

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 02 Fyzika

**Vliv magnetického pole Země na nabitě
částice pohybující se v jeho dosahu**

Influence of Earth's magnetic field
on charged particles moving in its range

Autor: **Jan Jurica**

Škola: Gymnázium, Pardubice, Dašická 1083

Kraj: Pardubický kraj

Konzultant: RNDr. Vladimír Vícha

Pardubice 2016

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Vladimíra Víchy a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v seznamu vloženém v práci SOČ.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V dne

Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kdo mi pomohli při vypracování této SOČ. Můj vděk patří pracovníkům ÚTEF ČVUT v Praze, se kterými jsem mohl spolupracovat. Především bych chtěl poděkovat pánům doc. Ing. Carlosi Granjovi, Ph.D. a Ing. Štěpánovi Polanskému za jejich obětavou pomoc a čas, který mi věnovali. Dále bych chtěl poděkovat PhDr. Aleně Vomlelové a Martinovi Kaplanovi za připomínky z hlediska jazyka. Můj největší dík však patří RNDr. Vladimíru Víchovi, protože bez jeho obětavé pomoci by tato práce nikdy nemohla vzniknout.

Anotace

V této práci se snažím podrobně zmapovat geomagnetické pole a oblasti zvýšené radiace okolo Země pomocí dat z družice Proba-V. Data za celý rok 2015 mi poskytl ÚTEF ČVUT v Praze.

Během své práce jsem musel napsat počítačové programy, které mi umožnily data lépe zpracovávat a následně vytvářet grafické podoby map. Veškeré mapování bylo provedeno pro letovou hladinu družice okolo 820 km nad povrchem Země. Díky tomu jsem mohl vytvářet mapy jednotlivých veličin popisujících geomagnetické pole pro různá časová období v roce 2015. Zkoumal jsem také vývoj geomagnetického pole v závislosti na čase a své výsledky jsem porovnával s teoreticky vypočtenými hodnotami. Provedl jsem i vlastní měření teslametrem při povrchu Země. Také jsem vytvářel mapy radiologických veličin (například dávkového příkonu). Zvýšenou pozornost jsem při tom věnoval časovým obdobím, kdy se v okolí Země projevoval vliv předchozí sluneční erupce.

Ve své práci jsem se tedy snažil prokázat, jaký vliv má geomagnetické pole na nabitě částice a naopak, jak tyto částice ovlivňují geomagnetické pole.

Klíčová slova: Geomagnetické pole, magnetická indukce, inklinace, sluneční vítr, ionizující záření, SATRAM, Timepix, Proba-V, mapování

Annotation

In this work I try to map the geomagnetic field and areas of increased radiation around the Earth using data from satellite Proba-V. IEAP CTU in Prague provided to me data for the entire year of 2015.

During my work, I had to write computer programs that make the processing of data easier and then create the maps in their graphical form. All mapping was done for flight level of the satellite about 820 km above Earth's surface. Thanks to that I was able to create maps of individual quantities describing geomagnetic field during different time periods in year 2015. I also examined the evolution of the magnetic field depending on time. Then I compared my results with theoretically calculated values and I performed the measurements with magnetometer on the ground. I also created maps of radiological quantities (eg. dose rate). Increased attention was paid to the period of time, when the influence of the previous solar flare was observed in the vicinity of the Earth.

To sum up, in my work I try to demonstrate the influence of the geomagnetic field on charged particles, and on the contrary, how these particles influence the geomagnetic field.

Key words: Geomagnetic field, magnetic induction, inclination, solar wind, ionizing radiation, SATRAM, Timepix, Proba-V, mapping

Obsah

Úvod.....	7
1 Teoretická část	8
1.1 Magnetické pole	8
1.1.1 Magnetické pole ideálního dipólu.....	8
1.1.2 Magnetické pole okolo vodiče	9
1.1.3 Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli	10
1.1.4 Hallův jev.....	11
1.1.5 Magnetické pole Země.....	12
1.2 Kosmické záření	16
1.3 Sluneční vítr	18
1.4 Družice Proba-V	19
2 Praktická část	21
2.1 Měření geomagnetického pole při povrchu Země.....	21
2.2 Měření geomagnetického pole a radiace na družici	23
2.3 Tvorba programu pro zpracování dat a map	25
3 Výsledky a diskuze	30
3.1 Legenda	30
3.2 Měření teslametrem Vernier.....	31
3.3 Základní popis geomagnetického pole	32
3.3.1 Magnetický rovník a severní magnetický pól	32
3.3.2 Mapy velikosti výsledné magnetické indukce	33
3.3.3 Mapy vertikální složky magnetické indukce	35
3.3.4 Mapy horizontální složky magnetické indukce	37
3.3.5 Mapy inklinace magnetické indukce.....	39
3.3.6 Grafy vývoje geomagnetických veličin v závislosti na čase.....	40

3.4	Mapy dávkového příkonu a počtu nabitých částic	44
3.4.1	Projev sluneční erupce v blízkosti Země	46
	Závěr	49
	Literatura a zdroje	50

Úvod

Již od útlého věku se zajímám o vesmír a mým velkým snem je stát se astronautem. V roce 2014 jsem se proto přihlásil do projektu Expedice Mars. Ta umožňuje vybrané skupině studentů vyzkoušet si simulátory pro výcvik astronautů. V zimě 2015 jsem se prostřednictvím Expedice Mars stal součástí pětičlenné posádky nejdelšího studentského simulovaného letu do vesmíru. Během celého ročníku jsem také poznal spoustu nových lidí s podobnými zájmy a zapálením pro vědu, kteří již mají zkušenost se SOČ nebo se na SOČ chystají. Nejen z tohoto důvodu jsem se rozhodl začít pracovat na své vlastní práci a zaměřit se na nástrahy, které nám může přinést cestování do vesmíru.

Do povědomí lidí se již před delší dobou dostaly pojmy kosmické záření a sluneční vítr. Podrobně se jim budu věnovat dále ve své práci. Obecně jsou to ionizující částice o vysoké energii a relativně velké rychlosti, které k Zemi neustále přilétávají z okolního vesmíru. Jejich působení na člověka i na ostatní živé organismy může mít negativní účinky, protože nejsme přizpůsobeni pro život v oblastech s vysokým ionizujícím zářením.

Avšak lidé na Zemi žít mohou. Jsme zde totiž chráněni rozsáhlým magnetickým polem Země, které sahá několik desítek tisíc kilometrů daleko, a u povrchu hustou atmosférou. Tento dvousložkový „štít“ dokáže absorbovat či odchýlit téměř veškeré nebezpečné záření ze Slunce i ze vzdáleného kosmu.

I přestože žijeme na povrchu Země, kde se relativně nemusíme bát nebezpečného záření z kosmu, je žádoucí se touto problematikou zabývat. Částice slunečního větru zachycené magnetickým polem Země se zde hromadí na určitých místech. Tyto oblasti je důležité mít zmapované kvůli bezpečnému provozu satelitů i například pro zachování zdraví posádek na Mezinárodní vesmírné stanici (ISS). Kosmické záření navíc přichází z celého vesmíru, a proto chceme-li začít v budoucnu podnikat daleké cesty na jiné planety (tedy mimo prostor magnetického pole Země), musíme nejdříve zajistit komplexnější způsob ochrany jak lidských životů, tak i elektronických zařízení.

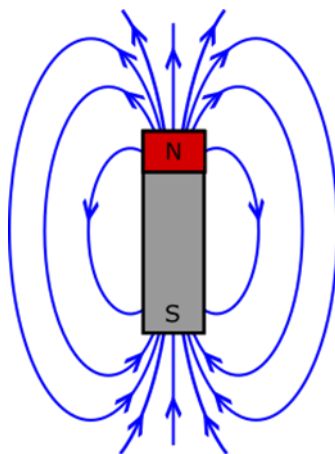
1 Teoretická část

1.1 Magnetické pole

Podle [1] je definicí magnetického pole: „Magnetické pole je druh silového pole, které vytváří vodič s proudem, pohybující se částice nebo těleso s elektrickým nábojem, zmagnetované těleso (např. magnet) a proměnné elektrické pole.“ Důkazem existence magnetického pole je například zorientování stříčky kompasu (malý permanentní magnet) po jejím předchozím vychýlení. Magnetické pole magnetů a vodičů s proudem můžeme naznačit pomocí magnetických indukčních čar, což jsou prostorově orientované křivky, jejichž tečny v daném bodě mají směr miniaturní magnetky umístěné v tomto bodě. Hlavní kvantitativní veličinou popisující magnetické pole je magnetická indukce \vec{B} . Magnetická indukce má jednotku tesla (značka T) a v daném bodě magnetického pole má směr ve směru tečny k indukční čáře.

1.1.1 Magnetické pole ideálního dipólu

Nejjednodušší popis magnetického pole můžeme ukázat pomocí ideálního tyčového magnetu, který má na jednom konci severní a na druhém jižní magnetický pól. Neboli je tento tyčový magnet magnetickým dipólem. Magnetické indukční čáry vystupují z jeho severního pólu a následně vstupují do pólu jižního. Magnetické pole je polem vírovým, a proto tvoří magnetické indukční čáry uzavřené smyčky, což také vysvětluje jejich směr uvnitř magnetu, kde směřují naopak od jižního k severnímu magnetickému pólu. Magnetické pole v okolí tyčového magnetu je naznačeno na Obr. 1.



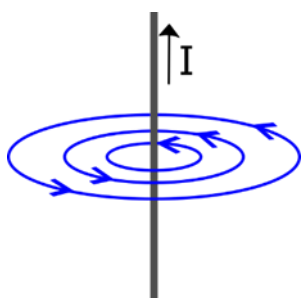
Obr. 1 Magnetické pole dipólu

1.1.2 Magnetické pole okolo vodiče

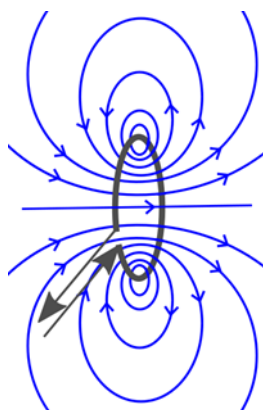
Dánský fyzik H. Ch. Ørsted provedl roku 1820 pokus, kdy postupně umístil magnetku nad a pod vodič s proudem orientovaný severojižním směrem. Magnetka se působením magnetického pole vychýlila kolmo na vodič. Tímto pokusem bylo potvrzeno, že okolo vodiče, jímž prochází elektrický proud, vzniká magnetické pole. Jeho magnetická indukce je přímo úměrná velikosti procházejícího proudu a nepřímo úměrná vzdálenosti od vodiče.

Pokusem se nechal inspirovat anglický vědec Michael Faraday, kterému se po mnoha pokusech s cívkami podařilo roku 1831 vyslovit zákon elektromagnetické indukce, který zní: „Změnou magnetického pole v okolí cívky se v cívce indukuje elektrické napětí a v uzavřeném obvodu prochází indukovaný elektrický proud.“ Směr proudu se určuje na základě Lenzova zákona. Na principu elektromagnetické indukce jsou generátory v elektrárnách schopny vyrábět střídavé elektrické napětí.

Magnetické indukční čáry u přímého vodiče zauímají tvar kružnic rozmístěných v rovinách kolmých k vodiči, které mají střed v místě průchodu vodiče těmito rovinami. Směr proudu udává orientaci čar, kterou můžeme určit pomocí Ampérova pravidla pravé ruky (Obr. 3). Obdobně můžeme znázornit i magnetické pole vodiče s proudem ve tvaru závitů (Obr. 2).

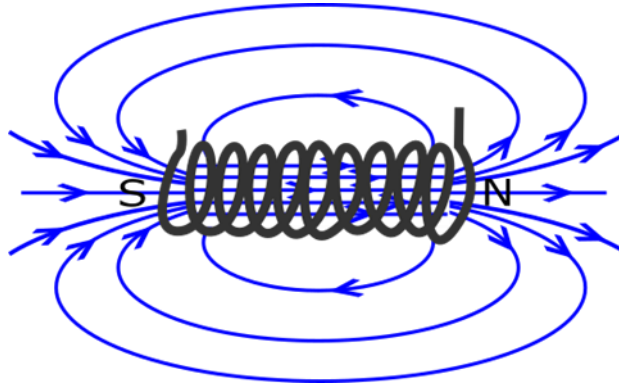


Obr. 3 Přímý vodič s magnetickým polem



Obr. 2 Magnetické pole okolo závitů

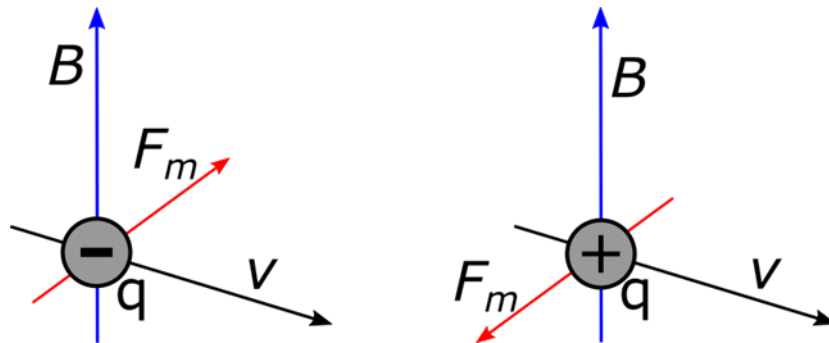
Solenoid je cívka s velkým počtem závitů, jejíž průměr je mnohonásobně menší než délka. Uvnitř solenoidu jsou pak magnetické indukční čáry rovnoběžné s jeho podélnou osou. Je zde tedy homogenní magnetické pole. Vnější magnetické pole cívky vypadá podobně jako pole tyčového magnetu, jak je znázorněno na Obr. 4.



Obr. 4 Magnetické pole solenoidu

1.1.3 Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli

Na částici s nábojem působí v magnetickém poli magnetická síla F_m , která je kolmá na směr magnetické indukce a na směr vektoru rychlosti částice. Orientace F_m závisí také na polaritě náboje částice. Vše je postupně naznačeno na Obr. 5.



Obr. 5 Směr magnetické síly působící na částice s nábojem

Na částici s nábojem q , která letí rychlostí v kolmo na magnetickou indukci B , působí magnetická síla F_m , jejíž velikost lze vyjádřit vztahem:

$$F_m = Bqv. \quad (1)$$

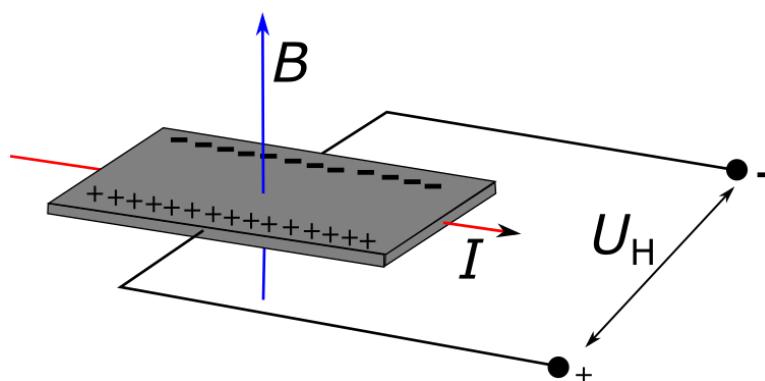
F_m tedy zakřivuje trajektorii částice a působí jako dostředivá síla. Částice o hmotnosti m se následně pohybuje po kružnici o poloměru r , který se vypočítá ze vztahu:

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (2)$$

Tohoto zakřivování trajektorie částice se využívá v řadě zařízení od televizních CRT obrazovek po různé druhy urychlovačů částic.

1.1.4 Hallův jev

Působení magnetického pole na částice s nábojem lze také dobře vysvětlit tzv. Hallovým jevem. Destička z kovu nebo polovodiče, kterou prochází elektrický proud, je umístěná v homogenním magnetickém poli. Působením F_m se volné částice s nábojem postupně přemísťují k jedné boční stěně destičky, což má za následek vznik malého Hallova napětí (U_H) mezi bočními stěnami destičky. Schématické znázornění Hallova jevu je na Obr. 6. Tohoto jevu se využívá například v přístrojích pro měření velikosti magnetické indukce neboli teslametrech, se kterými jsem pracoval během své práce.

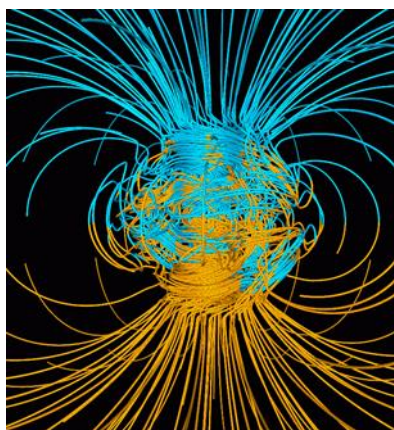


Obr. 6 Schématické znázornění Hallova jevu

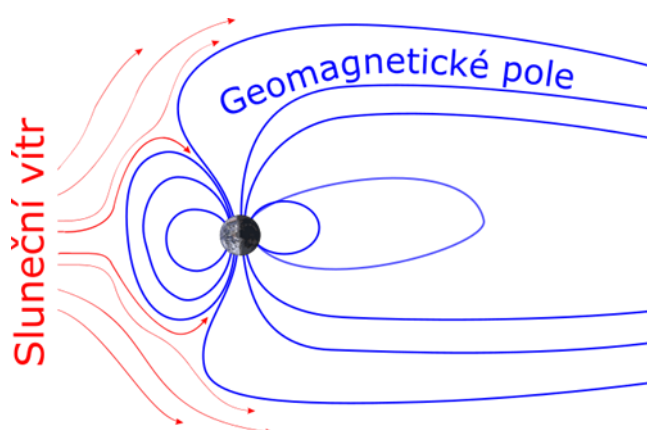
1.1.5 Magnetické pole Země

Magnetické pole Země neboli geomagnetické pole je oblast působení magnetické síly okolo Země, která sahá desítky tisíc kilometrů daleko od planety. Velikost magnetické indukce na zemském povrchu se pohybuje v řádu desítek mikrotesla, přičemž směr i velikost závisí na zeměpisných souřadnicích měřeného místa.

