

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geologie

Studijní obor: Geologie



Irena Olšanská

**Frekvence změn v normálních a obrácených
polaritách geomagnetického pole**

Frequency changes in normal and reversed polarities of geomagnetic field

Bakalářská práce

Praha, 2016

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

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svoji závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze 29. 8. 2016

Irena Olšanská

Poděkování:

Za cenné rady, konzultace a podnětné připomínky děkuji mému vedoucímu práce panu RNDr. Güntherovi Kletetschkovi, Ph.D. Dále děkuji rodině a přátelům za podporu.

Bibliografická identifikace:

OLŠANSKÁ, Irena

Frekvence změn v normálních a obrácených polaritách geomagnetického pole

Bakalářská práce

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky

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

Praha, 2016

Abstrakt:

Práce sestává z rešeršní a praktické části. Rešeršní část práce si klade za cíl shrnout některé základní poznatky o magnetickém poli Země a umožnit tak lepší porozumění problematice inverzí jeho polarit. Zahrnuje historii zkoumání geomagnetického pole, klíčové teorie, fyzikální veličiny, magnetické vlastnosti minerálů a nastiňuje poznatky paleomagnetismu

Praktická část se věnuje analýze inverzí geomagnetického pole. Zaměřuje se na inverze za posledních 157,53 milionů let (Gee a Kent, 2007) a porovnává doby trvání normálních a reverzních polarit a obou typů dohromady. Jako metodu jsem pro tento cíl použila statistických metod (gaussovo rozdělení a četnost).

Použité metody ukázaly, že průměrná délka doby mezi inverzemi je pro normální 124 000, pro reverzní 450 000 a pro oba typy 287 000 let. V posledních 80 milionech let se objevuje trend zkracování intervalů.

Na základě srovnání četnosti period jsem došla k následujícím výsledkům. Oba typy nejčastěji trvají kolem 350 000 let. Kratší periody než 350 000 let se vyskytují spíše jen u normálních polarit, oproti tomu delší periody se vyskytují u obou typů polarit s podobnou četností.

Abstract:

This work consists of two parts, literature review and practical section. Literature review covers essential knowledge about magnetic field of Earth in attempt of understanding its inversion events. This section contains thistory of research of geomagnetism, key theories, physical quantities, magnetic properties of the minerals and outlines the knowledge of paleomagnetism.

Practical part concerns the analysis of geomagnetic field inversions. It deals with inversions that happened during the last 157, 53 million years (Gee and Kent, 2007) and compares the duration of normal and reversal polarity and both types together. Statistical methods of investigation,namely Gaussian distribution and frequency, were employed.

The evaluation of results showed that the average time between two inversions is: 124 000 years for normal, 450 000 years for reversal and 287 000 years for both types. The intervals shortened over last 80 million years.

Comparing the frequencies of each period following results were obtained: both types usually lasts about 350 000 years, periods that are shorter than 350 000 years appears more often for normal polarity, but the frequencies of longer periods are similar for both types.

Obsah:

1 Úvod.....	9
1.1 Vymezení problému.....	9
2 Geomagnetické pole.....	10
2.1 Teorie geomagnetismu.....	10
2.1.1 Model geodynamo.....	10
2.1.2 Vnější geomagnetické pole.....	11
2.2 Elementy geomagnetického pole.....	13
2.3 Variace geomagnetického pole.....	14
2.3.1. Sekulární variace.....	14
2.3.2 Krátkodobé variace.....	14
2.4 Magnetické mapy.....	14
3 Fyzikální veličiny.....	15
3.1 Magnetizace.....	15
3.2 Intenzita magnetického pole.....	16
3.3 Magnetická indukce.....	16
3.4 Permeabilita.....	16
3.5 Magnetická susceptibilita.....	17
3.6 Magnetický moment.....	17
3.7 Magnetizace.....	17
3.8 Remanence.....	18

3.9 Indukovaná magnetizace.....	20
3.10 Celková magnetizace.....	20
3.11 Demagnetizace.....	20
4 Magnetická mineralogie.....	20
4.1 Magnetické vlastnosti minerálů.....	20
4.2 Magnetické minerály.....	22
5 Paleomagnetismus.....	25
5.1 Póly.....	25
5.2 Zdánlivé putování pólů.....	26
5.3 Teorie deskové tektoniky.....	26
6 Inverze geomagnetického pole.....	28
6.1 Průběh inverzí.....	28
7 Analyza inverzi.....	29
7.1 Metoda.....	29
7.2 Výsledky.....	29
8 Diskuse.....	31
9 Závěr.....	32
10 Tabulky.....	33
11 Literatura.....	46

1 Úvod

1.1 Historický kontext

Magnetické působení je lidstvu známo již více, než dvě tisíciletí. Vynález kompasu se zasloužil o hojné využití v navigaci. První exemplář předchůdce dnešního kompasu je znám již ve starověké Číně za dynastie Han. O minerál magnetit a jeho vlastnosti se zajímali lidé již v antickém Řecku. (Lowrie, 1997)

Souvislost orientace kompasu se zemským magnetismem byla však poprvé zaznamenána až ve 12. stol. n. l. Tuto analogii popisuje William Gilbert ve svém pojednání *De Magnete* z roku 1600, kde zároveň shrnul veškeré doposud známé poznatky o zemském magnetismu a jeho práce je až do 19. stol. nejzásadnějším dílem v tomto oboru. (Lowrie, 1997)

V roce 1820 Ampère vysvětlil magnetické pole jako projev elektrického proudu. Roku 1839 Gauss publikoval analýzy, z nichž vyvodil že přes 98% magnetického pole pochází z vnitřního zdroje a 95% je dipólového charakteru. O 80 let později Joseph Lamor vytvořil teorii geodynamy, která popisuje mechanismus vzniku magnetického pole ve vnějším jádře. (Lowrie, 1997; Kusák, 2008)

Deklinace si jako první povšimli číňané 500 n.l., tehdy tento objev však konstatovali pouze jako fakt, že směr, který ukazují kompasu není přesně shodný s geografickým zemským pólem. Ve 14. století se začaly kompasu hojně využívat v námořnictvu a tehdy si mořeplavci povšimli, že deklinace se mění spolu se zeměpisnou polohou. V průběhu 15. a 16. století byly zhotovena schémata deklinace pro celou Zemi. (Lowrie, 1997; Kusák, 2008)

V roce 1634 si anglický astronom H. Gellinbrad, na základě několika měření deklinace v různých letech, povšiml, že dochází také k jejím změnám v čase. V roce 1702 E. Halley publikoval první graf sekulárních variací magnetického pole. (Lowrie, 1997; Kusák, 2008)

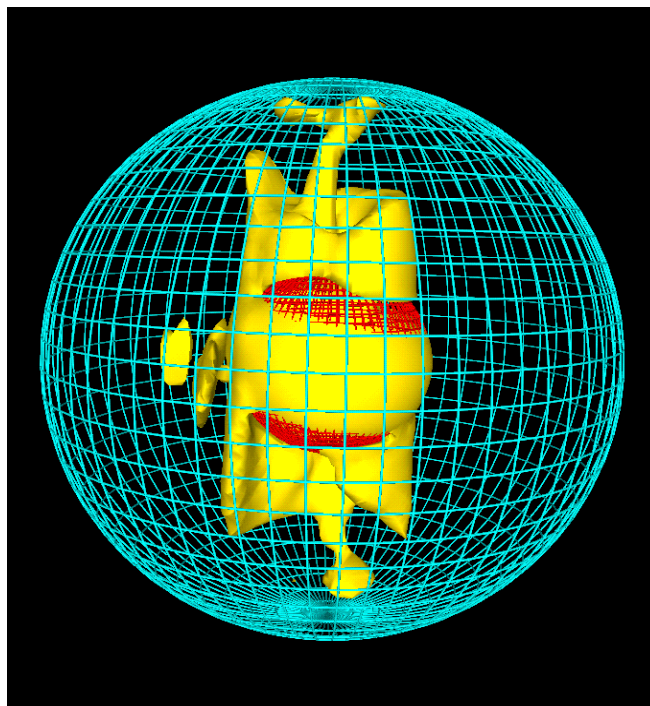
2 Geomagnetické pole

2.1 Teorie geomagnetismu

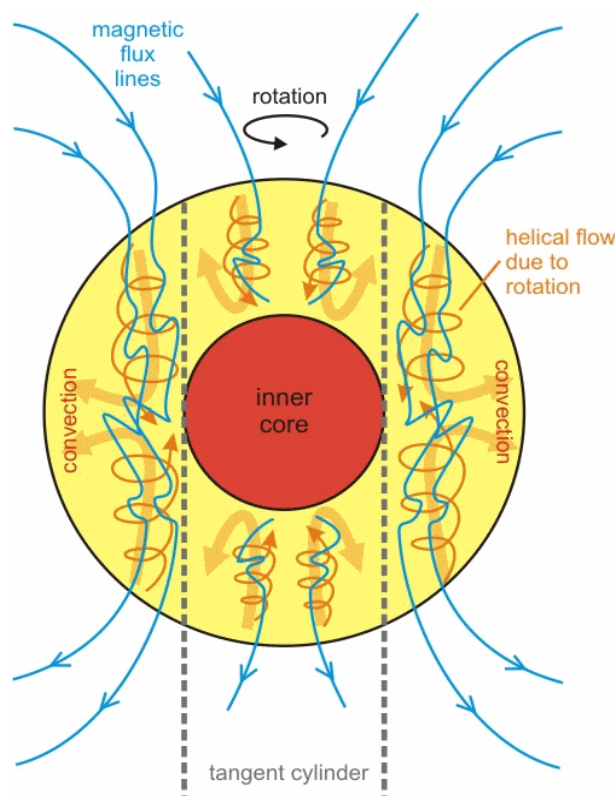
Geomagnetické pole obklopující Zemi sahá od jádra až daleko za hranice svrchních vrstev atmosféry. Plní důležitou ochrannou funkci Země před nebezpečným kosmickým zářením, má však také nesporný přínos pro vědecké bádání - zejména v oblasti výzkumu geologického vývoje planety.

