

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Geotechnologie



Ondřej Vávra

Separace indukovaných a remanentních zdrojů magnetických anomálií na Měsíci
Separation of induced and remanent sources of magnetic anomalies on the Moon

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Günther Kletetschka, Ph.D

Praha, 2021

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 26. 08. 2021

Podpis

Abstrakt

Pokaždé když je Měsíc v úplňku, prochází ohonem zemské magnetosféry. Přibližně 6 dní je vystaven silnějšímu magnetickému poli, které indukuje magnetizaci paramagnetických a feromagnetických hornin. Snažím se vypátrat stopu těchto hornin, v záznamech z orbitálních měření a navrhnout tak nový způsob zpracování orbitálních magnetometrických dat vhodný k lokalizování ložisek železa.

V teoretické části práce jsem představil základní pojmy magnetismu hornin, popsal jsem zemskou magnetosféru a zaměřil se na dynamické prostředí ohonu, jehož vlastnosti jsou přímo ovlivněny interakcí magnetického pole země s rychle se pohybujícími částicemi slunečního větru. Ve výpočetní části jsem poté zobrazil mapu z magnetometrických dat satelitu Kaguya (SELENE) z dob kdy se Měsíc nachází v magnetosférickém ohonu a referenční data naměřená v meziplanetárním magnetickém poli. Tyto mapy jsem odečetl a získal tak mapu indukovaných anomálií.

Podarilo se mi potvrdit výskyt jedné anomálie během dvou různých proletů Měsíce ohonem zemské magnetosféry. Detekovaná anomálie, ležící na severním okraji kráteru South Pole - Aitken, pravděpodobně ukazuje na stopu významného ložiska železa.

Abstract

During every full Moon our natural satellite passes through the Earth's magnetotail. For about 6 days the moon is exposed to a much stronger magnetic field, which induces magnetization in the paramagnetic and ferromagnetic minerals.. I'm trying to find a trace of these minerals in orbital magnetometric data and suggest a new way of analysing the magnetometer data suited for finding iron deposits.

In the theoretical part of this work, I presented basic concepts of magnetism, described the magnetosphere, focusing on the dynamic nature of the magnetotail, which is directly influenced by the interaction of the magnetosphere with the fast moving particles of the solar wind.

In the computational part, I plotted maps of the magnetometric data from the satellite Kaguya (SELENE) for times in which the Moon is in the Earth's magnetotail and reference maps from times in which the Moon is in the interplanetary magnetic field. I subtracted the data thus making a plot of the induced anomalies.

I managed to confirm the occurrence of one of the anomalies in two separate magnetotail events. The induced anomaly located on the northern rim of the South Pole - Aitken Basin likely shows a signature of significant iron deposits.

Obsah

Úvod	10
Magnetismus hornin	11
Magnetosféra	13
Magnetický ohon	16
Magnetometr satelitu Kaguya	18
Výpočetní část	19
Závěr	28
Zdroje	29

Úvod

Lidská pozornost se znovu otáčí k Měsíci. Existují plány k zajištění trvalé lidské přítomnosti nejprve na oběžné dráze a poté i na jeho povrchu. K zlevnění a možná i postupné komercializaci takových objevných výprav bude důležité využití tamějších zdrojů. Strategie ISRU (in situ resource utilization) v sobě zahrnuje sběr, zpracování a uložení materiálů, které by jinak bylo třeba dopravit ze Země. Vedle vodíku a kyslíku, použitelných jako raketové palivo a pro systémy podporující život, je důležitým prvkem železo, užitečné k výrobě nosných struktur a nástrojů. Poměrně bohaté zastoupení železa v regolitu bazaltických měsíčních moří koliduje s energetickou náročností jeho extrakce ze silikátových minerálů. Velké množství kovu se dá nejvýhodněji získat z masivního rudního tělesa.

Vedoucí mé práce doc. RNDr. Günther Kletetschka, Ph.D. navrhl, zdali by se na základě dostupných magnetometrických dat ze satelitů Lunar Prospector a Selene (Kaguya), analýzou záznamu z období, kdy byl Měsíc ponořen do ocasu zemské magnetosféry, dala získat mapa indukovaných anomálií. Takováto mapa by vypovídala o přítomnosti elektricky vodivých hornin, pravděpodobně kovového železa. (Wieczorek, Weiss, Stuart, 2012) ukázal, že nejvýraznější uspořádání magnetických anomálií na Měsíci se dá vysvětlit přítomností vysoce magnetických materiálů z tělesa, které při nárazu vytvořilo největší kráter na Měsíci: pánev South Pole - Aitken. Tato oblast byla tedy vybrána pro ověření zmiňované hypotézy

Magnetismus hornin

Pro práci s magnetickým polem na Měsíci je třeba vysvětlit fyzikální podstatu magnetismu hornin. Magnetismus se dá uspokojivě vysvětlit pomocí kvantové mechaniky. Magnetická síla má původ ve spinu elektronů. Feromagnetismus je způsoben efekty kvantové mechaniky: Pauliho vylučovacím principem a spinem (Feynman, Phillips, Sands, Leighton, 2001). Pro účely této práce se budu držet vnějšími projevy magnetismu, které jsou dobře popsány v rámci klasické fyziky.

K definici magnetických vlastností minerálů, necht' \mathbf{m} (vektorové veličiny jsou značeny tučně) značí magnetický moment dipólu z nějakého druhu lokalizovaného proudu, např. uvnitř atomu. Kus horniny s příspěvky mnoha individuálních dipólů se popisuje dipólovým momentem v jednotce objemu neboli magnetizací \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \frac{\sum_i \mathbf{m}_i}{V}$$

kde se sčítají dipóly v celém objemu V . \mathbf{M} má SI jednotku ampéru na metr (A/m) (Langel, Hinze, 1998). Pokud mají jednotlivé dipólové momenty preferovanou orientaci, vznikají magnetické domény a magnetismus materiálu se projevuje v makroskopickém měřítku (Feynman, Phillips, Sands, Leighton, 2001).

Rotací vektorové veličiny magnetizace, lze vyjádřit hustotu magnetizačních proudů \mathbf{J}_{mag} :

$$\mathbf{J}_{mag} = \nabla \times \mathbf{M}$$

(Feynman, Phillips, Sands, Leighton, 2001).

Což se dá dále rozepsat jako:

$$\nabla \times (\mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{M}) = \mu_0 \mathbf{J}$$

kde \mathbf{J} je proud a \mathbf{H} se nazývá intenzita magnetického pole (Langel, Hinze, 1998).

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{M}}{\mu_0}$$

Předpokládá se že \mathbf{M} a \mathbf{H} jsou lineárně závislé:

$$\mathbf{M} = K_m \mathbf{H}$$

kde K_m , bezrozměrný skalár, popisuje jak snadno se materiál zmagnetizuje (Langel, Hinze, 1998).

Potom

$$\mathbf{B} = \mu_0(K_m + 1)\mathbf{H} = \mu\mathbf{H}$$

kde K_m je magnetická susceptibilita a μ je permeabilita prostředí (Langel, Hinze, 1998). V tomto případě je magnetizace indukovaná magnetickým polem \mathbf{H} (Langel, Hinze, 1998).

V horninách může být magnetizace indukovaná, nebo pokud se po odstranění pole \mathbf{H} nevrátí \mathbf{M} na hodnotu nula, trvalá nebo remanentní (Langel, Hinze, 1998). Trvalý magnetismus v hornině se nazývá přírodní remanentní magnetizace (Natural remanent magnetization, NRM) (Langel, Hinze, 1998). Platí že

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_r + \mathbf{M}_i$$

kde \mathbf{M}_r je NRM a \mathbf{M}_i je indukovaná magnetizace (Langel, Hinze, 1998). Poměr

$$Q = \frac{M_r}{M_i} = \frac{M_r}{K_m|\mathbf{H}|}$$

se označuje jako Koenigsbergerův (Koenigsberger, 1938), (Langel, Hinze, 1998).

Diamagnetické látky nemají permanentní magnetický moment. V přítomnosti vnějšího magnetického pole vznikají indukované magnetické momenty orientované proti směru vnějšího pole (Feynman, Phillips, Sands, Leighton, 2001). Vnější pole tak mírně zeslabují (Tarling, Hrouda, 1993).

Paramagnetické látky mají permanentní magnetický moment. Ve vnějším magnetickém poli se jednotlivé dipóly snaží natočit ve směru pole a mírně ho tak zesilují (Feynman, Phillips, Sands, Leighton, 2001).

Feromagnetické látky jsou typické tím, že se magnetické momenty shlukují do tzv. domén se shodnou orientací (Tarling, Hrouda, 1993). Pokud takovou látku vložíme do vnějšího magnetického pole, jehož síla bude postupně růst, dojde nejprve k tomu že se začnou zvětšovat domény orientované ve směru vnějšího pole, poté se domény natočí do krystalografického směru nejbližšího vnějšímu magnetickému poli, až se nakonec domény ustálí ve směru magnetického pole (Feynman, Phillips, Sands, Leighton, 2001). Vnější magnetické pole zesilují relativně velkou měrou, závislou na jeho intenzitě (Feynman, Phillips, Sands, Leighton, 2001).

Mapa magnetických anomálií vypovídá o fyzických a chemických vlastnostech hornin, z kterých magnetické pole vychází (Langel, Hinze, 1998). Horniny jsou složeny z minerálů, a přesto že všechny mají magnetické vlastnosti, ne všechny jsou měřitelné z orbity (Langel, Hinze, 1998). Mezi ty významné patří oxidy železa, často s příměsí titanu a některé sulfidy železa (Langel, Hinze, 1998). Překročením určité teploty se minerály stávají paramagnetickými, u feromagnetických minerálů je to Curieova teplota (Langel, Hinze, 1998). Magnetit je obzvláště významný zdroj lokální magnetizace, protože je to běžný akcesorický minerál se silnou magnetizací a má vysokou Curieovu teplotu 580°C (Langel, Hinze, 1998). Pro porovnání, teplota povrchu Měsíce na rovníku má silné výkyvy mezi přibližně -170 a 120 °C (Bugby, Farmer, O'Connor, Wirzburger, Abel, Stouffer, Robertson, 2010).