Popis vzniku magnetického pole Země není zdaleka jednoduchý. Na celkovém rozložení geomagnetického pole se podílí několik činitelů, kterými bych se chtěl postupně zabývat. Hlavní zdrojem zemského magnetického pole se zabývá tzv. teorie geodynama. Ve středu Země se nachází vnitřní (tuhé) jádro tvořené převážně ze železa, které je i přes vysoké teploty (až 6 000 K) v tuhém stavu, což je způsobeno vysokým tlakem okolo 340 GPa. Vnitřní jádro sahá přibližně do 1 220 km od středu Země. Okolo vnitřního jádra je vnější (tekuté) jádro, které je opět tvořeno převážně ze železa (případně niklu), ale nachází se zde také další lehčí prvky, nejspíše křemík a síra. Teplota vnějšího jádra se pohybuje od 4 300 K až po teplotu vnitřního jádra a tlak zde působící je také nižší. Tekutá struktura vnějšího jádra umožňuje konvektivní pohyb částic, který je vlastně důsledkem Archimédova zákona. V převážné míře je to způsobeno tuhnutím vnějšího tekutého jádra na povrchu vnitřního jádra, které se tak každý rok zvětší asi o 1 mm. Na povrchu vnitřního jádra tuhne ale pouze těžká frakce tekutého jádra (železo, případně nikl). Ta lehčí frakce (křemík a síra) netuhne, a protože se nachází v oblasti s vyšší hustotou, je díky Archimédovu zákonu vytlačována vzhůru. Konvekcí stoupá také část ohřáté těžší frakce. To způsobuje pohyb horké nabitě masy vytváří elektrický proud, který generuje geomagnetické pole. Pro tento složitý komplex dějů vědci začali používat název geodynamo. V roce 1995 vytvořili vědci Glatzmaier a Roberts počítačovou simulaci geodynamo (když se zabývali hlavně přepólování magnetického pole), kterou můžete vidět na Obr. 7.



Obr. 7 Počítačová simulace geodynamy

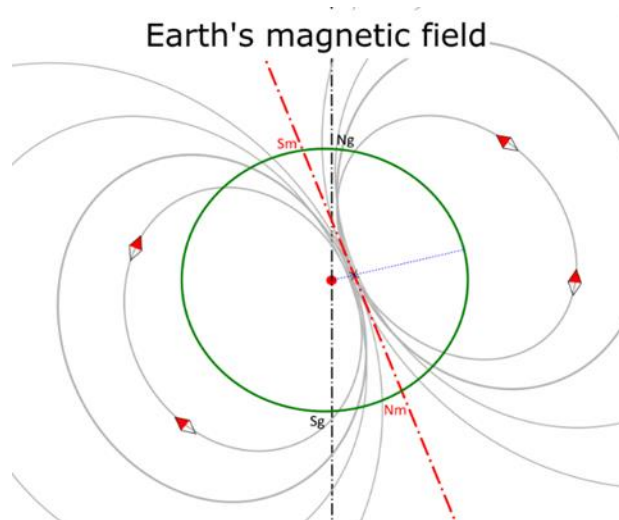


Obr. 8 Schéma působení slunečního větru na geomagnetické pole

Dalším činitelem vzniku geomagnetického pole je zbytkové magnetické pole, jež je po určitou dobu uložené v magnetických horninách, které se nacházejí v zemské kůře. Magnetické pole v nich nechalo v minulosti svou magnetickou stopu, kterou dnes mohou zkoumat paleomagnetologové. Díky tomu si vytváříme obrázek o tom, jak vypadalo geomagnetické pole v průběhu historie Země.

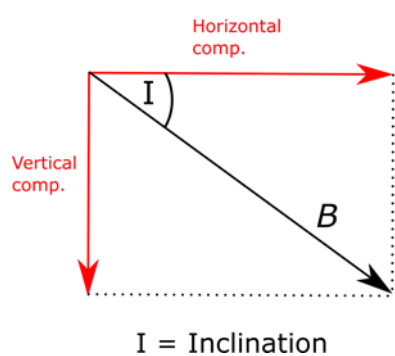
Jedním z externích činitelů ovlivňujících geomagnetické pole jsou elektrické proudy v magnetosféře, které vznikají interakcí slunečního větru s geomagnetickým polem. Tento „náraz“ slunečního větru na geomagnetické pole způsobuje jeho následné zploštění na straně přivrácené ke Slunci a naopak protažení na straně odvrácené, jak je naznačeno na Obr. 8.

Když si zjednodušíme geodynamo na ideální tyčový dipólový magnet a zanedbáme zbývající činitele, můžeme si na tomto modelu popsat základní vlastnosti současného geomagnetického pole. Osa geomagnetického pole je o 11 stupňů odkloněna od osy otáčení planety, což má za následek, že magnetické póly nejsou totožné s geografickými póly. Severní magnetický pól se v současnosti nachází na jižní polokouli, a naopak jižní magnetický je na severní polokouli. Může to však být i obráceně v závislosti na přepólování geodynamy, které již v minulosti Země několikrát proběhlo. Dále ani střed geomagnetického pole není totožný se středem naší planety, ale je asi o 500 km blíže k oblasti Malajsie (Obr. 9).

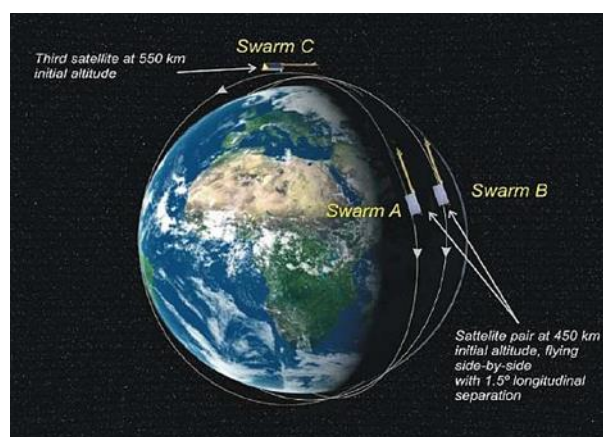


Obr. 9 Zjednodušené schéma magnetického pole Země

To, že je geomagnetické pole vytvářeno pohybem mas v zemském jádře, má za následek jeho proměnlivost v čase. Změnu magnetického pole v čase z dlouhodobého hlediska popisují tzv. sekulární variace magnetického pole. Ty se vyjadřují pomocí rozdílů mezi dvěma po sobě jdoucími průměrnými ročními hodnotami různých geomagnetických veličin. Například inklinací magnetického pole, tj. úhlem mezi směrem magnetické indukce a její horizontální složkou (Obr. 10), nebo velikostí magnetické indukce. Sekulární variace se projevují například změnou polohy magnetických pólů.

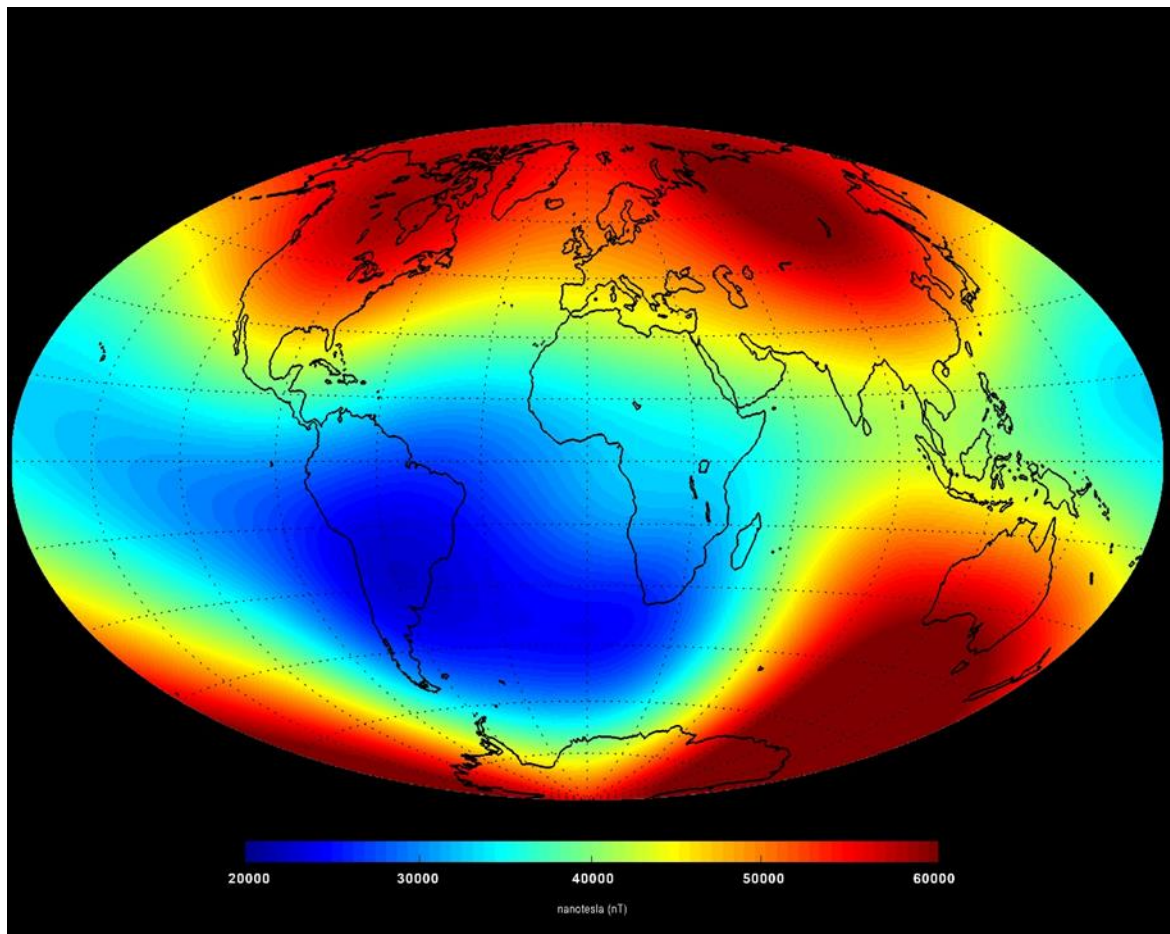


Obr. 10 Inklinace geomagnetického pole



Obr. 11 Trajektorie družic SWARM

Mapováním magnetického pole Země se v současné době zabývá mnoho družic, z nichž jsou asi nejznámější družice SWARM, které vypustila v listopadu 2013 Evropská kosmická agentura (ESA). Jedná se o tři družice pohybující se v oblasti LEO (Low-Earth Orbit) ve výšce 450 km a 500 km nad povrchem. Jejich trajektorie je naznačena na Obr. 11. V červnu 2014 ESA uveřejnila mapu velikosti magnetické indukce zaznamenané právě družicemi SWARM (Obr. 12).



Obr. 12 Mapa rozložení magnetické indukce geomagnetického pole z června 2014 vytvořená z dat naměřených družicemi SWARM

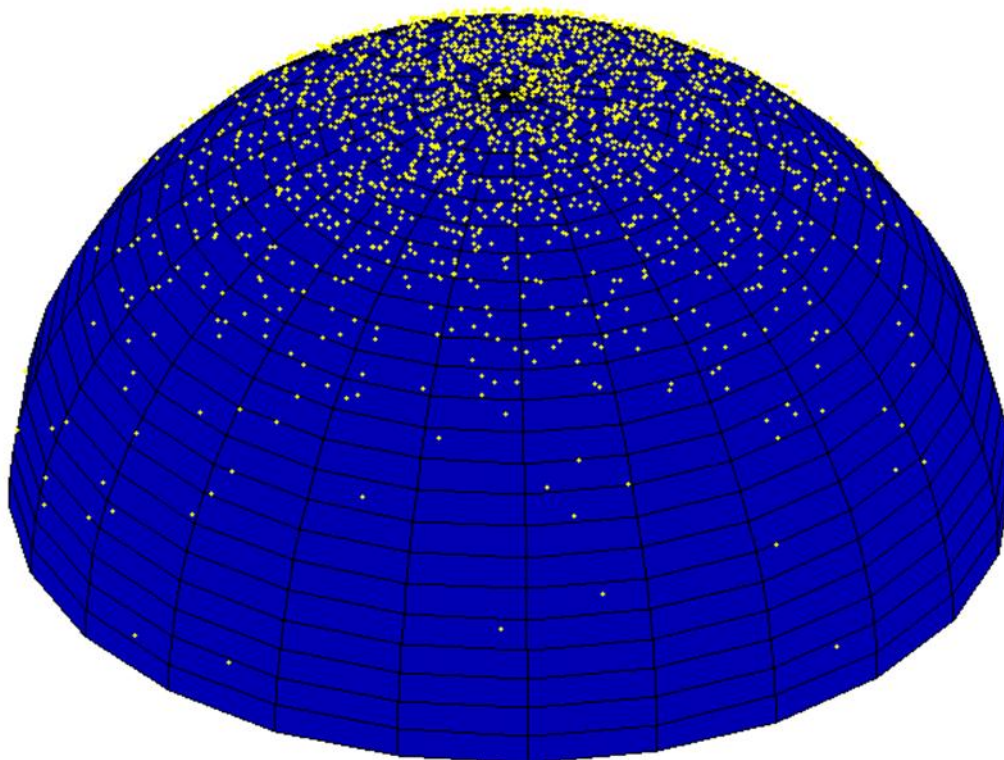
Ve své práci se zabývám vytvořením podobných map magnetických veličin z dat, které sbírá družice Proba-V (kapitola 1.4).

1.2 Kosmické záření

Kosmické záření tvoří proud vysoce energetických částic, přilétajících k nám ze všech stran vesmíru. Nejvíce jsou zde zastoupeny protony, v menší míře se vyskytují jádra helia a elektrony. Vzácně můžeme pozorovat nabitá jádra těžkých prvků (např. železo). Energie těchto částic jsou velmi vysoké, pohybují se v rozmezí od 10^9 eV do 10^{20} eV. Vědci zatím neznají přesnou odpověď na to, jakým způsobem jsou ve vesmíru částice urychlovány na tak vysoké energie, jaké mají právě částice kosmického záření.

Vysoké energie těchto částic způsobují, že kosmické záření prochází magnetickým polem Země jen s případným nepatrným zakřivením trajektorie, a přímo naráží na vrstvu částic zemské atmosféry. Po interakci těchto částic s jádry atmosférických plynů dochází ke vzniku tzv. sekundárních spršek kosmického záření, kde vznikají částice, které se rozpadají na další a další částice. V jedné spršce mohou vzniknout až statisíce částic a některé z nich (např. miony) lze zachytit až u zemského povrchu.

Tyto sekundární spršky měří například stanice CZELTA, která se nachází na střeše Gymnázia Pardubice, Dašická 1083. Tři scintilační detektory umístěné ve vrcholech rovnostranného trojúhelníku o straně 10 m pracují v koincidenčním režimu. Vzhledem ke zvolené velikosti trojúhelníku jsou archivovány pouze spršky o energiích přibližně 10^{14} eV a vyšších. Hodiny měřící s přesností 25 ps umožňují změřit zpoždění mezi zásahy jednotlivých detektorů a z toho následně určit směr příchodu spršky. Během jednoho dne zaznamená stanice na našem gymnáziu okolo 1 600 spršek kosmického záření o uvedených energiích. Na Obr. 13 vidíme směry příchodu spršek na polokouli oblohy (zobrazení je provedeno v horizontálních souřadnicích) za jeden den.



Obr. 13 Zobrazení směrů příchodu sekundárních spršek kosmického záření za jeden den. Data byla naměřena stanicí CZELTA na Gymnáziu Pardubice, obrázek byl převzat z [4].

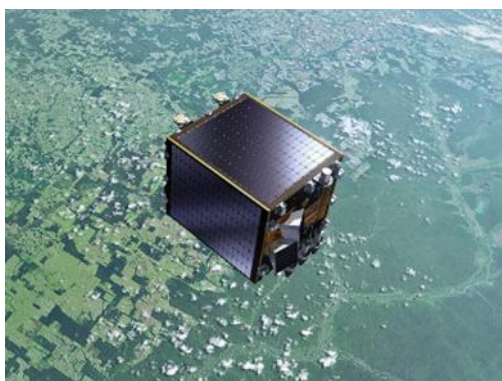
Z obrázku by se mohlo zdát, že nejvíce kosmického záření dopadá na Zemi z oblasti okolo zenitu, ale to není správná úvaha. Podobný obrázek lze sestavit i pro stanice na jiných místech planety, jimiž se zenit promítá na jiné místo na obloze. Detektory jsou totiž na povrchu Země a nad nimi je několik desítek kilometrů atmosféry, ve které po dopadu primárních částic sekundární spršky záření vznikají a také zanikají. Ve směrech nízko nad horizontem je atmosféra výrazně „tlustší“ než ve směru k zenitu, proto ve směrech blízkých horizontu se více spršek utlumí. Atmosféra nás významně chrání před dopadem ionizujících částic o energiích, které geomagnetické pole nedokáže výrazně odklonit.

1.3 Sluneční vítr

Sluneční vítr je proud nabitých částic, které k Zemi přichází ze Slunce. Tvoří ho elektrony, protony a částice alfa. Energie těchto částic jsou podstatně nižší než energie částic kosmického záření. A proto na tyto částice působí v blízkosti Země její magnetické pole, které je odklání od přímé trajektorie. Jejich hustota je pouze několik částic v metru krychlovém. Přicházející částice jsou zachyceny magnetickým polem Země a stáčí se podél indukčních čar. Nakonec se mohou hromadit v radiačních pásích, které mají nejspíše všechny planety s magnetosférou. Radiační pásy Země se nazývají podle svého objevitele Van Allenovy pásy. Po velkých slunečních erupcích (výronech koronární hmoty na Slunci) se intenzita slunečního větru zvyšuje. To se pak může následně projevit polárními zářemi (za normálních okolností je znají spíše jen severské národy v polárních oblastech), poruchou příjmu na krátkých radiových vlnách či kolísáním až výpadky na elektrické rozvodné síti.