2.1.1 Model geodynamama (vznik primárního pole)

Vznik zemského magnetismu je vysvětlován teorií geodynamama. Tato teorie předpokládá vznik ve vnějším tekutém jádře, které je tvořeno převážně železem. Teplotní a kompoziční rozdíl mezi pevným vnitřním jádrem a tekutým vnějším způsobuje konvekci. V důsledku rotace Země v kombinaci s konvekcí vznikají ve vnějším jádře spirálovité proudy (obr. 1), které se chovají jako cívky a výsledkem je magnetické pole dominantně dipólového charakteru. Siločáry tohoto pole má tvar podobný poli obklopujícímu tyčový magnet. (Glatzmaier a kol., 1996)



Obr.1 Model konvektivního toku v jádře (Glatzmaier a kol., 1996). Žlutá reprezentuje oblast s největším tokem. Modře je vyznačena hranice vnějšího jádra, červeně vnitřního.



Obr.2 Model vzniku magnetického pole uvnitř zemského jádra (Rowan, 2008)

Nedipólová část pole vnitřního původu pravděpodobně vzniká v důsledku nerovností, které se nacházejí na rozhraní jádro/plášť. Tyto nerovnosti způsobují nehomogenity v toku fluid. Tvoří přibližně 5 % celkového pole. (Lowrie, 1997)

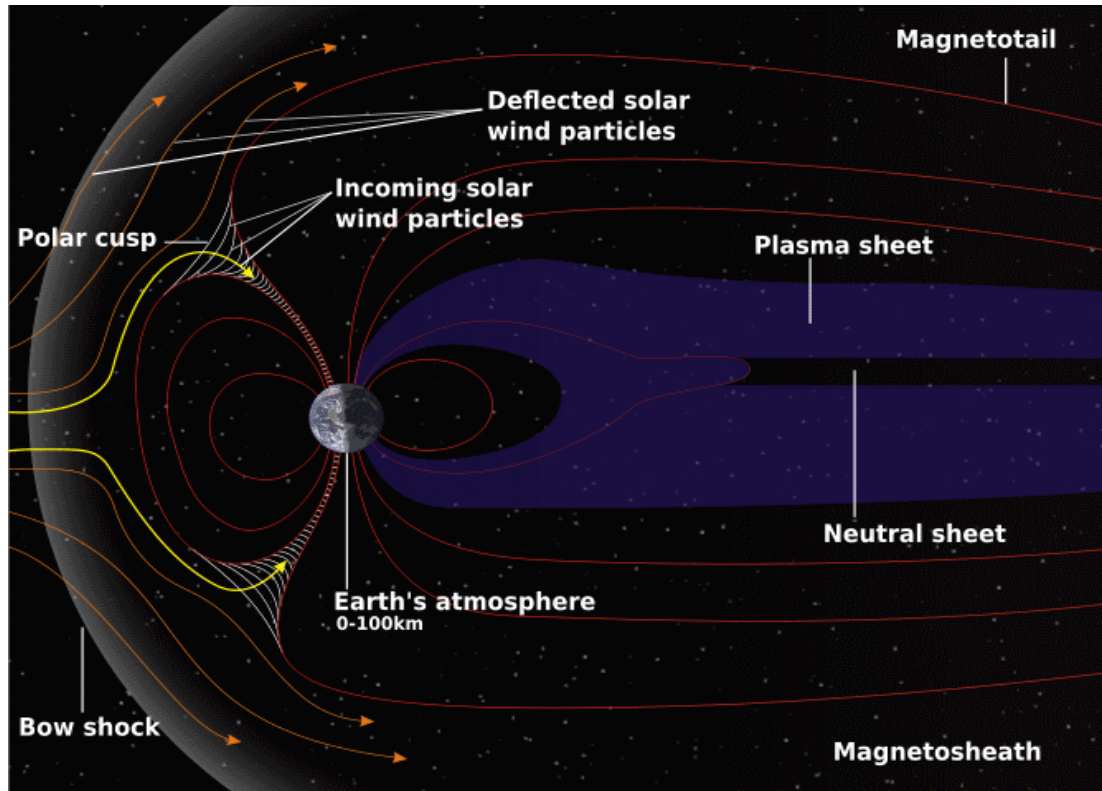
Vnitřní zdroj generuje 98% magnetického pole. Zbývající 2 % jsou vnějšího původu. (Blecha, 2013)

2.1.2 Vnější geomagnetické pole

Vnější část pole je velmi ovlivněna interakcí se slunečním větrem, proudem z elektricky nabitých částic (H^+ , $^4H^{2+}$ a elektronů (Merrill a McElhinny, 1983)). Ten formuje vnější pole, obklopující Zemi, také nazývané magnetosféra. (Lowrie, 1997)

Na denní straně je působením větru zploštělé a zároveň tvoří štít, který odklání dráhu jeho částic od Země a vyděluje ji od meziplanetárního prostoru. Na opačné straně, odvrácené Slunci, je magnetické pole protažené jako dlouhý lalok, sahající daleko do kosmického prostoru. (Merrill a McElthinny, 1983)

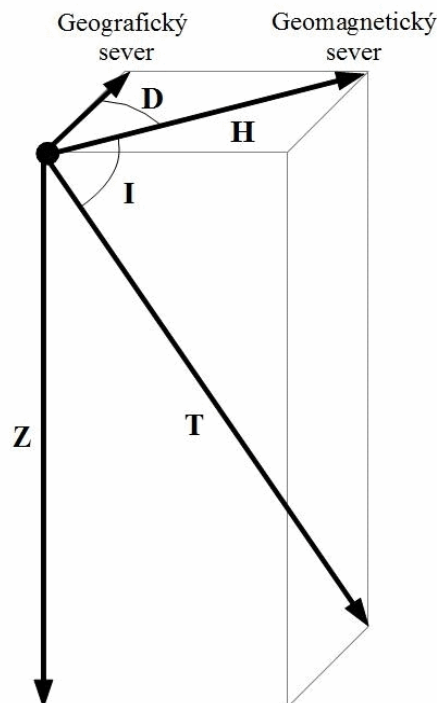
Ty částice, které proniknou bariérou, jsou zachytávány ve Van Allenových radiačních pásech, které jsou generovány interakcí nabitých částic slunečního větru s ionosférou. Odtud jsou jejich dráhy stáčeny k magnetickým pólům. Při silnější sluneční aktivitě je můžeme pozorovat jako polární záři. (Fox, 2014; Lowrie, 1997)



Obr.3 Struktura vnějšího geomagnetického pole (Kaase, 2008)

2.2 Elementy geomagnetického pole

Magnetické pole Země dělíme na elementy znázorněné v grafu 1, kde jednotlivé vektory reprezentují složky magnetického pole libovolném bodě na zemském povrchu. **T** je totální složka MP - fyzikálně je to vektor magnetické indukce. **H** je jeho průmětem do horizontální roviny - tento vektor směřuje k severnímu Magnetickému pólu. **Z** je průmětem totální složky do vertikální roviny a zároveň směřuje k zemskému centru. Vektor **X** směřuje k severnímu geografickému pólu. Úhel mezi **X** a **H** odpovídá hodnotě magnetické deklinace **D**., jinými slovy deklinace jen úhel mezi magnetickým a geografickým meridiánem. Úhel mezi **H** a **F** pak magnetické inklinaci **I**. (Merrill a McElhinny, 1983)



Graf 1 - složky geomagnetického pole

2.3 Variace magnetického pole

2.3.1 Sekulární variace

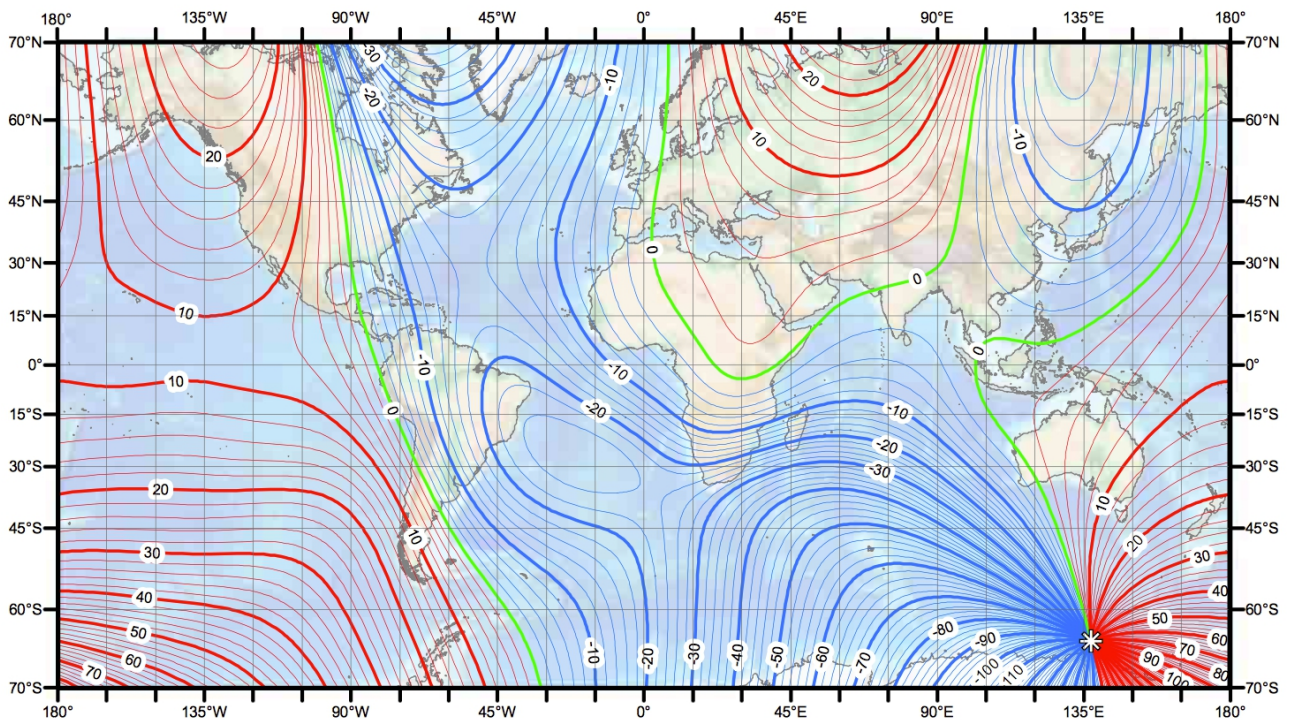
Deklinace geomagnetického pole se mění v čase. Její dlouhodobé změny nazýváme sekulárními variacemi pole. Jejich zdroj je ve vnitřním jádře, variace však pozorujeme na zemském povrchu jako změnu úhlu mezi geografickým a geomagnetickým pólem a změnu velikosti dipólového momentu. V časovém měřítku stovek let magnetický pól opisuje nepravidelnou precesivní dráhu kolem rotační osy, v současné době má tento pohyb západní vergenci. (Čípová, 2006)

