dodatok A

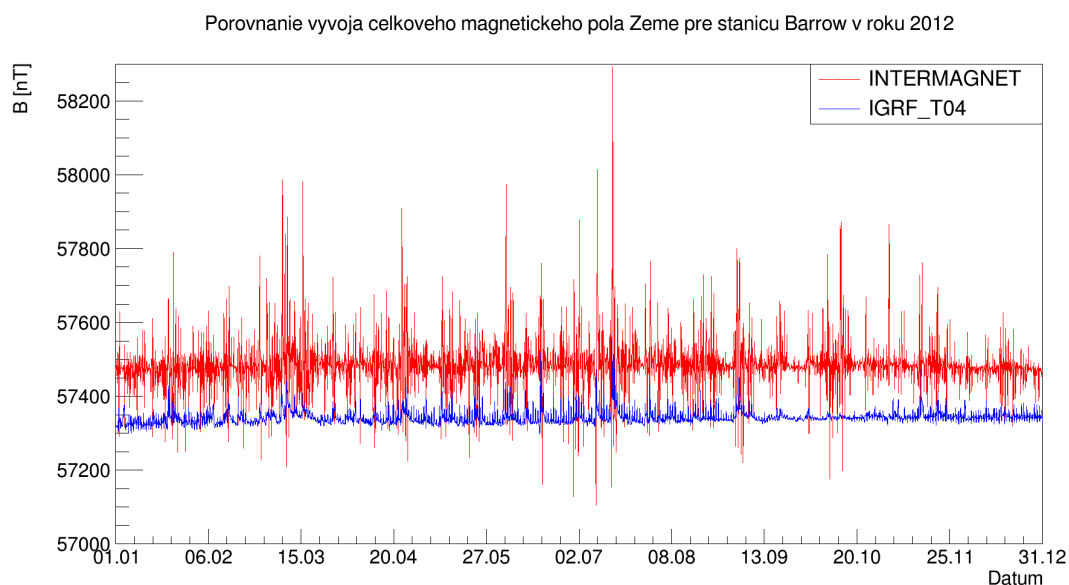
Vývoj celkového magnetického poľa pre vybrané stanice a pre dané roky



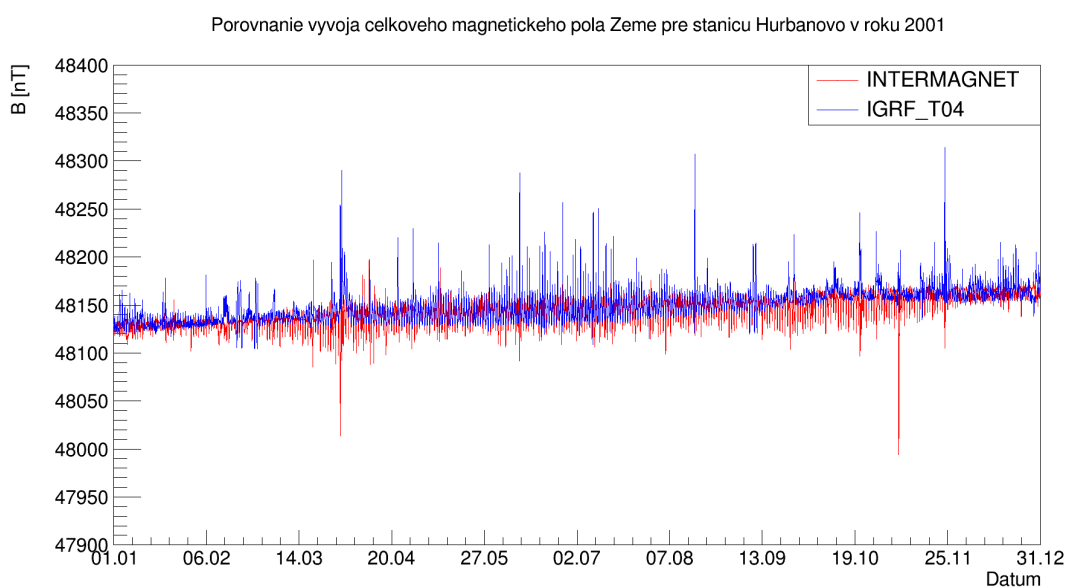
Obr. A.23: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



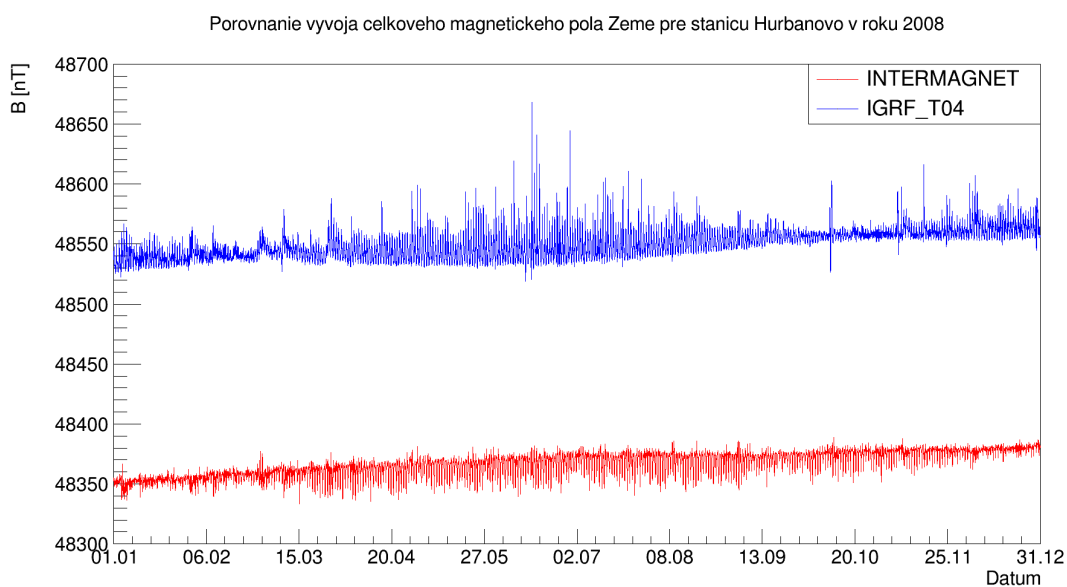
Obr. A.24: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



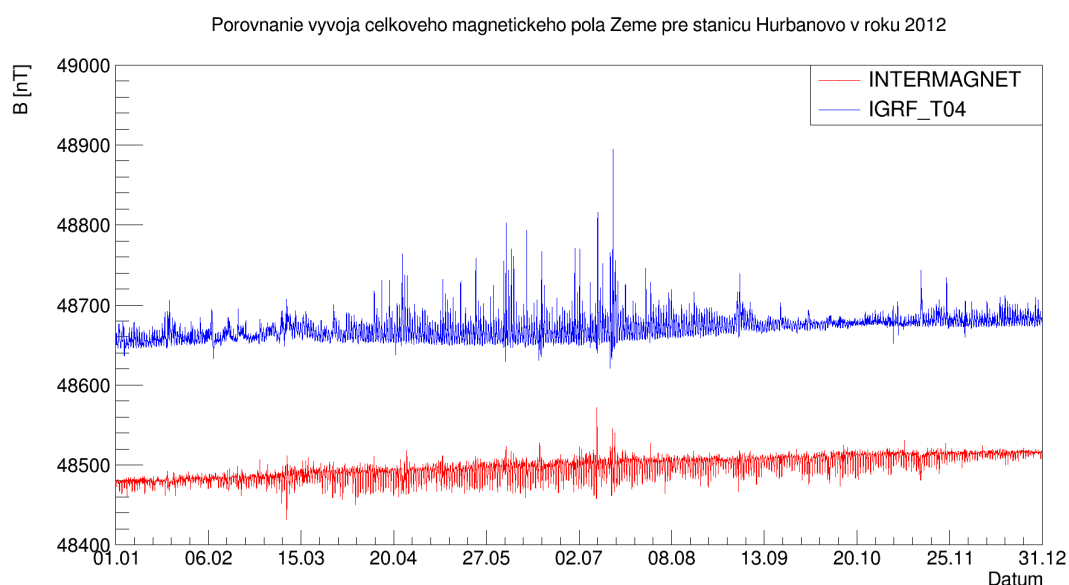
Obr. A.25: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Barrow v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



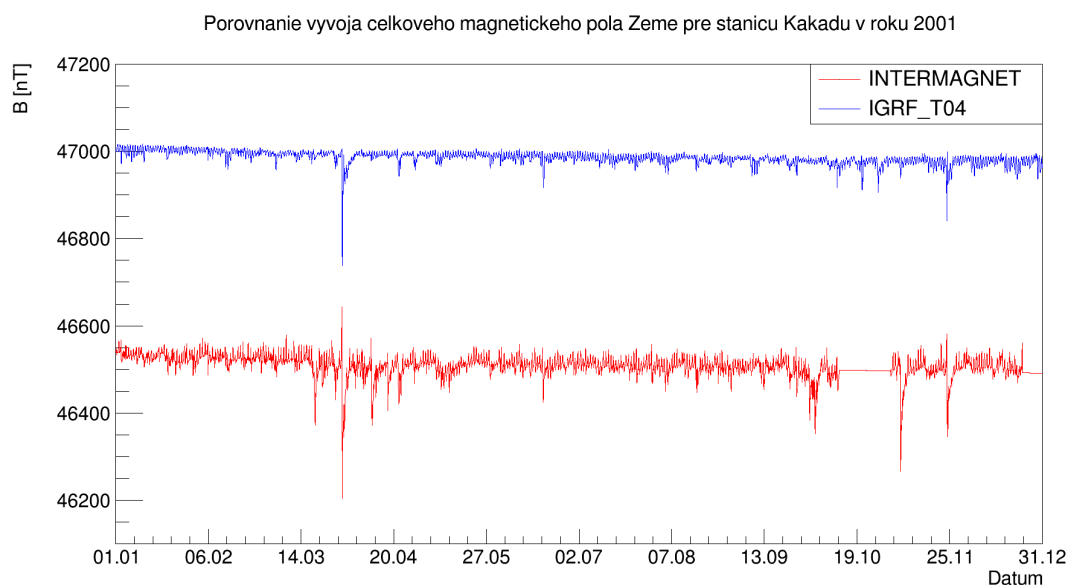
Obr. A.26: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



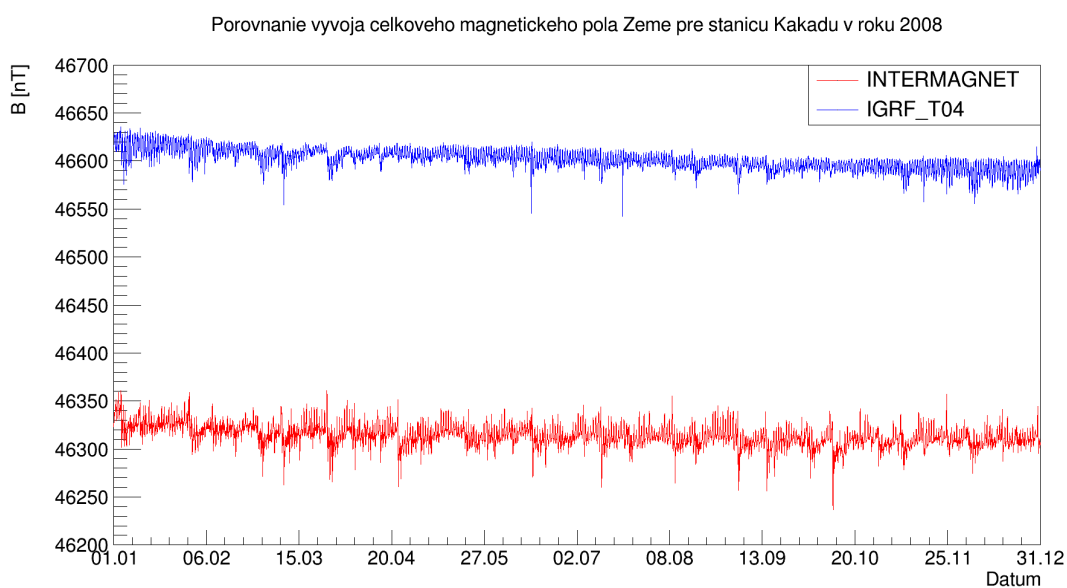
Obr. A.27: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



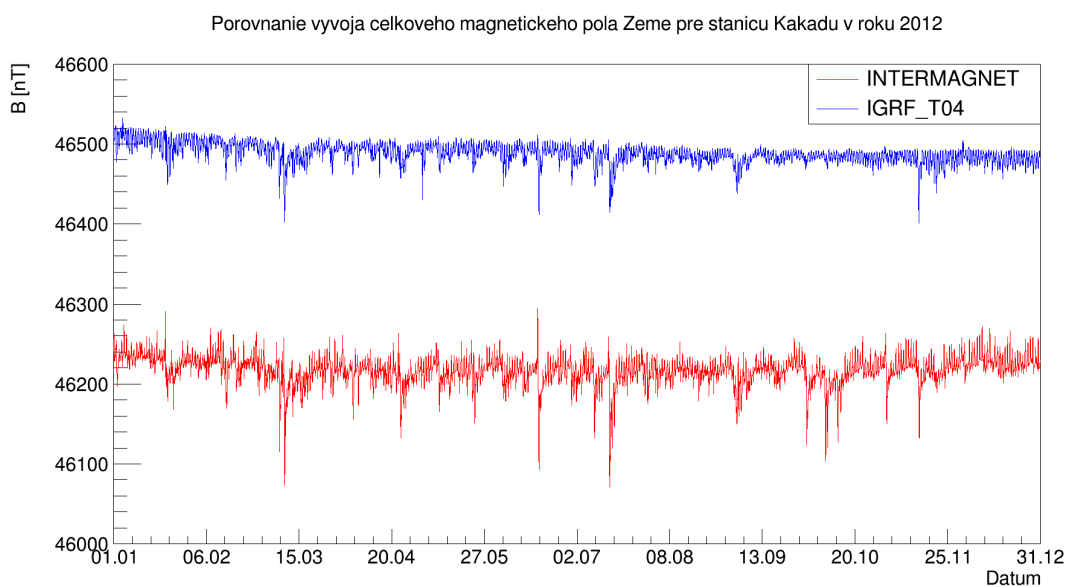
Obr. A.28: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Hurbanovo v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



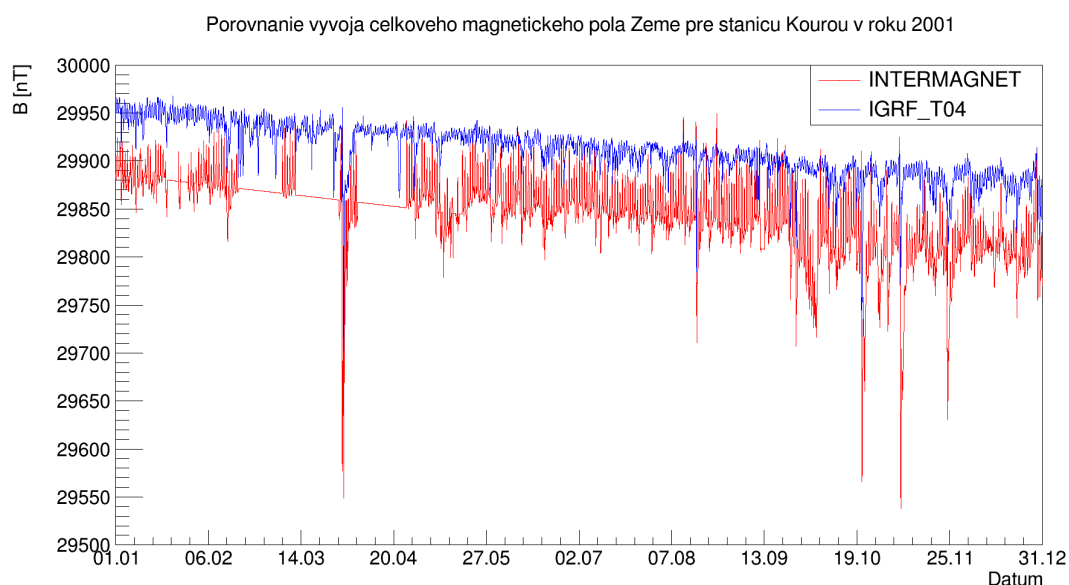
Obr. A.29: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kakadu v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