1.4 Družice Proba-V

Družici Proba-V vypustila v květnu 2013 ESA za účelem studia zemské vegetace. Jedná se o malý satelit, který (jak jsem si mohl ověřit z poskytnutých dat) se pohybuje po téměř kruhové trajektorii s výškou od 810 km do 822 km nad povrchem Země a s oběžnou dobou 101 min. Společnost Czech Space Research Centre dostala možnost umístit na družici detektor Timepix, který zaznamenává radiaci. Na družici je umístěno zařízení SATRAM (The Space Application of Timepix Radiation Monitor), které obsahuje právě detektor Timepix, jenž dodal ÚTEF ČVUT v Praze. Detektory stejného typu se nacházejí uvnitř stanice ISS, kde fungují jako dozimetry pro posádku. Na rozdíl od těchto detektorů je SATRAM umístěn v otevřeném kosmickém prostoru. Data jsou z družice přenášena do ÚTEF ČVUT, jehož pracovníci data archivují a zpracovávají.



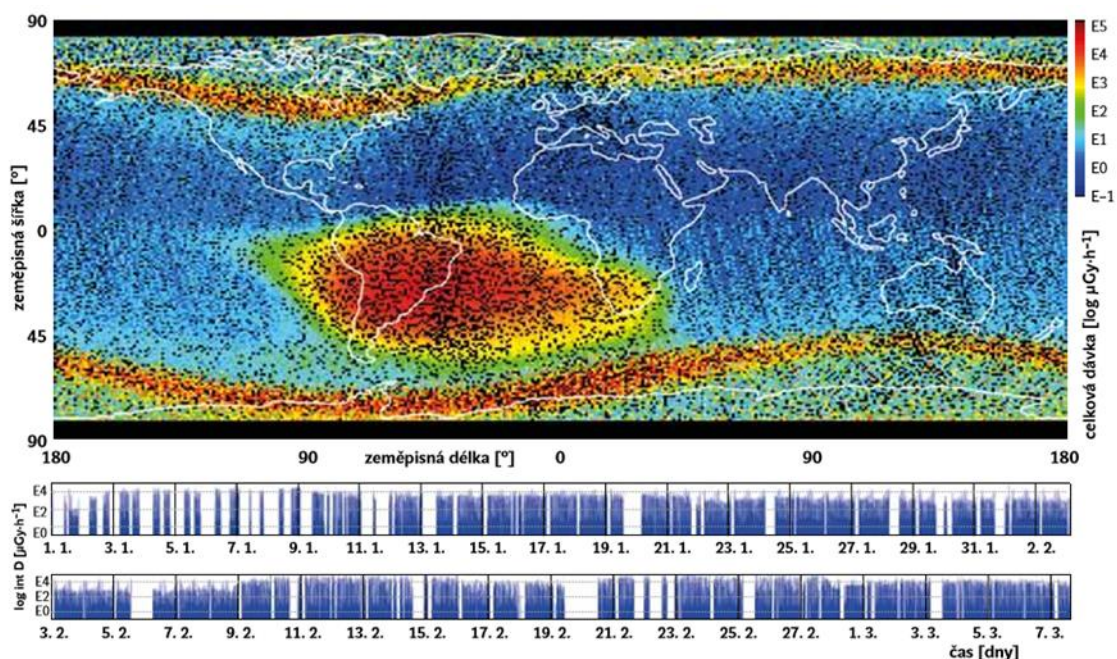
Obr. 15 Ilustrační obrázek družice Proba-V



Obr. 14 Zařízení SATRAM

Nejdůležitější součástí detektoru Timepix je křemíkový čip, který je rozdělen na 65 536 pixelů (256 x 256). Jeho rozměry jsou 14 x 14 x 0,3 mm. Jde o plošnou křemíkovou diodu zapojenou v závěrném směru. Nabité částice dopadají na čip a jejich energie je v něm plně nebo jen částečně absorbována. Tato pohlcená energie umožní vznik volného náboje, který je přitahován k čtecí elektrodě, čímž vzniká proudový impulz. Jednotlivé pixely mají vlastní elektroniku obsahující zesilovač, komparátor a čítač. Podle délky trvání impulzu se pro daný pixel vyhodnotí hodnota energie. Díky tomu jsou na těchto detektorech zaznamenávány také stopy jednotlivých částic a lze zjistit, pod jakým úhlem přilétaly částice na rovinu čipu a jaký byl například dávkový příkon těchto částic.

Dávkový příkon je jedna z radiologických veličin, která udává přírůstek dávky (což je poměr střední energie dE předané ionizujícím zářením látce o hmotnosti dm) za jednotku času. V prosinci 2014 byla v časopise Vesmír uveřejněna mapa dávkového příkonu, kterou vytvořili v ÚTEF ČVUT pomocí dat zaznamenaných družicí Proba-V (Obr. 16). Článek, k němuž mapa patří, se věnuje Jihoatlantické anomálii, která je na mapě dobře pozorovatelná.



Obr. 16 Mapa rozložení dávkového příkonu ve výšce letu družice Proba-V

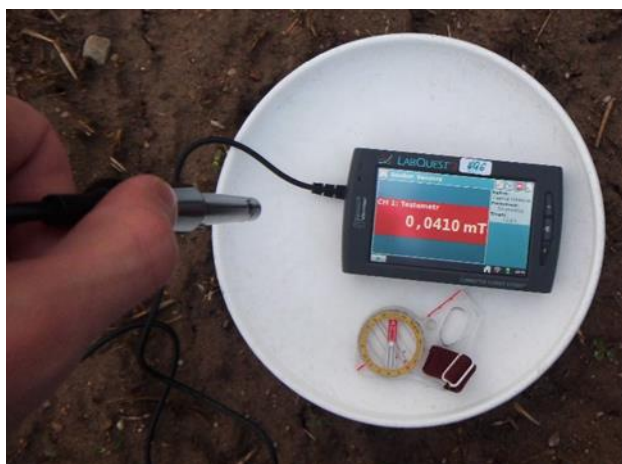
Výhodou družice Proba-V je, že jako satelit zaznamenávající pozemskou vegetaci musí být neustále stabilizován vůči zemskému povrchu. K tomu slouží na její palubě gyroskopy (reaction wheels) a stabilizátory magnetického momentu (magnetotorquers). Díky tomu by měla být družice jednou svou stranou neustále přikloněna k povrchu Země a druhou stále orientována ve směru letu. Na palubě družice se totiž nachází i několik teslametrů, které zaznamenávají tři různé hodnoty magnetické indukce, kterým se budu věnovat v kapitole 2.3.

Ve své práci jsem se rozhodl navázat na mapy a záznamy dávkového příkonu, rozšířit je o znalosti magnetického pole Země a pokusit se prokázat souvislost mezi magnetickým polem a radiačními pásy okolo Země. A proto mi byl umožněn přístup k datům družice Proba-V, které jsou archivované na ÚTEF ČVUT za celý rok 2015.

2 Praktická část

2.1 Měření geomagnetického pole při povrchu Země

Pro měření geomagnetického pole při povrchu Země mi byl naším gymnáziem zapůjčen přenosný datalogger LabQuest 2 od společnosti Vernier. K dataloggeru jsem také dostal připojitelný externí senzor Magnetic Field Sensor (neboli teslametr) od téhož výrobce. Tento teslametr využívá pro měření magnetické indukce Hallův jev (viz 1.1.4) a je měřena ta složka magnetické indukce, která je kolmá k bílé tečce vyznačené na konečné pohyblivé části teslametru. Senzor má dva přepínatelné rozsahy měření. První rozsah je $\pm 0,3$ mT s citlivostí $0,2 \mu\text{T}$, což je vhodné pro studium magnetického pole Země. Druhý rozsah $\pm 6,4$ mT s citlivostí $4 \mu\text{T}$ umožňuje podrobné zkoumání velikosti magnetické indukce v okolí permanentních magnetů a cívek. Během svých měření jsem tedy používal první citlivější rozsah.



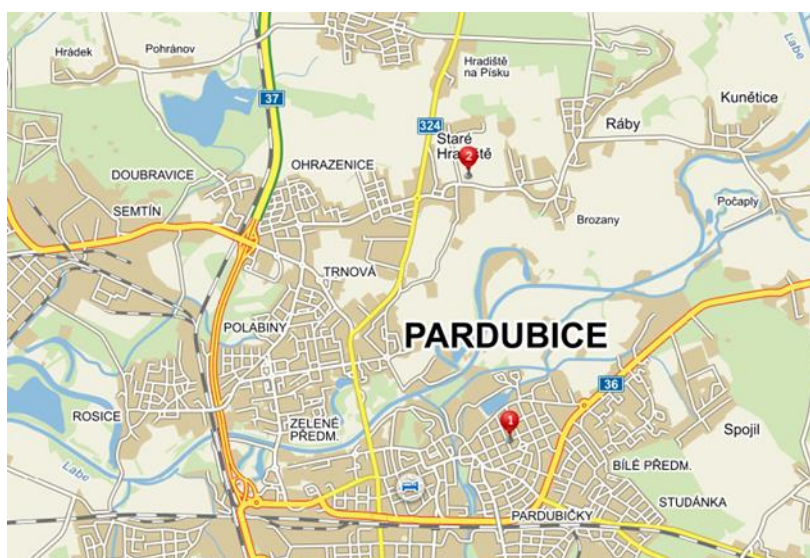
Obr. 18 Měření teslametrem ve vertikální poloze



Obr. 17 Měření teslametrem v horizontální poloze. Teslametr míří severojižním směrem (viz štrelka buzoly).

Senzor jsem postupně umístil do vertikální a horizontální polohy, abych tak mohl změřit jednotlivé složky magnetické indukce. Díky tomu jsem mohl spočítat celkovou velikost magnetické indukce i její inklinaci. Při měření jsem si uvědomoval, že se nacházím na severní polokouli, kde podle teorie mají indukční čáry směřovat k Zemi a směrem k jižnímu magnetickému pólu, tedy přibližně k severnímu geografickému pólu. Proto mi senzor při měření ve vertikální poloze směrem k zemi ukazoval kladné hodnoty, jak je naznačeno na Obr. 18. Při měření horizontální složky už to tak snadné není. Senzor se totiž musí umístit ve směru indukční čáry, aby ukazoval plnou hodnotu horizontální složky. Tento směr jsem si zjistil za pomoci buzoly, kterou jsem položil na vodorovnou podložku (Obr. 17). Následně jsem si směr ještě ověřil otáčením teslametru okolo jednoho jeho krajního bodu na vodorovné podložce. Ve směru, jímž ukazovala buzola, teslametr naměřil nejvyšší hodnoty.

V LabQuestu jsem nastavil desetisekundový nebo stosekundový časový interval jednotlivých měření, z nichž jsem poté vypočítal průměrné hodnoty pro daná místa. Svá měření jsem provedl na dvou různých místech, podle mapy na Obr. 19. První měření jsem provedl ve svém pokoji. Bylo to tedy v budově v centru města, kde by mohly být výsledky ovlivňovány magnetickými poli, která okolo sebe mají budovy se železnou konstrukcí nebo dráty s elektrickým proudem. Proto jsem druhé měření prováděl na poli za městem pod otevřenou oblohou, na mapě bod dva.



Obr. 19 Mapa míst, kde bylo provedeno měření s teslametrem Vernier

2.2 Měření geomagnetického pole a radiace na družici

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, naměřené hodnoty, které jsem během vytváření své práce používal, jsou zaznamenávané družicí Proba-V (více v kapitole 1.4). ÚTEF ČVUT v Praze mi poskytl přístup k datům za celý rok 2015. Během jednoho dne provede družice více jak 4 000 měření. Záznamy za jednotlivé dny jsou uloženy v několika souborech, z nichž byly pro mne klíčové velké *.txt soubory a menší *.dsc.

V *.txt souborech je uložen záznam energií absorbovaných v jednotlivých pixelech čipu Timepix v podobě dlouhé číselné matice, kde jsou jednotlivá měření oddělena #. Během konzultace v ÚTEF jsem se dozvěděl, že během letu muselo dojít k poškození části čipu, neboť několik pixelů v levém dolním rohu čipu neustále ukazuje maximální měřitelné energie. Započítání těchto pixelů by mělo za následek, že naměřené výsledky by byly zkreslené a velice nepřesné. Tento problém však na ÚTEF vyřešili zamaskováním poškozených pixelů.

Po konzultaci, kdy jsem na ÚTEF sdělil, že bych se chtěl ve své práci věnovat podrobněji také nabitým částicím, mi byl poskytnut nový soubor *.dat. Ten obsahuje data za červen 2015, kdy na Slunci proběhla jedna z větších erupcí, kterou byla schopna družice detekovat. V souboru *.dat je tabulka, která obsahuje přesné datum a čas měření, GPS souřadnice družice a hlavně dávkový příkon a hustotu toku částic (v našem případě počet částic na cm^2 za sekundu).

Druhý soubor *.dsc potom obsahuje všechna ostatní data, která jsou měřena na družici, jež má ÚTEF k dispozici. Jedná se o textový soubor. Jednotlivá měření jsou od sebe oddělena vodicím znakem, jímž je číslo měření pro určitý den. Konkrétní měření je pak tvořeno několika řádky formátovaného textu, kde jsou názvy jednotlivých typů dat, pod nimiž jsou už číselně vyjádřené naměřené hodnoty. Vše je pro přehlednost oddělováno prázdnými řádky. Klíčové pro mou práci byly záznamy o datu a čase (timestamp), GPS souřadnice družice (satellite position) a magnetické indukce (magnetic field strength). Na Obr. 20 je naznačen záznam z náhodně vybraného souboru *.dsc. Pro magnetickou indukci jsou zde uvedeny tři hodnoty, k jejichž významu se dostanu v kapitole 2.3.


```
[F0]
Type=i16 [X,C] width=256 height=256
"Timestamp" ("SATRAM timestamp"):
uchar[26]
2015-08-31 00:00:25.891311

"Internal temperature" ("Internal temperature level in deg. C [max, min]"):
float[2]
32.1384147054 28.3210538108

"Satellite position" ("Satellite position [R+h, long, lat]"):
float[3]
7204471.43051 -5.73875774676 -53.8618380742

"Satellite attitude" ("Satellite attitude quaternion of rotation from ECI to BOF"):
float[4]
-0.0223575123384 -0.294524021112 -0.355681084311 0.886705536745

"Magnetic field strength [B]" ("Magnetic B-field strength given in BOF coordinate frame"):
float[3]
9.99849953659e-06 -2.00264116917e-08 -1.8999714776e-05

"Acq time" ("Acquisition time [s]"):
double[1]
0.2

"ChipboardID" ("Medipix or chipboard ID"):
char[10]
C06-W0097

"Timepix clock" ("Timepix clock (in MHz)"):
double[1]
11.0592

"Start time" ("Acquisition start time"):
double[1]
```

Obr. 20 Naznačení záznamu z náhodně vybraného souboru *.dsc

2.3 Tvorba programu pro zpracování dat a map

Prvním úkolem mé práce bylo vymyslet způsob, jakým budu poskytnutá data z družice Proba-V zpracovávat. Nechal jsem se inspirovat mapou dávkového příkonu vytvořenou v ÚTEF (Obr. 16) a mapou magnetické indukce podle družic SWARM (Obr. 12). Rozhodl jsem se pro vytvoření svých vlastních map podle dat, která zaznamenala družice Proba-V ve své letové hladině okolo 820 km nad povrchem Země. Tím bych mohl potvrdit závěry, které ze svých map vyvodili v ESA a v ÚTEF, a případně je rozšířil o nové poznatky, jež bych tímto mapováním získal.

Pro psaní programu na zpracování dat jsem zvolil objektově orientovaný programovací jazyk Java. Všechny mapy, které jsou uvedené v kapitole 3, jsem vytvořil sám. Musel jsem proto napsat dva programy.

Jeden *.dsc soubor obsahuje tři až pět tisíc měření, které družice provede za jeden den, což nám dává necelých jeden a půl milionu měření pro jeden rok. Abych se během kalibrování svých map vyhnul vytváření velkých, datově velice náročných polí a ušetřil čas, který by program strávil výpočty, rozhodl jsem se nejprve předělat celou *.dsc souborovou databázi do své vlastní podoby. Proto jsem napsal první program, který mi z dat vytvořil novou souřadnicovou databázi, kde jsou data ukládána do tabulek v textových souborech. Přičemž každá tabulka náleží jednomu čtverečnému stupni nad povrchem Země. Tato databáze je tedy sestavena podle GPS souřadnic, nikoli podle času. Náhled části náhodně vybrané tabulky nové databáze můžete vidět na Obr. 21.