2.3.2 Krátkodobé variace

Na rozdíl od dlouhodobých jsou generovány sluneční aktivitou, která interaguje s částicemi v ionosféře. Erupce na Slunci produkují velké množství nabitých částic, které způsobují magnetické bouře. Tato aktivita je nepravidelného charakteru. Na variace vnějšího pole má vliv také střídání dne a noci - denní strana je více vystavena částicím slunečního větru. O něco dlouhodobější změny způsobuje sluneční cyklus (perioda cca 11 let)). (Lowrie, 1997)

2.4 Magnetické mapy

Magnetické mapy se pořizují přímým měřením geomagnetického pole na zemském povrchu. Data jsou pořizována kombinací oceánografických, satelitních, leteckých a pevninských průzkumů a následně zpracovávána v magnetických observatořích. Obvykle se používá graf, ve kterém linie propojují místa stejné intenzity příslušné komponenty magnetického pole. Komponenty většinou zastupují elementy magnetického pole. Tento typ grafu nazýváme izomagnetický diagram. (Merrill a McElhinny, 1983)



Obr. 4 Izogonický diagram zobrazující model hodnot deklinace na zemském povrchu pro období 2015 (NOAA, 2014)

3 Fyzikální veličiny

3.1 Magnetizace

Magnetizaci \mathbf{M} získávají látky působením magnetického pole. Vyjadřuje schopnost materiálu změnit své vlastnosti při vložení do magnetického pole.

$$\mathbf{M} = d\mathbf{m}_c/dV$$

Výslednou hodnotou je magnetický moment \mathbf{m}_c (2.2.6) vztážený na jednotku objemu látky. (Tillich a kol., 1988)

Jedná se o vektorové pole vyjadřující hustotu indukovaného nebo permanentního dipólového momentu v magnetickém materiálu. Jeho intenzitu vyjadřujeme v Ampér/metrech (Am^{-1}). Hovoříme-li o magnetickém poli Země, vektor magnetizace určuje intenzitu příspěvku primárního magnetického pole \mathbf{H} (tj. bez vlivu hornin) k celkové intenzitě magnetického pole Země neboli magnetické indukci \mathbf{B} . (Blecha, 2013) Můžeme použít vztah:

$$M = \kappa H,$$

kde κ zastupuje magnetickou susceptibilitu. (Matthews, 2013)

3.2 Intenzita magnetického pole

Intenzita magnetického pole \mathbf{H} je vektorová veličina vyjadřující lokální intenzitu geomagnetického pole bez vlivu magnetického působení horninového prostředí. (Blecha, 2013; Tillich a kol., 1988)

$$H = B/\mu_0 - M$$

kde μ_0 je permitivita vakua, tedy skalární konstanta. Magnetizaci uvažujeme v daném bodě. Výsledná intenzita je vyjádřena v A/m. (Tillich a kol., 1988)

3.3 Magnetická indukce

Celkovou intenzitu magnetického pole, kterou můžeme naměřit v konkrétním bodě na zemském povrch nazýváme magnetickou indukcí \mathbf{B} [nT]. Je součtem intenzity primárního magnetického pole a vlivu okolních hornin. (Blecha, 2013)

3.4 Permeabilita

Permeabilita je skalární veličina, definující vztah mezi magnetickou indukcí \mathbf{B} a intenzitou magnetického pole \mathbf{H} v daném bodě.

$$\mu = B/H$$

V neferomagnetickém prostředí je permeabilita konstantní, ve feromagnetickém prostředí je funkcí intenzity magnetického pole. Pro izotropní prostředí platí vztah

$$\mu_r = \mu/\mu_0,$$

kde μ_r je relativní permeabilita, μ zastupuje permeabilitu prostředí a μ_0 permeabilitu vakua. (Tillich a kol., 1988)

Hodnotu relativní permeability určují vlastnosti atomů, z nichž je daná látka složena. Jednotlivá elementární magnetická pole vytvářené elektrony vytvářejí celkové magnetické pole atomu. V závislosti na jejich konfiguraci uvnitř atomu se mohou sčítat, ale i vyrušovat. (Lepil a Šedivý 1992)

3.5 Magnetická susceptibilita

Magnetická susceptibilita κ je vlastnost látky, například horniny či minerálu, která jí umožňuje získat magnetizaci \mathbf{M} ve vnějším magnetickém poli s intenzitou \mathbf{H} (Blecha 2013). Se susceptibilitou roste ochota minerálů a hornin získat magnetizaci ve vnějším magnetickém poli. Jde o skalární veličinu definovanou pro izotropní prostředí vztahem

$$\kappa = \mu_r - 1. \text{ (Tillich a kol., 1988)}$$

3.6 Magnetický moment

Magnetický moment atomu či molekuly \mathbf{m} je vektorovým součtem magnetických momentů (orbitálních a spinových) všech elektronů, jež obsahuje. Protože orientace momentu hybnosti každého elektronu v atomu se liší, jejich magnetické momenty se navzájem vyruší a celkový magnetický moment částice je proto nulový. Avšak u atomů, které mají ve valenční slupce nespárované elektrony nemusí dojít k úplnému vyrušení. Také jádro atomu má malý vliv na magnetický moment částice, avšak tento příspěvek je zpravidla zanedbatelný. (Hoffman a Urbanová 2005)

3.7 Magnetizace

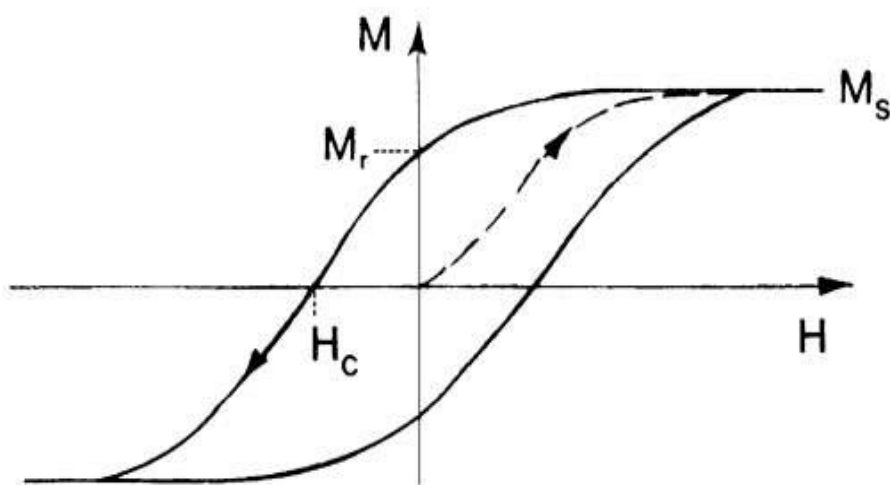
Magnetizace \mathbf{M} pro danou látku je sumou magnetických momentů částic, z nichž je složena, na jednotku objemu. (Tuček, 2010)

Některé minerály díky obsahu vysoce magnetických látek jsou schopny reagovat na vnější magnetické pole ve smyslu magnetizace.

Přítomnost těchto minerálů v hornině jí dává schopnost uložit si v době svého vzniku či přeměny informaci o magnetickém poli a jeho orientaci, působící v té době. Magnetizaci u hornin dělíme na několik následujících typů podle způsobu jejího vzniku. (Lowrie, 1997)

3.8 Remanence

Feromagnetické minerály (viz níže v kapitole feromagnetika) jsou schopny zaznamenat informaci o působícím magnetickém poli. Magnetizují se podle hysterezní smyčky; působí-li na takovýto minerál vnější magnetické pole s intenzitou H , získává magnetizaci M . S nárůstem intenzity narůstá magnetizace látky podle tzv. "panenské křivky" (v grafu čárkovaně) k bodu nasycení M_s , dále už magnetizace látky stoupat nemůže, neboť všechny magnetické momenty jsou v tomto bodě již orientovány ve směru vnějšího pole. Začne-li se intenzita vnějšího pole snižovat, magnetizace klesá podél levé křivky v grafu, avšak nedosáhne nulové hodnoty, nýbrž dojde pouze k hodnotě nazývané remanentní magnetizace M_r . Nuly dosáhne až pokud bude mít vnější pole opačnou orientaci, v tuto chvíli má působit vnější pole s intenzitou nazývanou koercitivní síla H_c . (Blecha, 2013)



Obr. 5 Graf magnetické hystereze ("hysterezní smyčka"). (The-Crankshaft Publishing's, 2010)

Schopnost feromagnetických minerálů, uchovat si intenzitu pole, působící v daném období, je velmi užitečná pro paleomagnetické výzkumy. Lze takto zjistit, jaká byla orientace a intenzita pole v době jejich vzniku, resp. vzniku horniny. K tomu je zapotřebí odstranit sekundární magnetizace a zjistit její primární magnetizaci z období vzniku či přetavení. (Lowrie, 1997)

Obsah feromagnetických minerálů v hornině je proměnlivý, většinou se však jedná o menší podíl. V závislosti na jejich obsahu je proměnlivá i susceptibilita dané horniny. Největší vliv na celkovou magnetizaci horniny má obsah titanomagnetitu a pyrrhotinu. (Blecha, 2013, Lowrie 1997)

Remanentní magnetizaci dále dělíme podle způsobu jejího vzniku v hornině:

Termoremanentní magnetizace (TRM)

Jak napovídá název, tento typ magnetizace hornina získává zahřátím na specifickou teplotu. Feromagnetické minerály, které horniny obsahuje si ukládají informaci o vnějším magnetickém poliv momentě, kdy při chladnutí překročí tzv. Curierův bod. Ten je pro každý specifický feromagnetický minerál různý, například pro magnetit je to 578°C. Při vyšší teplotě je pohyb elektricky nabitých částic v mřížce minerálu stává chaotickým, avšak poklesne-li teplota ke Curierově bodu, jejich pohyb se usměrní ve směru vnějšího pole a takto zůstane (do té doby dokud hornina není opět zahřáta na teplotu vyšší). Díky tomu lze zjistit primární magnetizaci, získanou až během procesu tuhnutí a vychládání horniny, nikoliv jejího vzniku (obvykle mnohem vyšší teploty). (Blecha, 2013)

Depoziční remanentní magnetizace (DRM)

Tento druh magnetizace je typický pro sedimentární horniny. Vzniká v době ukládání horniny obsahující feromagnetické minerály, které se orientují ve směru působícího magnetického pole (minerál jako celek se mechanicky natočí ve směru siločar vnějšího pole). (Blecha, 2013)

Chemická remanentní magnetizace (CRM)