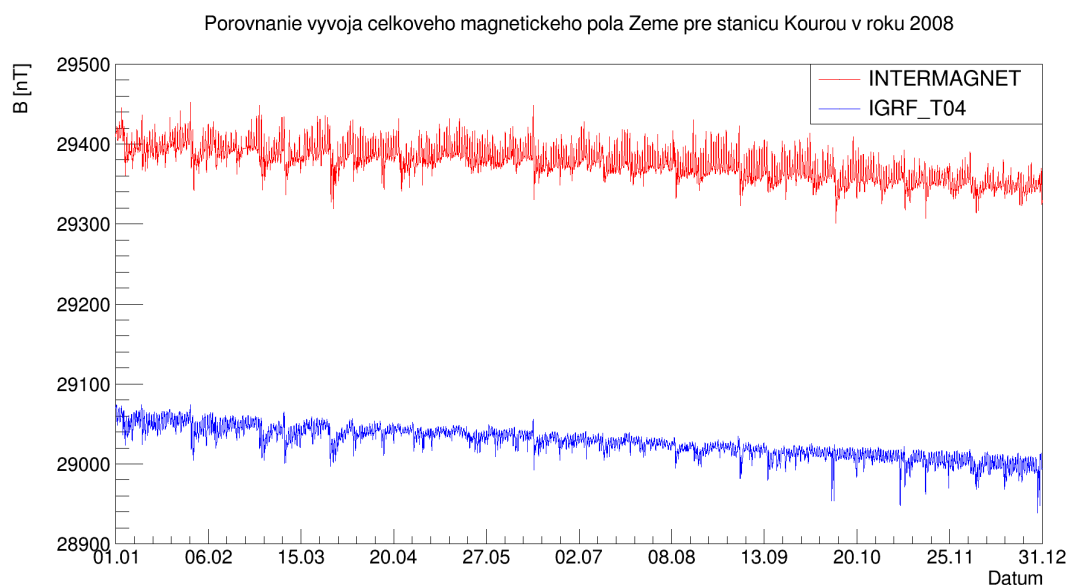
Obr. A.30: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kakadu v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



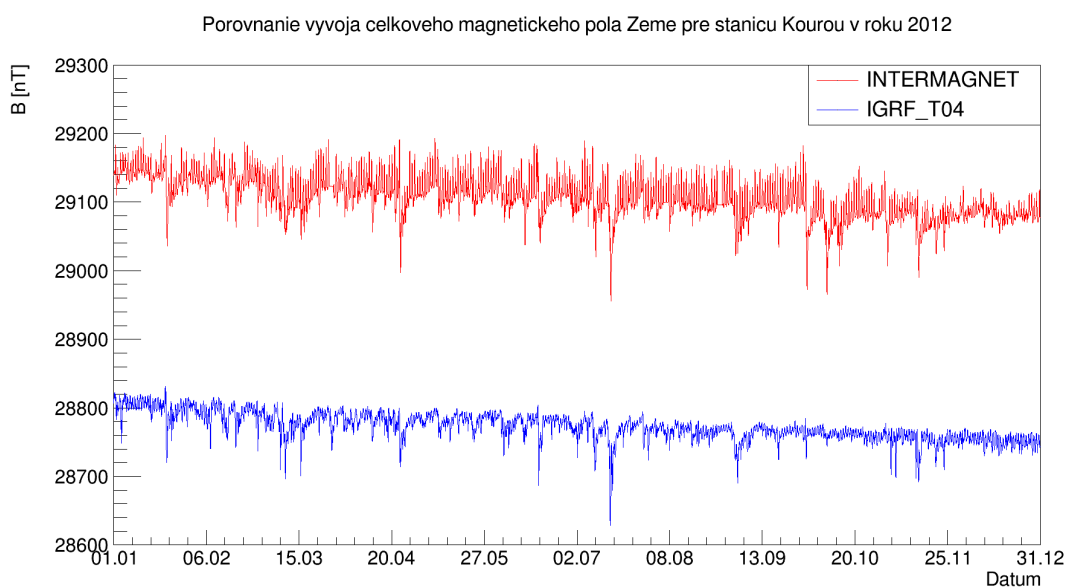
Obr. A.31: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kakadu v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



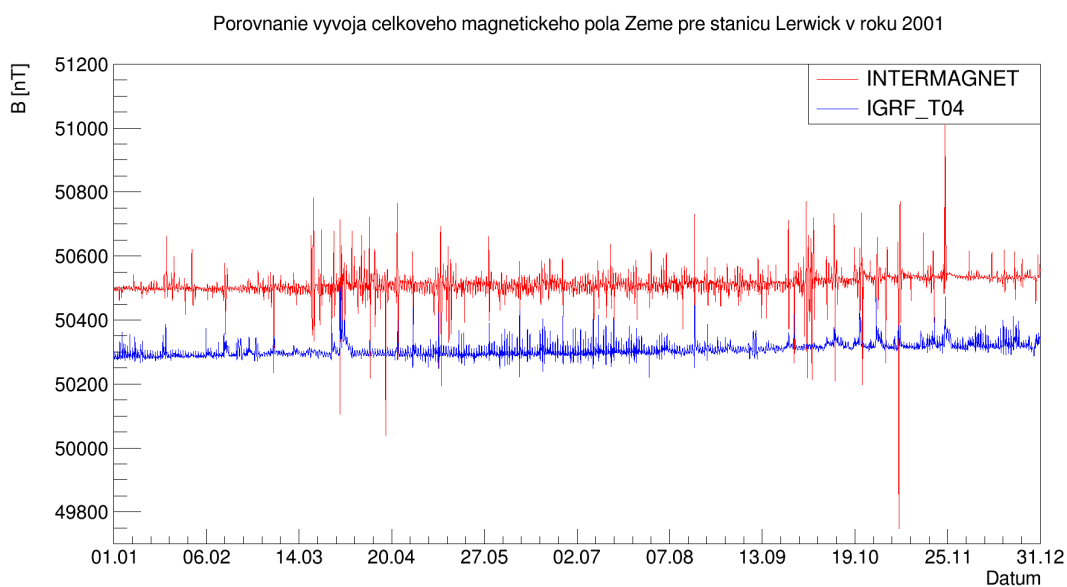
Obr. A.32: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kourou v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



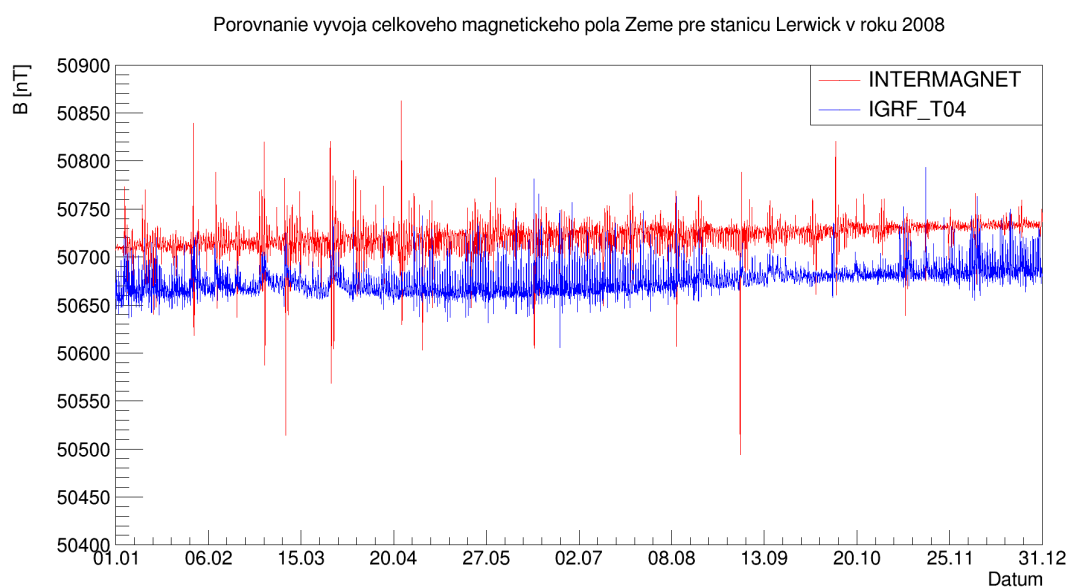
Obr. A.33: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kourou v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



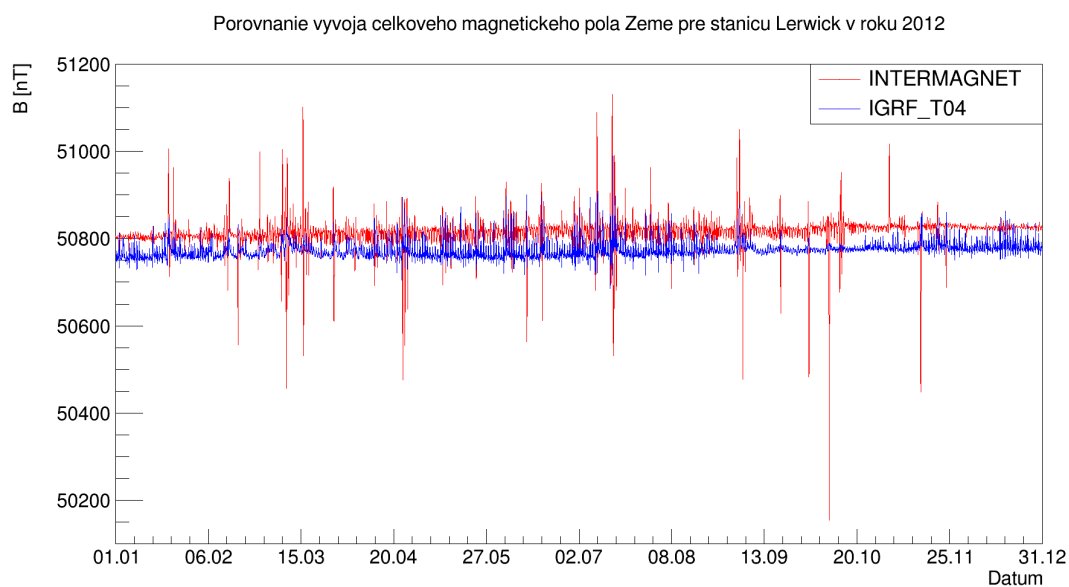
Obr. A.34: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Kourou v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



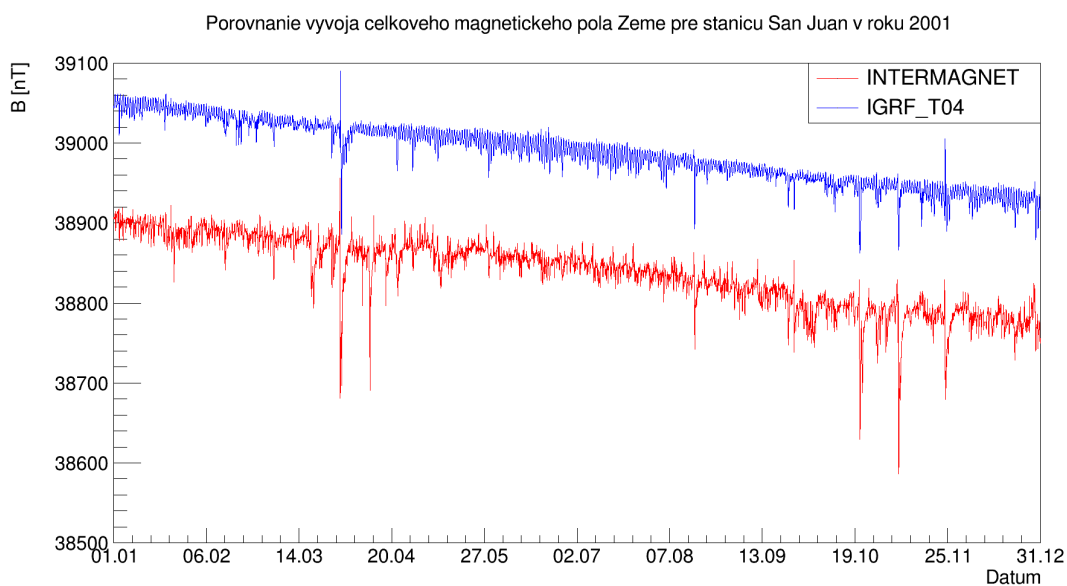
Obr. A.35: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Lerwick v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



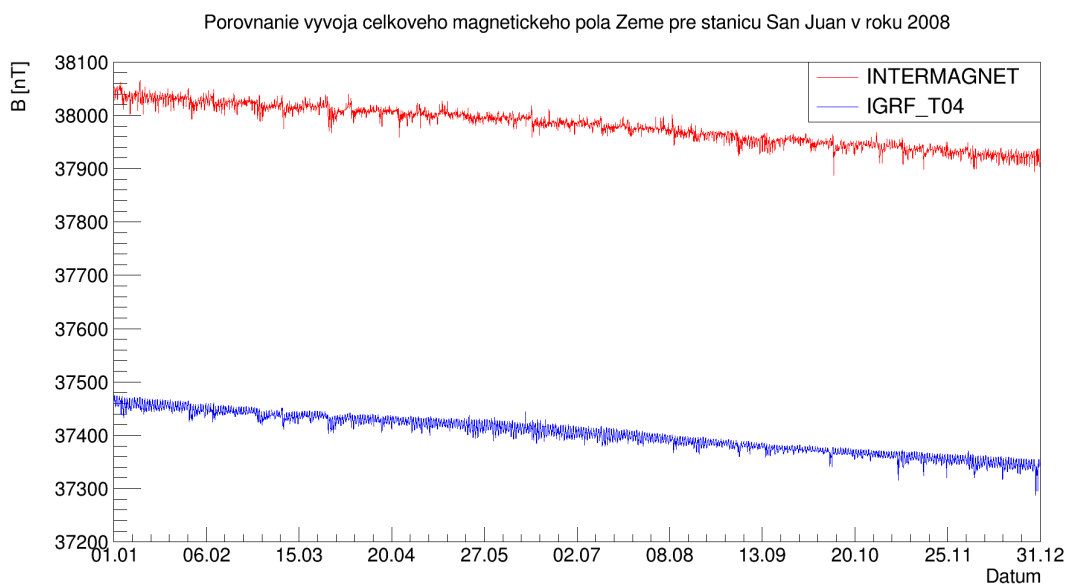
Obr. A.36: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Lerwick v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