Date	TimeShort	MagFS(1)	MagFS(2)	MagFS(3)	R+h	Long	Lat	StartTime	AcqTime
08-02-15	8:01:50 AM	-1.08E-05	6.46E-06	-1.93E-05	7202270.075	37.95996785	-26.04932514	1423382510.00	0.001990741
12-02-15	8:38:31 PM	1.19E-05	-8.38E-07	-1.92E-05	7196856.034	37.35720869	-26.06413802	1423773511.00	20
12-02-15	8:38:29 PM	1.19E-05	-8.38E-07	-1.92E-05	7196856.034	37.35720869	-26.06413802	1423773509.00	0.2
17-02-15	8:03:23 AM	-1.07E-05	6.46E-06	-1.93E-05	7201186.479	37.52972054	-26.17698084	1424160203.00	20
17-02-15	8:03:08 AM	-1.07E-05	6.46E-06	-1.93E-05	7201186.479	37.52972054	-26.17698084	1424160188.00	0.2
17-02-15	8:03:36 AM	-1.03E-05	6.50E-06	-1.94E-05	7201186.479	37.52972054	-26.17698084	1424160216.00	0.001990741
17-04-15	8:01:44 AM	-1.09E-05	6.41E-06	-1.91E-05	7198226.749	37.87318292	-26.04985675	1429257704.00	20
17-04-15	8:01:34 AM	-1.09E-05	6.41E-06	-1.91E-05	7198226.749	37.87318292	-26.04985675	1429257694.00	0.2
17-04-15	8:02:01 AM	-1.05E-05	6.50E-06	-1.93E-05	7198226.749	37.87318292	-26.04985675	1429257721.00	0.001990741
21-04-15	8:38:08 PM	1.17E-05	-9.80E-07	-1.92E-05	7202773.364	37.38168077	-26.48471638	1429648688.00	20
21-04-15	8:38:12 PM	1.17E-05	-9.80E-07	-1.92E-05	7202773.364	37.38168077	-26.48471638	1429648692.00	0.2
26-04-15	8:03:08 AM	-1.07E-05	6.41E-06	-1.91E-05	7199503.901	37.49288531	-26.11136371	1430035388.00	0.001990741
26-04-15	8:03:33 AM	-1.03E-05	6.45E-06	-1.93E-05	7199503.901	37.49288531	-26.11136371	1430035413.00	20
26-04-15	8:03:22 AM	-1.03E-05	6.45E-06	-1.93E-05	7199503.901	37.49288531	-26.11136371	1430035402.00	0.2
05-05-15	8:04:38 AM	-1.05E-05	6.41E-06	-1.91E-05	7200914.46	37.02080705	-26.53200637	1430813078.00	20
05-05-15	8:04:26 AM	-1.05E-05	6.41E-06	-1.91E-05	7200914.46	37.02080705	-26.53200637	1430813066.00	0.2
05-05-15	8:04:54 AM	-1.05E-05	6.41E-06	-1.91E-05	7200914.46	37.02080705	-26.53200637	1430813094.00	0.001990741
19-06-15	8:35:54 PM	1.19E-05	-8.86E-07	-1.91E-05	7196825.661	37.86703323	-26.40320147	1434746154.00	20
19-06-15	8:35:52 PM	1.19E-05	-8.86E-07	-1.91E-05	7196825.661	37.86703323	-26.40320147	1434746152.00	0.2

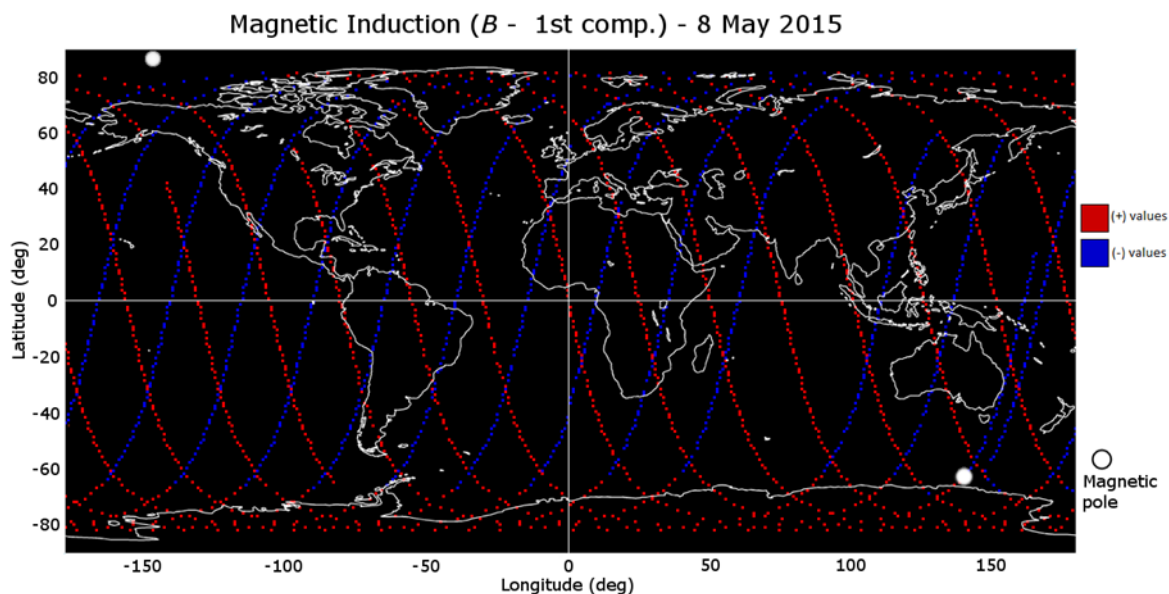
Obr. 21 Náhled části náhodně vybrané tabulky ze souřadnicové databáze

Pro souřadnicovou databázi jsem napsal další program. Ten už vyčítá požadovaná data a dokáže je převést do grafické podoby. V našem případě dokáže vykreslit barevnou mapu daných hodnot nad povrchem Země pro různá časová období. Povrch Země si promítám na plochu obdélníku, který tvoří 180 x 360 čtverců (polí). Během jednoho roku se družice dostane nad konkrétní pole několikrát, a proto program vykresluje průměrnou hodnotu dané veličiny nad tímto místem. Každý obarvený čtverec znamená, že nad tímto místem byla družice během daného období alespoň jednou. Černé čtverce jsou pak místa, kam se družice nedostala, nebo nebyla odeslána žádná data. Aby však tyto mapy ukazovaly smysluplné výsledky, bylo nejprve nutné správně nastavit barevné škály pro jednotlivé veličiny.

Nejprve jsem se věnoval datům o geomagnetickém poli. Proba-V měří tři složky magnetické indukce. Tyto hodnoty jsem si pro sebe pracovníě očísloval podle toho, jak jsou za sebou seřazené v řádku souboru *.dsc zleva jako B_1 , B_2 a B_3 . Můj předpoklad byl takový, že tyto složky magnetické indukce jsou vůči sobě navzájem kolmé, v pravoúhlé soustavě se nachází například na osách x , y , z . Nejjednodušší tedy bylo vytvořit mapu rozložení celkové magnetické indukce, protože k tomu není třeba znát, v jakém směru vůči geomagnetickému poli jsou jednotlivé složky orientovány. Velikost výsledné magnetické indukce jsem určil standardním způsobem jako velikost vektoru:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}. \quad (3)$$

Jestliže však chceme zjistit inklinaci, musíme si výslednici magnetické indukce rozdělit na její vertikální a horizontální složku. V tomto případě už potřebujeme znát přesnou orientaci jednotlivých teslametrů vůči geomagnetickému poli. Proto jsem jednotlivé měřené hodnoty podrobil testu, ve kterém jsem zjišťoval, v jakých místech nad Zemí nabývají kladných a záporných hodnot. Použil jsem pro to mapy pro různá časová období, abych se vyhnul případnému zkreslení. Pro B_1 mi vyšla nejprůkaznější mapa jednodenního měření družice na Obr. 22. Z mapy je zřejmé, že pokud se družice pohybuje ve směru z jižní polokoule nad severní, nabývá B_1 kladných hodnot, a naopak ve směru ze severní nad jižní nabývá hodnot záporných. Díky informacím o stabilizaci družice to znamená, že B_1 je měřena ve směru letu družice.

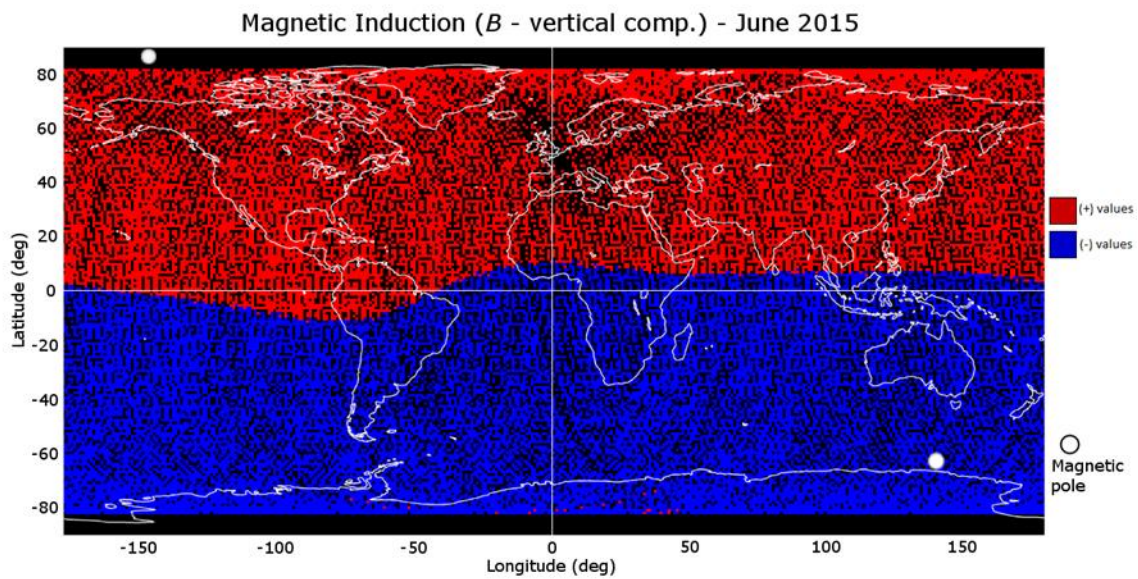


Obr. 22 Mapa kladných (červených) a záporných (modrých) hodnot B_1 během jednodenního měření

Hodnota B_2 nabývá oproti ostatním dvěma o řád menších hodnot, a proto jsem se rozhodl nejprve vyřešit směr teslametru měřícího B_3 . Složka B_2 poté bude kolmá na obě zbývající.

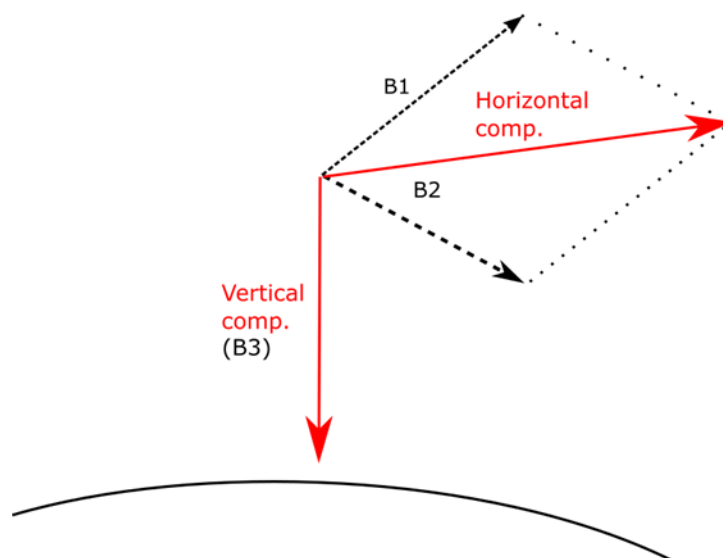
Pro B_3 jsem pro větší přesnost byl naopak nucen zvolit delší časové období, například měsíc. Jak je vidět na Obr. 23, změna z kladných na záporné hodnoty a naopak nastává přibližně v rovníkové oblasti. Na jižní polokouli nabývá B_3 hodnot záporných a na severní hodnot kladných. Z toho jasně vyplývá, že hodnota B_3 je měřena ve směru do středu gravitačního pole Země. Složka B_3 je tedy zároveň i vertikální složkou magnetické indukce. Hranice mezi kladnými a zápornými hodnotami pak vytváří magnetický rovník, jehož přesnějšímu popisu se budu věnovat v kapitole 3.3.1.

Jelikož směry měřených složek tvoří pravotočivý pravoúhlý systém souřadnic, musí se B_1 a B_2 nacházet v jedné rovině kolmé na vertikální složku. Jsou tedy v horizontální rovině. Jejich vektorovým součtem tedy získáme zbývající horizontální složku magnetické indukce. Pravotočivý pravoúhlý systém souřadnic vidíme na Obr. 24.



Obr. 23 Mapa kladných (červených) a záporných (modrých) hodnot B_3 během měsíčního měření

Magnetic induction components



Obr. 24 Složky magnetické indukce měřené na družici Proba-V (pravotočivý pravouhlý systém souřadnic)

Díky těmto zjištěním mohu vytvářet mapy rozložení celkové magnetické indukce a její horizontální i vertikální složky, inklinace, magnetického rovníku a dalších (kapitola 3.3). Všechno v nejrůznějších časových intervalech od délky jednoho dne až pro celý rok 2015. Během jednodenního měření pokryje družice necelá 4 procenta povrchu Země.

Pomocí dat ze souboru *.dat jsem mohl podobným způsobem vytvářet mapy rozložení dávkového příkonu a počtu nabitých částic. Ovšem jen pro časové intervaly v červnu 2015. Hlavním jevem, kterým jsem se však v tomto ohledu zabýval, byl projev sluneční erupce v okolí Země (kapitola 3.4.1). V ÚTEF jsem se dozvěděl, že jedna z větších slunečních erupcí roku 2015 proběhla právě v červnu, a proto byla tato data dostačující.

Z jednotlivých tabulek souřadnicové databáze jsem také vytvářel grafy změn magnetické indukce a inklinace pro konkrétní místa na Zemi v závislosti na čase (kapitola 3.3.6).

Všechny své výsledky týkající se geomagnetického pole jsem současně srovnával s vypočtenými hodnotami World Magnetic Model 2015 Calculator. Tato kalkulačka geomagnetických veličin je přístupná veřejnosti na [2] a kde ji spravuje British Geological Survey.

3 Výsledky a diskuze

3.1 Legenda

Všechna data uvedená ve výsledcích jsou naměřená mnou samým nebo poskytnutá z ÚTEF případně vypočítaná z World Magnetic Model 2015 Calculator. Pro vyhodnocování těchto dat jsem použil následující tabulky, grafy a mapy. Pro jejich lepší vzhled jsem pro některé veličiny používal zkratky. Zde je vysvětlen jejich význam:

B – celková magnetická indukce (magnetic induction), [*B*] = μT

BV – vertikální složka (vertical component) magnetické indukce

BH – horizontální složka (horizontal component) magnetické indukce

I – inklinace (inclination) magnetické indukce, [*I*] = $^{\circ}$ (stupeň)

h – výška nad mořem, [*h*] = km

Dev. – odchylka měření (deviation)

MV – naměřené hodnoty (measured values)

CV – vypočítané hodnoty (calculated values) podle [2]

Gy – Gray, jednotka dávkového příkonu (dose rate)

$\#/\text{cm}^2/\text{s}$ – jednotka hustoty toku částic (particle flux density), znamená počet částic zaznamenaných na jednom centimetru čtverečním za sekundu

Lat – zeměpisná šířka ve stupních s kladnými hodnotami pro severní polokouli a zápornými pro jižní polokouli

Long – zeměpisná délka ve stupních s kladnými hodnotami pro východní polokouli a zápornými pro západní polokouli

Souřadnice GPS jsou uváděny ve tvaru „[**Long**, **Lat**]“.

3.2 Měření teslametrem Vernier

Měření provedené u mě doma v centru města zachycuje Tab. 1 a měření mimo město zachycuje Tab. 2. Družice během letu nad střední Evropou zasílá naměřená data do přijímače ESA ve Frankfurtu na úkor zaznamenávání nových dat. Z toho důvodu je nad ČR naměřeno během roku malé množství dat. Proto v tabulkách uvádím pouze hodnoty vypočtené z kalkulátoru pro letovou hladinu družice.

Tab. 1 Porovnání výsledků měření teslametrem Vernier prováděném v centru města s hodnotami vypočtenými kalkulátorem

V centru města [15.792, 50.04] ($h = 0.22$ km)				
	MV	CV	Dev. [%]	CV [$h = 820$ km]
B [μT]	53.39	49.08	-8.8	34.28
BH [μT]	22.10	19.90	-11.1	14.46
BV [μT]	48.60	44.86	-8.3	31.08
I [$^\circ$]	65.54	66.07	0.8	65.06

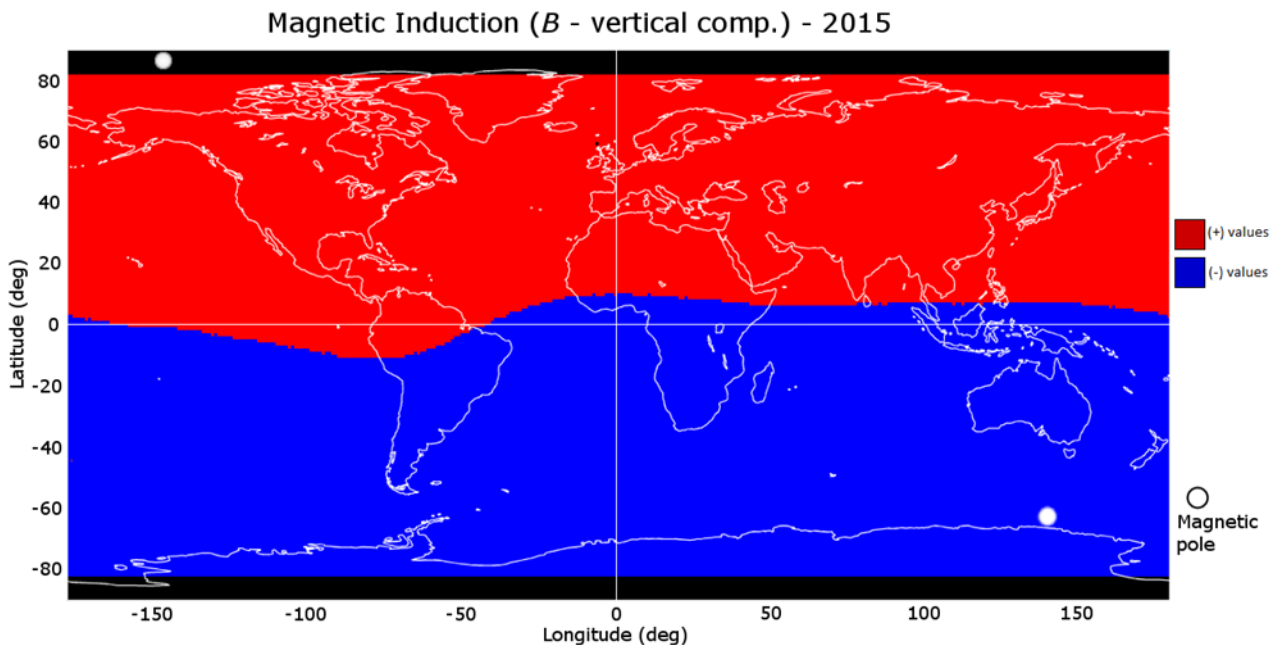
Tab. 2 Porovnání výsledků měření teslametrem Vernier prováděném mimo město s hodnotami vypočtenými kalkulátorem

Mimo město [15.785, 50.068] ($h = 0.22$ km)				
	MV	CV	Dev. [%]	CV ($h = 820$ km)
B [μT]	45.02	49.08	8.3	34.28
BH [μT]	18.60	19.89	6.5	14.45
BV [μT]	41.00	44.87	8.6	31.09
I [$^\circ$]	65.60	66.09	0.7	65.08

Při měření magnetické indukce jsem naměřil hodnoty lišící se v řádu jednotek mikrotlesla od hodnot vypočítaných podle [2]. Poměr BH a BV vždy ale zůstal zachován, a proto následně vypočítaná inklinace měla téměř stejnou hodnotu s necelou jednoprocenní odchylkou od hodnoty vypočtené. Tato chyba mohla být způsobena kalibrací teslametru. Z tabulek je pak zřejmé, že velikost B se zmenšuje s rostoucí nadmořskou výškou. V letové hladině družice je B o $15 \mu\text{T}$ menší než při povrchu Země.