Magnetosféra

K porozumění vzniku a intenzity polí indukovaných na Měsíci je nejprve zapotřebí dobře uchopit magnetické pole Země a jeho interakci s meziplanetárním magnetickým polem.

Původ magnetického pole Země je dnes nejlépe vysvětlen teorií ochlazující se Země (The cooling Earth model) (Roberts, King, 2013). Konvekční proudy roztaveného železa ve vnějším jádře, poháněné postupným chladnutím Země, generují magnetické pole. Toto pole má sílu přibližně 60,000 nT na pólech a dvakrát menší intenzitu, 30,000 nT, v oblasti rovníku díky geometrii magnetického dipólu (Langel, Hinze, 1998). V blízkosti Země připomíná pole tyčového permanentního magnetu. Bez vnějších vlivů by se zemské pole rozprostíralo a ubývalo se vzdáleností podle rovnice dipólu s třetí mocninou vzdálenosti od zdroje (Feynman, Leighton, Sands, 2010).

Sluneční vítr proudí od Slunce kolem Země rychlostí 300 až 800 km · s⁻¹, má iontovou hustotu přibližně 4 cm⁻³, iontovou teplotu 10⁵ K, elektronovou teplotu 2 · 10⁵ K a rychle se pohybující nabitě částice indukují meziplanetární magnetické pole (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Síla tohoto pole fluktuuje ale je v průměru 5 nT (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). V rovině ekliptiky směřuje podél Parkerovy spirály pod úhlem 135° nebo 315° (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999).

Meziplanetární magnetické pole je značně proměnlivé a jeho severo/jižní souřadnice “z” ovládá mnoho aspektů vzájemného chování slunečního větru a magnetosféry (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999).

Slunce prochází 11letým cyklem, který je charakterizován změnami v počtu a ploše slunečních skvrn (Hathaway, 2010). Cyklus způsobuje změny v napojení siločar zemského magnetického pole na siločáry magnetického pole Slunce.

Magnetické pole Země stojí slunečnímu větru v cestě, čímž vzniká magnetosféra (Obr. 1) (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Sluneční vítr zpomaluje na tenké hranici zvané rázová vlna (bow shock), kde se během 17 km plazma o mnoho řádů stlačí, ohřeje o přibližně půl milionu kelvinů (Schwartz, Henley, Mitchell, Krasnoselskikh, 2011) a plyne kolem magnetosféry magnetickým obalem (magnetosheath) (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Typické parametry plazmy slunečního větru v denní části magnetického obalu jsou: iontová hustota $20 - 30 \text{ cm}^{-3}$, rychlost $200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, teplota 10^7 K a magnetická indukce $30 - 40 \text{ nT}$ (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Na vnitřním okraji magnetického obalu naráží sluneční vítr na magnetopauzu, relativně tenkou (1000 km) zónu, kde se síla a orientace magnetického pole mění z hodnot nacházejících se v magnetickém obalu na hodnoty magnetosférické (Obr. 1) (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Magnetopauza se nachází přibližně $10 - 12 R_e$ (Earth radius, $1 R_e = 6371 \text{ km}$) od Země na denní straně (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Magnetické indukční čáry vnitřní magnetosféry jsou uzavřené (mají oba konce v ionosféře) a téměř dipolární (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). V této oblasti se vyskytují 3 hlavní skupiny částic: Van Allenovy radiační pásy, prstencový proud a plazmasféra (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Ve vnějším radiačním pásu, jehož střed leží $4 \text{ až } 5 R_e$ od země, se vyskytují velmi energetické ionty a elektrony ($0.05 \text{ až } 1 \text{ MeV}$) (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). V zeměpisných šířkách poblíž rovníku a poblíž magnetopauzy má plazma nižší hustoty ($\leq 1 \text{ cm}^{-3}$) a mnohem vyšší teploty ($\geq 10^8 \text{ K}$) oproti slunečnímu větru nebo magnetickému obalu (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Plazmasféra je oblast husté ($\geq 100 \text{ cm}^{-3}$), studené (10^4 K) plazmy tvaru toru, která se rozpíná $3 - 6 R_e$ od Země v oblasti rovníku (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999).

Působením slunečního větru se magnetické indukční čáry vystupující z pólů nechovají jako u klasického dipólu, ale jsou unášeny mnoho stovek R_e směrem od Slunce do magnetického ohonu (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). V magnetosférickém laloku

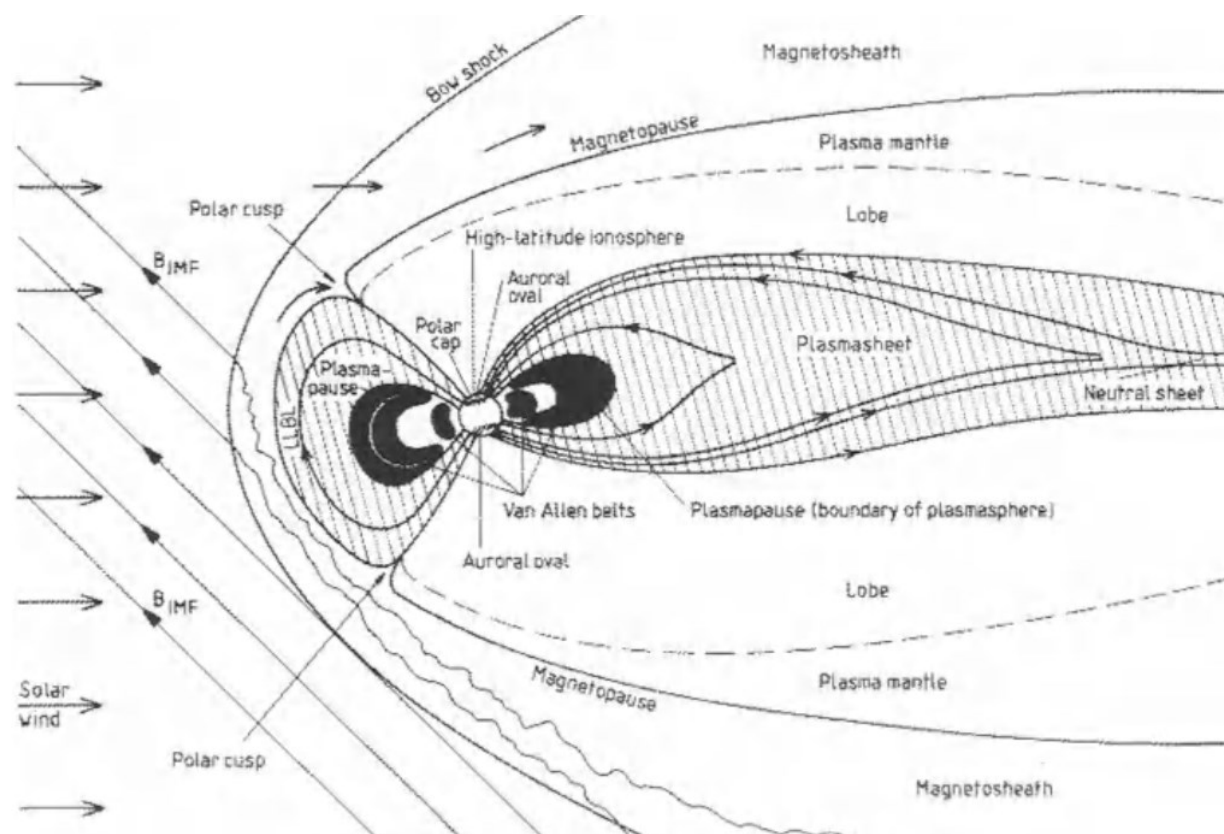
(lobe) poblíž Země se nacházejí převážně protony a ionty kyslíku s jedním nábojem, proudící směrem od Slunce, s nízkými hustotami ($\leq 0.01 \text{ cm}^{-3}$) a teplotami ($\leq 2 \cdot 10^5 \text{ K}$) (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Magnetická pole směřující k Slunci v severním magnetosférickém laloku a pole směřující od Slunce v jižní laloku musí být oddělena proudovou vrstvou, která leží v plazmatické vrstvě (plasma sheet), oblasti žhavější ($> 10^6 \text{ K}$ pro elektrony, $> 10^7$ pro ionty) a hustější (1 cm^{-3}) plazmy (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999).

V převážné většině případů značí magnetopauza nejzazší hranici pro výskyt magnetosférických indukčních čar a nejbližší hranici pro výskyt indukčních čar magnetického obalu (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Malá část slunečního větru magnetopauzou pronikne do magnetosféry a vytvoří vrstvu mocnou přibližně 1000 km na denní straně a až několik R_e mocnou na straně noční (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Zatímco hraniční vrstva nízkých zeměpisných šířek (low-latitude boundary layer, LLBL) obsahuje směs plazem magnetického obalu a magnetosféry ležících na otevřených a zavřených magnetických indukčních čarách, plazmatický plášť vysokých zeměpisných šířek obsahuje hlavně plazmu magnetosférického obalu a zdá se, že leží pouze na otevřených indukčních čarách (jeden konec na Zemi, druhý ve slunečním větru) (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Polární kasp (polar cusp) je region téměř stagnující husté (5 až 10 cm^{-3}) plazmy na mag. indukčních čarách polární zem. šířky, které náleží k magnetopauze (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Kasp odděluje mag. indukční čáry příslušející k denní a noční části magnetosféry (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Malá část magnetosférické plazmy také pronikne magnetopauzou do magnetického obalu. Unikající energetické ($\geq 1 \text{ keV}$) ionty jsou často pozorovány v magnetickém obalu ve vzdálenosti až několik tisíc kilometrů od magnetopauzy a někdy i mnohem dále po proudu slunečního větru, zatímco unikající elektrony jsou většinou v přímé blízkosti magnetopauzy (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999).