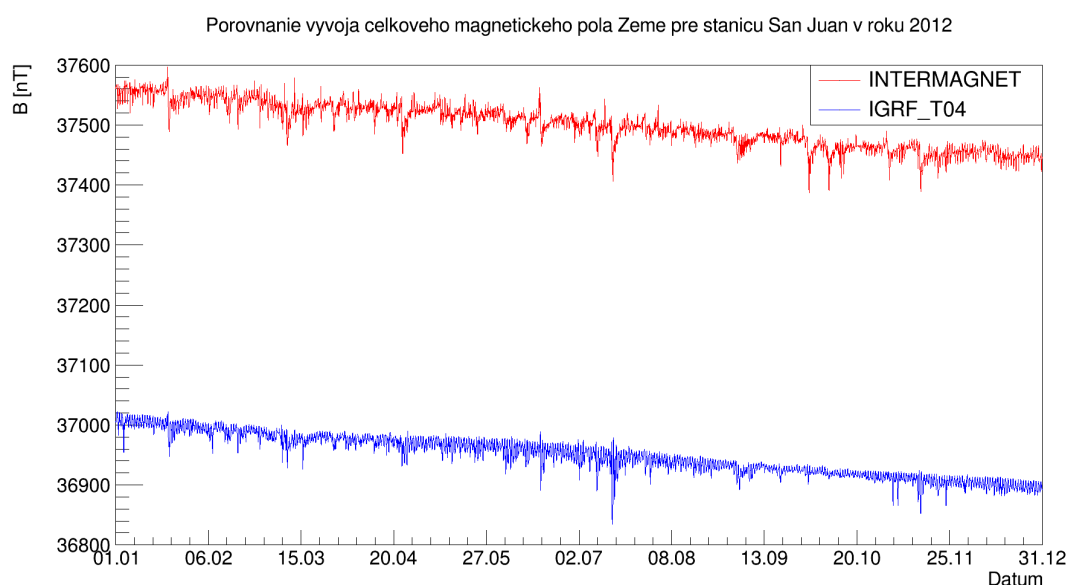
Obr. A.37: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Lerwick v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



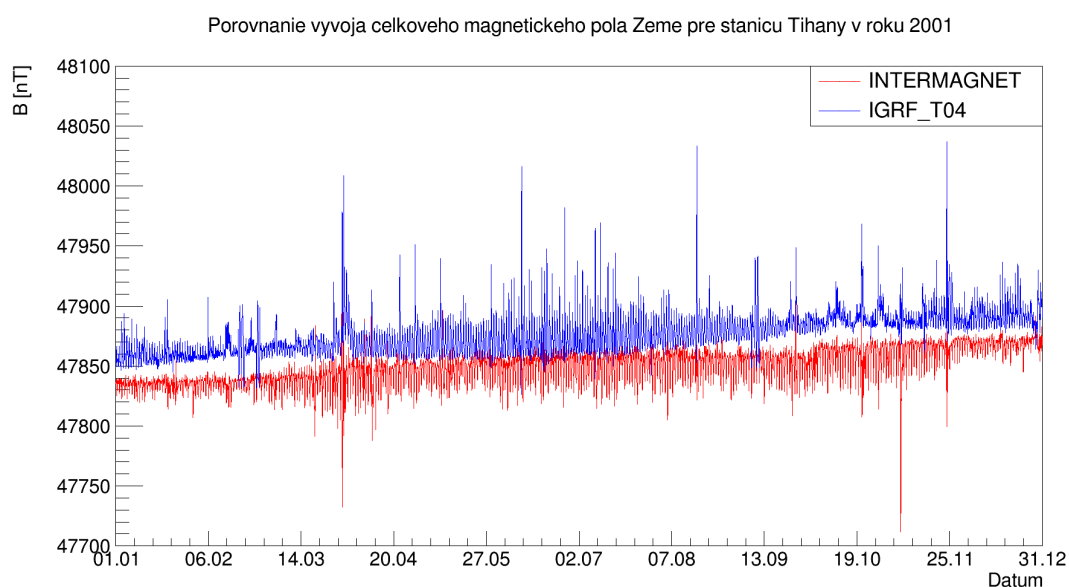
Obr. A.38: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



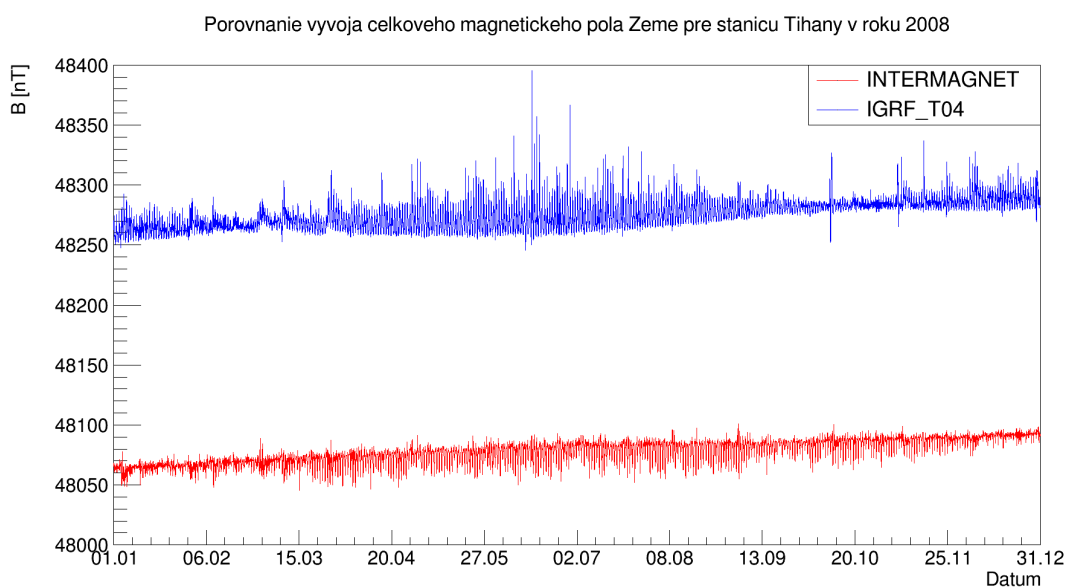
Obr. A.39: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



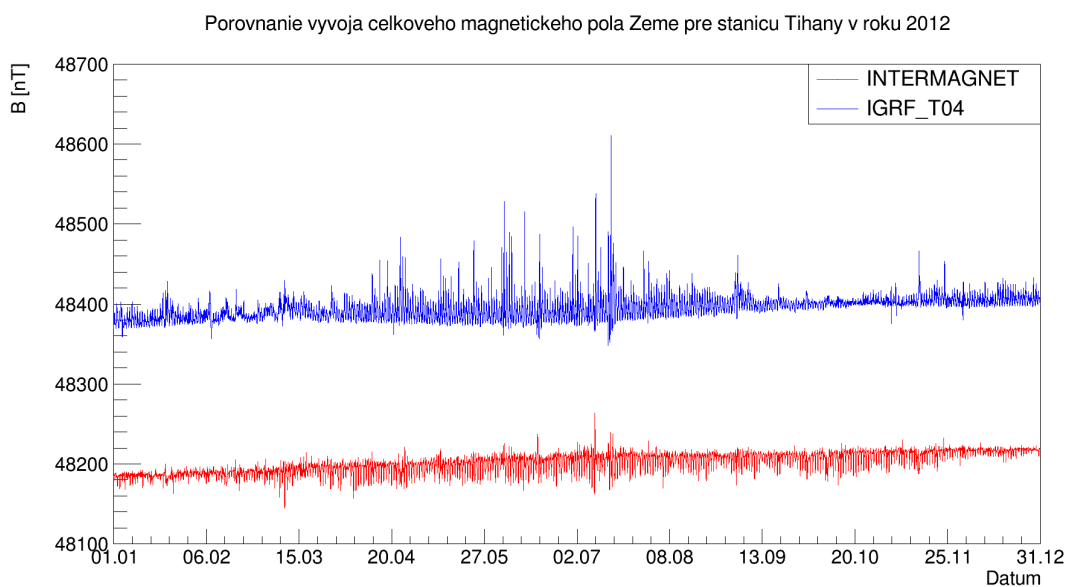
Obr. A.40: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu San Juan v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



Obr. A.41: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Tihany v roku 2001 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



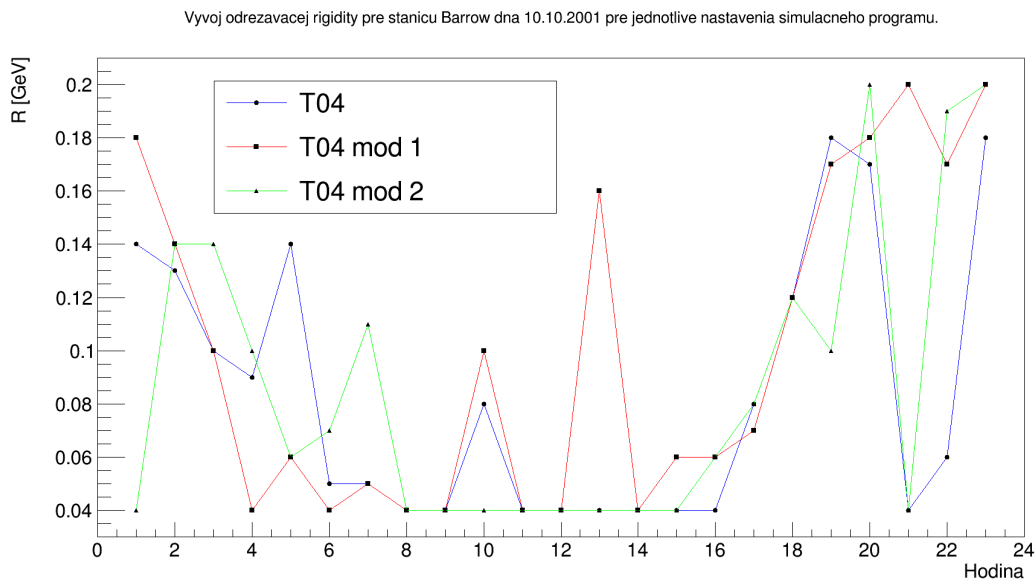
Obr. A.42: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Tihany v roku 2008 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).



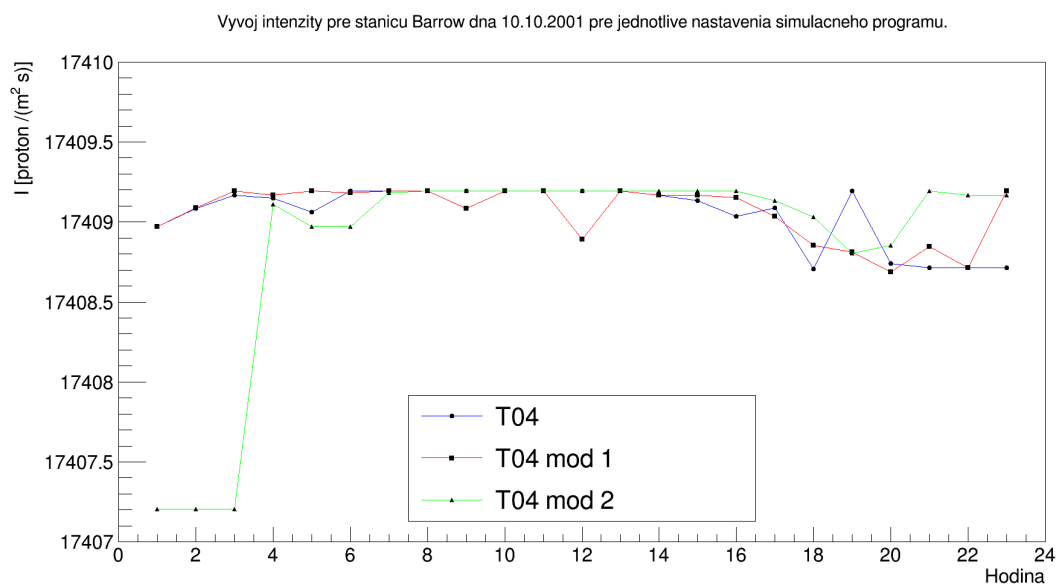
Obr. A.43: Porovnanie vývoja celkového magnetického poľa Zeme pre stanicu Tihany v roku 2012 pre simulované dáta (modrá čiara) a reálne nameraných dát (červená čiara).

Dodatok B

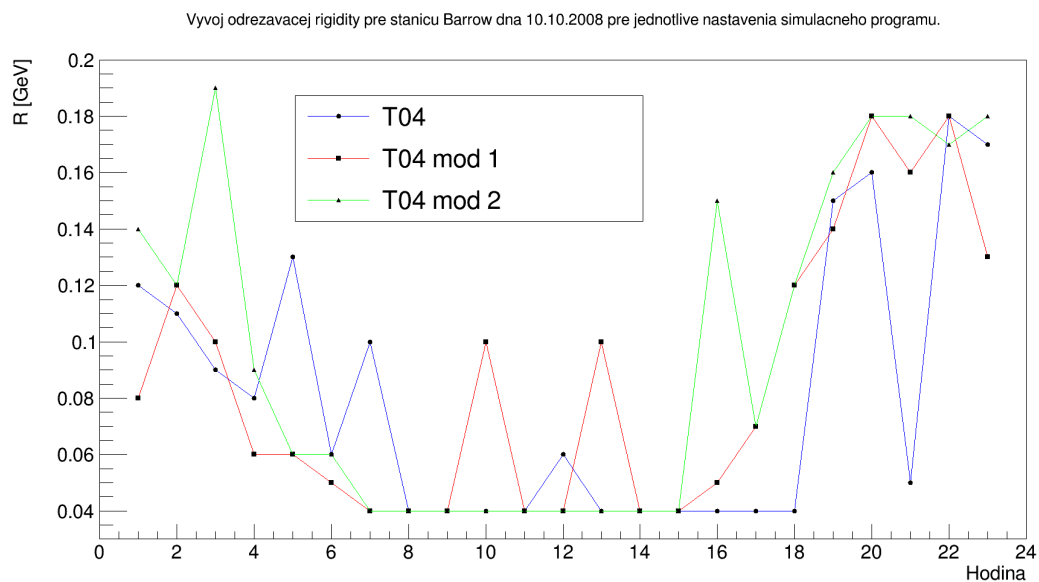
Vývoj efektívnej odrezávacej rigidity a celkovej intenzity kozmického žiarenia dňa 10.10. pre vybrané stanice a pre nami zvolené roky



