

**Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Geologie



Daniela Joštová

Paleomagnetická studie paleozoických hornin JZ Mongolska

Paleomagnetic study of Paleozoic rocks from SW Mongolia

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Mgr. Ondrej Lexa, Ph.D.

Praha, 2017

Prohlašuji, že na této bakalářské práci jsem pracovala samostatně s pomocí mého školitele, všechny prameny jsem řádně odcitovala a tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání stejného nebo obdobného akademického titulu.

.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému školiteli Doc. Mgr. Ondreji Lexovi, Ph.D. za to, že mi poskytl velmi cenné a užitečné rady a seznámil mě s mnohými odborníky na danou problematiku. Prof. RNDr. Karlu Schulmannovi, CSc. tímto děkuji za čas, který mi věnoval na mých cestách do Strasbourgu a v neposlední řadě je potřeba poděkovat i prof. Jean-Bernard Edelovi za jeho nedocenitelné odborné rady, připomínky a zasvěcení mé osoby do tajů paleomagnetismu. Poděkování patří i celému ÚPSG za přátelskou a vždy vstřícnou atmosféru, hlavně paní sekretářce Drahomíře Seemannové, která je duší ústavu a bez které by se mé cesty do Francie jen těžko uskutečnily. Za cenné rady ohledně technické stránky práce děkuji Mgr. Václavu Špillarovi, Ph.D., za korekturu textu a podporu děkuji své kamarádce Mgr. Barboře Švandrlíkové. Poděkování posílám také mým rodičům, sourozencům a všem členům mé rodiny, kteří se o má studia zajímají a bezmezně mě v nich podporují. Děkuji!

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá paleomagnetickou analýzou hornin odebraných na jihozápadě Mongolska a je prvním krokem k detailnějšímu pochopení této problematiky. V rešeršní části jsou uvedeny a vysvětleny základy geomagnetismu, magnetismu obecně, paleomagnetismu a je popsána geologie oblasti. Následuje metodika a vlastní výzkum, kde jsou prezentována data získaná měřením termoremanentní magnetizace. Cílem této práce je ověření vzniku Mongolské orokliny v období permotriasu.

Mongolsko je situováno mezi tři kratony – Siberijský, Severočínský a Tarim a je součástí centrálního asijského orogenního pásu (CAOB), jehož vznik a vývoj stále není dokonale pochopen a je předmětem mnoha studií a výzkumů. Podle Krönera (2010) se dá území Mongolska rozčlenit na 4 tektonické zóny (Jezerní, Trans-Altajská, Gobi-Altajská a Jižní Gobi), avšak Badarch et al. (2002) už vyčleňuje na území Mongolska 44 terránů rozdělených na severní (Kaledonskou) a jižní (Variskou) doménu oddělenou tzv. *Centrálním mongolským lineamentem*.

Studovaná oblast se nachází východně od severní hranice Číny a vzorky byly nashromážděny ze tří oblastí – Altay, Edrene a Khovd. V práci je popsán postup při zpracování vzorků od odběru na lokalitě až po zpracování výstupů statistickými metodami a provedena korelace výsledků s předchozí paleomagnetickou studií. Naše výsledky ukazují koncentrace magnetizací v severojižním a severozápadním-jihovýchodním směru, tyto směry dokazují rotaci během formování CAOB.

English abstract

The aim of this thesis is verification of the theory about evolution of the Mongolian orocline in Permo-Triassic by the paleomagnetic analysis of rocks taken from south-west Mongolia and it is the first step to understand the problematics in bigger detail. Basics of magnetism, geomagnetism, paleomagnetism and geology of the studied part of Mongolia are described in first part of this thesis. Second part is dedicated to methodology and to my own research with the thermoremanent magnetizations data.

Mongolia is situated between three cratons – Siberia, North China and Tarim and it is part of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), whose evolution is not well understood and it is still being studied by a lot of researches. Kröner (2010) says, that the area of Mongolia can be divided to 4 tectonic zones (Lake, Trans-Altai, Gobi-Altai and South Gobi). Badarch et al. (2002), however, divide the area to 44 terranes, which are separated to two parts – North (Caledonian) and South (Variscan) - by the Main Mongolian Lineament.