Obvykle se jedná o sekundární magnetizaci. Sekundární magnetické minerály směr svého růstu orientují v závislosti na směru vnějšího magnetického pole. (Lowrie, 1997)

3.9 Indukovaná magnetizace

Magnetizace, kterou hornina získává působením vnějšího magnetického pole. Je součinem magnetické susceptibility a intenzity magnetického pole, ve kterém se hornina nachází. (Lowrie, 1997)

3.10 Celková magnetizace

Celková magnetizace je vektorovým součtem indukované a remanentní magnetizace. (Lowrie, 1997)

3.11 Demagnetizace

K testování paleomagnetické stability slouží demagnetizace. Tímto procesem můžeme zjišťovat stáří získání remanentní magnetizace v minerálu. (Haislová, 2014) Metoda spočívá ve snižování remanentní magnetizace u daného minerálu. (Butler, 2004)

4 Magnetická mineralogie

4.1 Magnetické vlastnosti minerálů

Magnetické vlastnosti látek, respektive minerálů, závisejí na magnetických momentech atomů, z nichž jsou složeny. Magnetismus na atomární úrovni vzniká rovnoměrným pohybem elektrického náboje - rotací kolem vlastní osy a oběhem kolem jádra atomu. Magnetické momenty jsou odvozeny od elementárních magnetických polí vytvářených jednotlivými elektrony. Ty se mohou sčítat, stejně tak ale i navzájem vyrušovat. (Lowrie, 1997)

Na základě těchto vlastností se minerály rozdělují do následujících skupin

Diamagnetické

Diamagnetické minerály jsou složeny z diamagnetických atomů. Magnetické pole těchto atomů je složené z elementárních magnetických polí elektronů, která se navzájem vyrušují (resp. všechny elektrony jsou spárovány (Skála, 2013)). Výsledné magnetické pole atomu a tedy i celé látky má zápornou hodnotu, analogicky k tomu susceptibilita diamagnetických látek je slabá a nabývá záporných hodnot. Relativní permeabilita mírně přesahuje hodnotu jedna. V praxi to znamená, že pokud takovouto látku vložíme do magnetického pole, bude ho mírně zeslabovat a na její magnetické vlastnosti nebude mít žádný vliv. (Lowrie, 1997; Lepil a Šedivý 1992) Mezi diamagnetické minerály patří např. křemen, topaz, halit, ryzí Cu, Ag (Skála, 2013).

Paramagnetické

Paramagnetismus u látek, potažmo minerálů vzniká, nejsou-li elektrony v atomech, z nichž je látka složena, spárovány. Nedojde tak k úplnému vzájemnému vyrušení a výsledný magnetický moment atomů má nenulovou, avšak nevysokou hodnotu. Orientace magnetických polí je však neuspořádaná, magnetická susceptibilita látky nabývá tedy jen nízkých kladných hodnot. (Lowrie, 1997) Permeabilitu mají mírně menší než jedna, paramagnetické materiály mírně zeslabují vnější pole (Lepil a Šedivý 1992). Paramagnetické minerály jsou např. platina, siderit, rutil, olivín (Skála, 2013).

Feromagnetické

Feromagnetické látky jsou tvořeny paramagnetickými atomy (Lepil a Šedivý 1992), přesto však se jejich vnitřní stavba liší. Atomy jsou vůči sobě uspořádány tak, že si mezi sebou mohou vyměňovat elektrony. Tato interakce mezi sousedními atomy produkuje velké množství energie a zároveň tzv. *výměnné síly* způsobí, že magnetické momenty všech atomů feromagnetické látky jsou uspořádán paralelně, tedy se sčítají. (Lowrie, 1997) Tento jev se nazývá spontánní magnetizace, protože k jejímu vzniku není zapotřebí vnějšího magnetického pole (Lepil a Šedivý 1992). Např. Fe, Ni, kobalt. (Lowrie, 1997)

Antiferomagnetické

Typický pro oxidy, kde jsou obvykle kovové ionty odděleny iontem kyslíku. Přímá výměna elektronu mezi ionty kovu proto není možná. K výměně elektronu mezi nimi dochází průchodem elektronového obalu, který obklopuje kyslíkové ionty. (Lowrie, 1997) Vznikají tak opačně orientované magnetické momenty o stejné velikosti, tedy se navzájem vyrušují (Skála, 2013). Důsledkem je slabá kladná susceptibilita. Remanentní magnetizace není možná. (Lowrie, 1997)

Aniferomagnetismus se může vyskytovat pouze za relativně nízkých teploty (Néelova teplota), specifické pro danou látku. Např. pro ilmenit FeTiO_3 je Néelova teplota 50 K. Při překročení této teploty se látka stává paramagnetickou. (Lowrie, 1997) Dalšími antiferomagnetickými minerály jsou MnO a NiO (Skála, 2013).

Parazitický feromagnetismus

Vzniká u antiferomagnetických materiálů, které mají v krystalové mřížce nehomogenity. Ty způsobí, že ne všechny opačně orientované spiny jsou spárovány a nedojde tedy k úplnému vyrušení. Tento jev je typický např. u minerálu hematitu ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). (Lowrie, 1997)

Ferimagnetické

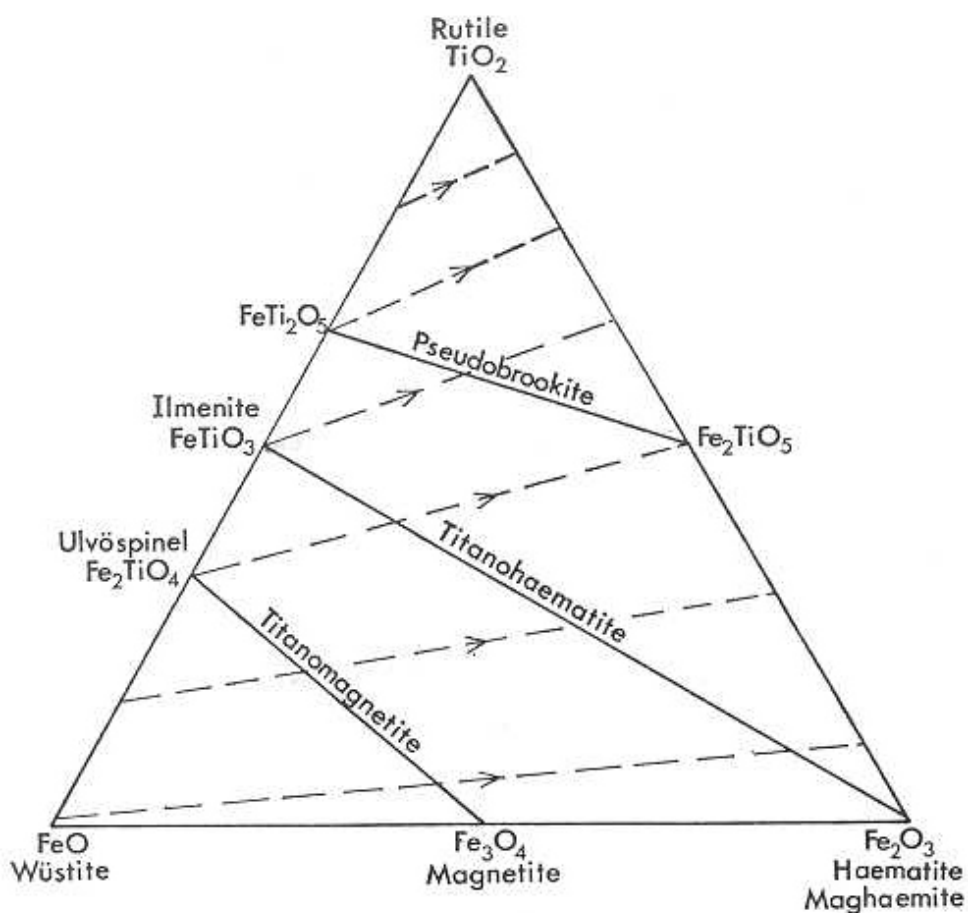
Klasicky se vyskytuje i krystalů se spinelovou strukturou, ve které mají ionty kovu rozdílné pozice vůči iontům kyslíku. Výměna elektronů je v této struktuře neparalelní, tedy je neparalelní i orientace magnetických momentů. V důsledku toho nedojde k úplnému vyrušení a vzniká spontánní magnetizace. Např. magnetit Fe_3O_4 , pyrhotin a goethit. (Lowrie, 1997)

4.2 Magnetické minerály

Magnetické minerály se vyskytují v horninách, obsahujících Fe-Ti oxidy, Fe-Mn oxidy a oxyhydroxidy, Fe-sulfidy a Fe a Ni-Co slitiny. Přispívají k jejich remanenci. (Merrill a McElthiny, 1983)

Nejvýznamnější skupinou jsou Fe-Ti oxidy. Mřížková struktura minerálu je složená z kyslíkových iontů, mezi nimiž jsou ionty Fe^{2+} , Fe^{3+} a Ti, jejichž relativní velikost způsobuje ferimagnetické vlastnosti minerálu. (Lowrie, 1997)

Fe-Ti oxidy jsou děleny do tří serií, z nichž jsou pro své magnetické vlastnosti důležité minerály titanomagnetitové a titanohematitové. Nepříliš hojný minerál třetí série pseudobrookit je paramagnetický za "pokojové teploty". (Lowrie, 1997)



Obr. 6 Trojúhelníkový diagram znázorňující vztahy serií magnetických minerálů. (Diehl, 2011)

Titanomagnetitová série

Obecný vzorec $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$), základní buňka má spinelovou strukturu. Významným zástupcem této série je její koncový člen, ferimagnetický minerál magnetit (Fe_3O_4). Magnetit má velmi silnou spontánní magnetizaci a nejvyšší magnetickou susceptibilitu ze všech známých minerálů. Dalšími členy série jsou maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), který je produktem nízkoteplotní oxidace magnetitu a druhý koncový člen ulvöspinel (Fe_2TiO_4). Minerály titanomagnetitové série jsou zodpovědné za magnetické vlastnosti bazaltů oceánského dna. (Lowrie, 1997)

Titanohematitová série

Též nazývaná ilmenohematitová série. Obecný vzorec $\text{Fe}_{2-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$), základní buňka má romboedrickou strukturu. V této sérii je zásadní koncový člen hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Tento hojný minerál má velmi dobrou magnetickou a chemickou stabilitu. Díky tomu je může být užitečný pro paleomagnetické výzkumy. Druhým koncovým členem je ilmenit (FeTiO_3). (Lowrie, 1997)

Další magnetické minerály

Mezi další minerály, významné pro magnetické výzkumy, patří například pyrhotit (Fe_{1-x}S), který je ferimagnetický jen za specifických podmínek. Dále goethit (FeOOH), který je sice antiferomagnetický, avšak disponuje slabým parazitickým feromagnetismem. Neméně významný je také hojně se vyskytující minerál pyrite (FeS_2). Ten sice není schopen získat remanentní magnetizaci, avšak slouží jako zdroj pro vznik goethitu či sekundárního magnetitu. Uvedené minerály se typicky vyskytují zejména v sedimentárních horninách. (Lowrie, 1997)

5 Paleomagnetismus

Tato disciplína se zabývá geomagnetickým polem z hlediska jeho vývoje v geologické historii. Díky remanentní magnetizaci lze ze specifických hornin vyčíst, jaká byla orientace pole v době kdy vznikaly, tedy i inverze geomagnetického pole a jejich průběh. Dále lze vysledovat změny deklina-
ce (sekulární variace) v minulosti. Taktéž má paleomagnetické zkoumání významný příspěvek na poli teorie deskové tektoniky. K paleomagnetickým výzkumům se využívají zejména horniny bohaté na železo (např. bazické vyvřeliny a železité pískovce). (Kletetschka, 1989)

5.1 Póly

Paleomagnetické modely sledují změny směru toku geomagnetického pole v čase, tedy především polohu jeho pólů. Následující terminologie definuje typy magnetických pólů.