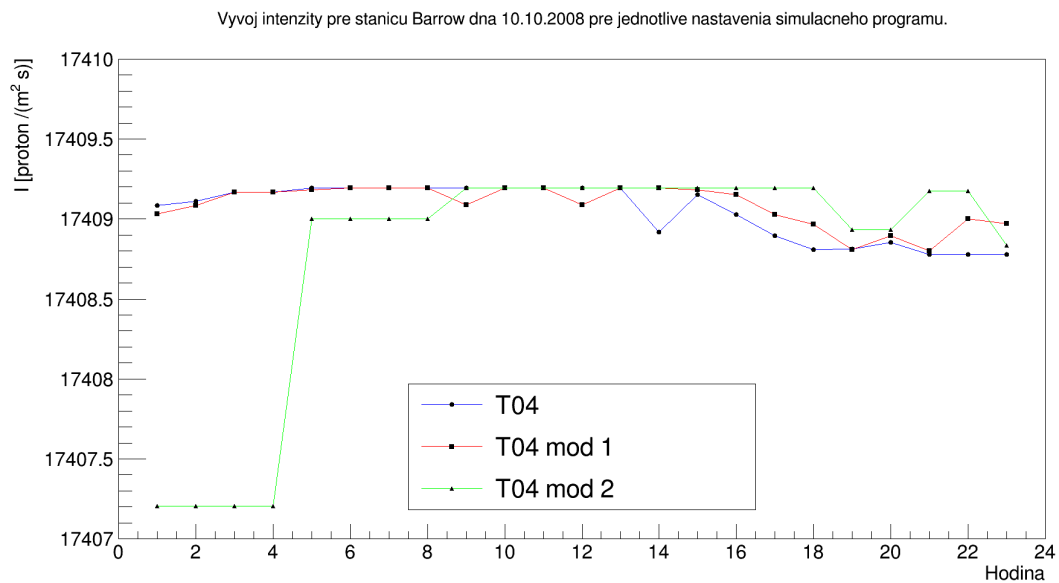
Obr. B.44: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Barrow dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



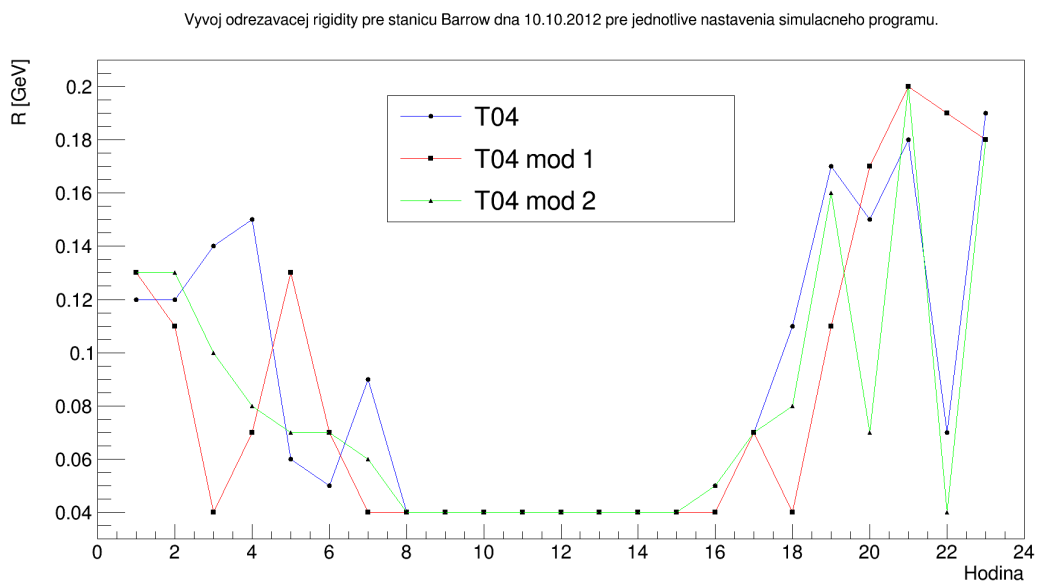
Obr. B.45: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Barrow dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



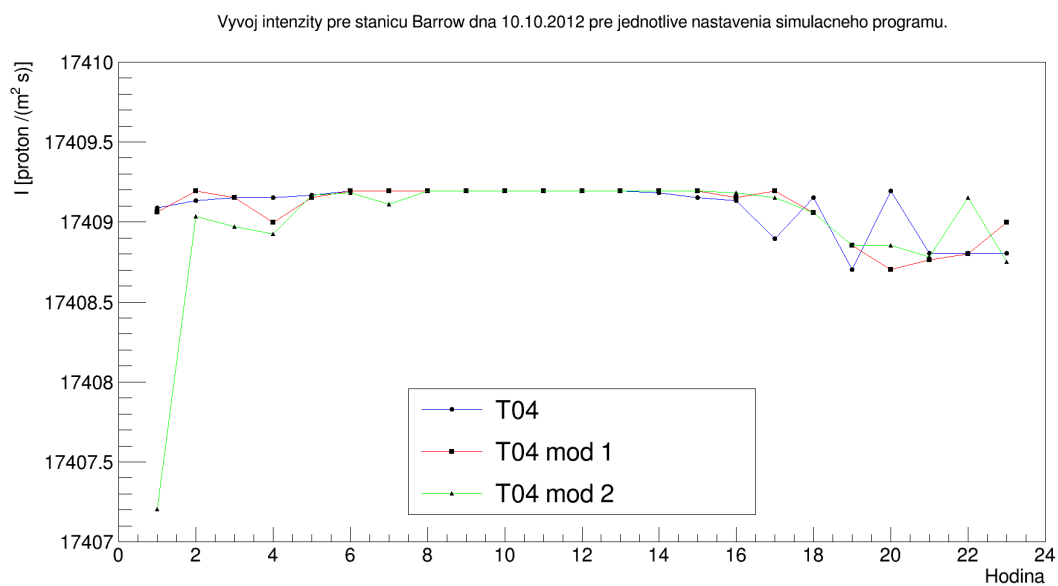
Obr. B.46: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Barrow dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



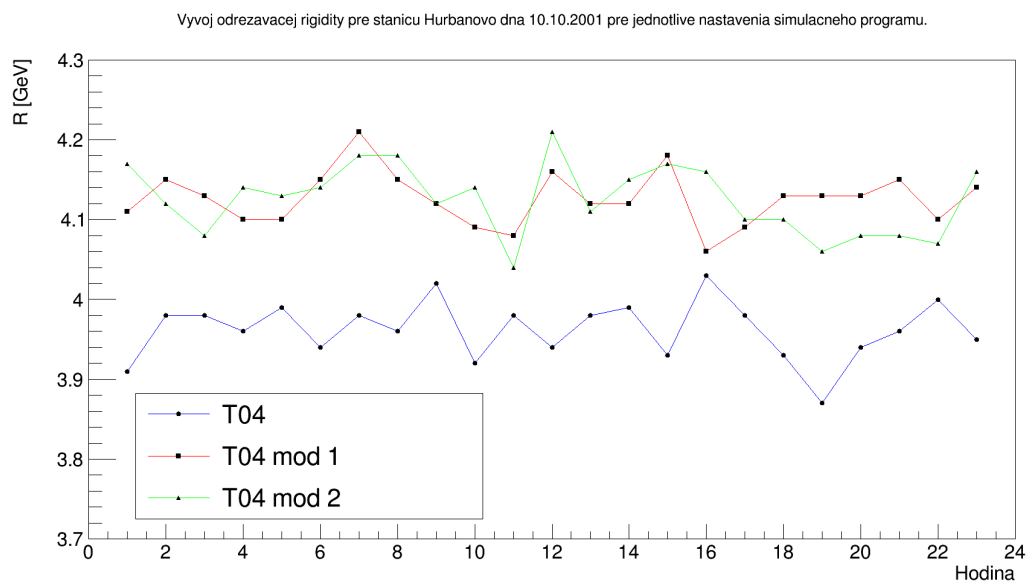
Obr. B.47: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Barrow dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



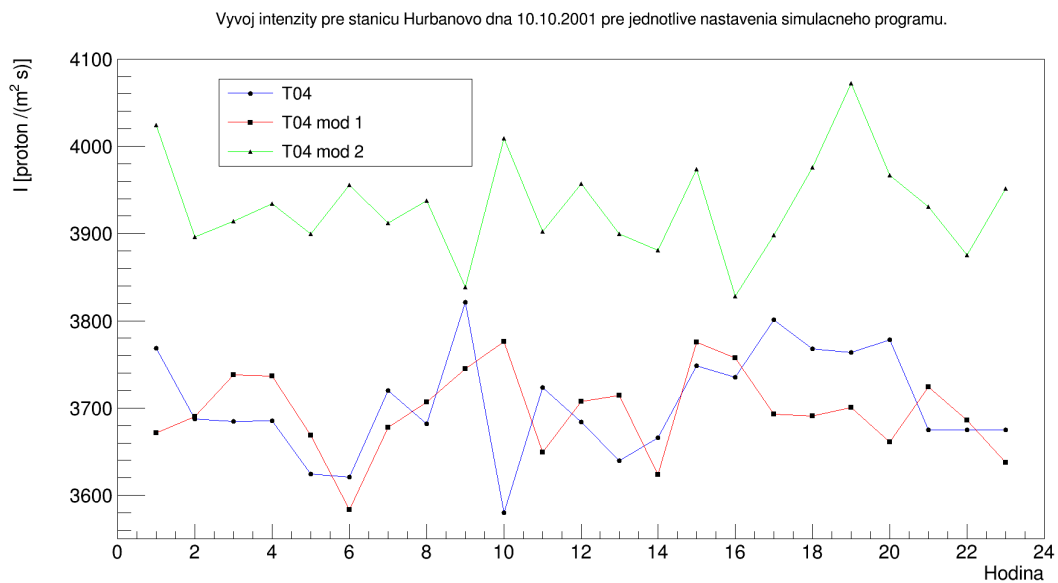
Obr. B.48: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Barrow dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



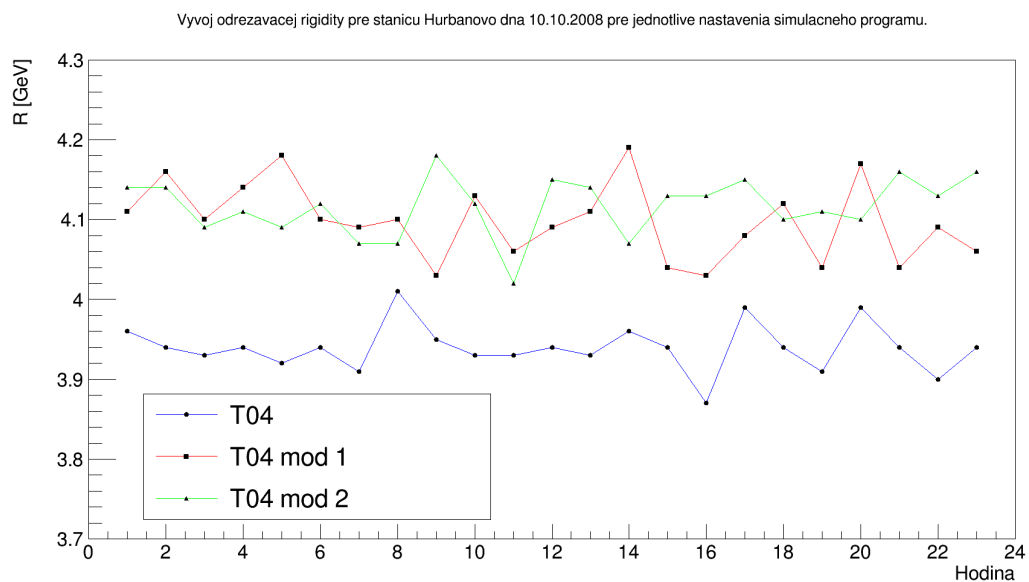
Obr. B.49: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Barrow dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



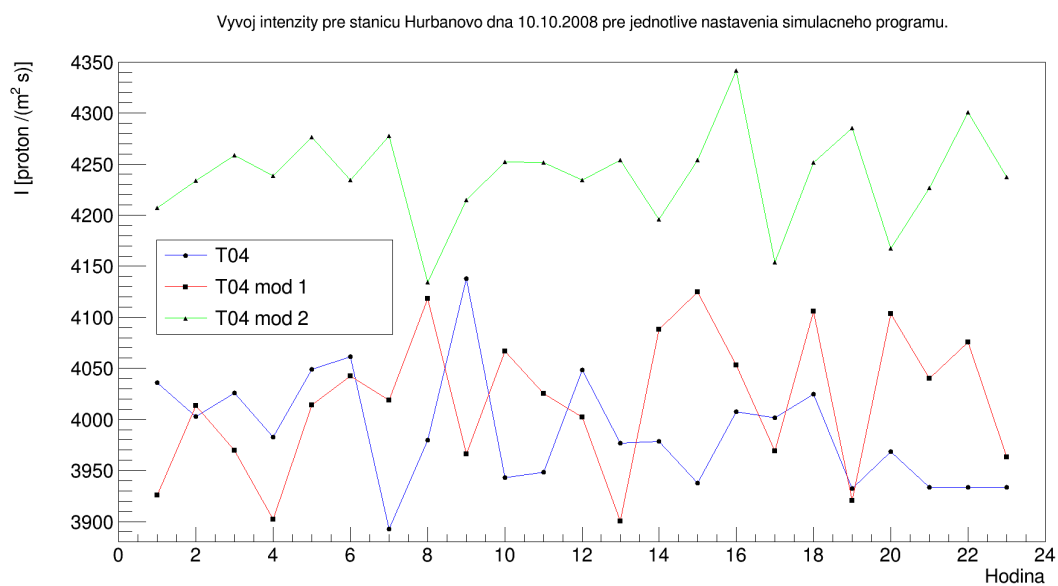
Obr. B.50: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



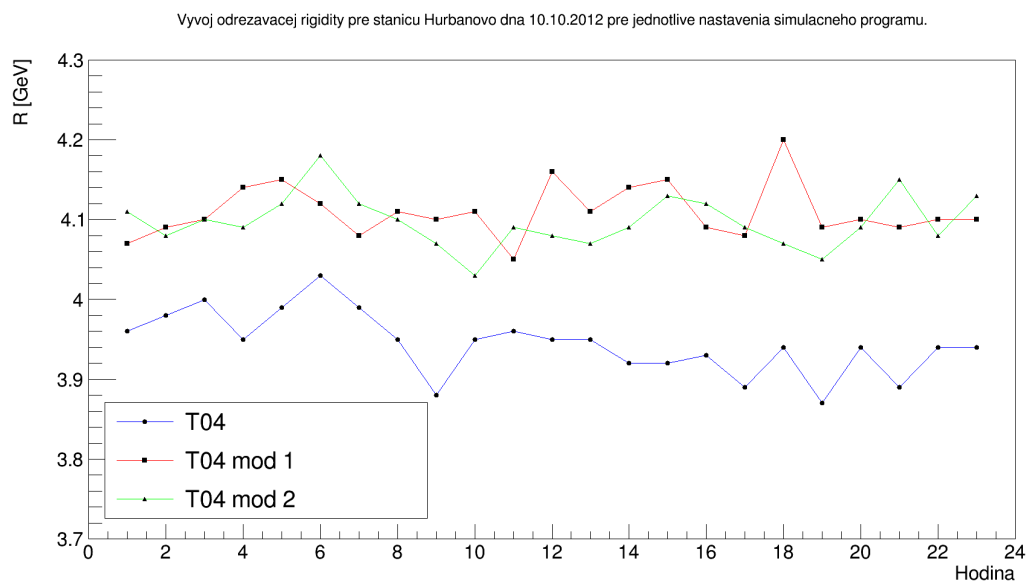
Obr. B.51: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