Značná část nejsvrchnější magnetosféry je ionizovaná. V ionosféře je hustota nabitých částic největší (až 10^6 částic na cm^3) ve výškách 250 – 300 km. Ionosféra je strukturovaná dle nadmořské výšky. Oblast s nejvyšší hustotou nabitých částic ve výšce asi 300 km se nazývá F vrstva. Ve výšce 100 km se nachází E vrstva a na dně ionosféry (80 km) je D vrstva. Nejčastěji se vyskytujícím iontem v těchto nadmořských výškách je O^+ . Horní limit ionosféry se překrývá se spodní magnetosférou ve výškách 500 – 2000 km. V prvních

několika stovkách kilometrů jsou k přenosu energie důležité kolize mezi částicemi. Ve vyšších nadmořských výškách s nižší iontovou hustotou se energie přenáší elektromagnetickými poli. Hustota plazmy ve výšce $1 R_e$ většinou nepřekračuje 50 cm^{-3} a ve výšce $2 R_e$ je pouze několik jednotek částic na cm^{-3} . Variace v hustotách je značná. Působením dostatečně účinných vylučovacích procesů může být hustota ve výšce $1 R_e$ menší než 1 částice na cm^3 . (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999)

Nabitě částice se dostávají do svrchní atmosféry podél geomagnetických indukčních linií do výšek menších než 200 km, kde jsou pohlceny kolizemi s ionosférickými a atmosférickými částicemi (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Příkladem jsou elektrony urychlené směrem dolů, které způsobují polární záře při styku s atmosférou (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Děje se tak v oválných oblastech poblíž magnetických pólů poblíž hranice mezi otevřenými a zavřenými indukčními liniemi (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999).

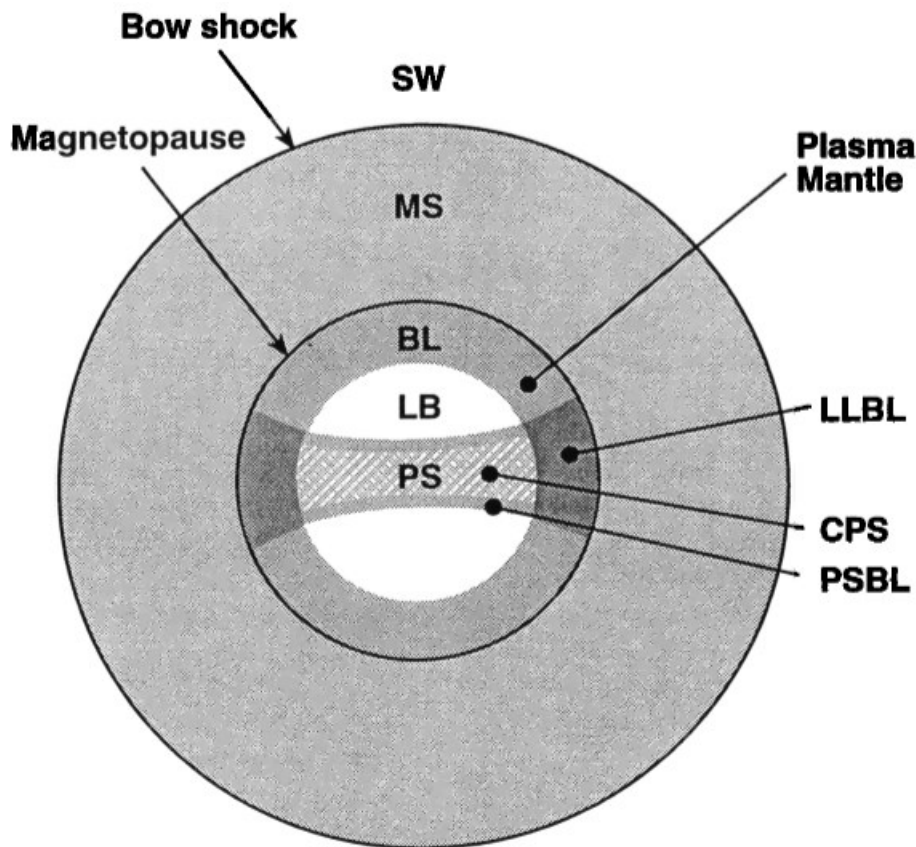


Obr. 1 Diagram magnetosféry (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999)

Magnetický ohon

Magnetosféra v blízkosti Země má tvar rotačního paraboloidu s ohniskem směřujícím k Slunci. Magnetické indukční čáry vycházející z polárních oblastí na noční straně Země jsou protaženy od slunce do dlouhého ($> 1000 R_e$) válcovitého útvaru. Tento útvar se nazývá magnetický ohon a představuje nejobtější část zemské magnetosféry. Z hlediska obsahu hmoty je druhý za plazmasférou. Ve vzdálenosti 30 – 50 R_e od Země je průměr ohonu přibližně 50 R_e . Vzdálenější ohon ($< 100 R_e$) má průměr 50 – 60 R_e . (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999). Pro srovnání, průměrná vzdálenost Měsíce od Země je přibližně 60 R_e (Murphy, 2013).

Magnetický ohon obsahuje dva regiony, severní a jižní magnetický lalok. Magnetický tok v severním laloku směřuje k slunci a napojuje se na ionosféru severního zemského pólu. Jižní lalok obsahuje magnetické indukční linie směřující od slunce napojené na ionosféru jižního zemského pólu. (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999) Magnetické laloky jsou odděleny oblastí slabšího magnetického pole a žhavější plazmy, zvanou plazmatická vrstva (PS) (Ness, 1965). V plazmatické vrstvě převažuje plazmatický tlak nad magnetickým tlakem. Změna směru magnetického pole nastává v proudové vrstvě plynoucí od úsvitu k soumraku. Oblasti uprostřed plazmatické vrstvy kde se mění znaménko magnetizace se říká neutrální vrstva. (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999) Plazmatická vrstva s proudovou vrstvou dosahují oběžné dráhy Měsíce (60 R_e) (Behannon, 1968).



Obr. 2 Struktura plazmy v magnetickém ohonu. SW, sluneční vítr; MS, magnetický obal; BL, hraniční vrstva, obsahuje plazmatický plášť a hraniční vrstvu malých zeměpisných šířek (LLBL); PS, plazmatický plášť, obsahující centrální plazmatický plášť (CPS) a hraniční plazmatickou vrstvu (PSBL); LB, magnetický lalok (Eastman, Christon, Doke, 1998)

Hraniční vrstva je definovaná přítomností plazmy podobné plazmě magnetickém obalu uvnitř magnetopauzy. LLBL přerušuje magnetopauzu a obsahuje žhavou plazmu podobnou té z plazmatické vrstvy a studenou plazmu podobnou té z magnetického obalu. Typické hodnoty kinetické energie částic v plazmatické vrstvě jsou 4 keV pro ionty a 0.6 keV pro elektrony. Hraniční plazmatické vrstvy jsou charakterizované silným prouděním v souladu s polem. Magnetický lalok obsahuje silná a stálá magnetická pole. (Hultqvist, Øieroset, Paschmann, Treumann, 1999)

Předpokládá se, že síla a směr meziplanetárního magnetického pole (interplanetary magnetic field, IMF) určuje velikost, tvar a vnitřní konfiguraci vzdáleného magnetického ohonu. Když IMF směřuje jižně, magnetický tok uniklý z denní strany magnetosféry a připojený k magnetickému ohonu rekonekcí na denní straně magnetopauzy způsobuje

rozšíření magnetopauzy magnetického ohonu do prostoru (Maezawa, 1975). Naopak během severní orientace IMF, rekonexce připojí magnetické indukční čáry k magnetopauze na denní straně, snižujíc tak rozměr magnetického ohonu (Song, Russell, 1992). Směr IMF určuje místa, kde plazma a magnetické indukční linie vstupují do magnetického ohonu a místa kde z něho vystupují a naklonění proudové vrstvy, která odděluje severní magnetický lalok od jižního (Sibeck, Lin, 2014). Sluneční vítr unáší magnetické indukční linie s jedním koncem v ionosféře směrem od slunce podél magnetosféry. Tímto pohybem získávají magnetické indukční linie laloku s jedním koncem v severní ionosféře severní orientaci a linie s jedním koncem v jižní ionosféře jižní orientaci (Sibeck, Lin, 2014).

Globální magnetohydrodynamické modely inerakce slunečního větru se zemskou magnetosférou umožňují kvantifikovat teoretické předpoklady ohledně vlivu magnetických indukčních linií mag. obalu na tvar a konfiguraci průřezu magnetickým ohonem. IMF většinou nesměřuje severně nebo jižně, ale má silný komponent ve směru úsvitu nebo soumraku (B_y). (Sibeck, Lin, 2014) Simulace potvrzují, že průřez magnetickým ohonem je prodloužený ve směru rovnoběžném s komponentem IMF ležícím v ploše kolmé na spojnici Země a Slunce (Lu et al., 2013).

Pro IMF naorientované směrem k soumraku, se proudová vrstva, oddělující indukční čáry severního a jižního magnetického laloku, krotí proti směru hodinových ručiček se vzdáleností po proudu při pohledu od Země (Sibeck, Lin, 2014). Pro IMF naorientované směrem k úsvitu probíhá kroucení po směru hodinových ručiček (Sibeck, Lin, 2014).