3.3 Základní popis geomagnetického pole

3.3.1 Magnetický rovník a severní magnetický pól

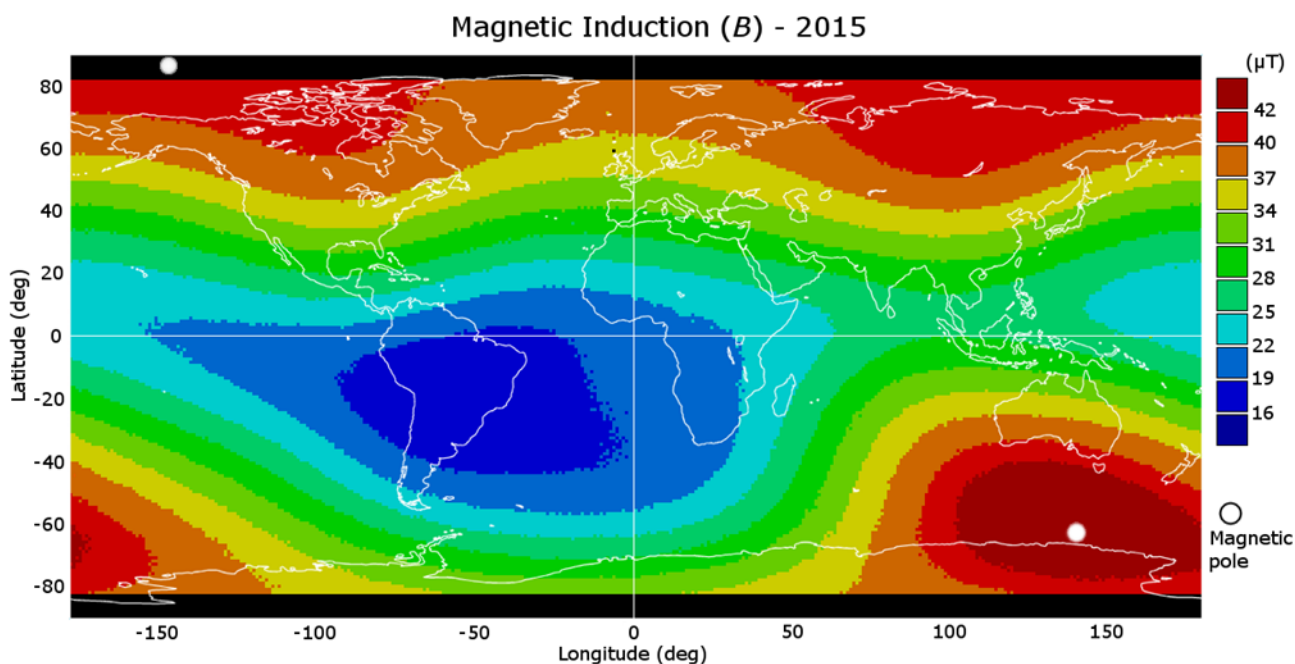


Obr. 25 Magnetický rovník získaný vyznačením hranice mezi kladnými (červenými) a zápornými (modrými) hodnotami B_V naměřenými na družici během celého roku 2015.

Magnetický rovník (Obr. 25) jsem vytvořil vyznačením hranice kladných a záporných hodnot vertikální složky magnetické indukce. Mapa jednoho měsíce se shoduje s mapou jednoho roku, z čehož lze soudit, že rovník v časovém intervalu jednoho roku výrazně nezmění svou polohu (tvar).

Severní magnetický pól jsem určil jako oblast, kdy výsledná B nabývá nejvyšších hodnot. Na mapě na Obr. 26 je to střed červené oblasti na jižní polokouli. Družice Proba-V pokryje zemský povrch od 81. do $-81.$ rovnoběžky. Z toho důvodu nemohu určit polohu jižního magnetického pólu, který by se měl nacházet mimo měřenou oblast. Na mapách je vyznačen podle [3].

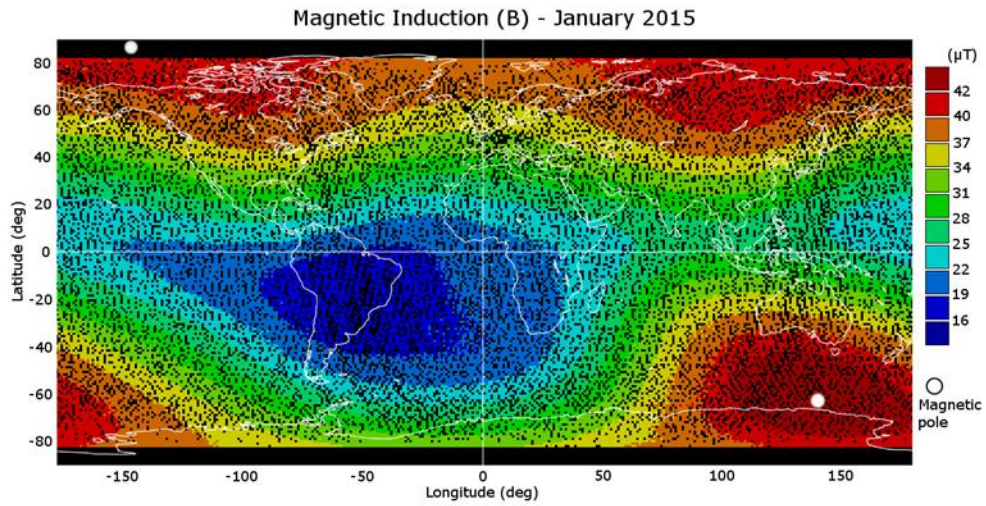
3.3.2 Mapy velikosti výsledné magnetické indukce



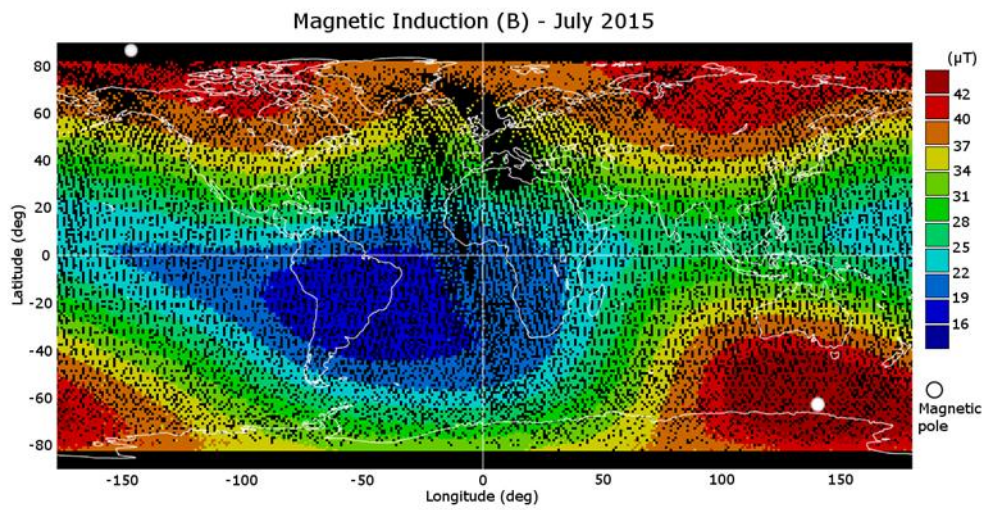
Obr. 26 Mapa rozložení výsledné B za celý rok 2015. Je zde vidět nesymetričnost geomagnetického pole vůči středu Země a také neshodující se magnetický pól s geografickým pólem.

Z mapy na Obr. 26 je zřejmé, že geomagnetické pole není symetrické vůči středu Země, tudíž jeho střed neleží ve středu Země. Z mapy současně vyplývá, že magnetická osa není totožná ani rovnoběžná s rotační osou Země. V prostoru nad Jižní Amerikou se nachází oblast nejnižších hodnot výsledné B .

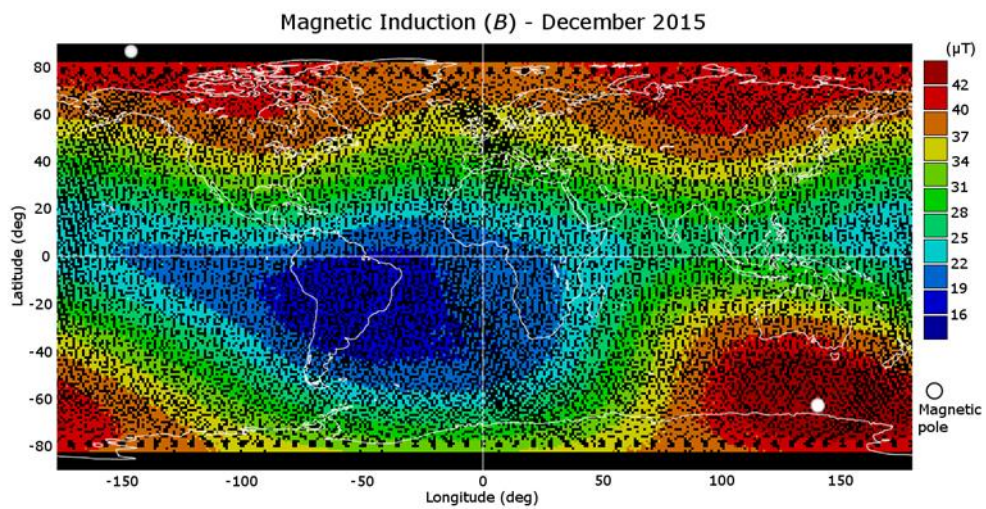
Z map pro jednotlivé měsíce (Obr. 27 až Obr. 29) pak vyplývá, že rozložení hodnot výsledné B nad povrchem Země během roku neprojde pozorovatelnými změnami.



Obr. 29 Mapa rozložení výsledné B pro leden 2015



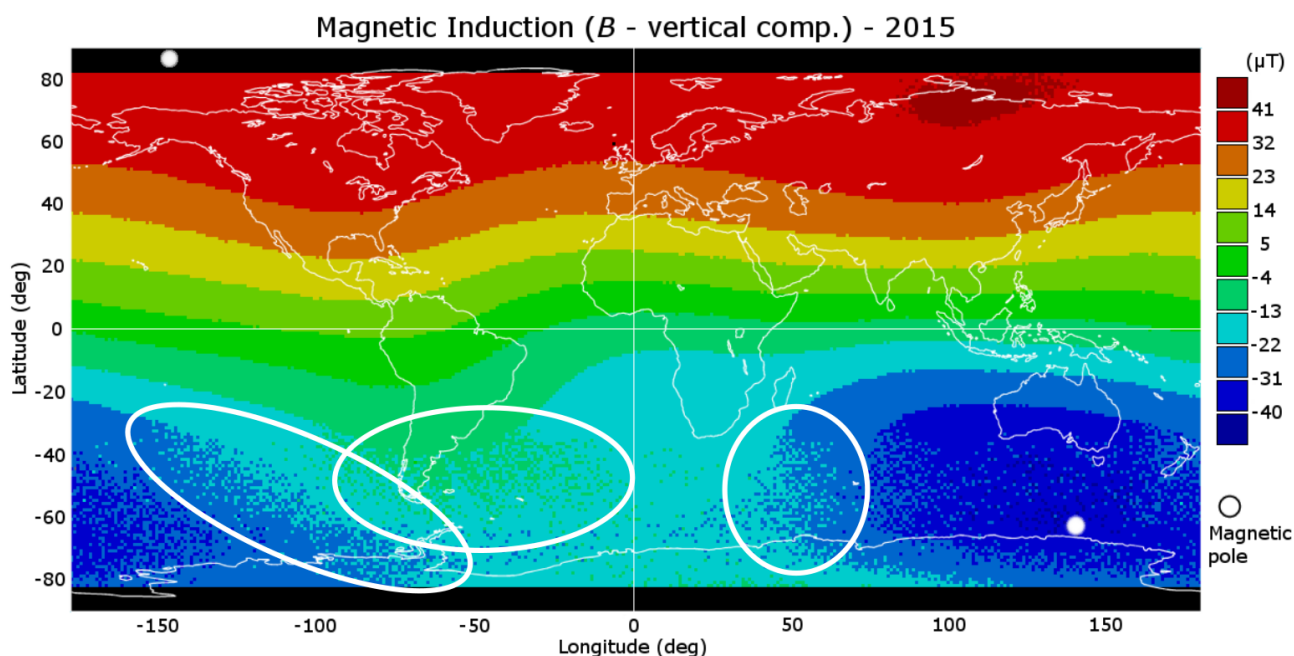
Obr. 28 Mapa rozložení výsledné B pro červenec 2015



Obr. 27 Mapa rozložení výsledné B pro prosinec 2015

3.3.3 Mapy vertikální složky magnetické indukce

Z vyhodnocení vertikální složky jsem zjistil, že družice během svého letu v pravidelných intervalech náhle na krátkou chvíli změni svůj sklon vůči Zemi. To se děje zřejmě kvůli přesnější stabilizaci družice. Má to však za následek, že v daném místě mají měřené hodnoty náhle menší či větší až opačnou hodnotu, než mají při většině průletů nad tímto místem. Tento problém se neprojeví při vytváření mapy výsledné B , jelikož v tom případě počítám pouze s velikostí B , a ne s jejím směrem. Výsledná mapa vertikální složky pro celý rok kvůli tomu vykazuje výrazné rušivé zkreslení hodnot na jižní polokouli, jak můžete vidět na Obr. 30.

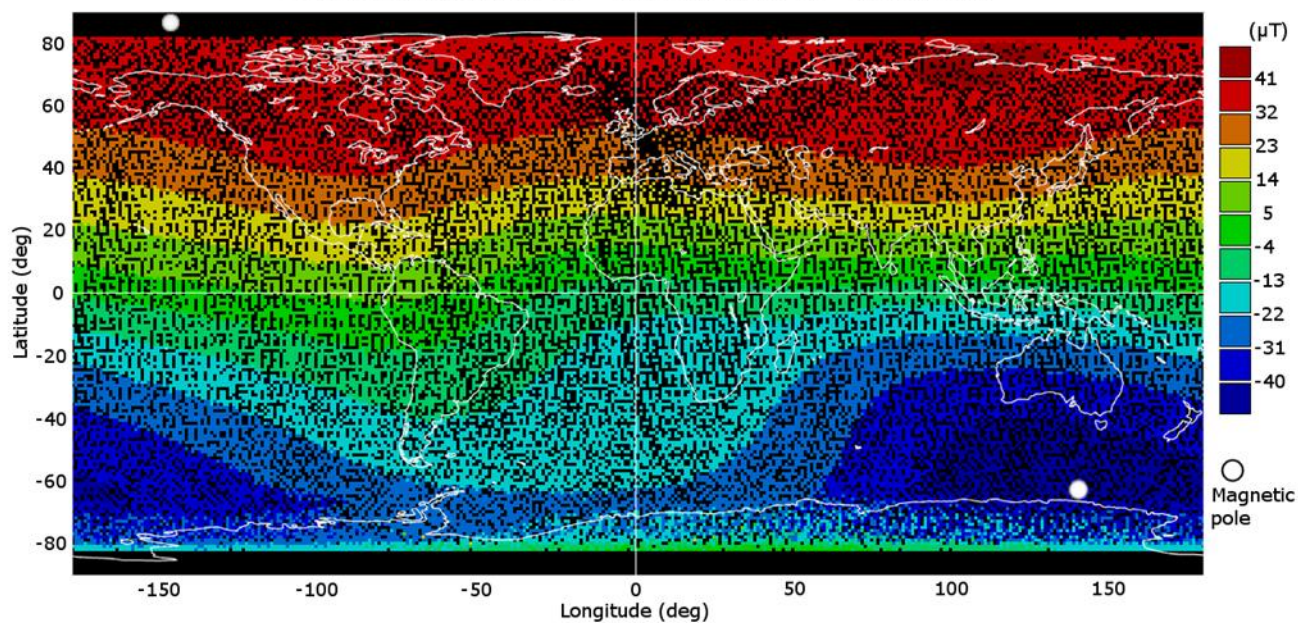


Obr. 30 Mapa rozložení vektoru BV pro celý rok 2015. Na jižní polokouli je vyznačeno rušivé zkreslení mapy způsobené převrácením družice.

Přesnější mapu rozložení BV můžeme vidět na jednoměsíční mapě z června 2015 na Obr. 31. Zelená barva na mapě odpovídá oblastem, kde BV nabývá nulové hodnoty. Tomu odpovídá magnetický rovník. Z mapy je zřejmé, že na jih od magnetického rovníku nabývá BV záporných hodnot, tedy míří směrem od Země. Na sever od magnetického rovníku nabývá BV kladných hodnot, tedy míří směrem k Zemi.