Studied part of the Mongolian area lies eastward from north boarder of China and the samples were taken from three parts – Altay, Edrene and Khovd. Sampling techniques and the whole procedure of analysing the measured data is also mentioned. There is also a comparison of the results to the previous paleomagnetic study. Our results show main distribution of magnetizations in North-South and Northwest-Eastsouth directions, which proves the rotatiton during the formation of CAOB.

Obsah

1. ÚVOD	1
2. REŠERŠNÍ ČÁST	1
2.1. GEOMAGNETISMUS	1
2.1.1. Složky magnetického pole	3
2.1.2. Fyzikální veličiny	4
2.2. MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTEK	5
2.2.1. Remanentní magnetizace	6
2.2.3. Demagnetizace	7
2.2.4. Hysterezní smyčka	8
2.3. PALEOMAGNETISMUS	9
3. METODIKA SBĚRU A ANALÝZY DAT	11
3.1. ODBĚR VZORKŮ	11
3.2. MAGNETOMETRY	11
3.3. STEREOGRAFICKÁ PROJEKCE	12
3.4. ANALYTICKÉ METODY	12
3.4.1. Zijderveldovy demagnetizační diagramy	12
3.4.2. Shluková analýza	14
3.4.3. Fisherova statistická metoda	14
3.4.4. Vrásový test	16
4. GEOLOGIE STUDOVANÉ OBLASTI	17
4.1. TEKTONICKÉ ZÓNY	17
4.2. TEKTONICKÉ UDÁLOSTI	19
5. VLASTNÍ VÝZKUM A VÝSLEDKY	20
5.1. STUDOVANÁ OBLAST	20
5.2. POSTUP ANALÝZY DAT	21
5.2.1. Remasoft 3.0	21
5.2.2. Prostředí Python	25
6. DISKUZE	28
7. ZÁVĚR	30
8. PŘÍLOHY	32
9. ZDROJE	33

1. Úvod

Předkládaná bakalářská práce se věnuje analýze paleomagnetických dat z paleozoických hornin odebraných v jihozápadní části Mongolska – Altaji. Práce se skládá z rešeršní části a vlastního výzkumu. Cílem je ověření hypotézy vzniku mongolské orokliny v období permotriasu. Existují dva možné pohledy na tuto problematiku. Sengör et al. (1993) říkají, že ke vzniku mongolské orokliny docházelo během kambria až permu procesem imbrikace rozsáhlého magmatického oblouku Kipchak. Tento proces vedl k formování centrálního asijského orogenního pásu. Tato teorie byla modifikována Yakubchukem (2008), který předpokládá, že vznik orokliny následoval spodně paleozoickou akreční historii a odehrál se v permu. Následoval i názor (Zorin, 1999), že hlavní fáze vrásnění proběhla už v pozdním karbonu. Oproti tomu druhý pohled (např. Badarch et al., 2002; Windley, 2007) naznačuje, že centrální asijský orogenní pás (CAOB) vznikl frontální kolizí Severočínského kratonu a Sibérie v průběhu pozdního proterozoika až permu. Tato teorie počítá se souvislou aktivitou severojižně vergentního subdukčního systému způsobující akreci mnoha oceánských a kontinentálních terránů k Sibírii. Detailní strukturní analýza CAOB (Lehmann et al., 2010) ale naznačuje, že akrece oceánských terránů byla výsledkem východo-západně vergentního subdukčního systému, který byl v průběhu permotriasu výrazně zkrácen v severojižním směru, což vedlo ke vzniku dnešní architektury CAOB. Tato myšlenka byla následně elaborována paleomagnetickou studií (Edel et al., 2014), jejíž výstupy korespondují s již dříve nasbíranými daty.