Severní / jižní magnetický pól je bod na zemském povrchu, kde magnetické siločáry jsou k zemskému povrchu v kolmém vztahu (magnetická inklinace je rovna $+90^\circ/-90^\circ$). Jeho pozice v čase je nestabilní a je předmětem paleomagnetických výzkumů. Magnetické póly se vůči sobě mají nekoaxiálně, jejich protilehlá pozice, založená na dipólovém tvaru pole, je pouze přibližná. (Merrill a McElhinny, 1983)

Severní magnetický pól je nazýván severním z toho důvodu, že jeho poloha geograficky přibližně koreluje s polohou geografického severního pólu. Avšak na základě fyzikálních zákonů se jedná o pól jižní, jelikož z definice siločáry směřují od severního pólu magnetu k jižnímu. Tento fyzikální jižní pól odpovídá geografickému severu. (Blecha, 2013)

Geomagnetický severní / jižní pól je místem, kde osa zemského magnetického dipólu protíná ve dvou přesně protilehlých bodech zemský povrch. (Merrill a McElhinny, 1983)

Virtuální geomagnetický pól (VGP) reprezentuje místo, kde je pro daný okamžik dopočítána poloha geomagnetického pólu v paleomagnetickém záznamu. Platí pouze pro ten moment, pro který je bod zjištěn. (Merrill a McElhinny, 1983)

Paleomagnetický pól zastupuje bod, který je vypočítán jako průměr z paleomagnetického pole nebo průměr z VGP pro příslušné, dostatečně dlouhé období (obvykle 10^4 až 10^5 let). (Merrill a McElhinny, 1983)

5.2 Zdánlivé putování pólů

Paleomagnetické rekonstrukce vysledovaly změny polohy magnetických pólů vůči pólům zemské rotační osy. Tento pohyb je vysvětlován hypotézou, že ve skutečnosti póly zachovávají svoji polohu, zatímco spolu s pohybem tektonických desek měnily pozice horniny, z nichž jsou vzorky analyzovány. Srovnáním dat z různých lokalit lze rekonstruovat jejich vzájemnou změnu pozice. (Janáčková, 1995)

5.3 Teorie deskové tektoniky

Podle této významné teorie, která po svém zavedení na začátku druhé poloviny minulého století vyřešila mnoho dosavadních otázek v geologických vědách, je zemská litosféra rozdělena na různé velké desky, které jsou vůči sobě v relativním pohybu. Zachování stability pohybu je kompenzováno čtyřmi typy deskového rozhraní:

Divergentní rozhraní: desky se od sebe vzdalují za vzniku nové kůry, která vystupuje v podobě magmatu na hřbetech, oddělující obě desky.

Konvergentní rozhraní: jedna deska se zanořuje pod druhou, její kůra je tavena a recyklována.

Transformní rozhraní: desky se vůči sobě horizontálně posouvají (nedochází k destrukci, stejně tak ani produkci nové kůry).

(Kious a Tilling, 1996)

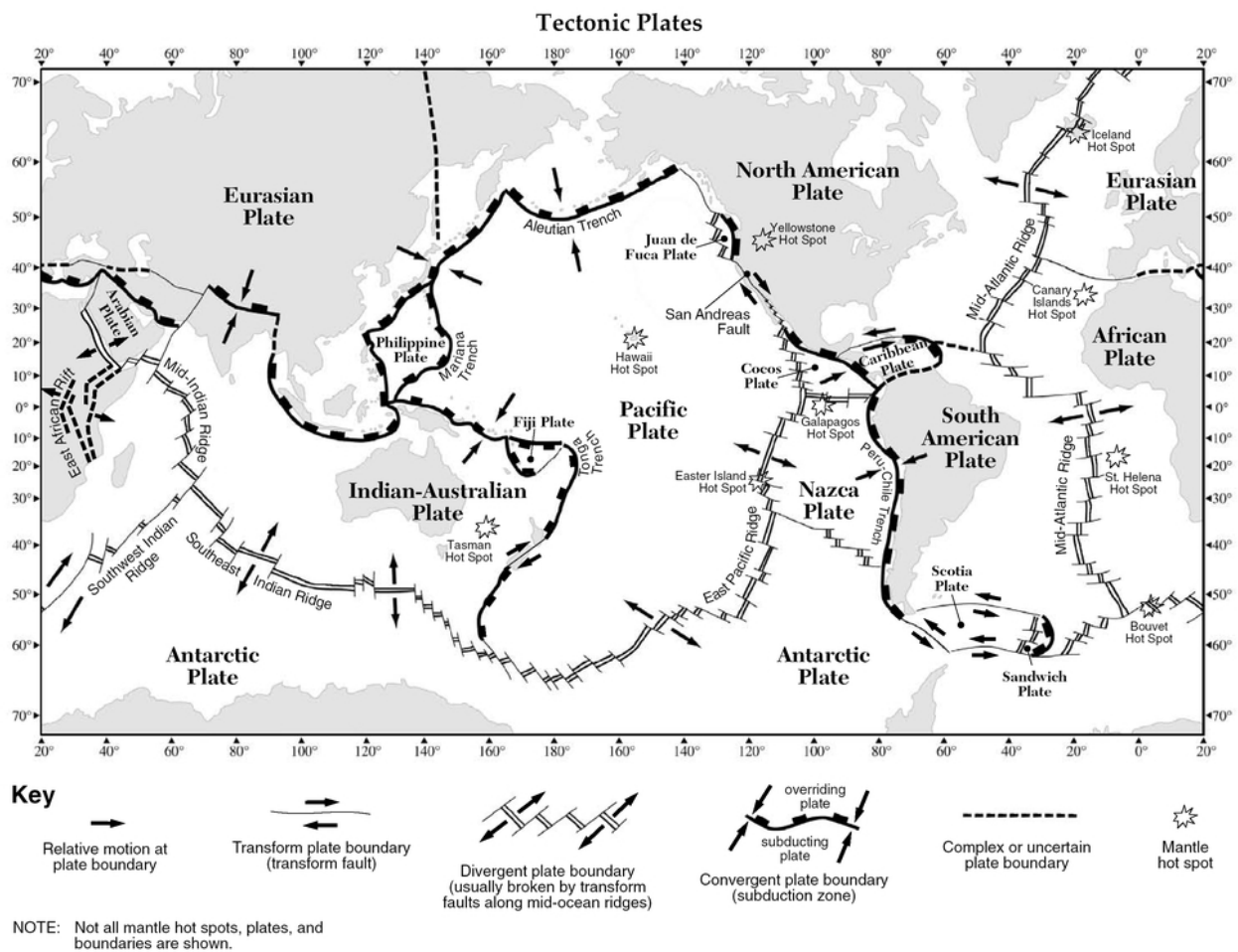
Paleomagnetické metody významně přispívají k hypotéze a výpočtům pohybů litosférických desek a jejich rekonstrukcím v geologické historii. Pro tato měření se využívá zdánlivého putování pólů, které jsou použity jako referenční body. (Lowrie, 1997)

Bazalty deskového rozhraní na oceánském dně

Divergentní deskové rozhraní např. uprostřed Atlantského oceánu produkuje bazaltové lávy (rychlostí v průměru 2,5 cm/rok (Kious a Tilling, 1996)), které jsou symetricky distribuovány podél středoatlantského hřbetu a zároveň jejich vzdálenost od rozhraní koreluje se stářím jejich

vzniku. Na základě těchto předpokladů lze velmi dobře sledovat souvislý záznam intenzity a směru magnetického pole, který je zaznamenán ve lineálních sekvencích těchto bazaltů. (Stern, 2008)

U nejstarších částí oceánského dna bylo naměřeno stáří až 200 milionů let. Starší okraje opět subdukuje pod kontinentální desky. (Metzger, 2001)



Obr. 7 Mapa zobrazující nejvýznamnější tektonické desky a jejich rozhraní. (Murloy, 2013)

6 Inverze geomagnetického pole

V průběhu magnetické inverze dochází k výměně polarit magnetického pole, tzn. že tam, kde leží severní magnetický pól bude po ukončení inverze pól jižní a obráceně. Z obecných definic magnetického pole to znamená, že se obrátí generelní směr magnetických siločar. (Lowrie, 1997)

Současnou polaritu, kdy se severní magnetický pól nachází na severní polokouli nazýváme normální polaritou, v opačném případě hovoříme o inverzních (reverzních) polaritách. Doba trvání jedné polarity se velmi různí, ale řádově lze říci, že se může trvat desítky, častěji však stovky tisíc let. Jen výjimečně v minulosti délka jedné polarity přesáhla milion let. (Gee a Kent, 2007)