Shrnutí:

- Velikost a tvar ohonu jsou závislé na směru a intenzitě meziplanetárního magnetického pole
- Jednotlivé plazmatické regiony jsou dobře vymezeny
- Statistické určení tvaru není možné, kvůli časové proměnlivosti, pro předpověď okamžitého tvaru existují magnetohydrodynamické modely

Magnetometr satelitu Kaguya

LMAG (Lunar Magnetometer) má triaxiální fluxgate senzory s prstencovým jádrem (Tsunakawa, Shibuya, Takahashi, 2010). Byl navržen na základě předchozích misí Geotail a Nozomi (Tsunakawa, Shibuya, Takahashi, 2010).

Fluxgate magnetometr je typ vektorového magnetometru, který byl vynalezen již v roce 1936 (Ness, 1970). Za druhé světové války se používal k detekci ponorek. Později přispěl k potvrzení teorie deskové tektoniky, při měření magnetických anomálií oceánské kůry. Skládá se ze dvou cívek a jádra z magneticky měkkého kovu (Ness, 1970). Do jedné cívky se pouští střídavý proud, který generuje v jádře magnetické pole. Změny generovaného pole způsobené interakcí s externím polem snímá druhá cívka. Triaxiální fluxgate magnetometr dokáže za pomoci tří vzájemně kolmých snímačů zaznamenávat 3 složky vektoru magnetického indukce \mathbf{B} , jednotkou je Tesla (T), v soustavě SI poté $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$. Odmocněním sumy čtverců jednotlivých komponent lze získat délku vektoru, tedy skalár odpovídající velikosti magnetické indukce.

Snímače LMAG mají 4 dynamické rozsahy ± 64 , ± 256 , ± 1024 a ± 65536 nT a jsou umístěny na konci 12metrového stožáru, aby se zabránilo snímání magnetických ruchů z družice. Stožár byl původně složen ve válcovém pouzdru (o délce 0.9 m a průměru 0.3 m) a byl nasazen až potom co družice dosáhla polární orbity s výškou 100 km nad povrchem Měsíce. Váha celého zařízení byla 14 kg. Kalibrace magnetometru proběhla jak na Zemi tak i v orbitě. (Tsunakawa, Shibuya, Takahashi, 2010)

Výpočetní část

Pracoval jsem s daty z japonské družice SELENE někdy nazývané Kaguya, obsahující záznamy od prosince 2007 do konce října 2008, volně dostupnými z: <https://data.darts.isas.jaxa.jp/pub/pds3/sln-1-lmag-3-mag-ts-v1.0/>.

Data (vzorek na Obr. 3) obsahují čas v UTC (Universal time coordinated) a dvě sady 6 sloupců obsahující pozici a vektor magnetického pole ve dvou různých kartézských souřadnicových systémech: ME (Mean Earth/Polar Axis System) a GSE (Geocentric Solar Ecliptic System).

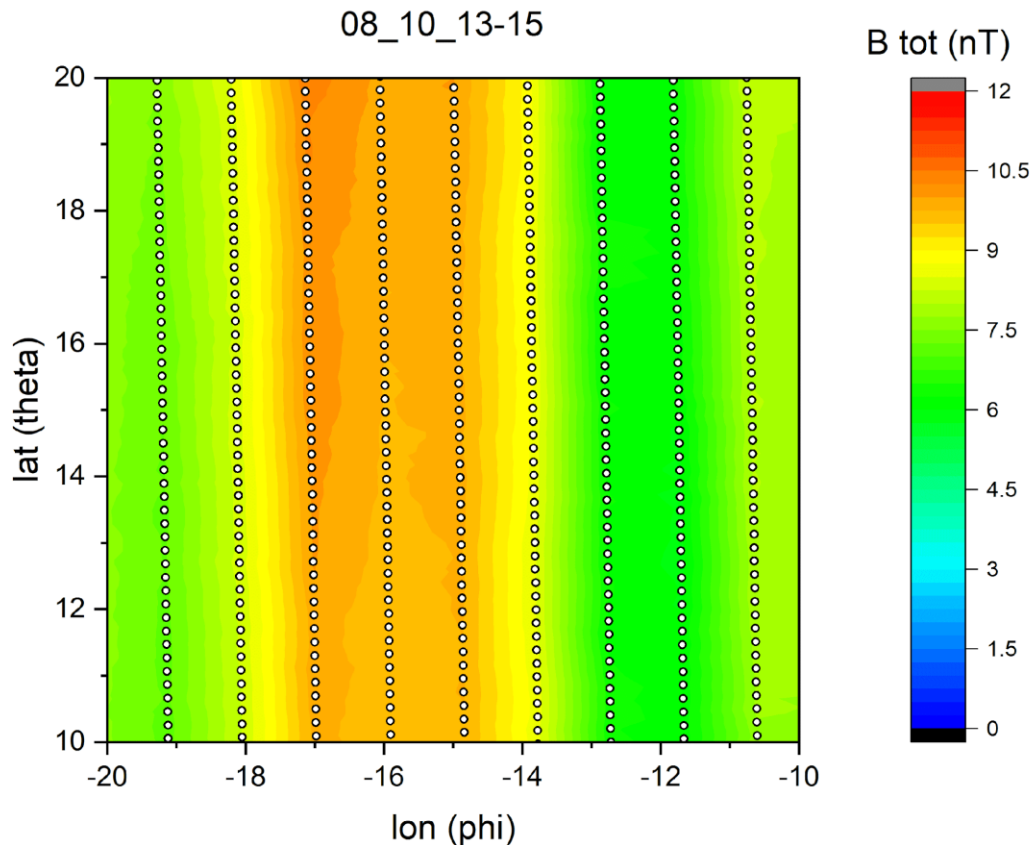
2007-12-24T00:00:00,	78.2,	-211.0,	1821.1,	7.55,	1.63,	0.94,	-361800.9,	5061.6,	29146.6,	7.63,	1.09,	1.10
2007-12-24T00:00:04,	76.5,	-204.7,	1821.6,	7.66,	1.06,	0.86,	-361802.4,	5064.0,	29146.9,	7.69,	0.51,	1.02
2007-12-24T00:00:08,	74.8,	-198.4,	1822.2,	7.64,	1.06,	0.82,	-361803.9,	5066.4,	29147.1,	7.68,	0.52,	0.98
2007-12-24T00:00:12,	73.0,	-192.1,	1822.8,	7.63,	1.09,	0.75,	-361805.4,	5068.7,	29147.4,	7.67,	0.55,	0.92
2007-12-24T00:00:16,	71.3,	-185.9,	1823.3,	7.59,	1.10,	0.66,	-361806.8,	5071.1,	29147.6,	7.63,	0.56,	0.82

Obr. 3 Struktura volně dostupných dat magnetometru družice Kaguya

System GSE má střed uprostřed Země, tudíž je pro účely tvorby grafů vztažených k povrchu Měsíce nevhodný.

System ME má střed uprostřed Měsíce, jeho nultý poledník je definován průměrným směrem k Zemi, tedy přibližně středem přivrácené strany. Osa x systému ME prochází průsečíkem tohoto nultého poledníku s rovníkem. Osa z leží na úsečce mezi rotačními póly Měsíce. Data v souřadném systému ME byla dále zpracována.

Družice Kaguya byla umístěna na polární orbitu ve výšce 100 km nad povrchem měsíce, z čehož vyplývá orbitální perioda cca 2h. Tato orbita nevykazuje nodální progresi či regresi a její rovina je konstantní vzhledem ke vzdáleným hvězdám. Rotace orbitální roviny vzhledem k povrchu měsíce je tak dána rotací měsíce kolem vlastní osy s periodou 27,3 dní. Tudíž rozestup průletů je zhruba 1° selenografické délky. Podél orbity je vektor magnetizace měřen jednou za 4s a tudíž obsahuje zhruba 5 měření na 1° selenografické šířky. Jemná struktura měření je ilustrována na příkladu na Obr. 4, kde jeden měřený bod odpovídá jednomu řádku záznamu.



Obr. 4. Ilustrace hustoty vzorkování magnetického pole nad povrchem měsíce družicí Kaguya. Body jsou jednotlivá měření vektoru magnetizace. V podkladu je interpolovaná mapa celkové hodnoty magnetické indukce

Pomocí převodních vzorců a funkce atan2 jsem v Microsoft Excel přepočítal souřadnice z kartézských x, y, z na sférické souřadnice theta (selenografická šířka), phi (selenografická délka) a r (vzdálenost od středu Měsíce).

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\theta = \arcsin(z/r)$$

$$\phi = \arctg2(y/x)$$

Z vektoru magnetického pole B jsem vypočítal totální magnitudu (velikost vektoru).