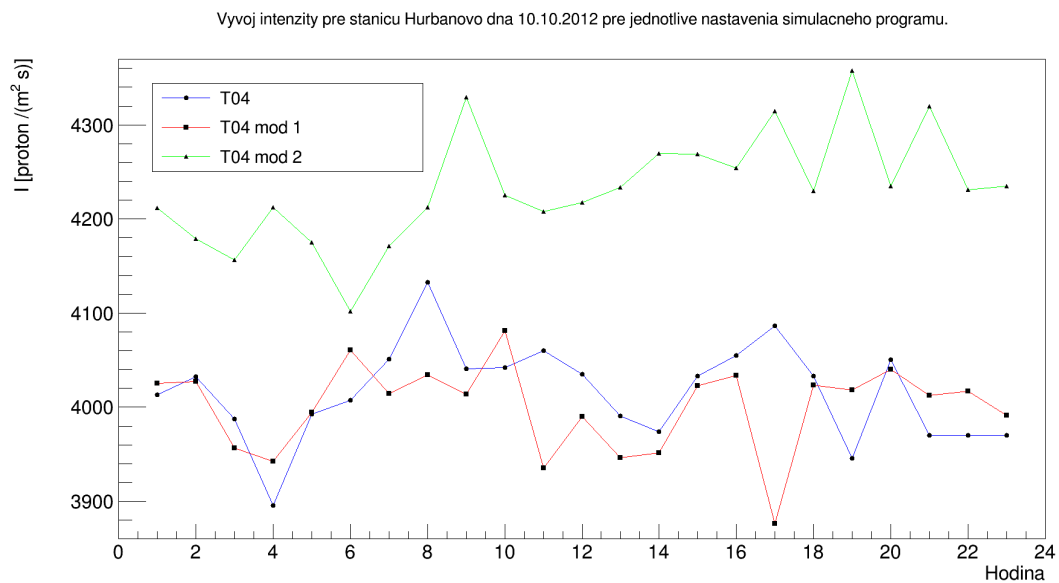
Obr. B.52: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



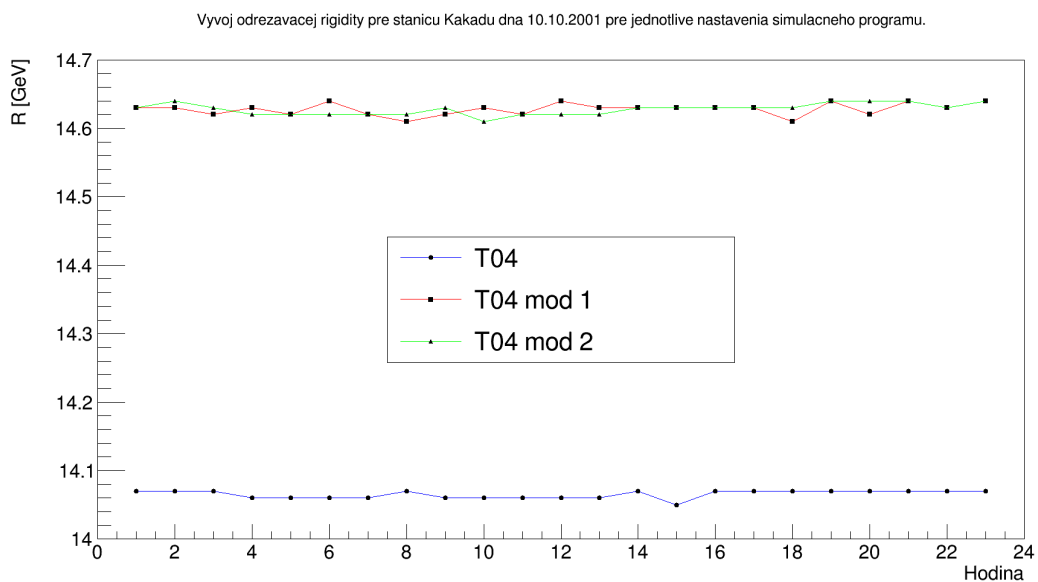
Obr. B.53: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



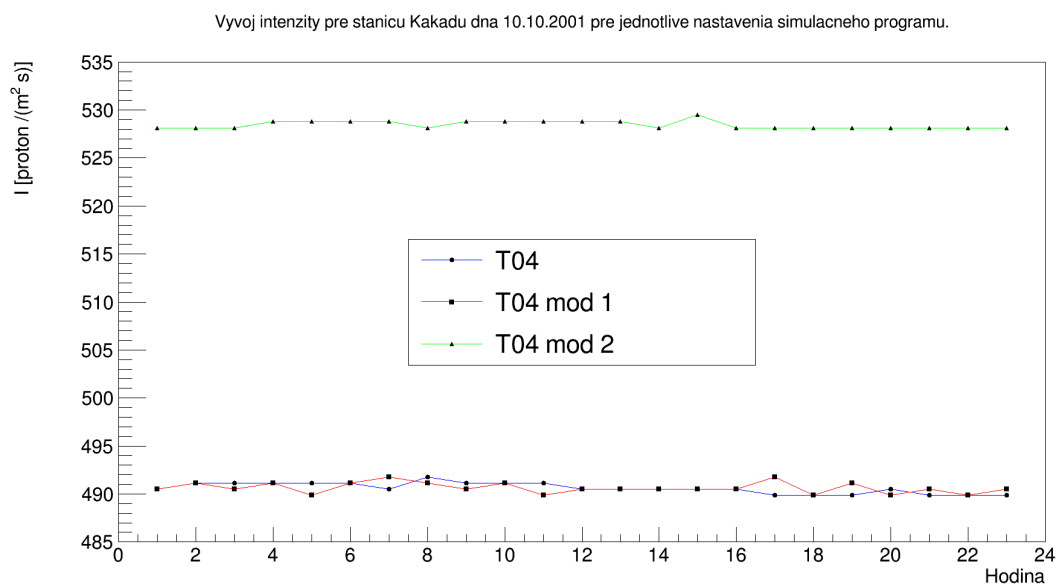
Obr. B.54: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



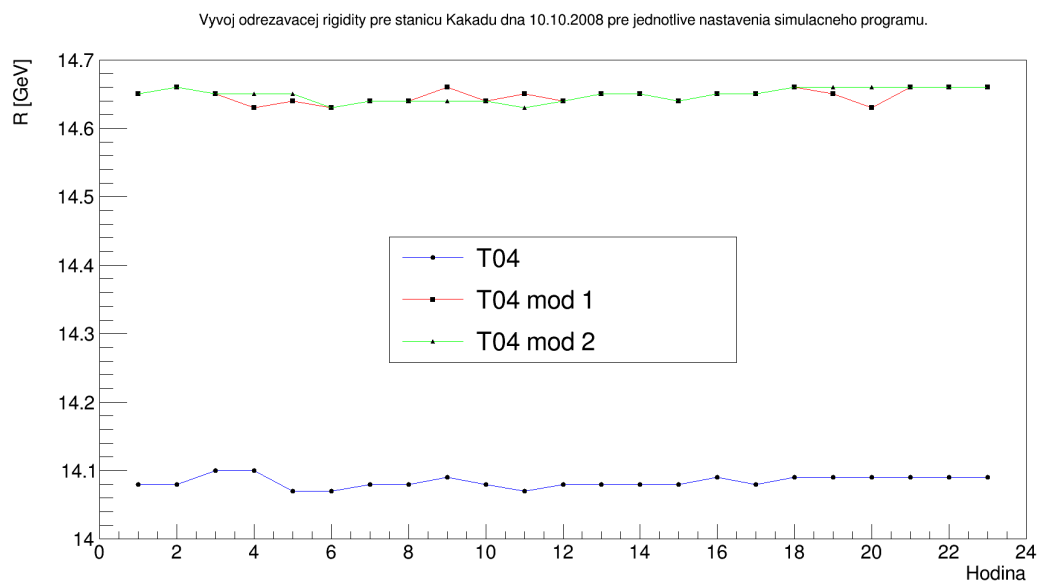
Obr. B.55: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Hurbanovo dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



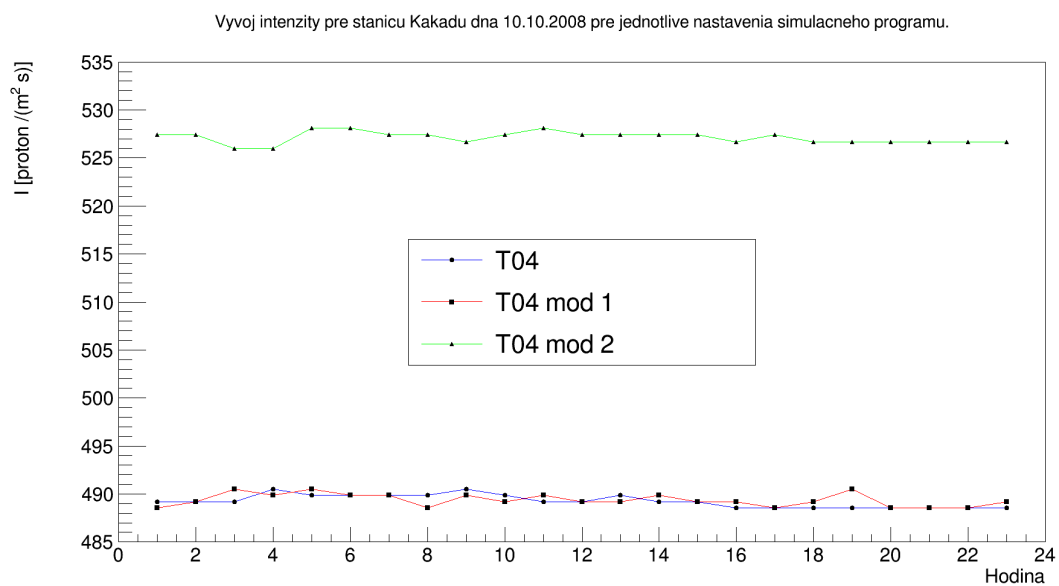
Obr. B.56: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



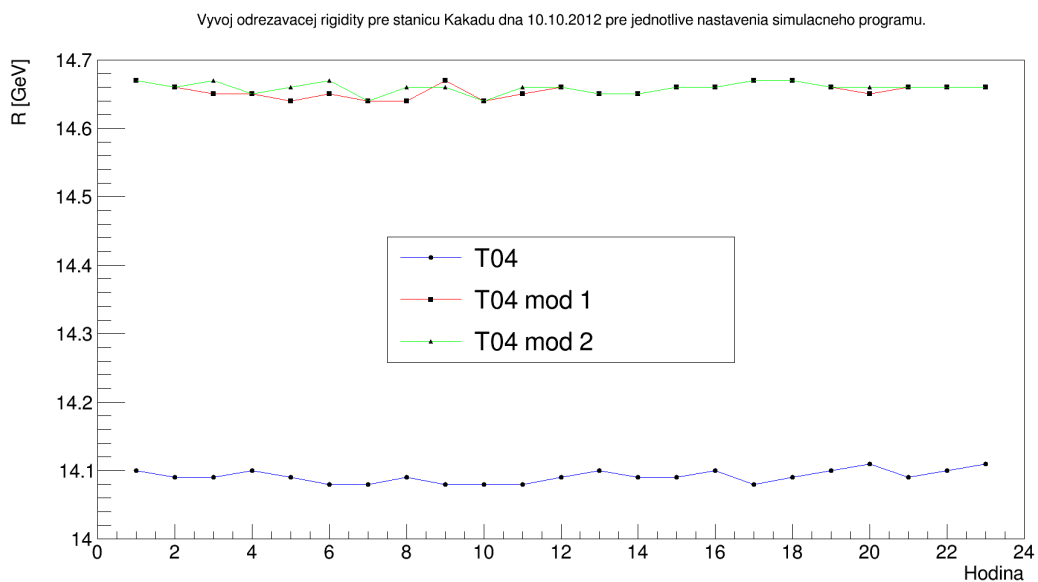
Obr. B.57: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



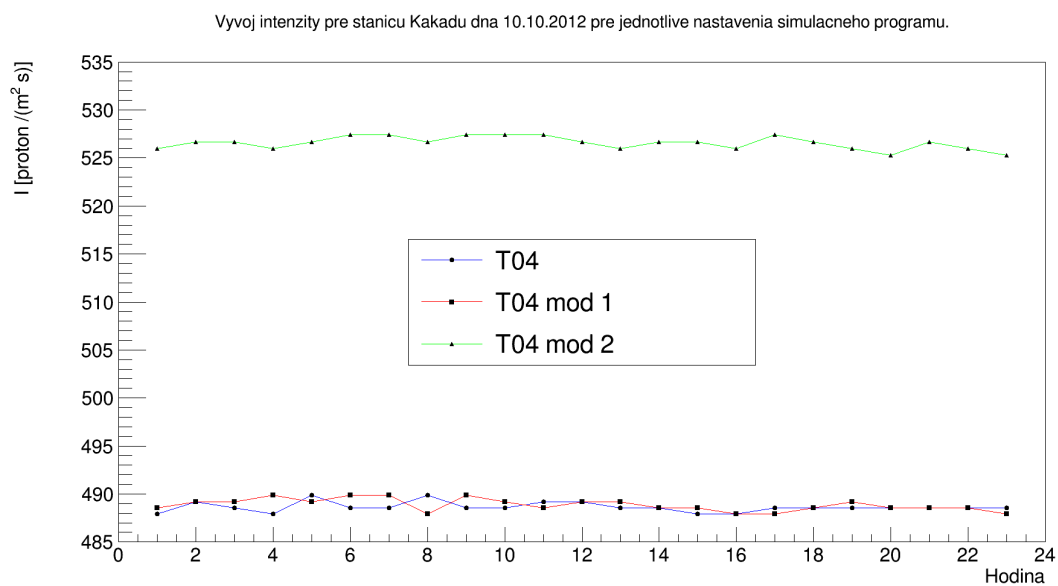
Obr. B.58: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



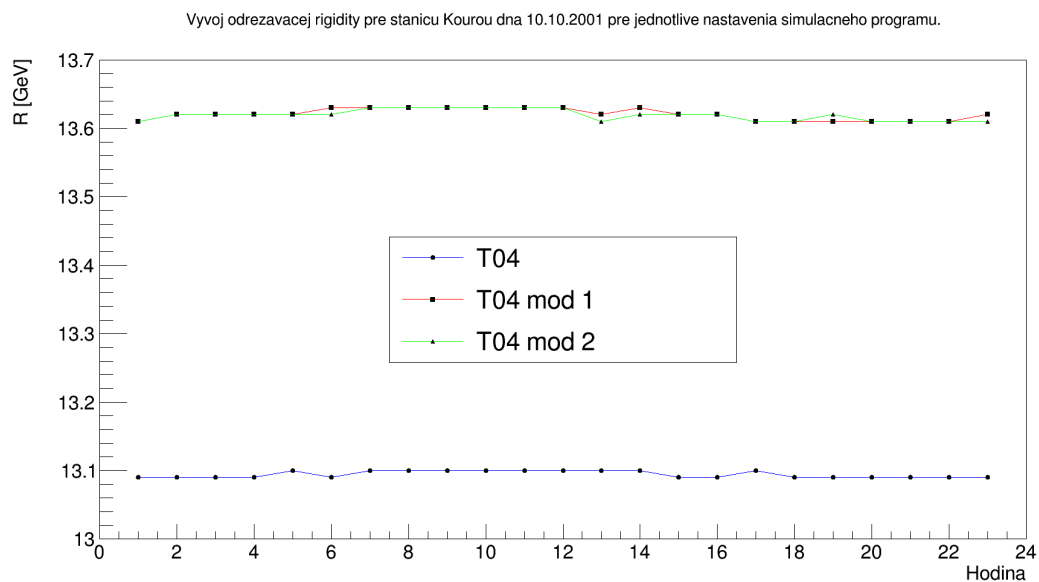
Obr. B.59: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