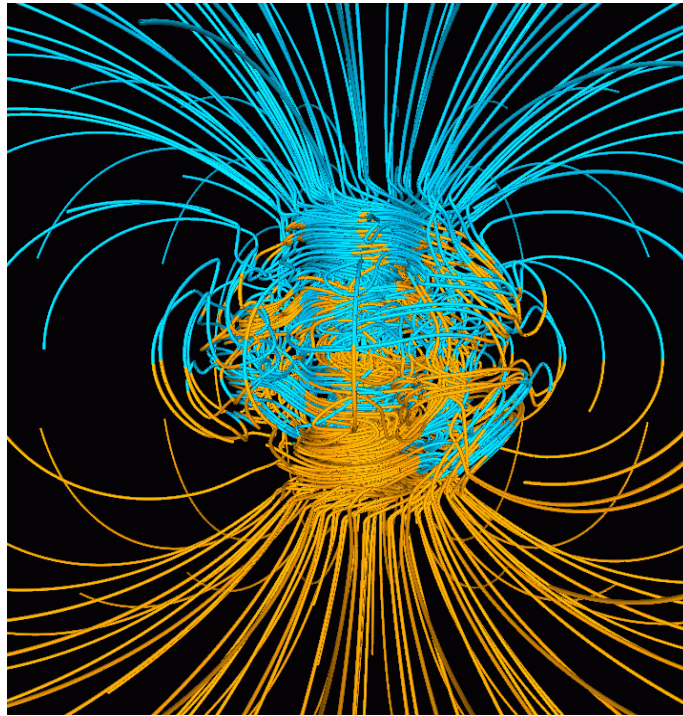
V současnosti se nacházíme v období normální polarity, která se nazývá Brunhes. K poslednímu přepólování Matuyama/Brunhes došlo před přibližně 780tis lety. (Gee a Kent, 2007)

6.1 Průběh inverzí

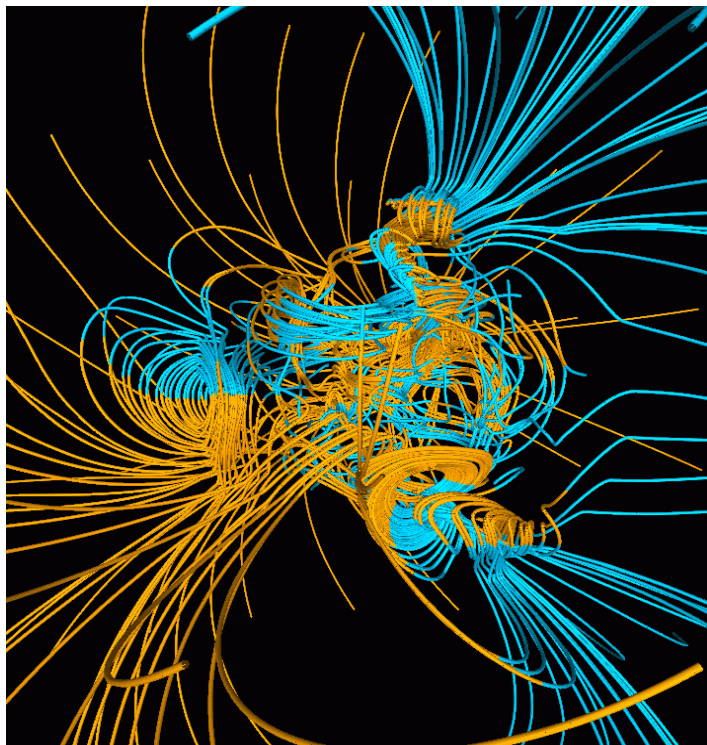
Údaje o průběhu inverzí poskytují záznamy v sedimentárních, hlubinných a vyvřelých horninách. Při získávání těchto údajů je třeba vzít v úvahu faktory, které tento údaj zkreslují (sekundární magnetizace, chemické změny při chladnutí hlubinných hornin atd.).

Před inverzí nejprve začnou v magnetickém poli přibývat anomálie a dochází k postupnému zeslabování celkového pole. Průběh siločar se směrem ke střednímu času inverze se stává čím dál více chaotickým (tento proces trvá až stovky let)(Glatzmaier a kol., 1996) . V hlavní fázi inverze inverze klesá dipólový moment o 75% (Kletetschka, 1989).

Samotná výměna polarit trvá několik tisíc let (Kletetschka, 1989; Merrill a McElhinny, 1983; Lowrie, 1997). Například Lowrie uvádí 3,5 - 5 tisíc let na základě radiometrických datování hlubokomořských lávových proudů (Lowrie, 1997).



*Obr. 8 Siločáry v období stabilního pole - rozdílné barvy označují vergenci opačným polaritám.
(Winter, 2014)*



Obr. 9 Siločáry během inverze. (Glatzmaier, 2015)

Výzkumy vývoje magnetického pole však objevily nezvyklý jev, ke kterému čas od času došlo v jeho historii. Z horninových výzkumů víme, že při této události magnetické pole vykazuje znaky předcházející inverzi, následně magnetické póly započnou přesun na opačnou zemskou hemisféru, avšak svoji pouť tam nezakončí. Dostanou se pouze přibližně na úroveň rovníku, odkud se opět vrací na svoji původní pozici. Polarita pole je tedy opět stejná, jako před událostí. Tento fenomén se nazývá magnetická exkurze a netrvá déle, nežli 10 000 let. (Lowrie, 1997)

7 Analýza inverzí

V praktické části práce zaměřuji na inverze magnetického pole. Vzájemně jsem porovnávala trvání normálních a reverzních polarit v období od 157,53 milionů let po současnost. Za pomoci statistických metod zjišťuji, zda lze nalézt trendy v intervalech mezi jednotlivými výměnami polarit.

7.1 Metoda

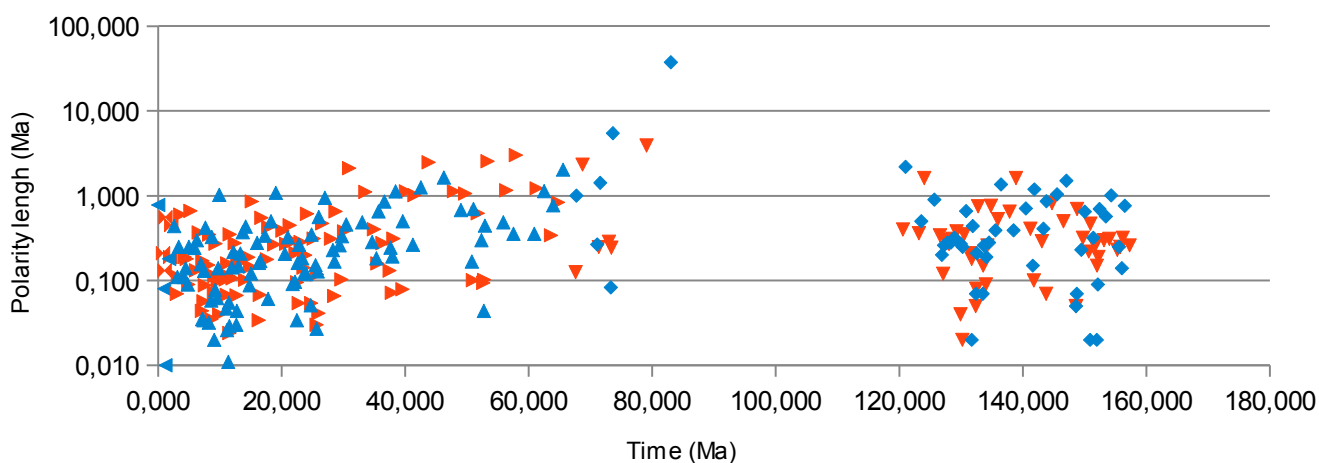
Chronologicky seřazené inverze za posledních 157,53 mil. let jsem rozdělila na normální a reverzní polarit. Pro obě skupiny jsem každé polaritě vypočetla gaussovo rozdělení, průměrnou délku trvání normálních, reverzních a obou typů polarit. Dále jsem srovnávala četnosti polarit podle jejich trvání.

7.2 Výsledky

Srovnáním intervalů inverzí jsem se došla k následujícím bodům:

1. Průměrná hodnota doby trvání normální polarit je 124 000 a inverzní 450 000 let. Pro oba typy je průměr 287 000 let.
2. Nejfrekventovanější doba setrvání jedné polarit je pro normální polaritu od 10 000 do 1 000 000. Oproti tomu délka reverzních polarit se nejvíce koncentruje mezi hodnotami 350 000 - 1 000 000 let. U reverzních polarit se kratší nežli 100 000 let téměř nevyskytují, zatímco u normálních jsou i kratší polarit četné.
3. Pro oba typy polarit platí, že zdaleka nejčastější doba trvání jedné polarit je interval kolem 350 tis. let.

4. Polarities delší než 1 milion let jsou nezvyklé a delší nežli 1,65 mil. let jsou vzácné. V těchto intervalech jsou četnosti obou typů poměrně vyrovnané.
5. V intervalu mezi 2,5 - 4 mil- let se vyskytují pouze inverzní polarities a oproti tomu velmi dlouhé polarities delší než 5 mil. let jsou pouze normální.
6. Od konce nezvykle dlouhé polarities před 80 miliony let můžeme pozorovat trend celkového zkracování period inverzí



Graf znázorňující doby trvání inverzí v časovém úseku 157,53 milionů let. Modře jsou značeny normální polarities, červeně reverzní.

8 Diskuse

Na základě výsledných hodnot lze konstatovat, že k inverzím magnetického pole dochází poměrně nepravidelně, přesto můžeme vysledovat jisté trendy. Průzkum inverzí, ke kterým došlo v minulosti, má mimo jiné značný přínos pro výzkum geologického vývoje planety. Remanence minerálů v horninách zaznamenává informaci o geomagnetickém poli Země působícím v době, kdy horniny vznikaly. Využití této vlastnosti má velký potenciál na poli teorie a modelů deskové tektoniky nebo při určování prostorové orientace horninových celků v době jejich vzniku.

Zajímavé je srovnání výsledků průměrné délky intervalu mezi inverzemi - 287 tisíc let s hodnotami, které uvádí Glatzmaier - 200 tisíc let (Glatzmaier, 1996). Můžeme se však domnívat, že při získávání těchto hodnot pracoval autor například s kratším či delším obdobím a disponoval tedy rozdílným množstvím vstupních dat.

9 Závěr

V práci sumarizuji nejzákladnější poznatky o geomagnetickém poli, které jsou stručným úvodem do problematiky. Na základě těchto základních vědomostí můžeme konstatovat, že výzkum magnetického pole Země právem zaujímá významné místo v oblasti vědeckého zájmu. Propojuje zásadní vědecké oblasti zejména v geologickém oboru a zajišťuje mnohé podklady pro významné teorie. Avšak i samo o sobě má toto téma velký potenciál. Zároveň zemské magnetické pole chrání povrch planety před dopadem radiace z kosmu, má tedy i přímý význam pro život na Zemi. Znalost zemského magnetismu ale nemá svůj význam pouze pro výzkumy vývoje naší planety. Pomáhá při vesmírném průzkumu těles sluneční soustavy i těles vzdálenějších. Geomagnetické pole pro vědce stále skýtá mnohé otázky a můžeme se domnívat, že toto rozsáhlé téma ještě zdaleka není vyčerpané.