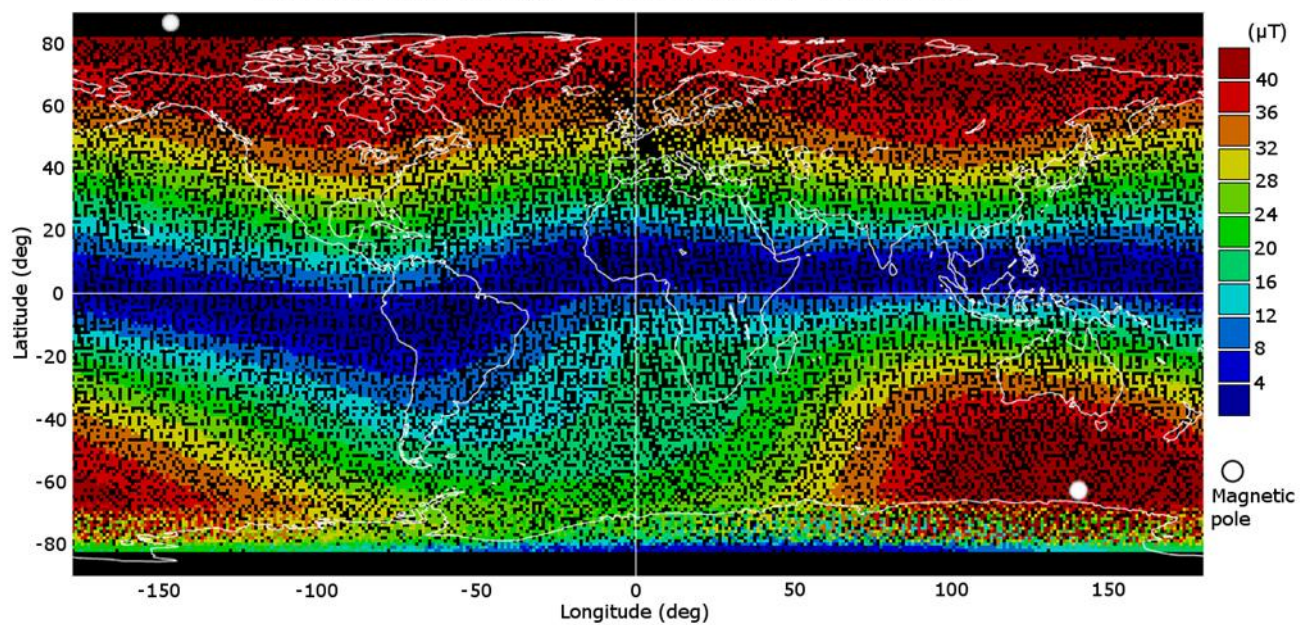
Mapa z června 2015 na Obr. 32 je vytvořena z absolutních hodnot BV . Ta nám dokazuje, že vektor BV se prodlužuje směrem od magnetického rovníku k magnetickým pólům.

Magnetic Induction (B - vertical comp.) - June 2015



Obr. 31 Mapa rozložení vektoru BV pro červen 2015

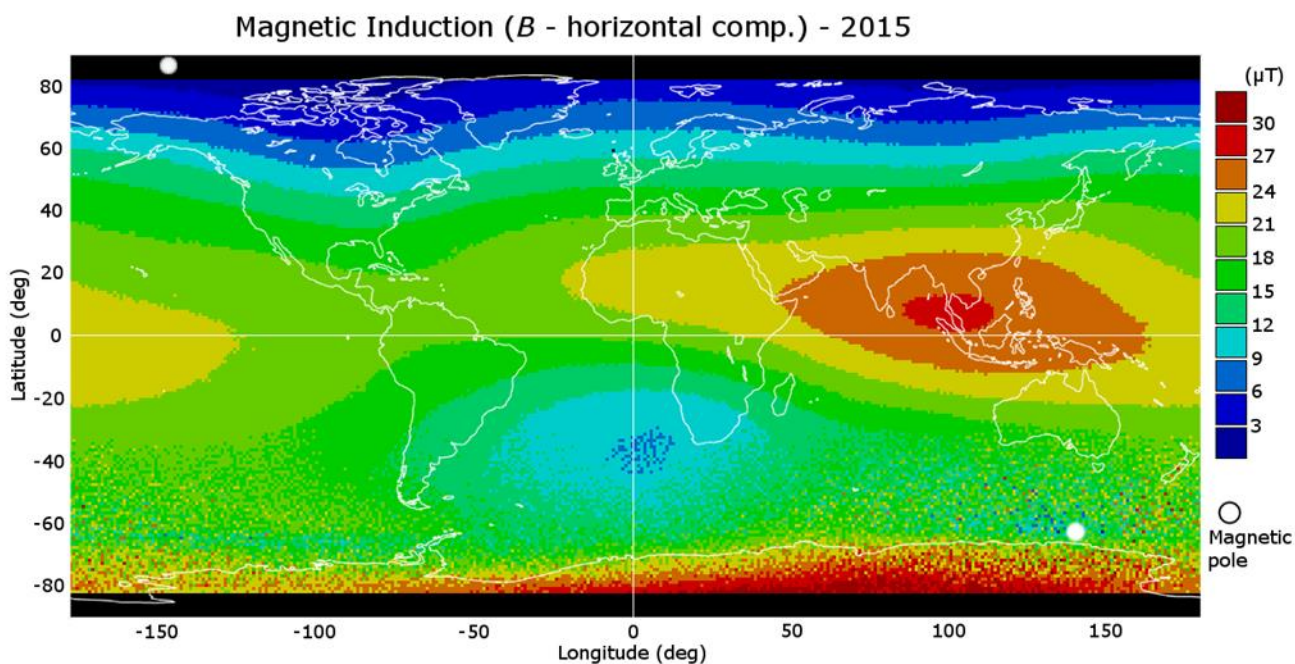
Magnetic Induction (B - vertical comp.) - June 2015



Obr. 32 Mapa rozložení velikosti vektoru BV pro červen 2015

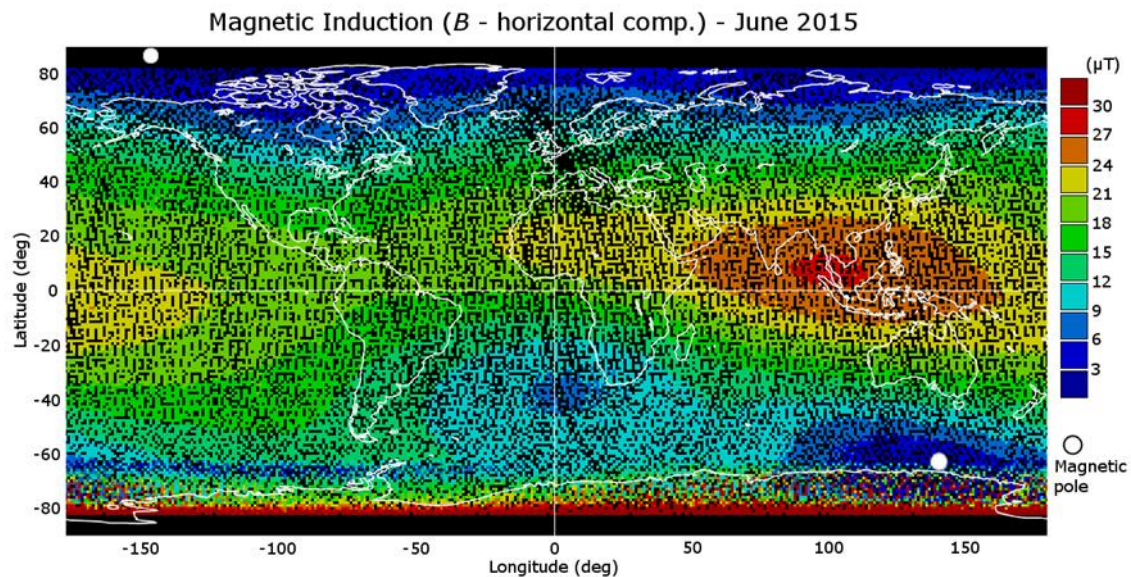
3.3.4 Mapy horizontální složky magnetické indukce

Roční mapa horizontální složky (Obr. 33) podléhá na jižní polokouli podobnému rušivému zkreslení (převrácení družice) jako mapa vertikální složky. Horizontální složku neměří družice přímo a musí se tedy vypočítat, jak je uvedeno v kapitole 2.3. Její hodnoty jsou pouze kladné. Zatímco během jednoho obletu nabývá BV na magnetickém rovníku nulových hodnot, BH nabývá maximálních hodnot. Maximum však není natolik ostré, abychom na Obr. 33 dobře pozorovali magnetický rovník. Na druhou stranu se nám na mapě velice dobře vykreslí oblast, kde hodnoty BH nabývají absolutního maxima. Tato oblast je vyznačena tmavě červenou barvou a nachází se nad Malajsií. Z toho vyplývá, že střed geomagnetického pole je posunutý ze středu Země směrem k Malajsií.

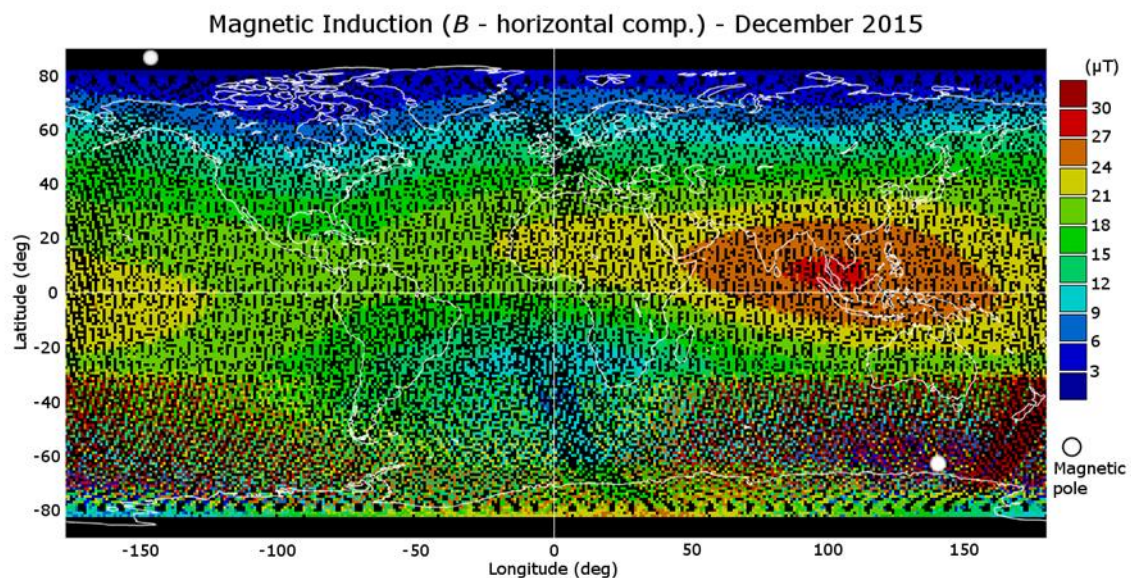


Obr. 33 Mapa rozložení vypočteného vektoru BH pro celý rok 2015. Na jižní polokouli je viditelné rušivé zkreslení mapy způsobené převrácením družice. Oblast Malajsie s maximálními hodnotami BH je nejbližším místem na povrchu Země vůči středu geomagnetického pole.

Obr. 34 je záznam hodnot BH opět pro červen 2015, kdy je rušivé zkeslení mapy nejmenší. Na Obr. 35 z prosince 2015 můžete naopak vidět jednoměsíční záznam s největším počtem zkreslujících hodnot.



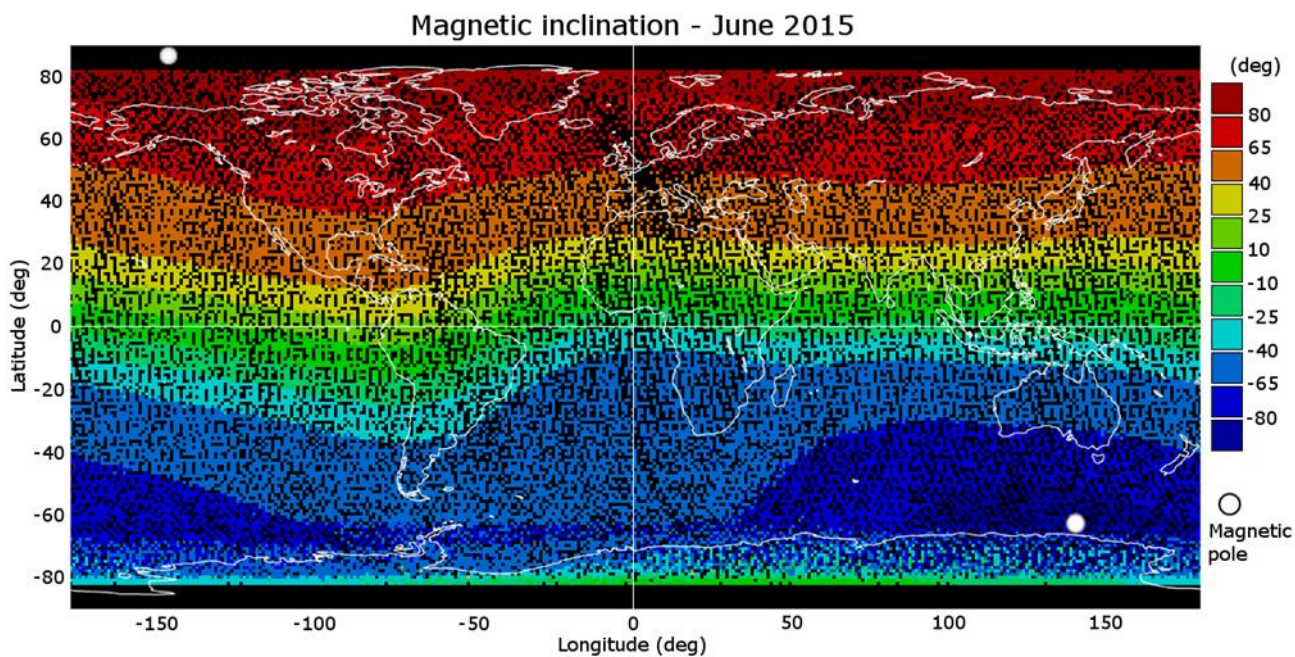
Obr. 34 Mapa rozložení vektoru BH pro červen 2015. Rušivé zkeslení je minimální.



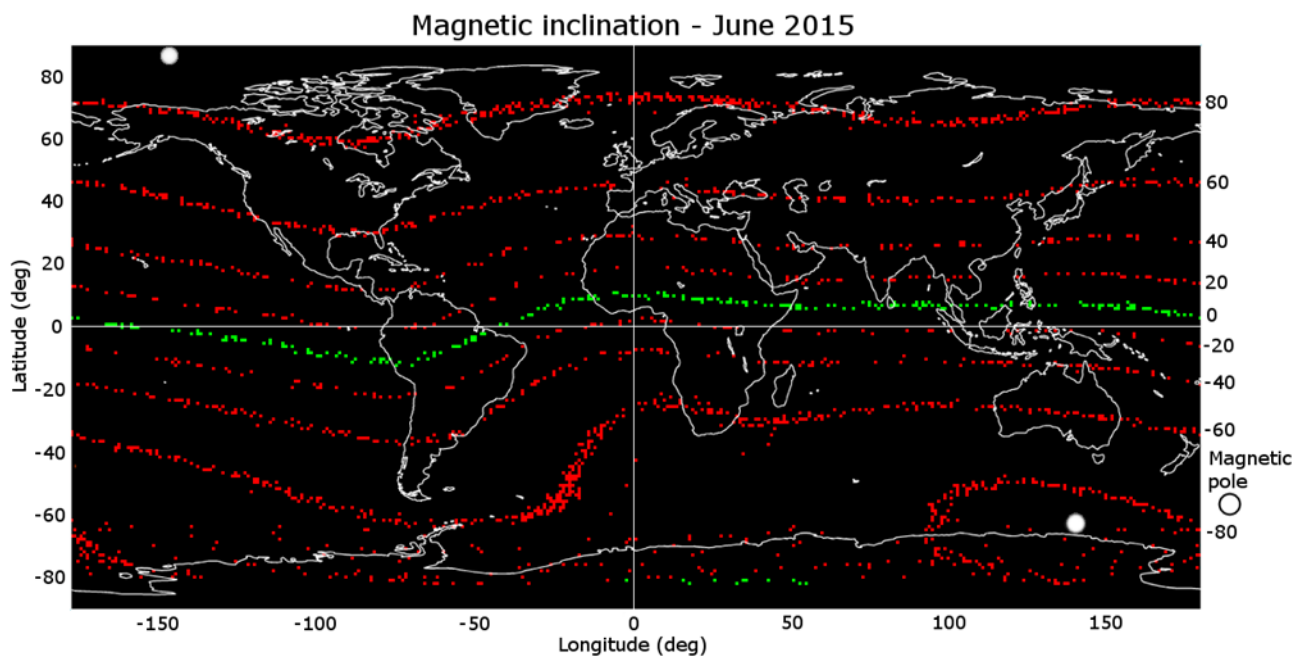
Obr. 35 Mapa rozložení vektoru BH pro prosinec 2015. Na jižní polokouli je pozorovatelné ztelně větší rušivé zkeslení než v červnu.

3.3.5 Mapy inklinace magnetické indukce

Mapy inklinace magnetické indukce (Obr. 37) se velice podobají mapám *BV* (Obr. 31). Místa o stejné inklinaci odpovídají geomagnetickým rovnoběžkám (Obr. 36).