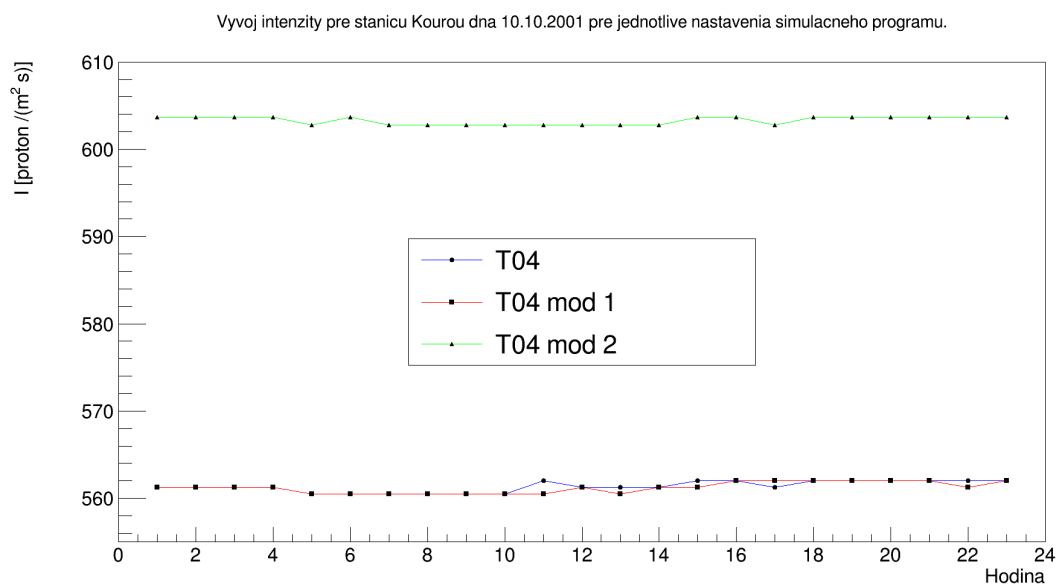
Obr. B.60: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



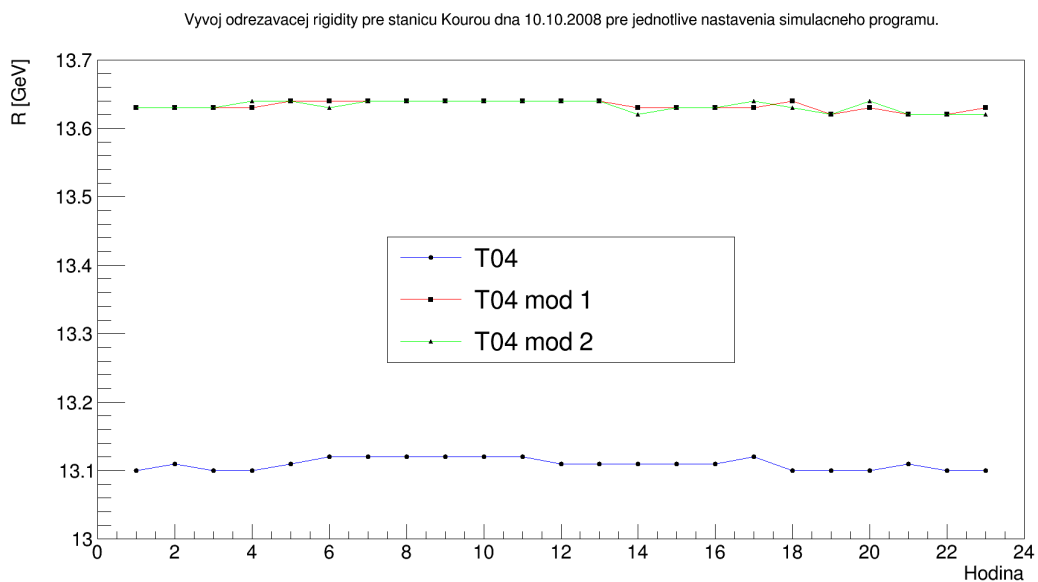
Obr. B.61: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kakadu dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



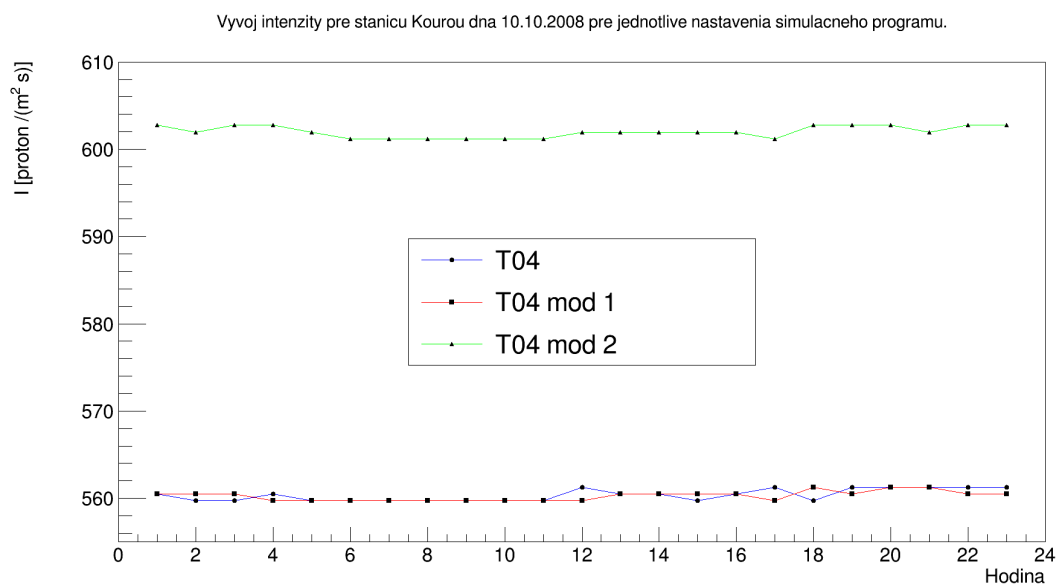
Obr. B.62: Vývoj efektívnej odrazávej rigidity pre stanicu Kourou dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



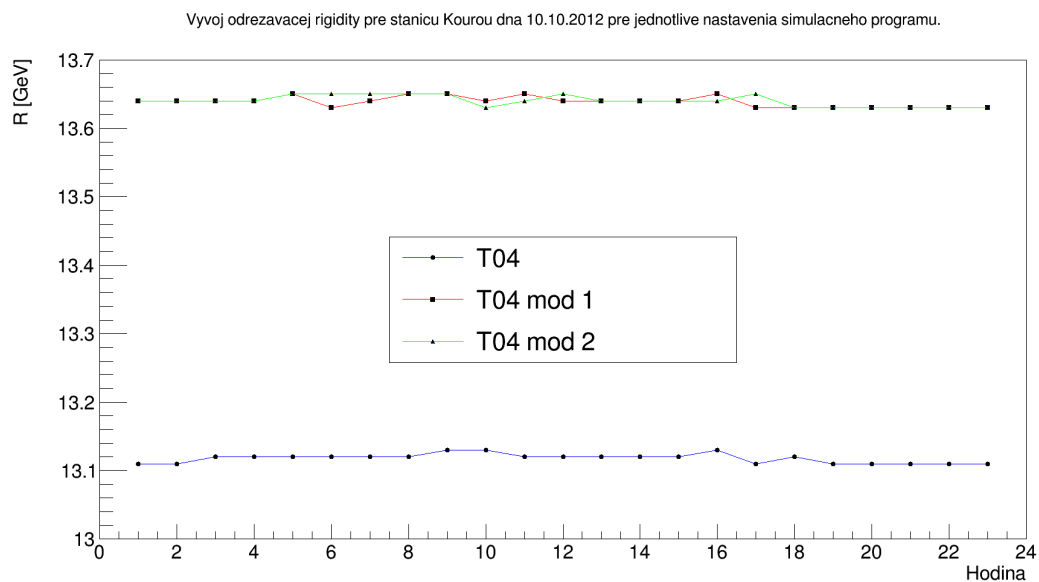
Obr. B.63: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kourou dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



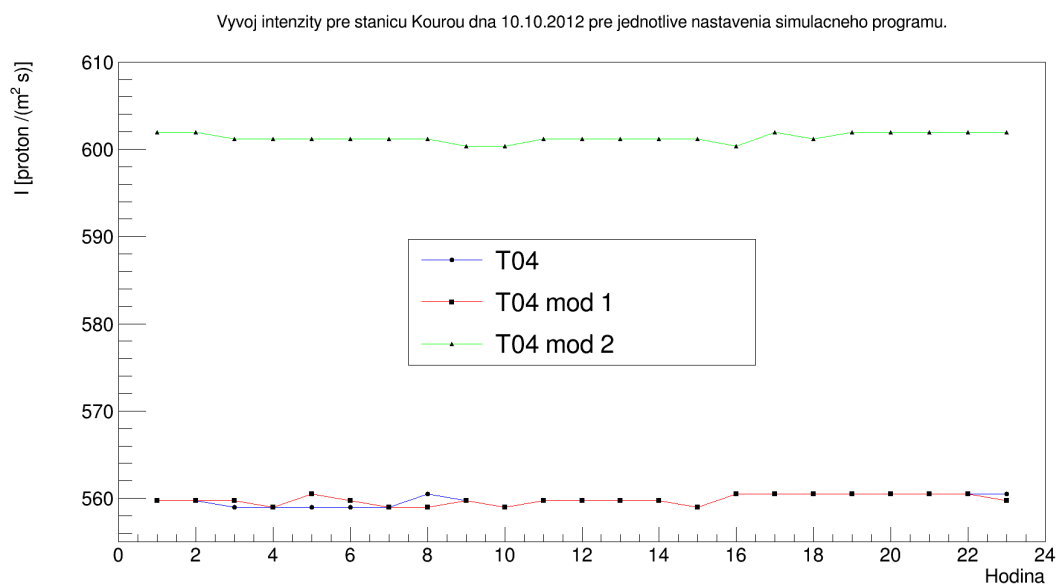
Obr. B.64: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kourou dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



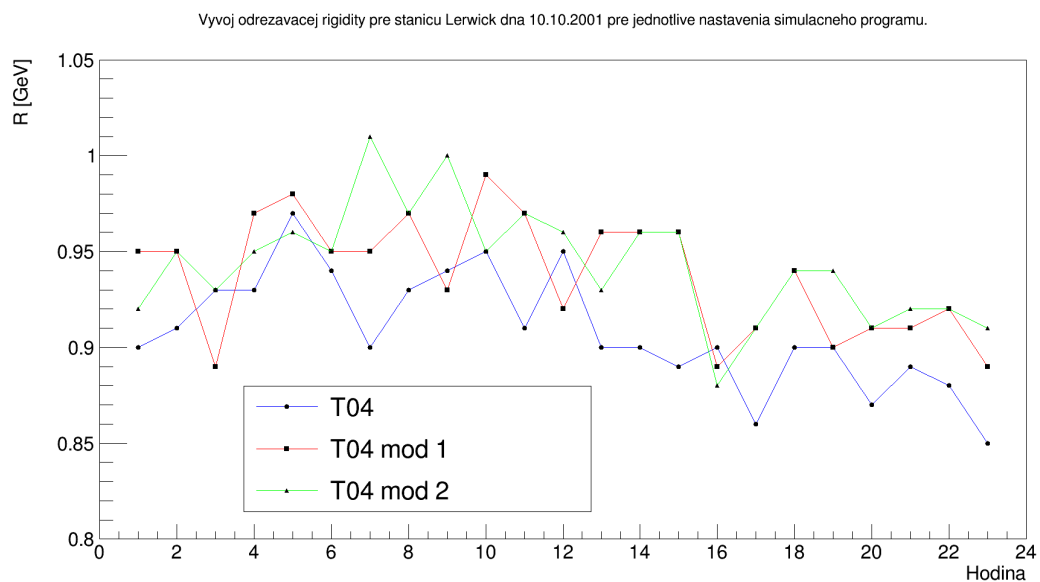
Obr. B.65: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kourou dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



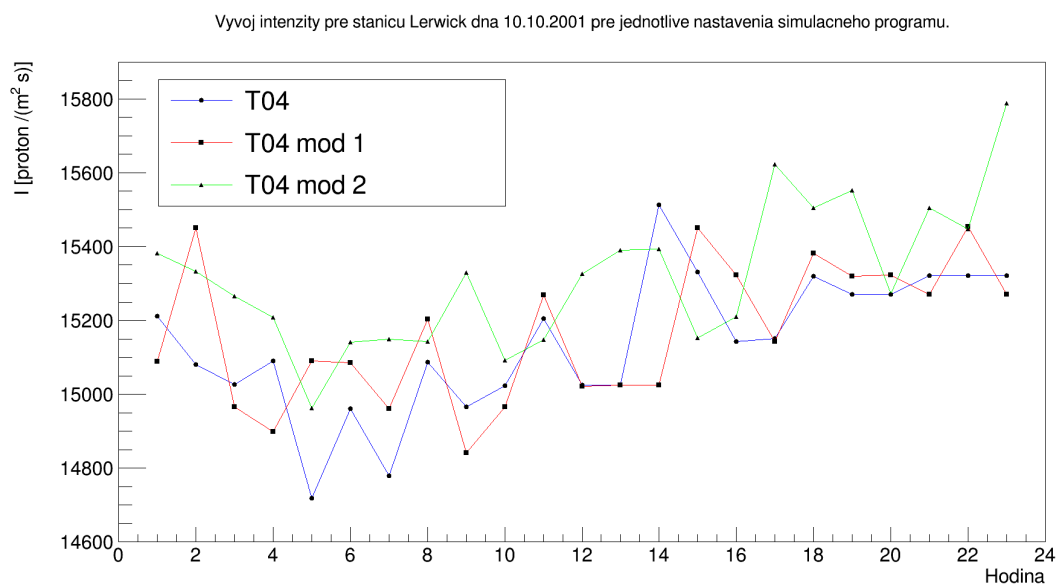
Obr. B.66: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Kourou dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



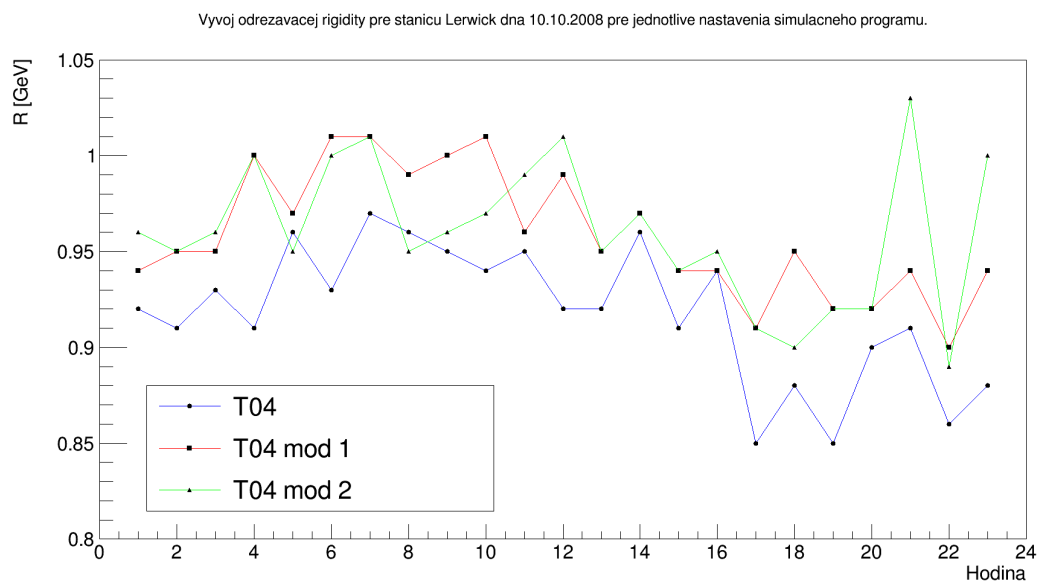
Obr. B.67: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Kourou dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