10 Tabulky

Tab. 1; *Průměrné doby trvání polarit geomagnetického pole.* Hodnoty intervalů polarit čerpány z: GEE J. S.; KENT D. V.: *Source of Oceanic Magnetic Anomalies and the Geomagnetic Polarity Timescale, 2007.*

Změna polarity [miliony let]	Doba trvání normalní polarity [miliony let]	Doba trvání reverzní polarity [miliony let]	Gaussovo rozdělení pro normální polaritu	Gaussovo rozdělení pro reverzní polaritu
Kenozoikum - kvartér				
0,000	0,780		0,126855169	
0,780		0,210		0,362013976
0,990	0,080		0,124716423	
1,070		0,131		0,312711932
1,201	0,010		0,124165322	
1,211		0,559		0,596284298
1,770	0,180		0,125400003	
1,950		0,190		0,349273539
2,140	0,010		0,124165322	
2,150		0,450		0,522863265
Kenozoikum - paleogén, neogén				
2,600	0,440		0,126593701	
3,040		0,070		0,276760118
3,110	0,110		0,124934384	
3,220		0,110		0,300108052
3,330	0,250		0,125804936	
3,580		0,600		0,623184317
4,180	0,110		0,124934384	
4,290		0,190		0,349273539
4,480	0,140		0,125141324	
4,620		0,180		0,342965398
4,800	0,090		0,124790298	

4,890		0,090		0,288322644
4,980	0,250		0,125804936	
5,230		0,664		0,663962005
5,894	0,243		0,125767191	
6,137		0,132		0,313317775
6,269	0,298		0,126047217	
6,567		0,368		0,46697096
6,935	0,156		0,125247166	
7,091		0,044		0,262076828
7,135	0,035		0,124368946	
7,170		0,171		0,337325196
7,341	0,034		0,124360946	
7,375		0,057		0,26936831
7,432	0,130		0,125073572	
7,562		0,088		0,287156207
7,650	0,422		0,126538593	
8,072		0,153		0,326154841
8,225	0,032		0,124344909	
8,257		0,349		0,454072734
8,606	0,058		0,124549614	
8,664		0,035		0,257088808
8,699	0,326		0,126175172	
9,025		0,072		0,277906078
9,097	0,020		0,124247675	
9,117		0,113		0,301894493
9,230	0,078		0,124701502	
9,308		0,272		0,402432808
9,580	0,062		0,12458038	
9,642		0,098		0,293010592
9,740	0,140		0,125141324	
9,880		0,040		0,259853822
9,920	1,029		0,126107348	
10,949		0,103		0,295958401
11,052	0,047		0,124464006	
11,099		0,068		0,275616478

11,167	0,026		0,124296509	
11,193		0,159		0,329861615
11,352	0,011		0,124173612	
11,363		0,113		0,301894493
11,476	0,055		0,124526412	
11,531		0,024		0,251060074
11,555	0,029		0,124320763	
11,584		0,351		0,455428402
11,935	0,143		0,125161409	
12,078		0,106		0,297733598
12,184	0,217		0,12562164	
12,401		0,277		0,405744874
12,678	0,030		0,124328824	
12,708		0,067		0,275045531
12,775	0,044		0,124440405	
12,819		0,172		0,337950112
12,991	0,148		0,125194639	
13,139		0,163		0,332342142
13,302	0,208		0,125569294	
13,510		0,193		0,351174226
13,703	0,373		0,126367696	
14,076		0,102		0,295367751
14,178	0,434		0,12657579	
14,612		0,188		0,348008507
14,800	0,088		0,12477562	
14,888		0,146		0,321851901
15,034	0,121		0,125011545	
15,155		0,859		0,775405647
16,014	0,279		0,125954771	
16,293		0,034		0,256537647
16,327	0,161		0,125279594	
16,488		0,068		0,275616478
16,556	0,170		0,125337186	
16,726		0,551		0,590977539
17,277	0,338		0,126226983	
17,615		0,178		0,341708938

17,793	0,061		0,124572707	
17,854		0,427		0,507184173
18,281	0,500		0,12674754	
18,781		0,267		0,399127732
19,048	1,083		0,125841487	
20,131		0,387		0,479903967
20,518	0,207		0,125563415	
20,725		0,271		0,401771227
20,996	0,324		0,12616636	
21,320		0,448		0,521500921
21,768	0,091		0,124797618	
21,859		0,292		0,415720719
22,151	0,097		0,124841284	
22,248		0,211		0,36265517
22,459	0,034		0,124360946	
22,493		0,095		0,29124847
22,588	0,162		0,125286042	
22,750		0,054		0,267676674
22,804	0,265		0,125883753	
23,069		0,284		0,410393073
23,353	0,182		0,125412418	
23,535		0,142		0,319403715
23,677	0,123		0,125025414	
23,800		0,199		0,354986748
23,999	0,119		0,124997626	
24,118		0,612		0,630952012
24,730	0,051		0,124495306	
24,781		0,054		0,267676674
24,835	0,348		0,126268768	
25,183		0,313		0,429777237
25,496	0,152		0,125221001	
25,648		0,030		0,254339173
25,678	0,027		0,124304606	
25,705		0,118		0,304882461
25,823	0,128		0,125059874	
25,951		0,041		0,26040866

25,992	0,562		0,126858123	
26,554		0,473		0,53850704
27,027	0,945		0,12644781	
27,972		0,311		0,428434384
28,283	0,229		0,125689865	
28,512		0,066		0,274475167
28,578	0,167		0,1253181	
28,745		0,656		0,658957575
29,401	0,261		0,12586301	
29,662		0,103		0,295958401
29,765	0,333		0,126205616	
30,098		0,381		0,475816924
30,479	0,460		0,126650088	
30,939		2,119		0,998201411
33,058	0,487		0,126718111	
33,545		1,110		0,882189061
34,655	0,285		0,125984455	
34,940		0,403		0,490811913
35,343	0,183		0,125418606	
35,526		0,159		0,329861615
35,685	0,656		0,126931717	
36,341		0,277		0,405744874
36,618	0,855		0,12671313	
37,473		0,131		0,312711932
37,604	0,244		0,125772621	
37,848		0,072		0,277906078
37,920	0,193		0,125479812	
38,113		0,313		0,429777237
38,426	1,126		0,125603663	
39,552		0,079		0,281935079
39,631	0,499		0,126745353	
40,130		1,127		0,887830801
41,257	0,264		0,125878586	
41,521		1,015		0,846974278
42,536	1,253		0,124767451	
43,789		2,475		0,99978445

46,264	1,642		0,121004932	
47,906		1,131		0,889129731
49,037	0,677		0,126932646	
49,714		1,064		0,86592585
50,778	0,168		0,125324474	
50,946		0,101		0,294777644
51,047	0,696		0,126928604	
51,743		0,621		0,636743085
52,364	0,299		0,126051957	
52,663		0,094		0,290662197
52,757	0,044		0,124440405	
52,801		0,102		0,295367751
52,903	0,444		0,126605386	
53,347		2,557		0,999874139
55,904	0,487		0,126718111	
56,391		1,163		0,899134586
57,554	0,357		0,126305294	
57,911		3,009		0,999995363
60,920	0,356		0,126301286	
61,276		1,223		0,916089821
62,499	1,135		0,125550969	
63,634		0,342		0,44933221
63,976	0,769		0,12686994	
64,745		0,833		0,761862316
65,578	2,032		0,115555883	

Mesozoikum - svrchní jura

67,610		0,125		0,309087536
67,735	1,002		0,126226515	
68,737		2,334		0,999479403
71,071	0,267		0,125894049	
71,338		0,249		0,38729081
71,587	1,417		0,123397402	
73,004		0,287		0,412389059

73,291	0,083		0,124738713	
73,374		0,245		0,38467413
73,619	5,456		0,039813398	
79,075		3,925		0,999999999
83,000	37,600		1,32676E-31	
120,600		0,400		0,488765903
121,000	2,190		0,11292281	
123,190		0,360		0,461535108
123,550	0,500		0,12674754	
124,050		1,620		0,980212007
125,670	0,900		0,126593376	
126,570		0,340		0,447979072
126,910	0,200		0,125521918	
127,110		0,120		0,306081317
127,230	0,260		0,125857794	
127,490		0,300		0,421063901
127,790	0,280		0,12595975	
128,070		0,270		0,401109927
128,340	0,280		0,12595975	
128,620		0,310		0,427763267
128,930	0,320		0,126148585	
129,250		0,380		0,475135986
129,630	0,280		0,12595975	
129,910		0,040		0,259853822
129,950	0,270		0,125909399	
130,220		0,020		0,248886498
130,240	0,250		0,125804936	
130,490		0,350		0,454750502
130,840	0,660		0,126932331	
131,500		0,210		0,362013976
131,710	0,020		0,124247675	
131,730		0,180		0,342965398
131,910	0,440		0,126593701	
132,350		0,050		0,265429519
132,400	0,070		0,12464133	
132,470		0,080		0,282512939

132,550	0,210		0,125581013	
132,760		0,750		0,71578606
133,510	0,070		0,12464133	
133,580		0,150		0,324307846
133,730	0,260		0,125857794	
133,990		0,090		0,288322644
134,080	0,190		0,125461581	
134,270		0,260		0,394512798
134,530	0,280		0,12595975	
134,810		0,760		0,72155571
135,570	0,390		0,126430442	
135,960		0,530		0,576970151
136,490	1,360		0,12391011	
137,850		0,650		0,655185754
138,500	0,390		0,126430442	
138,890		1,620		0,980212007
140,510	0,710		0,126922658	
141,220		0,410		0,495586784
141,630	0,150		0,125207845	
141,780		0,100		0,294188081
141,880	1,190		0,125207117	
143,070		0,290		0,414387314
143,360	0,410		0,126499562	
143,770		0,070		0,276760118
143,840	0,860		0,126701101	
144,700		0,820		0,754926402
145,520	1,040		0,126056163	
146,560		0,500		0,556793961
147,060	1,510		0,122478914	
148,570		0,050		0,265429519
148,620	0,050		0,124487499	
148,670		0,050		0,265429519
148,720	0,070		0,12464133	
148,790		0,700		0,686113528
149,490	0,230		0,12569547	
149,720		0,320		0,434483524

150,040	0,650		0,12693041	
150,690		0,220		0,368443058
150,910	0,020		0,124247675	
150,930		0,470		0,536469403
151,400	0,320		0,126148585	
151,720		0,260		0,394512798
151,980	0,020		0,124247675	
152,000		0,150		0,324307846
152,150	0,090		0,124790298	
152,240		0,190		0,349273539
152,430	0,700		0,126927162	
153,130		0,300		0,421063901
153,430	0,570		0,126868803	
154,000		0,310		0,427763267
154,310	1,010		0,126192165	
155,320		0,230		0,374909184
155,550	0,250		0,125804936	
155,800		0,250		0,387945786
156,050	0,140		0,125141324	
156,190		0,320		0,434483524
156,510	0,760		0,12688087	
157,270		0,260		0,394512798
157,530				

Průměrná doba trvání normalních polarit:	Průměrná doba trvání reverzních polarit:
0,123895775	0,449928521

Celkový průměr dob trvání polarit:	0,286912148
---	--------------------

Tab. 2. Četnost normálních a reverzních polarit.