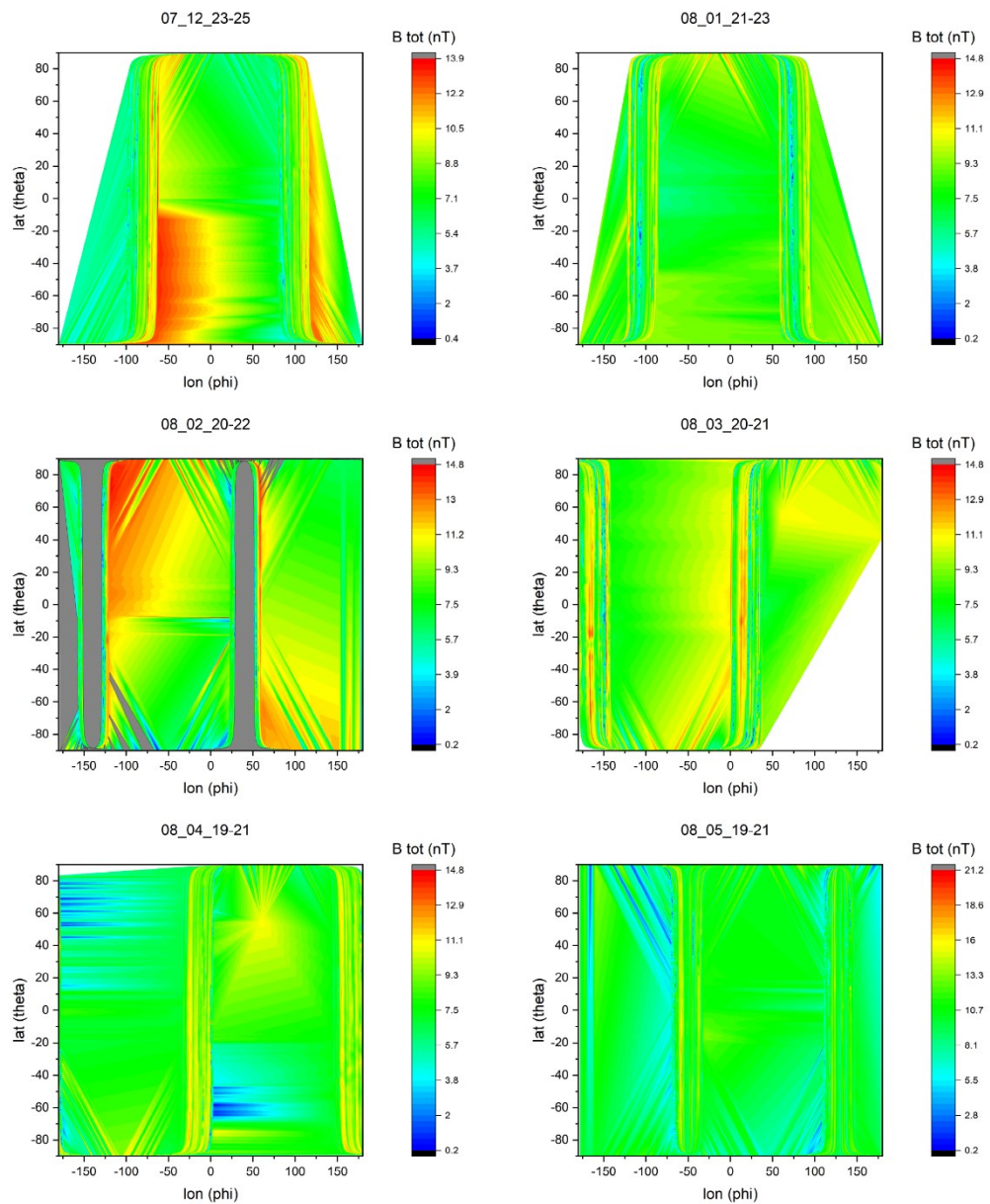
$$B_{tot} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Mapy velikosti magnetické indukce byly potom zobrazeny za pomoci programu OriginPro pomocí funkce XYZ contour plot přímo ze 3 sloupců obsahující hodnoty phi, theta a B_{tot} .

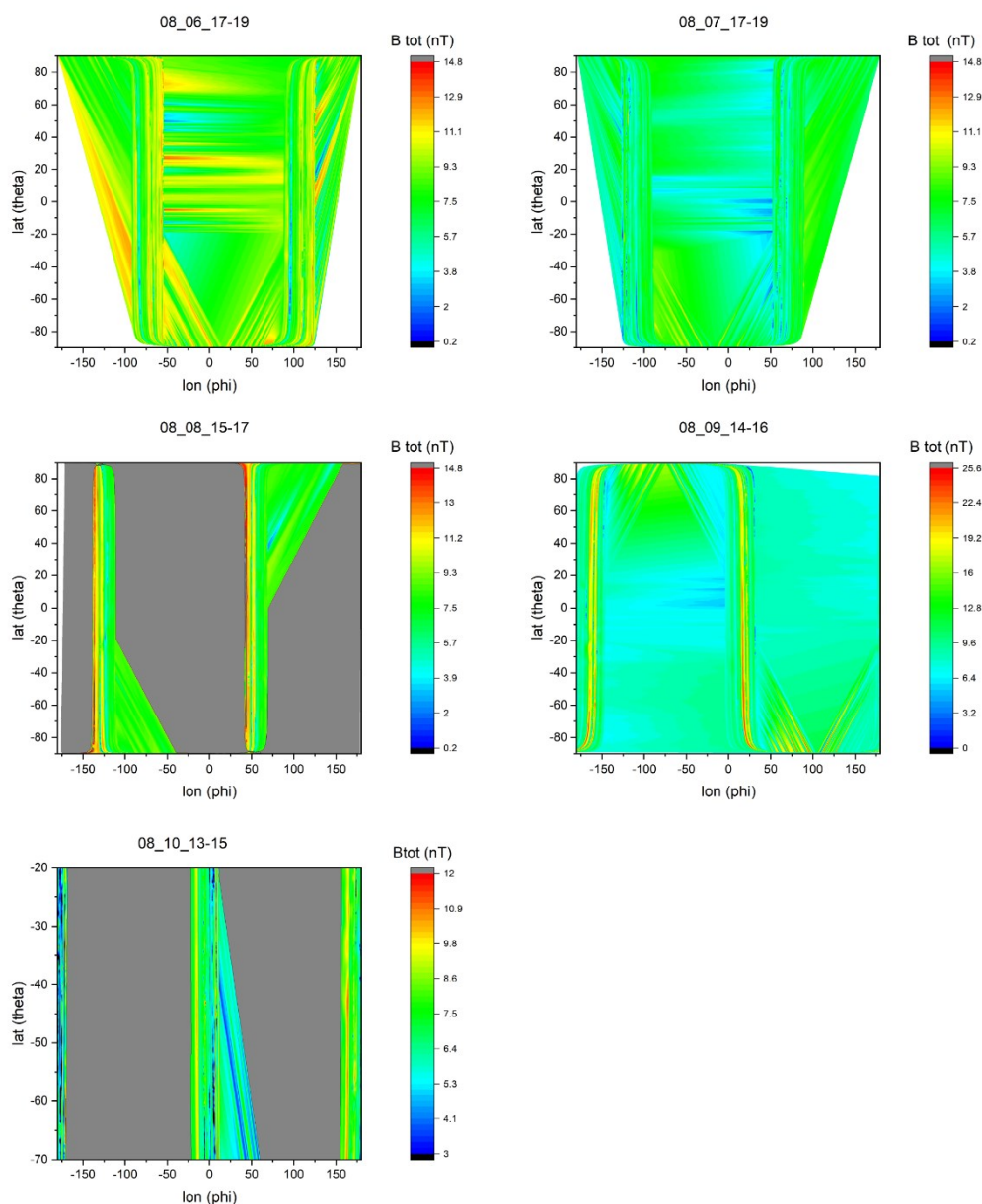
Algoritmus provede triangulaci, lineární interpolaci a výpočet kontur ekvivalentní hodnoty B_{tot} , plocha v souřadnicích ϕ , θ mezi přilehlými konturami je následně zobrazena jednou barvou.

Analyzoval jsem data naměřená družicí v rozsahu 11 měsíců od prosince roku 2007 do listopadu roku 2008. Předpokládám, že v den úplňku leží Slunce, země a měsíc zhruba na jedné přímce, a tudíž bude Měsíc procházet přibližným středem magnetického ohonu. Zaměřil jsem se tedy na den úplňku v každém měsíci ± 1 den pro vytvoření magnetických map povrchu Měsíce v magnetickém ohonu země. Tato data jsou zobrazena na **Obr. 4** a **Obr. 5**. Z polární orbity družice Kaguya vyplývá plné pokrytí selenografické šířky od -90° do $+90^\circ$, ale omezené pokrytí selenografické délky v rozsahu cca 40° na přivrácené straně měsíce a 40° na odvrácené straně měsíce. Pokrytá oblast se při každém následujícím úplňku posunuje o zhruba 40° na východ.

Data obsahují evidentně chybová měření, a to v případě, kde všechny složky vektoru magnetizace jsou 999 nT, a celková hodnota magnetické indukce 1730 nT. Tato chybová měření byla zaznamenána pro úplňk v únoru 2008, srpnu 2008 a částečně pro listopad 2008. Tato data jsem dále neuvažoval. Zdrojem chyby mohla být magnetická bouře.



Obr. 4 Mapy magnetického pole povrchu měsíce naměřená družicí okolo úplňku od 23.-25. prosince 2007 (07_12_23-25) do 19-21. května 2008 (08_05_19-21). V únoru nejspíš došlo k přehlcení snímačů magnetometru v silném magnetickém poli (šedá).