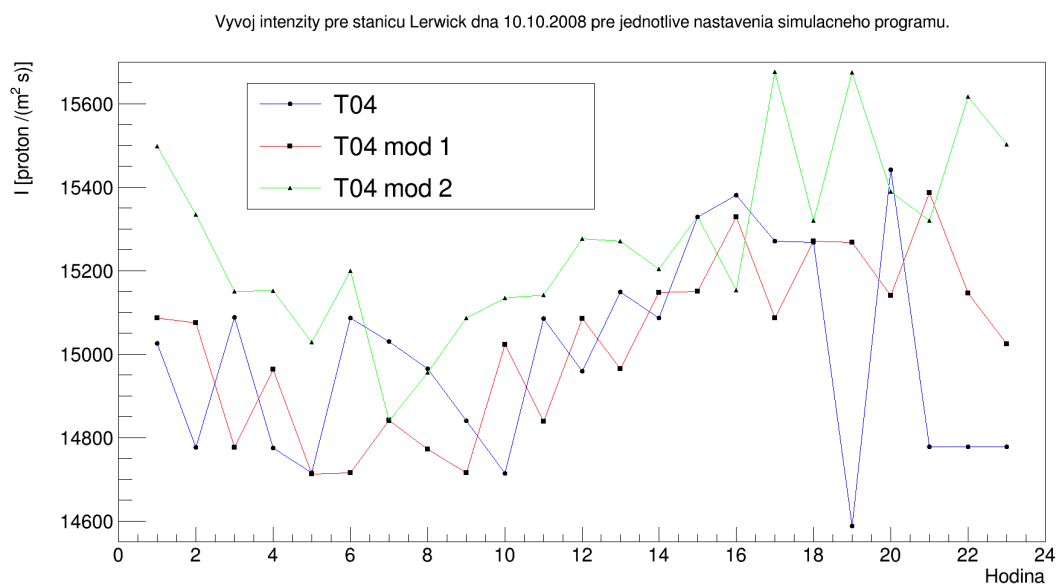
Obr. B.68: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



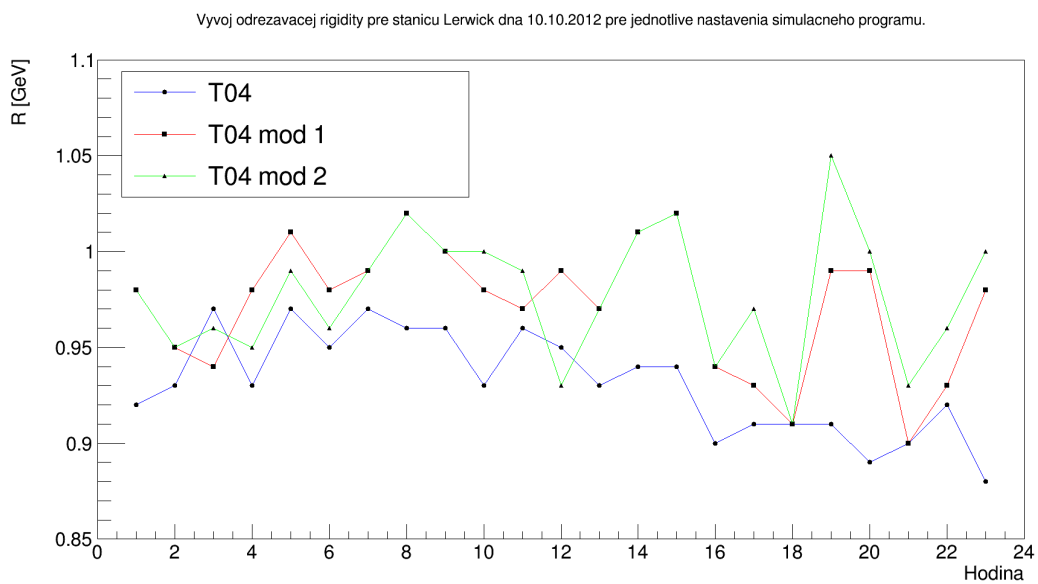
Obr. B.69: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



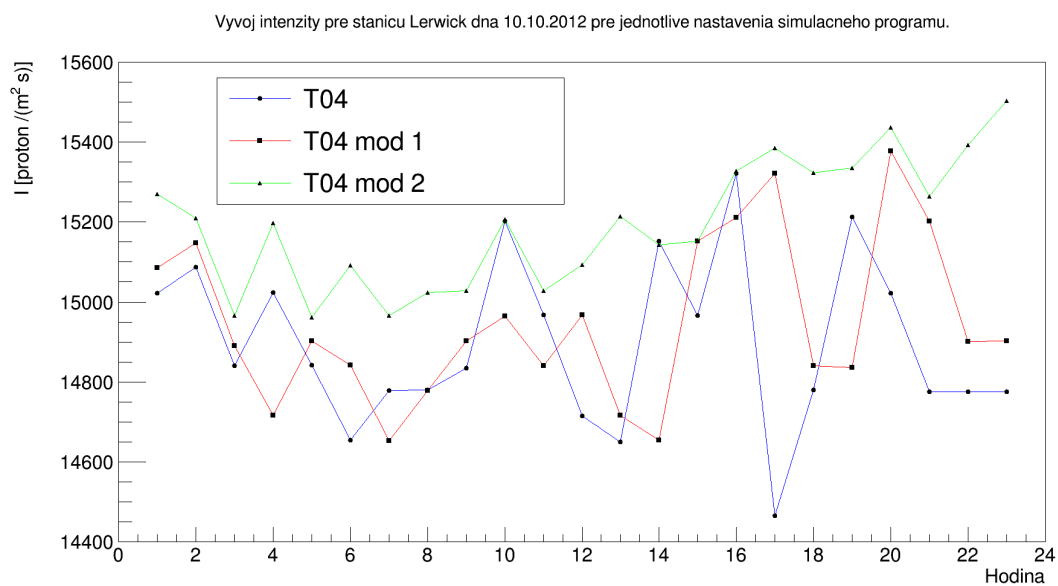
Obr. B.70: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



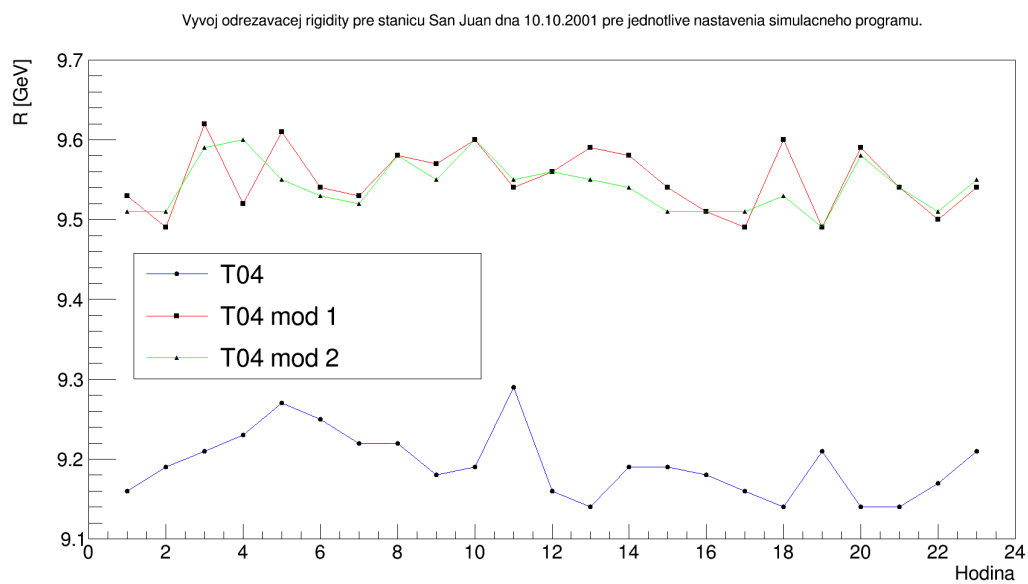
Obr. B.71: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



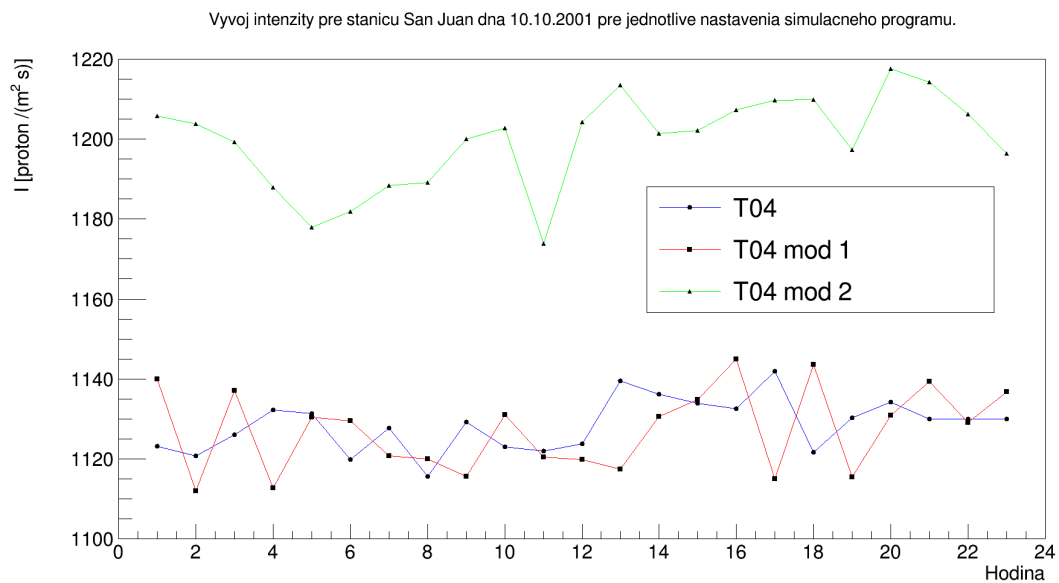
Obr. B.72: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



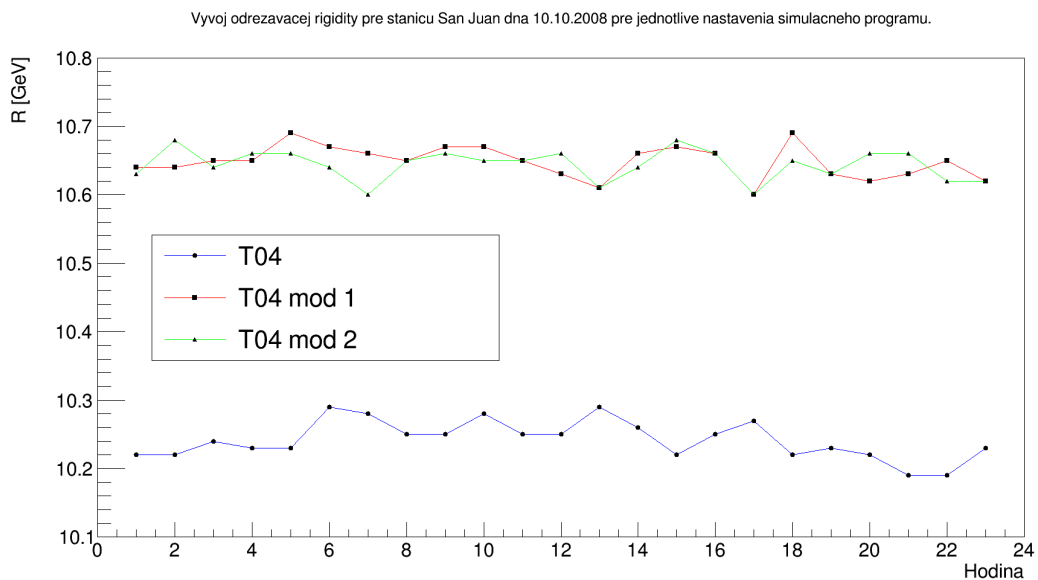
Obr. B.73: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Lerwick dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



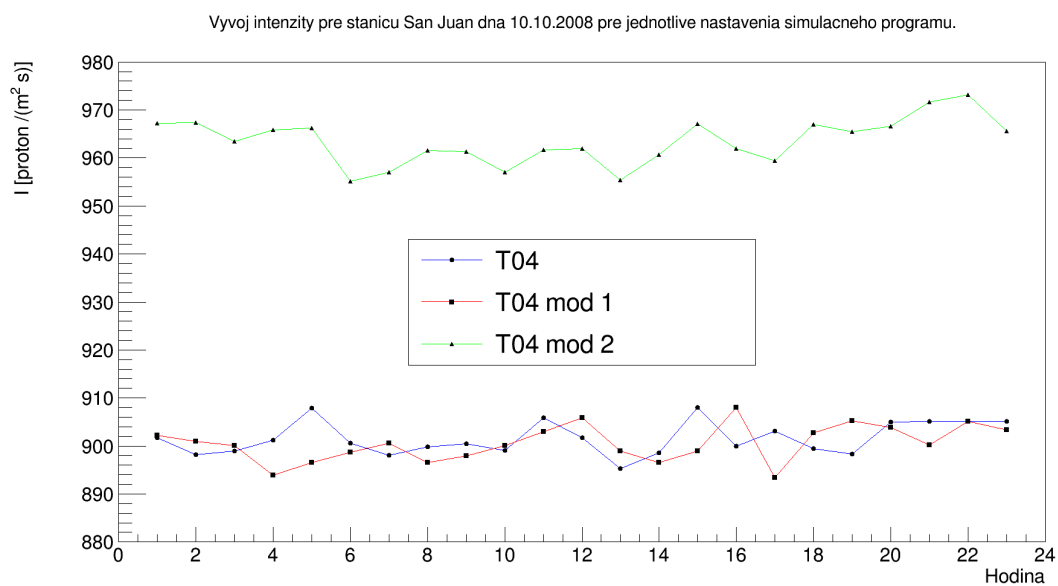
Obr. B.74: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu San Juan dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