Obr. 37 Mapa rozložení inklinace *B* v červnu 2015

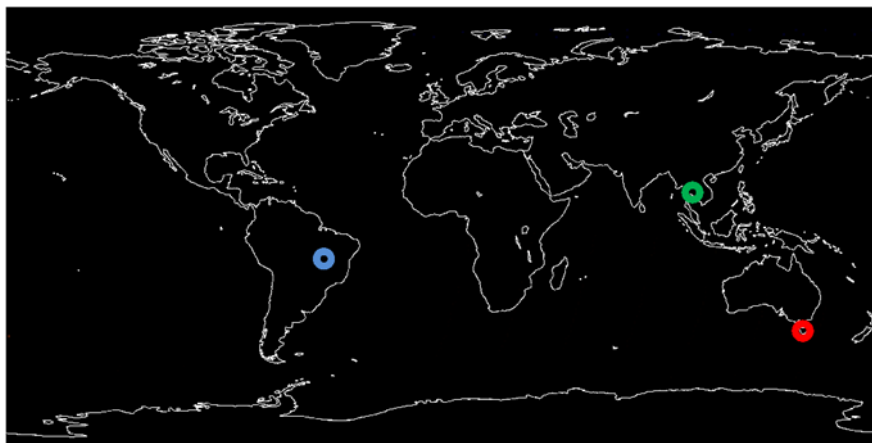


Obr. 36 Mapa geomagnetických rovnoběžek v červnu 2015

3.3.6 Grafy vývoje geomagnetických veličin v závislosti na čase

Na předešlých typech map vytvořených pro jednotlivé měsíce v roce 2015 nejsou pozorovatelné žádné výrazné změny v celkovém vzhledu geomagnetického pole ve výšce pohybu naší družice. Pro přesnější určení změn geomagnetického pole v závislosti na čase během jednoletého měření jsem proto vytvořil následující tabulky a grafy.

Ze souřadnicové databáze jsem vybral tři čtverce nad většími městy na Zemi, které se postupně nacházejí v oblastech nejnižších (Tab. 3), středních (Tab. 4) a nejvyšších (Tab. 5) hodnot výsledné B . Poloha těchto měst je naznačena na Obr. 38. Skutečné hodnoty naměřené družicí jsem zde současně porovnával s vypočítanými hodnotami podle [2]. Na Obr. 39 a Obr. 40 jsou grafy výsledné B a inklinace v závislosti na čase pro jednotlivá města.



Obr. 38 Místa na Zemi podrobená přesnějšímu zkoumání vývoje geomagnetických veličin v čase. Modrá Brasília, zelená Bangkok, červená Hobart.

Tab. 3 Měření provedená družicí za celý rok 2015 nad městem Brasilia v oblasti nejnižších hodnot výsledné B.

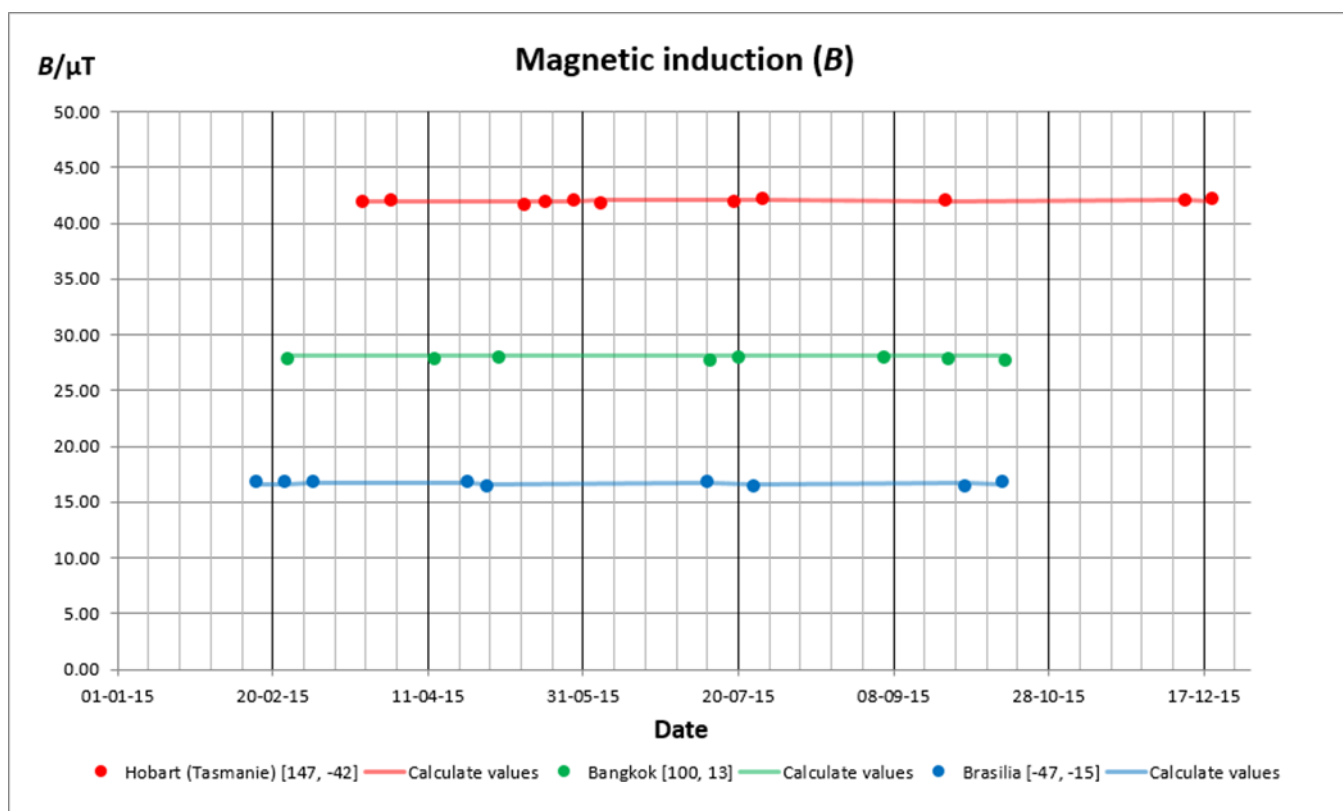
Brasilia [-47, -15]									
Date	h [km]	B [μ T]		BH [μ T]		BV [μ T]		I [°]	
		MV	CV	MV	CV	MV	CV	MV	CV
15-02-15	822.7	16.81	16.65	15.19	15.32	-7.19	-6.53	-25.31	-23.09
24-02-15	821.4	16.86	16.66	15.48	15.33	-6.70	-6.54	-23.40	-23.10
05-03-15	820.0	16.86	16.67	15.54	15.33	-6.55	-6.54	-22.86	-23.10
24-04-15	819.5	16.75	16.67	15.19	15.33	-7.04	-6.56	-24.86	-23.16
30-04-15	822.8	16.40	16.65	14.87	15.31	-6.92	-6.55	-24.97	-23.15
10-07-15	819.5	16.76	16.67	15.41	15.32	-6.60	-6.57	-23.18	-23.22
25-07-15	822.5	16.38	16.65	14.82	15.30	-6.97	-6.57	-25.21	-23.23
01-10-15	818.6	16.44	16.67	14.77	15.31	-7.22	-6.59	-26.05	-23.30
13-10-15	823.3	16.78	16.64	15.39	15.28	-6.70	-6.58	-23.52	-23.30

Tab. 4 Měření provedená družicí za celý rok 2015 nad městem Bangkok v oblasti středních hodnot výsledné B.

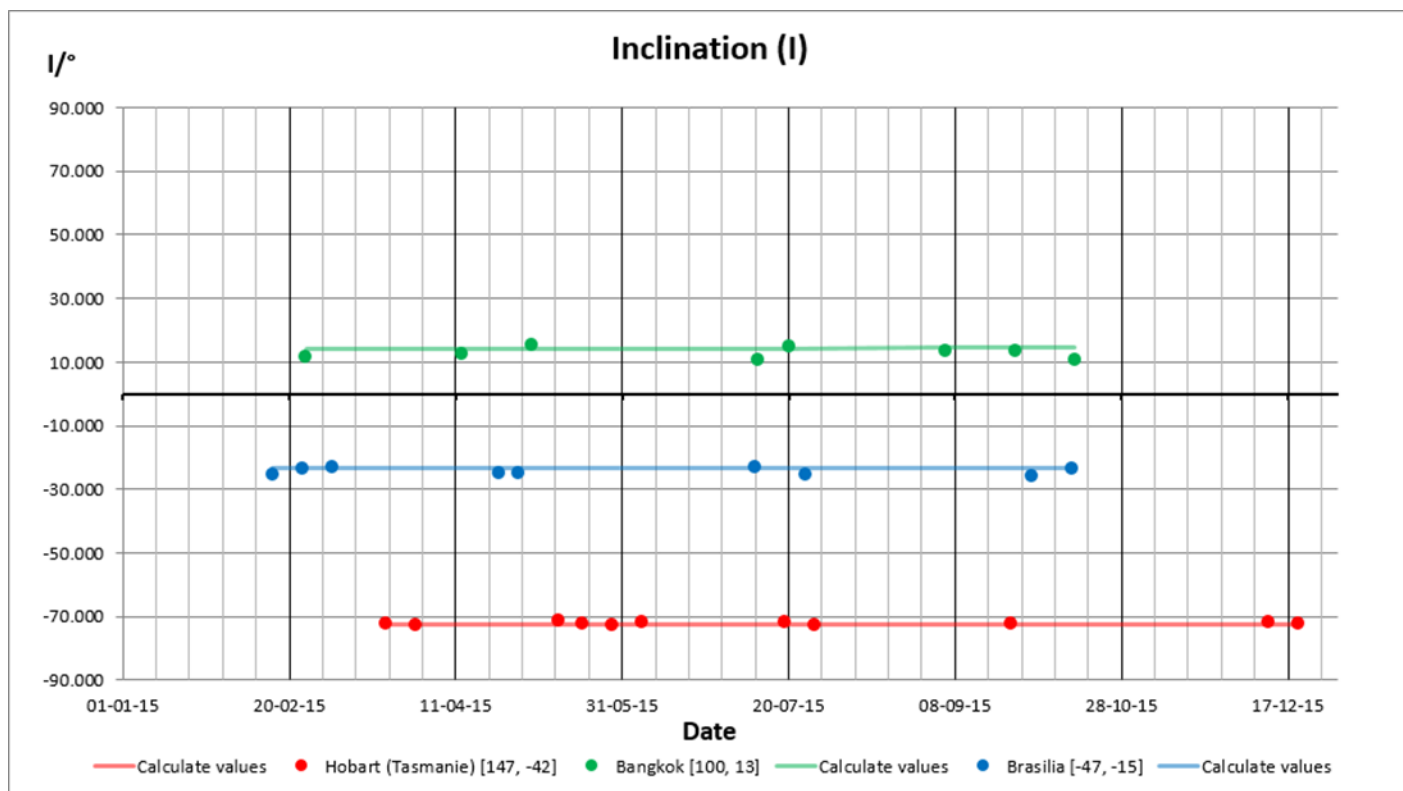
Bangkok [100, 13]									
Date	h [km]	B [μ T]		BH [μ T]		BV [μ T]		I [°]	
		MV	CV	MV	CV	MV	CV	MV	CV
25-02-15	816.1	27.81	28.14	27.14	27.27	5.68	6.96	11.81	14.32
13-04-15	813.5	27.84	28.18	27.15	27.30	6.14	6.98	12.74	14.34
04-05-15	816.5	27.94	28.14	26.97	27.26	7.30	6.98	15.14	14.35
11-07-15	817.9	27.65	28.12	27.18	27.24	5.09	6.99	10.60	14.38
20-07-15	818.9	27.94	28.11	26.98	27.23	7.25	6.98	15.03	14.39
05-09-15	815.1	27.94	28.16	27.15	27.28	6.58	7.01	13.62	14.41
26-09-15	813.9	27.85	28.18	27.07	27.29	6.51	7.02	13.52	14.42
14-10-15	814.1	27.64	28.18	27.18	27.29	5.04	7.02	10.50	14.43

Tab. 5 Měření provedená družicí za celý rok 2015 nad městem Hobart v oblasti nejvyšších hodnot výsledné B.

Hobart (Tasmanie) [147, -42]									
Date	h [km]	B [μT]		BH [μT]		BV [μT]		I [°]	
		MV	CV	MV	CV	MV	CV	MV	CV
21-03-15	822.9	41.90	41.99	12.75	12.70	-39.91	-40.03	-72.29	-72.40
30-03-15	824.2	42.05	41.97	12.49	12.69	-40.16	-40.00	-72.72	-72.40
12-05-15	825.3	41.64	41.95	13.21	12.68	-39.49	-39.98	-71.50	-72.40
19-05-15	823.4	41.87	41.98	12.66	12.69	-39.91	-40.02	-72.40	-72.40
28-05-15	822.0	42.07	42.01	12.39	12.70	-40.21	-40.04	-72.88	-72.40
06-06-15	820.8	41.70	42.03	13.15	12.71	-39.57	-40.06	-71.61	-72.40
19-07-15	819.9	41.84	42.05	13.11	12.71	-39.73	-40.08	-71.74	-72.40
28-07-15	819.8	42.14	42.05	12.58	12.71	-40.22	-40.08	-72.63	-72.40
25-09-15	825.8	42.00	41.93	12.72	12.68	-40.03	-39.97	-72.37	-72.40
11-12-15	820.5	41.96	42.03	13.06	12.71	-39.88	-40.06	-71.87	-72.40
20-12-15	821.6	42.15	42.01	12.77	12.71	-40.17	-40.04	-72.36	-72.40



Obr. 39 Graf závislosti velikosti výsledné B na GPS souřadnicích a na čase. Body označují reálné měření, křivky odpovídají hodnotám vypočteným z kalkulátoru.



Obr. 40 Graf závislosti velikosti inklinace na GPS souřadnicích a na čase. Body označují reálné měření, křivky odpovídají hodnotám vypočteným z kalkulátoru.

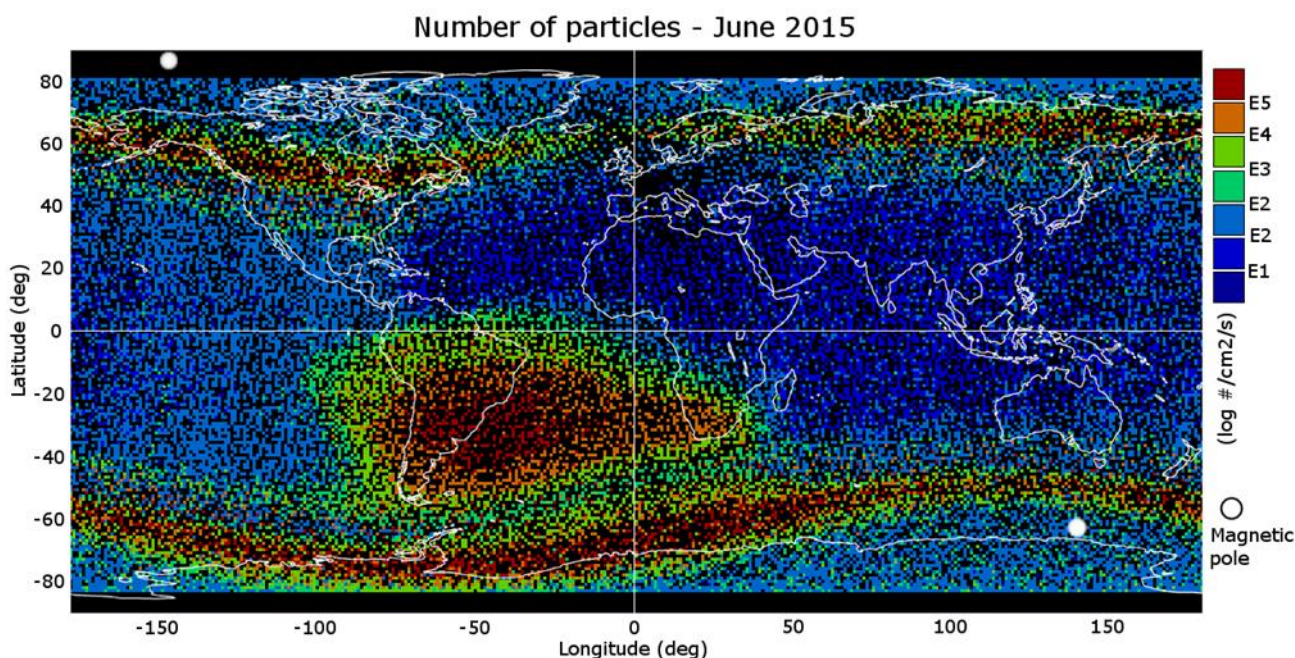
Z tabulek a grafů vyplývá, že hodnoty naměřené družicí jsou téměř totožné s hodnotami vypočtenými kalkulátorem. Dále je vidět, že až na malé odchylky v řádu desetin μT se měřené hodnoty během roku výrazně nemění. To je další důkaz, že proces změn geomagnetického pole je velice zdlouhavý a téměř nepozorovatelný během jednoletého měření.