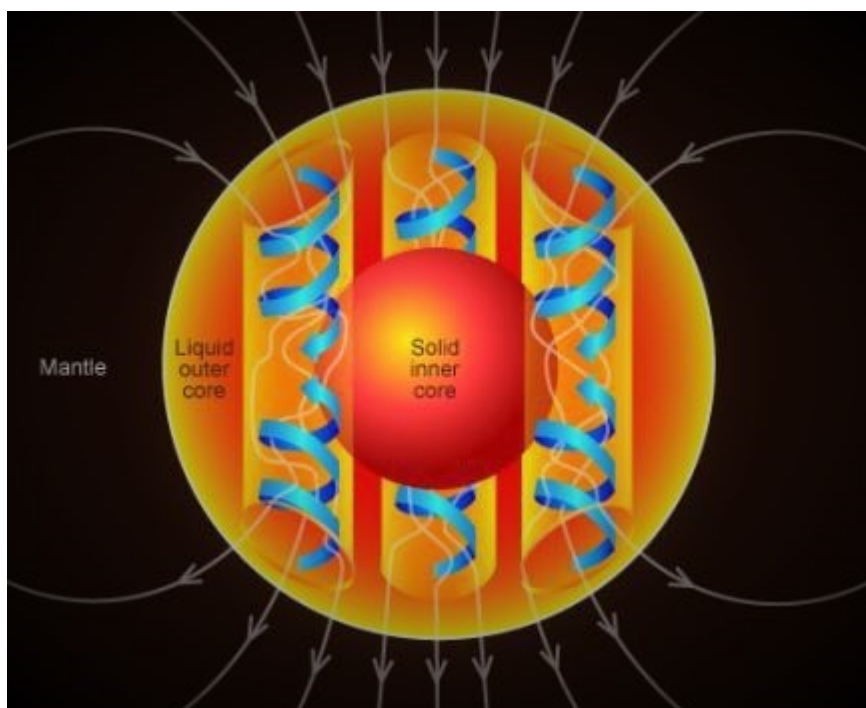
2. Rešeršní část

2.1. Geomagnetismus

Magnetické pole je prostor, ve kterém působí magnetické síly na magnet nebo cívku, ve které protéká proud (Dunlop et al., 1997). Magnetické pole Země je indukované a remanentní pole uvnitř i v okolí planety, které lze na základě měření na povrchu kontinentů i dnech oceánů považovat za pole geocentrického dipólu. Velikost i směr geomagnetického pole Země se v čase nepatrně a nepravidelně mění, a to kvůli sekulárním variacím a slunečnímu větru (řídce, plně ionizované plazma pocházející ze sluneční koróny) (Müller, 1985; Bochníček, 2004).

Text v následujících kapitolách o magnetismu vychází z publikace *Fundamentals of Geophysics* od Williama Lowrieho, 2007. Sekulární variace jsou pomalý a plynulý pohyb magnetických pólů po přibližně kruhových drahách kolem geografických pólů.

Hlavní složkou geomagnetického pole je magnetický dipól (Obr. 1). Ten je generován pohybem elektricky vodivých hmot ve vnějším jádře. Proces geodynamo je poháněn rotací vnitřního tuhého jádra Země, které je tvořeno především železem a niklem, nachází se v hloubce 5150 km a teploty zde dosahují až 5700 K. Tuhé jádro se pohybuje o cca 0,2 % rychleji než vrstvy nad ním. V hloubce cca 5000 km – na rozhraní s vnějším tekutým jádrem – mají taveniny teplotu okolo 3000 K a menší hustotu než materiál klesající shora. Stoupáním horkých hmot dochází k cyklickému proudění a díky rotaci Země zde vznikají šroubovice roztavených hmot. Ty se chovají jako cívky elektromagnetu, protéká jimi elektrický proud a tím generují magnetické pole. Magnetické pole zemského dipólu, často znázorňované siločarami, vystupuje nad zemský povrch. V místech, kde siločáry svírají s povrchem Země pravý úhel, se nachází magnetické póly. Magnetický jižní pól je na severu a osa dipólu svírá s osou rotace Země úhel cca 11,4°. Místa, kde jsou siločáry s povrchem Země rovnoběžné, se označují magnetický rovník.