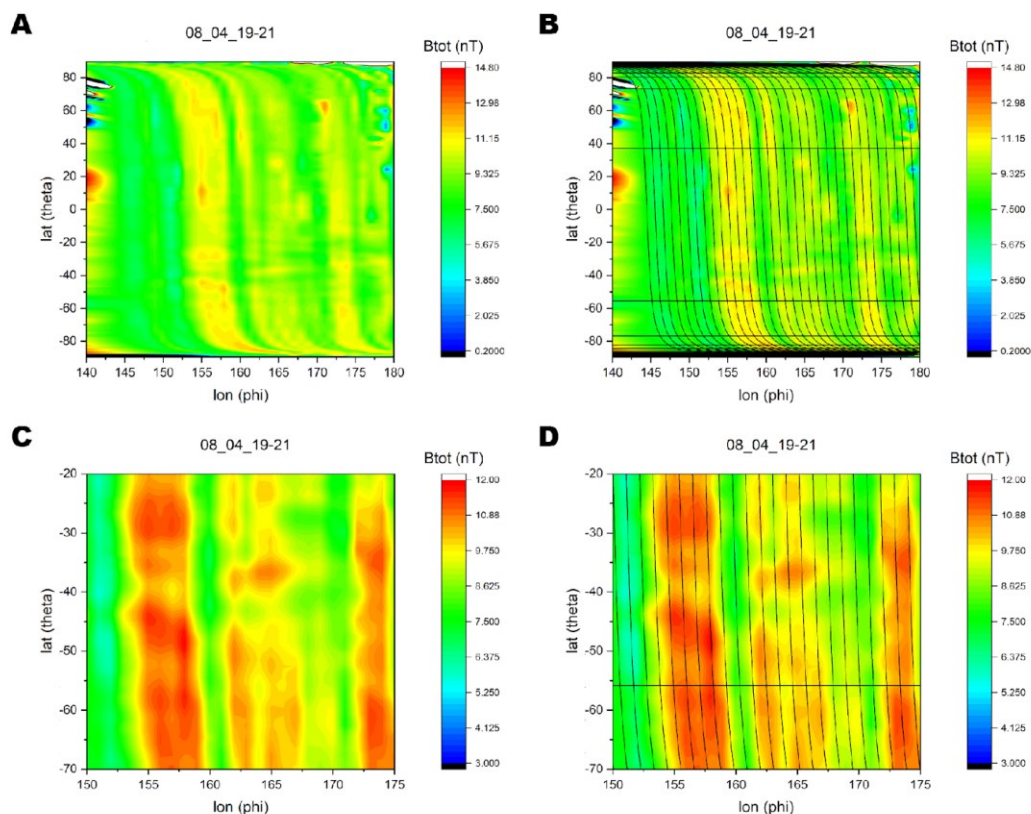
Obr. 5 Mapy magnetického pole povrchu měsíce od měření okolo úplňku od 17.-19. června 2008 (08_06_17-19) do 13-15. října 2008 (08_10_13-15). V srpnu a říjnu nastala období delší než den, během kterých byly snímače magnetometru přehlcneny v silném magnetickém poli (šedá).

Zaměřil jsem se na data z dubna 2008, kdy se družice pohybovala na odvrácené straně měsíce nad kráterem South Pole - Aitken, potenciálním místem s výskytem paramagnetických hornin. K porovnání jsem použil data starší přibližně o 12 dní, kdy se

družice pohybovala na stejném místě vůči povrchu Měsíce, ale celý Měsíc byl v meziplanetárním magnetickém poli.

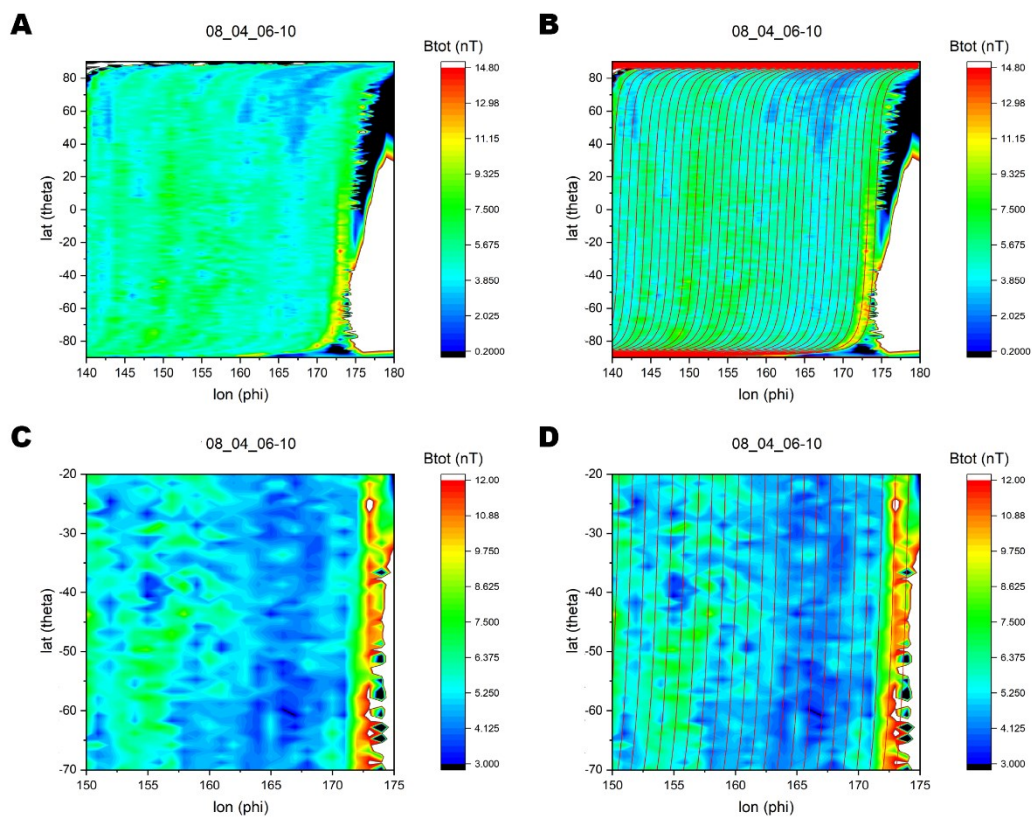
Z třírozměrných dat (θ , ϕ , B_{tot}) jsem v programu OriginPro s pomocí funkce XYZ gridding s metodou Renka-Cline interpoloval matici o rozlišení 1 stupeň v θ i ϕ . Toto rozlišení bylo zvoleno s ohledem na vzorkování povrchu měsíce v longitudě (ϕ) popsané výše. Matice (180 řádků, 360 sloupců) jsem interpoloval pro Měsíc v magnetickém ohonu okolo úplňku dne 20. 4. 2008 (Obr. 6) a pro Měsíc v meziplanetárním magnetickém poli mezi 6 - 10. 4. 2008 (Obr. 7). Odečtením těchto dvou matic (180 řádků, 360 sloupců) jsem získal mapu indukované části magnetizace (Obr. 8).

Na grafu z dubna 2008 (Obr. 6) jsou zřetelně vidět družicové přelety (sinusoidy připomínající písmeno "Z"). Anomálie vyskytující se napříč těmito pásy jsou pravděpodobně reálné. Tyto anomálie jsou měřitelné i při následných orbitech o 2, 4... hodiny později. Anomálie rovnoběžné se stopou přeletu satelitu mohou být způsobeny fluktuací plazmatu v dynamickém prostředí ohonu magnetosféry. Velikost pole je od 0 do 13 nT (oproti zemskému poli o velikosti 50 000 nT). Výrazné variace orientované kolmo k přeletovým pásům se nacházejí v rozmezí θ (-50,-20) a ϕ (155, 180). Tato oblast leží v části kráteru South Pole - Aitken (Obr. 9 A,B). V oblasti kráteru (Obr. 9 C,D) jsou pravděpodobně významná ložiska železa vzniklá při impaktu meteoritu bohatého na slitiny železa a niklu (Wieczorek, Weiss, Stewart, 2012), (Collins, 2012).



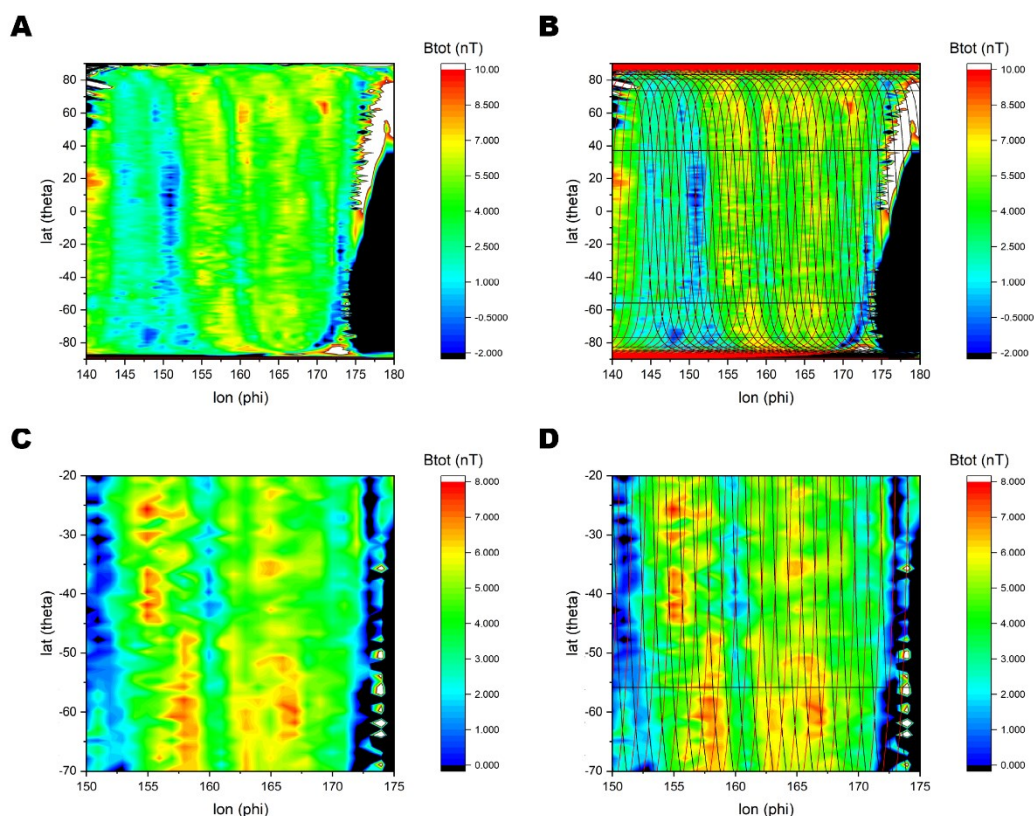
Obr. 6: Mapa intenzity magnetického pole naměřená mezi 19. a 21.4.2008 kdy se měsíc pohyboval v magnetickém ohonu země (A). Měsíc byl v úplňku dne 20.4.2008, nacházel se tedy v přibližném středu magnetického ocasu země. Stopa přeletu družice Kaguya (černá) zobrazená přes mapu intenzity magnetického pole (B) je charakteristická sinusoida připomínající písmeno “Z”. Průlety v konstantní selenografické šířce jsou pouze artefaktem zobrazení. Detail oblasti okolo South Pole - Aitken (C,D).