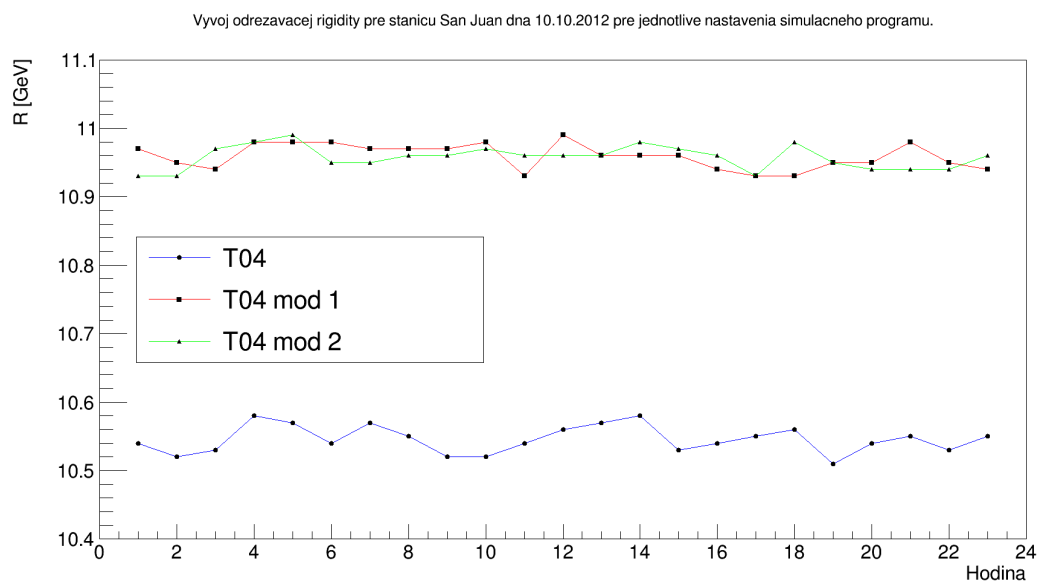
Obr. B.75: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu San Juan dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



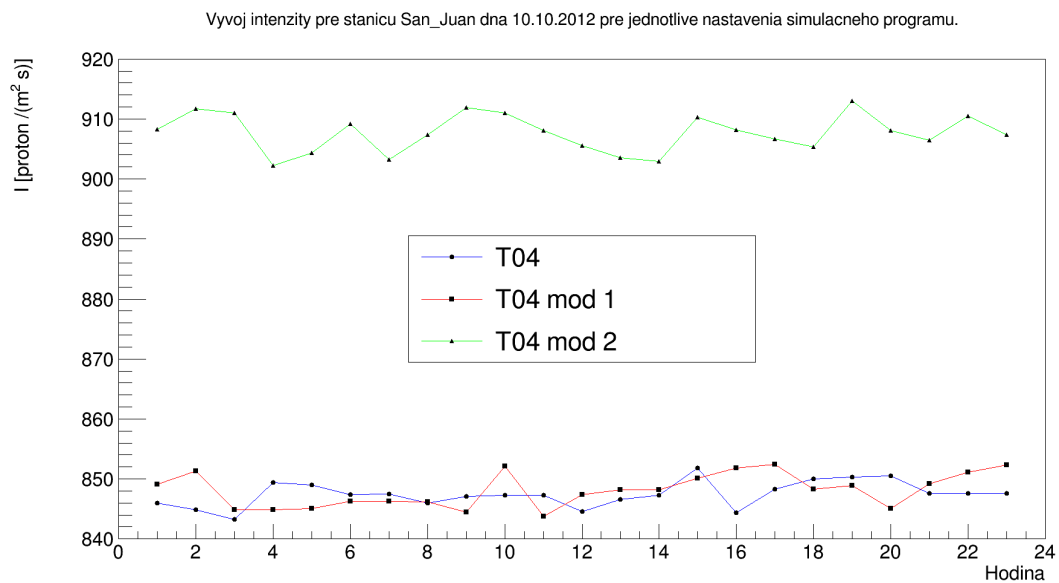
Obr. B.76: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu San Juan dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



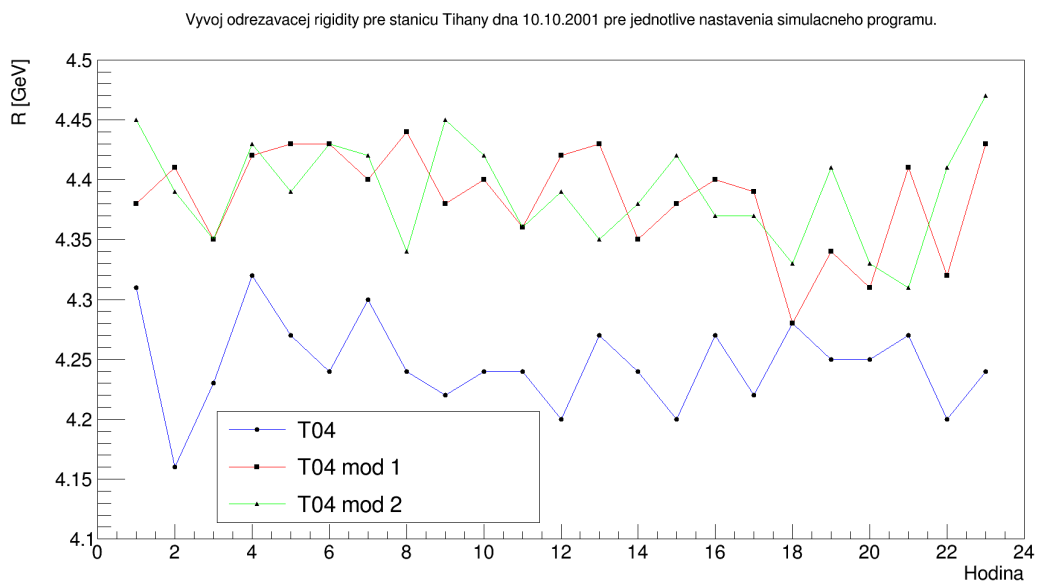
Obr. B.77: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu San Juan dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



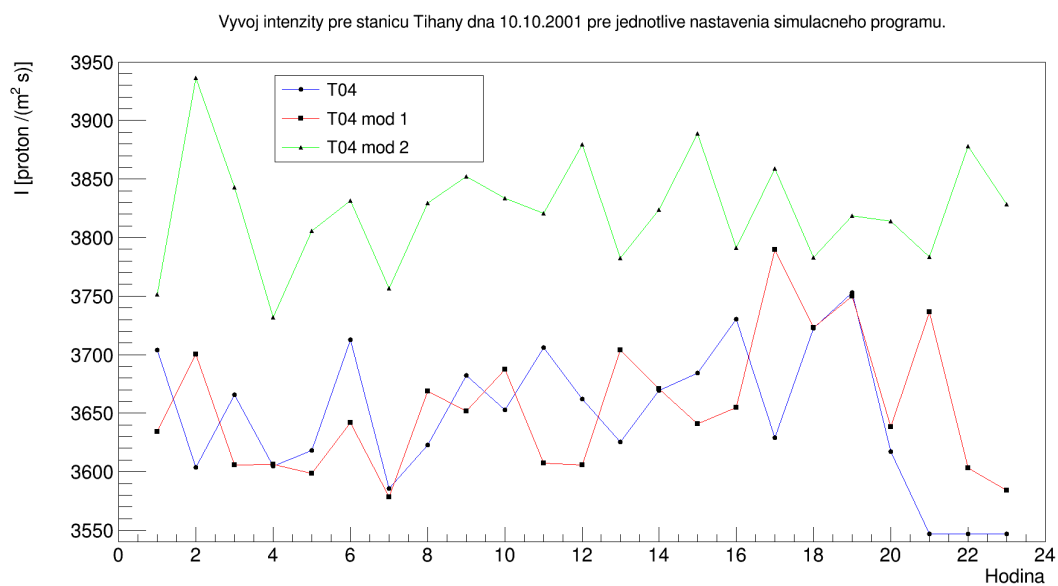
Obr. B.78: Vývoj efektívnej odrazávej rigidity pre stanicu San Juan dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



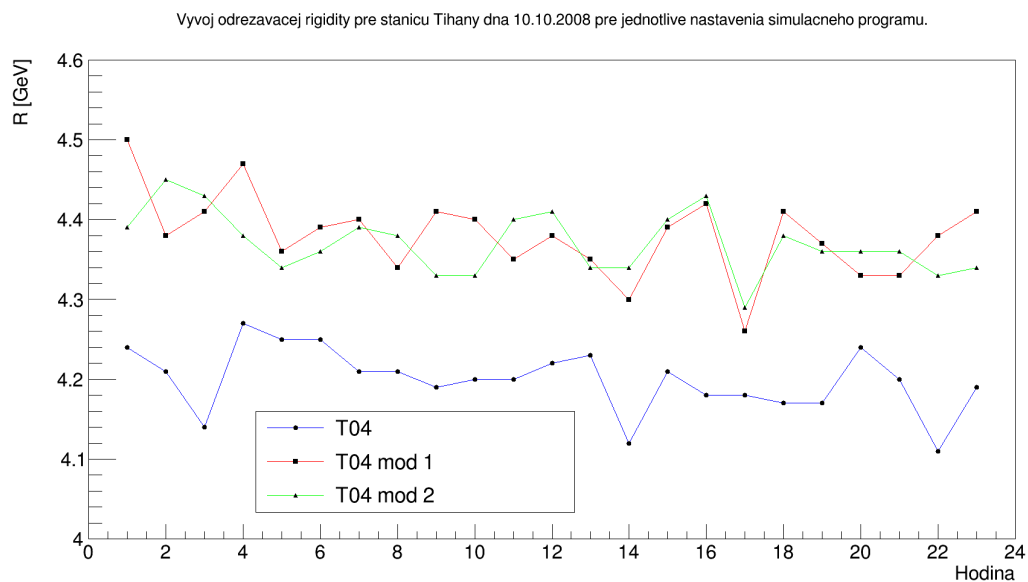
Obr. B.79: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu San Juan dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



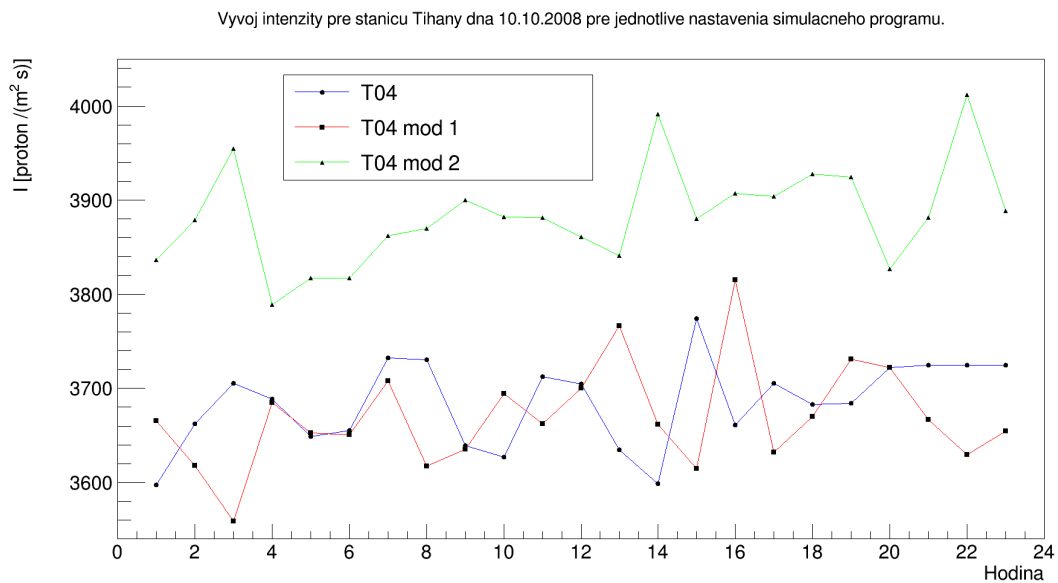
Obr. B.80: Vývoj efektívnej odrazávej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



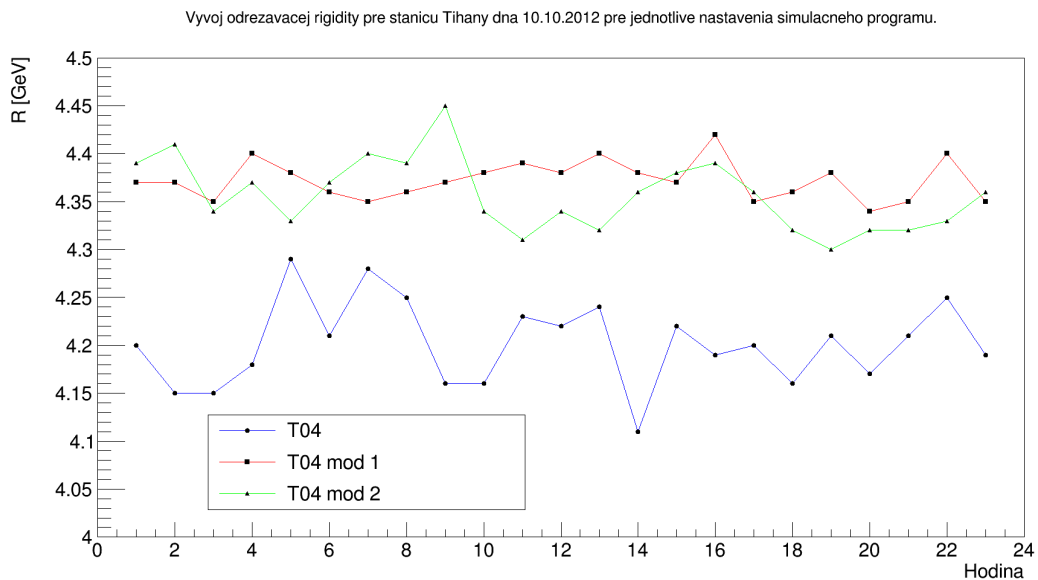
Obr. B.81: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2001 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



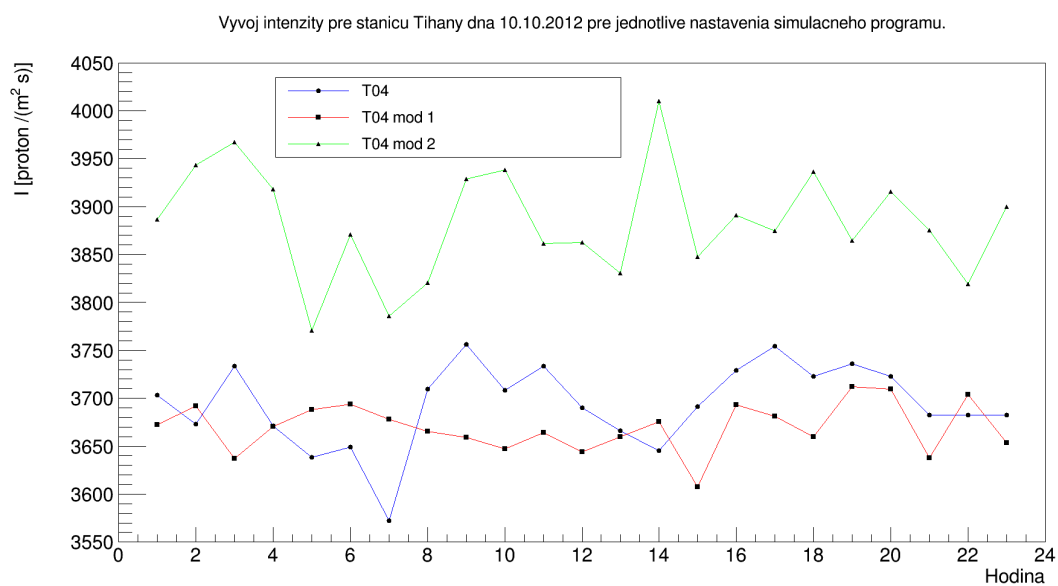
Obr. B.82: Vývoj efektívnej odrazávacej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



Obr. B.83: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2008 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



Obr. B.84: Vývoj efektívnej odrazávej rigidity pre stanicu Tihany dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.



Obr. B.85: Vývoj celkovej intenzity kozmického žiarenia pre stanicu Tihany dňa 10.10.2012 pre jednotlivé modulácie simulačného programu.