3.4 Mapy dávkového příkonu a počtu nabitých částic

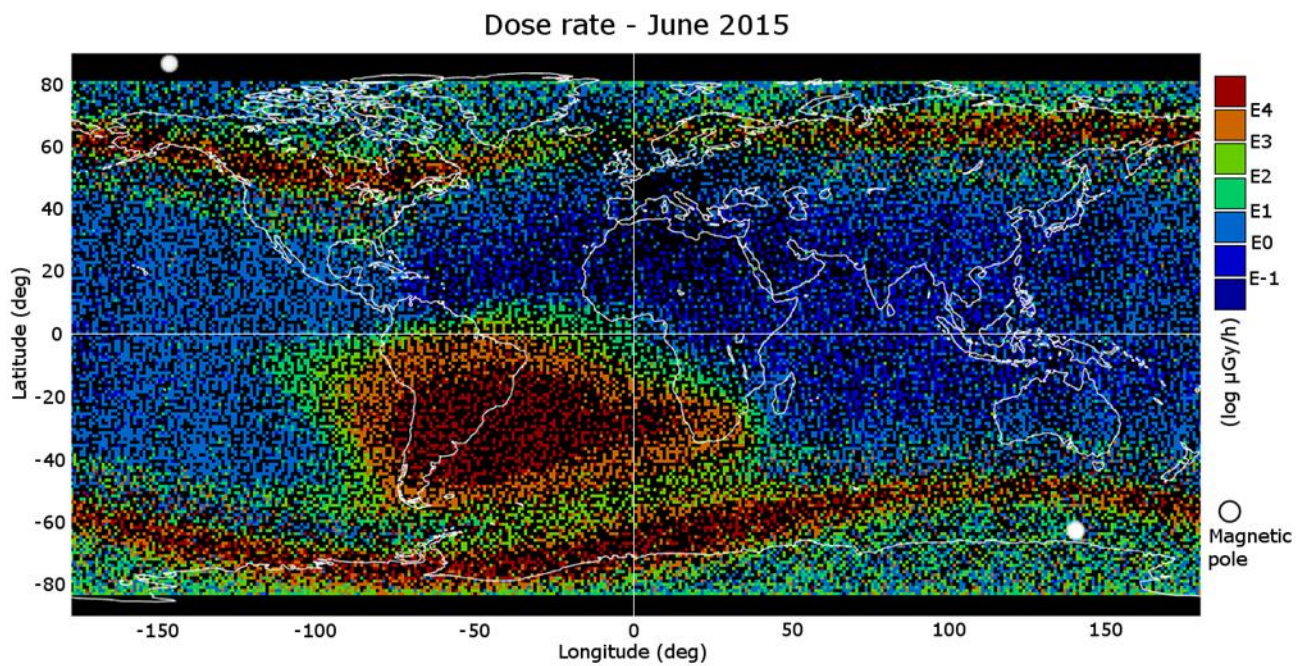
Z měření radiace, které provádí družice Proba-V, lze vypočítat dávkový příkon a hustotu toku částic. Podobným způsobem, jako jsem vytvářel mapy geomagnetických veličin, jsem z těchto hodnot vytvořil radiační mapy. U map rozložení dávkového příkonu a hustoty toku částic bylo nutné zvolit logaritmické měřítko, protože rozdíly maximálních a minimálních hodnot se liší až o několik řádů.

Na Obr. 41 je zobrazena mapa rozložení průměrného počtu nabitých částic na cm^2 za sekundu (hustota toku částic) v červnu 2015 ve výšce letu naší družice. Nejsilnější radiace je měřena v oblastech polárních pásů, ale také v oblasti mezi Jižní Amerikou a Afrikou. Tato oblast dostala název Jihoatlantická anomálie. Pokud si tuto mapu srovnáme s mapou výsledné B (například na Obr. 26), zjistíme, že oblast nejsilnější radiace nám velice dobře koresponduje s oblastí nejnižších hodnot výsledné B . To znamená, že geomagnetické pole výrazně mění směr trajektorií nabitých částic slunečního větru.

Na Obr. 42 je pak zobrazena mapa rozložení průměrného dávkového příkonu těchto částic. Správnost této mapy si můžeme ověřit srovnáním s mapou na Obr. 16, kterou uveřejnil ÚTEF ČVUT v časopise Vesmír.



Obr. 41 Mapa rozložení průměrného počtu nabitých částic na cm^2 za sekundu (hustota toku částic) v červnu 2015 ve výšce letu družice



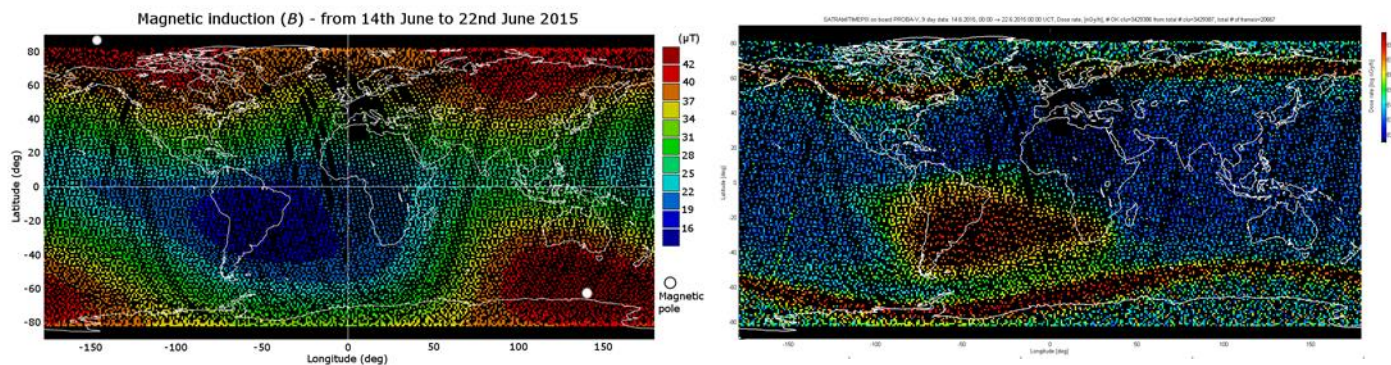
Obr. 42 Mapa rozložení průměrného dávkového příkonu v červnu 2015 ve výšce letu družice Proba-V.

3.4.1 Projev sluneční erupce v blízkosti Země

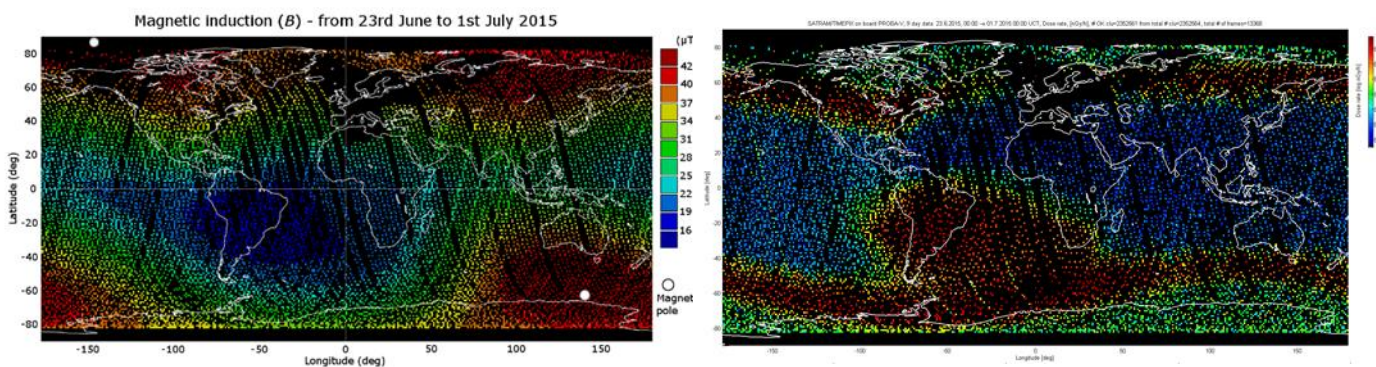
V druhé polovině června 2015 proběhl na povrchu Slunce velký výron koronární hmoty. Výsledky této sluneční erupce byly v největší míře pozorovatelné na Zemi od 22. června. Na ÚTEF mi bylo doporučeno porovnat tři devítidenní období postupně před (od 14. 6. do 22. 6.), během (od 23. 6. do 1. 7.) a po (od 2. 7. do 10. 7.) projevu sluneční erupce v okolí Země. Pro účely porovnávání jsem proto požádal ÚTEF o vytvoření map rozložení dávkového příkonu pro tato období.

Na Obr. 43 až Obr. 45 je provedeno srovnání map rozložení dávkového příkonu a výsledné B postupně pro zadaná období. Na Obr. 44 je vidět největší projev sluneční erupce, kdy se oblast nejvyšších hodnot dávkového příkonu zvětšila a propojila s jižním polárním radiačním pásem. Na Obr. 45 je dále vidět odeznívání vlivu sluneční erupce a postupný návrat k normálu. Naproti tomu na mapách výsledné B nejsou pozorovatelné žádné výrazné změny.

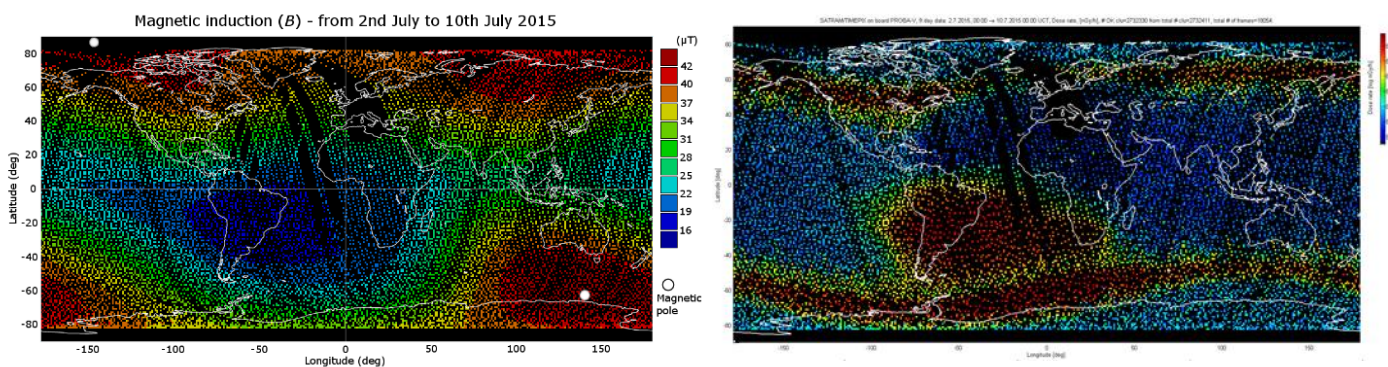
Na Obr. 46 jsou grafy vývoje výsledné B , jak byla vypočtena z dat měřených na družici za daná období. Mezi jednotlivými obdobími nejsou pozorovatelné žádné výrazné změny v hodnotách B . Z výsledků tedy vyplývá, že „náraz“ slunečního větru na magnetické pole Země se ve výšce letu družice Proba-V neprojeví pozorovatelnými změnami ve velikosti výsledné B .



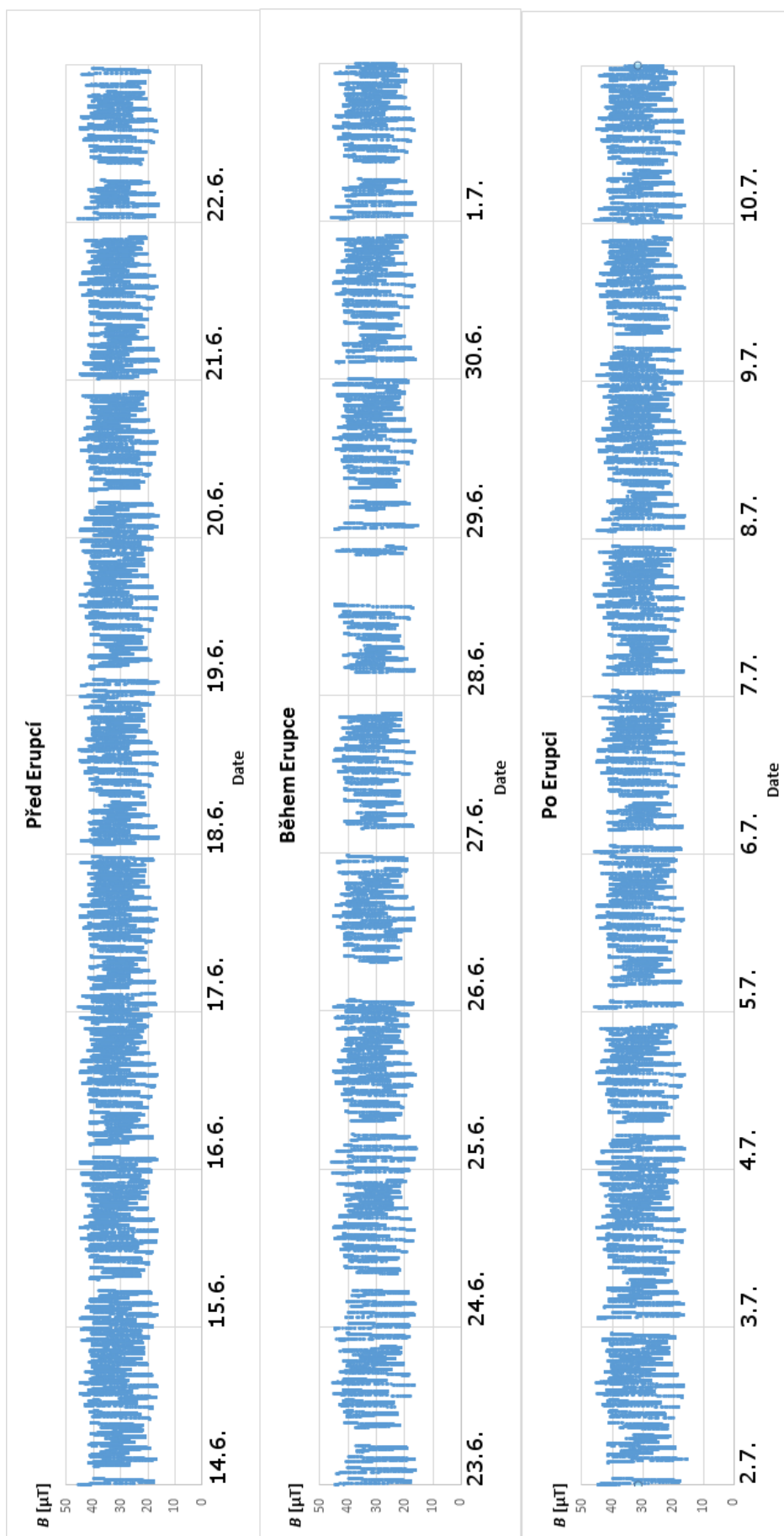
Obr. 43 Porovnání map výsledné B (vlevo) a dávkového příkonu (vpravo) v období před projevem sluneční erupce na Zemi od 14. 6. do 22. 6. 2015.



Obr. 44 Porovnání map výsledné B (vlevo) a dávkového příkonu (vpravo) v období během největšího projevu sluneční erupce na Zemi od 23. 6. do 1. 7. 2015. Na mapě vpravo je vidět zvětšení oblasti nejvyšších hodnot dávkového příkonu. Na mapě vlevo nejsou žádné viditelné změny.



Obr. 45 Porovnání map výsledné B (vlevo) a dávkového příkonu (vpravo) v období po největším projevu sluneční erupce na Zemi od 2. 7. do 10. 7. 2015. Na mapě vpravo je vidět doznívání účinků sluneční erupce.



Obr. 46 Grafy vývoje velikosti výsledné B na čase od 14. 6. do 10. 7. Ke zvýšení počtu nabitých částic v okolí Země došlo od 22. června. Na grafech však nejsou pozorovatelné žádné změny.

Závěr

Během své práce jsem z poskytnutých dat z družice Proba-V vytvořil mapy rozložení velikosti výsledné magnetické indukce, její vertikální a horizontální složky a inklinace pro různá časová období v roce 2015 ve výšce okolo 820 km. Popsal jsem polohu zemského magnetického rovníku, který není shodný s geografickým rovníkem. Dokázal jsem, že severní magnetický pól leží na jižní polokouli. Dále jsem dokázal, že magnetické póly nejsou souhlasné s geografickými póly, což je způsobeno tím, že osa geomagnetického pole není totožná se zemskou osou rotační. Z výsledků je patrné, že ani střed geomagnetického pole se nenachází ve středu Země, ale je posunut směrem k oblasti Malajsie. Také jsem dokázal, že během jednoletého měření neprojde geomagnetické pole žádnými změnami, které by se projeví v rámci citlivosti, s jakou měří teslametry družice Proba-V.

Vlastním měřením a porovnáním dat jsem ověřil, že s rostoucí vzdáleností od středu geomagnetického pole klesá velikost magnetické indukce. Konkrétně na stejných GPS souřadnicích v ČR při povrchu Země naměříme asi o 15 μT větší hodnoty než v letové hladině družice.

Vytvořil jsem mapy rozložení dávkového příkonu a počtu nabitých částic na cm^2 za sekundu pro různá časová období v červnu 2015 ve výšce okolo 820 km. Zobrazil jsem oblast Jihoatlantické anomálie a oblasti polárních radiačních pásů. Dokázal jsem, že geomagnetické pole dokáže zakřivit trajektorie nabitých částic slunečního větru. Dále jsem dokázal, že po slunečních erupcích se okolo Země nachází více nabitých částic než za normálních okolností. To má za následek náhlé zvýšení radiace na oběžné dráze, především v oblasti Jihoatlantické anomálie. Odezdnávání zvýšených hodnot poté probíhá o něco pomaleji.

Z mých výsledků také vyplývá, že vliv slunečního větru na tvar geomagnetického pole se ve výšce okolo 820 km nad povrchem Země výrazně neprojeví.

Literatura a zdroje

- [1] E. Svoboda, Přehled středoškolské fyziky, Prometheus, 2012.
- [2] "BGS Geomagnetism," British Geological Survey, [Online].
Available: <http://www.geomag.bgs.ac.uk/>. [Accessed 29 únor 2016].
- [3] "Wikipedia," 1997. [Online]. Available: <http://www.wikipedia.org>.
[Accessed 29. únor 2016].
- [4] J. Slabý, P. Šedivý and P. Bouchner, *Detekce vysokoenergetického kosmického záření CZELTA, práce SOČ*, Pardubice: Gymnázium Pardubice, Dašická 1083, 2008.
- [5] C. Granja, "Jihoatlantická anomálie vnitřního radiačního pásu Země," *Vesmír*, no. 12, pp. 686-689, 2014.
- [6] "Vernier," [Online]. Available: <http://www.vernier.cz/uvod/rozcestnik>.
[Accessed 29. únor 2016].
- [7] "Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT," 2002. [Online].
Available: <http://www.utef.cvut.cz>. [Accessed 29. únor 2016].
- [8] "PROBA-V website," 2013, [Online]. Available: <http://proba-v.vgt.vito.be/> .
[Accessed 29. únor 2016].
- [9] "eoPortal Directory," 2000. [Online].
Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>.
[Accessed 7. březen 2016].
- [10] "A Colletion of Satellite Database," [Online].
Available: <http://satellitedebris.net/Database/>. [Accessed 29. únor 2016].
- [11] *Večer pod lampou - Čo je v strede Země*. [Publicistický TV pořad]. Slovensko.2006.