V době, kdy je Měsíc v meziplanetárním magnetickém poli jsou naměřené hodnoty magnetického pole v rozmezí 0 až 7 nT (Obr. 7), což je téměř polovina velikosti totálního magnetického pole naměřeného v ohonu magnetosféry. Opět jsou data ovlivněna přeletovými pásy, tentokrát ve tvaru písmene “S”. Bílá oblast vpravo dole nemá žádná data. Anomálie na jižní polokouli v rozmezí theta (-50,-20) a phi (155, 180), zřetelné na předchozím grafu (Obr. 6), zmizely. Znamená to, že byly potenciálně generovány indukci od ohonu zemského magnetického pole.



Obr. 7: Referenční mapa intenzity magnetického pole naměřená mezi 06. a 10.4.2008 (A), kdy se měsíc pohyboval v meziplanetárním magnetickém poli, tedy mimo magnetický ohon země. (B) Přes mapu je zobrazena stopa přeletu družice Kaguya (červená) charakteristická sinusoida připomínající písmeno “S”. Detail oblasti okolo South Pole - Aitken (C,D).

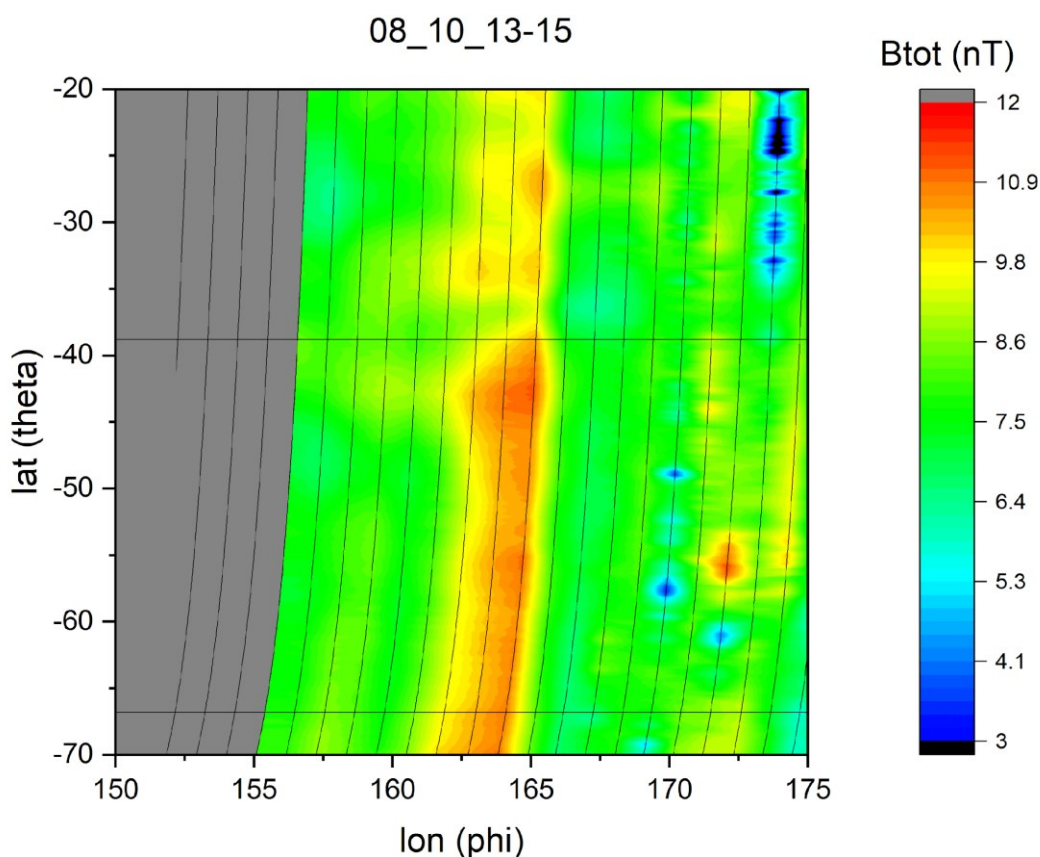
Rozdíl výše popsanych map odpovídá složce magnetického pole bez příspěvku remanentní magnetizace hornin Měsíce a zobrazuje tedy jak magnetické pole ohonu země, tak magnetická pole indukovaná v paramagnetických horninách Měsíce. (Obr. 8 A,B) Anomálie v oblasti pánve South Pole - Aitken nejsou kvůli šumu dobře zřetelné, ale stále jsou rozeznatelné (Obr. 8 C,D). Tyto anomálie by mohly být generovány indukovaným magnetickým polem v paramagnetickém materiálu s velkou susceptibilitou (např. železo). Data tedy ukazují, že v této oblasti by se mohla nacházet naleziště významného množství železa.



Obr. 8. Indukovaná složka magnetizace vypočtená jako rozdíl magnetizace v magnetickém ohonu země a magnetizace v meziplanetárním prostoru (A). Hodnoty jsou směrodatné mezi phi 145 a phi 175 stupňů. Okraje jsou mapy mimo záběr měřených hodnot. Na grafu (B) jsou poté zobrazeny stopy družice při průletu v magnetickém ohonu země (černá) a referenční měření v meziplanetárním prostoru (červená). Detail oblasti okolo South Pole - Aitken (C,D).

V analyzovaných datech byl dohledán průlet nad stejnou oblastí South Pole – Aitken naměřený v listopadu (Obr. 9), tedy s odstupem 6 měsíců od původně diskutovaných dat. Toto měření nepotvrzuje přítomnost původně popsání anomálie mezi 150° a 160° selenografické délky. Anomálie mezi 160° a 165° selenografické délky je však přítomná v obou měřeních. V obou případech je rozpoznatelná přes 3 průlety družice nad povrchem. Tímto měřením se tedy posiluje domněnka o možném ložisku hornin obsahujícím významné množství železa, či železa a niklu (meteoritické železo je významnou složkou měsíčního povrchu (Wieczorek, Weiss, Stewart, 2012)). Toto potenciální ložisko je pro

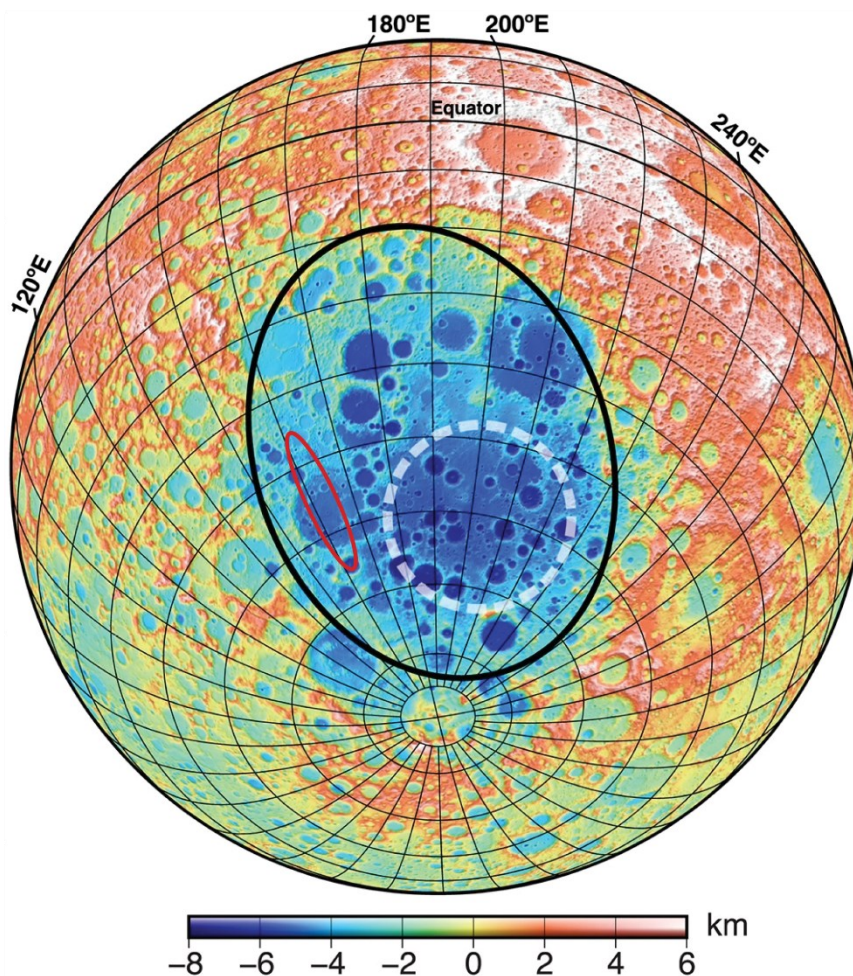
porovnání zakresleno na topografické mapě měsíce (Obr. 10). Identifikovaná anomálie se nachází na východním okraji kráteru South Pole - Aitken.



Obr. 9: Magnetické pole stejné oblasti nad kráterem South pole - Aitken měřená okolo úplňku 13-15. listopadu 2008. Mezi 150 a 155 longitudy jsou chybová měření.