Četnost normálních polarit	Četnost reverzních polarit	Intervaly polarit [miliony let]
0	0	0
0	0	0,005
1	0	0,01
2	0	0,015
1	0	0,02
3	2	0,025
4	0	0,03
84	98	0,35
5	6	0,4
6	5	0,45
6	4	0,5
0	1	0,55
2	3	0,6
0	2	0,65
6	3	0,7
1	2	0,75
3	1	0,8
0	2	0,85
3	1	0,9
1	0	0,95
0	0	1
1	0	1,005
1	0	1,01
0	0	1,015
0	1	1,02
0	0	1,025
1	0	1,03
6	6	1,35
1	0	1,4
1	0	1,45
0	0	1,5
1	0	1,55

0	0	1,6
1	2	1,65
0	0	1,7
0	0	1,75
0	0	1,8
0	0	1,85
0	0	1,9
0	0	1,95
0	0	2
0	0	2,005
0	0	2,01
0	0	2,015
0	0	2,02
0	0	2,025
0	0	2,03
2	2	2,35
0	0	2,4
0	0	2,45
0	1	2,5
0	0	2,55
0	1	2,6
0	0	2,65
0	0	2,7
0	0	2,75
0	0	2,8
0	0	2,85
0	0	2,9
0	0	2,95
0	0	3
0	0	3,005
0	1	3,01
0	0	3,015
0	0	3,02
0	0	3,025
0	0	3,03

0	0	3,35
0	0	3,4
0	0	3,45
0	0	3,5
0	0	3,55
0	0	3,6
0	0	3,65
0	0	3,7
0	0	3,75
0	0	3,8
0	0	3,85
0	0	3,9
0	1	3,95
0	0	4
0	0	4,005
0	0	4,01
0	0	4,015
0	0	4,02
0	0	4,025
0	0	4,03
0	0	4,35
0	0	4,4
0	0	4,45
0	0	4,5
0	0	4,55
0	0	4,6
0	0	4,65
0	0	4,7
0	0	4,75
0	0	4,8
0	0	4,85
0	0	4,9
0	0	4,95
0	0	5
0	0	5,005
0	0	5,01

0	0	5,015
0	0	5,02
0	0	5,025
0	0	5,03
0	0	5,35
0	0	5,4
0	0	5,45
1	0	5,5
0	0	5,55
0	0	5,6
0	0	5,65
0	0	5,7
0	0	5,75
0	0	5,8
0	0	5,85
0	0	5,9
0	0	5,95
0	0	6
1	0	37,6
0	0	

11 Literatura

BLECHA V.: *Geomagnetické pole*. Prezentace, 2013.

BUTLER R. F.: *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Department of Chemistry and Physics University of Portland. 2004.

ČÍPOVÁ M.: *Fyzika Země - Elektronický učební text*. Publ. 2006. Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/fyzika_Zeme/fyzika_Zeme.pdf.

FOX Karen C. : *NASA's Van Allen Probes Spot an Impenetrable Barrier in Space*. NASA's Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md. Publ. 2014. Dostupné z: <http://www.nasa.gov/content/goddard/van-allen-probes-spot-impenetrable-barrier-in-space>.

GEE J. S.; KENT D. V.: *Source of Oceanic Magnetic Anomalies and the Geomagnetic Polarity Timescale*. Treatise on Geophysics, vol. 5, pp. 455-507. Publ. 2007.

GLATZMAIER Gary A. a kol.: *The Geodynamo*. Publ. 1996. Dostupné z: <http://www.es.ucsc.edu/~glatz/geodynamo.html>.

HAISLOVÁ R.: *Paleomagnetický záznam lávových proudů bazaltu z Nelsonova ostrova v Antarktidě*. Bakalářská práce. Charles University in Prague, 2014.

JANÁČKOVÁ Alena: *Země je veliký magnet*. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 40 (1995), No. 4, 192--197. Dostupné z: http://www.dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138432/PokrokyMFA_40-1995-4_4.pdf.

KADLEC J.: *Zemský magnetismus pomalu vyhasíná*. Publ. 2012. Dostupné z: [Http://www.rozhlas.cz/meteor/prispevky/_zprava/1058309](http://www.rozhlas.cz/meteor/prispevky/_zprava/1058309).

KIOUS W. Jacquelyne, TILLING Robert I.: *This Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics*. U.S. Government Printing Office, 1996. ISBN 0-16-048220-8. Online vyd. dostupné z <http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/dynamic.html>.

KLETESCHKA G.: *Vyšetřování inverzí geomagnetického pole z hlediska trvání jednotlivých polarit*. Diplomová práce. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy v Praze, 1989.

- KUKLIŠ L.: *Magnetické pole Země slábne, změny monitorují družice mise Swarm*. Publ. 18/09/2014. Dostupné z: [Http://gnosis9.net/view.php?cisloclanku=2014090005](http://gnosis9.net/view.php?cisloclanku=2014090005)
- KUSÁK R.: *Přehled geofyziky: geomagnetismus a geoelektrina*, Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy v Praze, 2008.
- LEPIL O., ŠEDIVÝ P.: *Fyzika pro gymnázia - elektřina a magnetismus*. Prometheus, 1992.
- LOWRIE W.: *Fundamental of Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- MARTÍNEK, F.: *Magnetické pole Země*. Publ. 2004. Dostupné z: <http://www.astro.cz/clanky/slunezni-soustava/magneticke-pole-zeme.html>.
- MATTHEWS, John A.: *Encyclopedia of Environmental Change: Three Volume Set*. SAGE Reference, 2013.
- MERRILL, R. T.; McELTHINNY M. W.: *The Earth's Magnetic Field, Its History, Origin and Planetary Perspective*. Academic Press, 1983.
- METZGER E. P.: *A model of sea-floor spreading teacher's guide*. Publ. 2001. Dostupné z: <http://www.ucmp.berkeley.edu/fosec/Metzger3.html>
- SKÁLA R.: *Vlastnosti minerálů*. Prezentace, 2013.
- STERN D. P.: *Magnetic Reversals and Moving Continents*. Publ. 2008. <http://www.phy6.org/earthmag/reversal.htm>
- TUČEK J.: *Úvod do magnetismu, magnetické vlastnosti materiálů a magnetické jevy v nanosvětě*. Katedra experimentální fyziky a Centrum výzkumu nanomateriálů PřF UP Olomouc, 2010. Dostupné z: <http://nanosystemy.upol.cz/upload/10/tucek-uvod.pdf>.

Seznam obrázků:

1 GLATZMAIER G. A. a kol.: *The Geodynamo*. Publ. 1996. Dostupné z:

<http://www.es.ucsc.edu/~glatz/geodynamo.html>.

2 ROWAN Ch.: *Where the Earth's magnetic field comes from*. Publ. 2008. Dostupné z: [http://all-](http://all-geo.org/highlyallochthonous/2008/03/where-the-earths-magnetic-field-comes-from/)

[geo.org/highlyallochthonous/2008/03/where-the-earths-magnetic-field-comes-from/](http://all-geo.org/highlyallochthonous/2008/03/where-the-earths-magnetic-field-comes-from/).

3 KAASE A.: *Structure of the magnetosphere mod*. Orig. bitmap NASA, 2008. Dostupné z:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Structure_of_the_magnetosphere_mod.svg.

4 *Maps of Magnetic Elements from the WMM2015*. NOAA Geomagnetic Data & Information, 2015.

Dostupné z: <http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml>.

5 The-Crankshaft Publishing's: *Magnetic Phenomena and Their Interpretation—Classical*

Approach (Magnetic Properties of Materials); Part 1. Publ. 2010. Dostupné z: [http://what-when-](http://what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/magnetic-phenomena-and-their-interpretationclassical-approach-magnetic-properties-of-materials-part-1/)

[how.com/electronic-properties-of-materials/magnetic-phenomena-and-their-interpretationclassical-](http://what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/magnetic-phenomena-and-their-interpretationclassical-approach-magnetic-properties-of-materials-part-1/)

[approach-magnetic-properties-of-materials-part-1/](http://what-when-how.com/electronic-properties-of-materials/magnetic-phenomena-and-their-interpretationclassical-approach-magnetic-properties-of-materials-part-1/).

6 DIEHL J. F.: *Magnetics*. Michigan Technological University, 2011. Dostupné z:

<http://www.geo.mtu.edu/~jdiehl/magnotes.html>.

7 MURLOY P.: *What Happens Where Tectonic Plates Meet?* Publ. 2013. Dostupné z: [http://peter-](http://peter-mulroy.squarespace.com/new-page-3/)

[mulroy.squarespace.com/new-page-3/](http://peter-mulroy.squarespace.com/new-page-3/)

8 WINTER L.: *New Analysis Suggests Earth's Magnetic Field Is Destabilizing*. Publ. 2014. Photo

credit: US Department of Energy. Dostupné z: [http://www.iflscience.com/environment/earth-s-](http://www.iflscience.com/environment/earth-s-magnetic-field-about-flip)

[magnetic-field-about-flip](http://www.iflscience.com/environment/earth-s-magnetic-field-about-flip).

9 GLATZMAIER G. A.: *A supercomputer to model flow patterns in Earth's liquid core*. Los

Alamos National Laboratory - U.S. Department of Energy, 2015. Dostupné z: [https://com-](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geodynamo_In_Reversal.gif)

[mons.wikimedia.org/wiki/File:Geodynamo_In_Reversal.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geodynamo_In_Reversal.gif).