Během misí Apollo byla zaznamenána silná lokalizovaná magnetická pole s původem v měsíční kůře (Dyal, Parkin, Sonett, 1970). Ke vzniku magnetické anomálie jsou zapotřebí 2 věci: magnetické pole a magnetické minerály, které o něm vytvoří záznam (Collins, 2012). Horniny měsíční kůry obsahují relativně malé množství metalického železa a jsou tedy slabě magnetické (Fuller, 1974). Původní vysvětlení anomálií hovoří o mocných tělesech zmagetovaných silným polem, které se v současnosti na Měsíci nevyskytuje (Dyal, Parkin, Sonett, 1970). Wiczeorek navrhnul, že tyto anomálie mohou vycházet z relativně subtilní vrstvy materiálu (slitiny železa a niklu) uloženého meteoritem (Wiczeorek, Weiss, Stewart, 2012). Vrstva mohla získat magnetizaci buď z dávného globálního pole, které

Měsíc v současnosti nemá a nebo z přechodného pole způsobeného impaktem meteoritu (Wieczorek, Weiss, Stewart, 2012).



Obr. 10: Topografická mapa odvrácené strany Měsíce a jižního pólu. Umístění kráteru South Pole - Aitken vyznačeno černě. (James et al., 2019) Červeně je vyznačeno identifikované potenciální naleziště paramagnetických hornin.

Závěr

V práci jsem zpracoval a zobrazil satelitní data v době kdy byl Měsíc ponořen do zemské magnetosféry i z doby kdy se nacházel mimo ni v meziplanetárním magnetickém poli. Data jsem interpolací převedl na matici a odečetl je od sebe, abych získal indukovanou složku magnetizace. Záznam magnetického pole Měsíce pod vlivem zemské magnetosféry obsahuje značné množství náhodných variací způsobených pravděpodobně fluktuací plazmy během průletu plasmatickým pláštěm. Záznamy z ohonu magnetosféry mají ale potenciální přidanou hodnotu ve formě indukovaných magnetických anomálií. I když se ukázalo, v datech o několik měsíců starších, že část anomálie zmizela, její podstatná část zůstala viditelná na stejném místě. Anomálie je orientovaná kolmo k pásům přeletu satelitu, byla tedy měřená po dobu 6-10 hodin, vyskytuje se na stejném místě v datech měřených o 6 měsíců později a podařilo se nalézt korelaci s okrajem kráteru South Pole – Aitken. Pravděpodobně se tedy jedná o stopu skutečného ložiska materiálu s vysokou magnetickou susceptibilitou, tedy potenciální naleziště kovového železa, nebo jeho slitiny s niklem.

Pro statisticky významné odlišení náhodných fluktuací plazmy od složky indukované v magneticky susceptibilní hornině na Měsíci, nemáme dostatek dostupných dat. Pro zpřesnění odhadu ze stávajících dat by přispělo korelovat magnetohydrodynamický model ohonu zemské magnetosféry s polohou měsíce během uvažované mise. Toto by umožnilo rozšířit povrch měřené oblasti během jednotlivých průletů měsíce zemskou magnetosférou. Případně odhadovat průlet plasmatickým pláštěm přímo z měřených dat, pokud by se povedlo stanovit, že zmiňovaná chybová měření pocházejí z průletu měsíce hraniční vrstvou nebo magnetopauzou.

Zdroje

BEHANNON, Kenneth W. Mapping of the Earth's bow shock and magnetic tail by Explorer 33. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1968, **73**(3), 907-930 [cit. 2021-5-2]. ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/JA073i003p00907

BUGBY, D. C., J. T. FARMER, B. F. O'CONNOR, M. J. WIRZBURGER, E. D. ABEL, C. J. STOUFFER a Glen A. ROBERTSON. *Two-Phase Thermal Switching System for a Small, Extended Duration Lunar Surface Science Platform* [online]. In: . 2010, s. 76-83 [cit. 2021-8-24]. Dostupné z: doi:10.1063/1.3326291

COLLINS, Gareth S. Moonstruck Magnetism. *Science* [online]. 2012, **335**(6073), 1176-1177 [cit. 2021-8-18]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.1217681

DYAL, P., C. W. PARKIN a C. P. SONETT. Apollo 12 Magnetometer: Measurement of a Steady Magnetic Field on the Surface of the Moon. *Science* [online]. 1970, **169**(3947), 762-764 [cit. 2021-8-19]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.169.3947.762

EASTMAN, T. E., S. P. CHRISTON, T. DOKE, et al. Magnetospheric plasma regimes identified using Geotail measurements: 1. Regime identification and distant tail variability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* [online]. 1998, 103(A10), 23503-23520 [cit. 2021-4-27]. ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/98JA01915

FEYNMAN, Richard Phillips, Matthew SANDS a Robert B. LEIGHTON. *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady*. Havlíčkův Brod: Fragment, 2001. ISBN 80-7200-420-4.

FEYNMAN, Richard Phillips, Robert B. LEIGHTON a Matthew SANDS. *The Feynman lectures on physics*. New millennium edition. New York: Basic Books, [2010]. ISBN 978-0-465-02416-2.

FULLER, M. Lunar magnetism. *Reviews of Geophysics* [online]. 1974, **12**(1) [cit. 2021-8-19]. ISSN 8755-1209. Dostupné z: doi:10.1029/RG012i001p00023

HATHAWAY, David H. The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics* [online]. 2010, 7(1) [cit. 2021-8-24]. ISSN 2367-3648. Dostupné z: doi:10.12942/lrsp-2010-1

HULTQVIST, Bengt, Marit ØIEROSET, Goetz PASCHMANN a Rudolf A. TREUMANN, ed. *Magnetospheric Plasma Sources and Losses* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999 [cit. 2021-04-10]. Space Sciences Series of ISSI. ISBN 978-94-010-5918-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-011-4477-3

JAMES, Peter B., David E. SMITH, Paul K. BYRNE, Jordan D. KENDALL, H. Jay MELOSH a Maria T. ZUBER. Deep Structure of the Lunar South Pole-Aitken Basin. *Geophysical Research Letters* [online]. 2019, 46(10), 5100-5106 [cit. 2021-8-18]. ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1029/2019GL082252

KOENIGSBERGER, J. G. Natural residual magnetism of eruptive rocks. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1938, 43(2) [cit. 2021-8-24]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/TE043i002p00119

LANGEL, R. A. a W. J. HINZE. *Magnetic Field of the Earths Lithosphere The* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998 [cit. 2021-04-18]. ISBN 9780511629549. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9780511629549

LU, J. Y., Z.-Q. LIU, K. KABIN, H. JING, M. X. ZHAO a Y. WANG. The IMF dependence of the magnetopause from global MHD simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* [online]. 2013, 118(6), 3113-3125 [cit. 2021-5-2]. ISSN 21699380. Dostupné z: doi:10.1002/jgra.50324

MAEZAWA, Kiyoshi. Magnetotail boundary motion associated with geomagnetic substorms. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1975, 80(25), 3543-3548 [cit. 2021-5-1]. ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/JA080i025p03543

MURPHY, T W. Lunar laser ranging: the millimeter challenge. *Reports on Progress in Physics* [online]. 2013, 76(7) [cit. 2021-04-18]. ISSN 0034-4885. Dostupné z: doi:10.1088/0034-4885/76/7/076901

NESS, Norman F. The Earth's magnetic tail. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1965, **70**(13), 2989-3005 [cit. 2021-5-2]. ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/JZ070i013p02989

NESS, NormanF. Magnetometers for space research. *Space Science Reviews* [online]. 1970, **11**(4) [cit. 2021-8-20]. ISSN 0038-6308. Dostupné z: doi:10.1007/BF00183028

ROBERTS, Paul H a Eric M KING. On the genesis of the Earth's magnetism. *Reports on Progress in Physics* [online]. 2013, **76**(9) [cit. 2021-04-10]. ISSN 0034-4885. Dostupné z: doi:10.1088/0034-4885/76/9/096801

SCHWARTZ, Steven J., Edmund HENLEY, Jeremy MITCHELL a Vladimir KRASNOSELSKIKH. Electron Temperature Gradient Scale at Collisionless Shocks. *Physical Review Letters* [online]. 2011, **107**(21) [cit. 2021-4-29]. ISSN 0031-9007. Dostupné z: doi:10.1103/PhysRevLett.107.215002

SIBECK, D. G. a R.-Q. LIN. Size and shape of the distant magnetotail. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* [online]. 2014, **119**(2), 1028-1043 [cit. 2021-5-1]. ISSN 21699380. Dostupné z: doi:10.1002/2013JA019471

SONG, P. a C. T. RUSSELL. Model of the formation of the low-latitude boundary layer for strongly northward interplanetary magnetic field. *Journal of Geophysical Research* [online]. 1992, **97**(A2) [cit. 2021-5-1]. ISSN 0148-0227. Dostupné z: doi:10.1029/91JA02377

TARLING, D. H. a F. HROUDA. *The magnetic anisotropy of rocks*. New York: Chapman & Hall, 1993. ISBN 0412498804.

TSUNAKAWA, Hideo, Hidetoshi SHIBUYA, Futoshi TAKAHASHI, et al. Lunar Magnetic Field Observation and Initial Global Mapping of Lunar Magnetic Anomalies by MAP-LMAG Onboard SELENE (Kaguya). *Space Science Reviews* [online]. 2010, **154**(1-4), 219-251 [cit. 2021-8-20]. ISSN 0038-6308. Dostupné z: doi:10.1007/s11214-010-9652-0

WIECZOREK, Mark A., Benjamin P. WEISS a Sarah T. STEWART. An Impactor Origin for Lunar Magnetic Anomalies. *Science* [online]. 2012, **335**(6073), 1212-1215 [cit. 2021-8-18]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.1214773