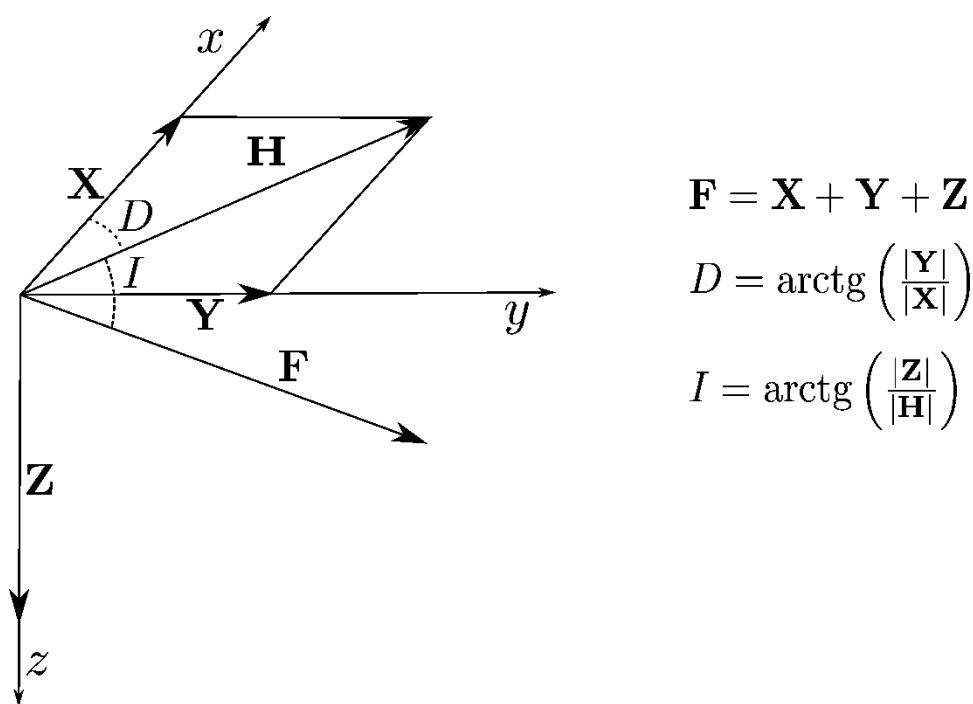


Obr. 1: Konvekce roztavených hmot v jádře Země (převzato od Bloxhama a Gubbinse, 1989)

Z magnetických záznamů v horninách lze usuzovat, že v minulosti se orientace pólů měnila, a to z toho důvodu, že magnetické hmoty, pohybující se po spirále vzhůru, chladnou a tím dochází ke zvětšování jejich objemu a hmotnosti. To má za následek jejich klesání zpět a změnu směru rotace spirály; tím vznikají podmínky pro přepólování Země. Během tohoto procesu se sníží intenzita magnetického pole až o 10 % a Země má několik magnetických pólů. K tomuto jevu dochází v průměru jednou za 250 tisíc let.

2.1.1. Složky magnetického pole

Magnetické pole Země je vektorová veličina – má velikost i směr. Vektorové veličiny se zapisují v koordinátovém systému, kde osa x ukazuje k severu, osa y k východu a osa z směrem dolů. V každém bodě v prostoru je definována vektorem \mathbf{F} . Vektor \mathbf{F} se dá rozložit na horizontální složku \mathbf{H} a vertikální složku \mathbf{Z} . Horizontální složka \mathbf{H} může být charakterizována rozkladem na složku severojižní (\mathbf{X}) a východozápadní (\mathbf{Y}). Kde \mathbf{X} ukazuje k severu (je kladná), \mathbf{Y} je kladné, míří-li k východu. Vertikální složka \mathbf{Z} je kladná za předpokladu, že míří dolů. Při paleomagnetickém zpracování dat se \mathbf{F} rozkládá na horizontální a vertikální složku / nebo podél os (x, y, z) (Obr. 2). Orientace vektoru \mathbf{F} se charakterizuje pomocí sférických souřadnic – úhlů D a I .



Obr. 2: Složky magnetického pole

Magnetická deklinace D je úhel mezi horizontální složkou \mathbf{H} a složkou \mathbf{X} ukazující k severu. Deklinace je kladná právě tehdy, když horizontální složka probíhá ve směru hodinových ručiček. *Magnetická inklinace* I je úhel mezi horizontální složkou \mathbf{H} a vektorem \mathbf{F} . Inklinace je kladná, směřuje-li vektor \mathbf{F} dolů (\mathbf{Z} je kladné). Obě tyto veličiny jsou udávány ve stupních, ostatní složky v Tesla, resp. nT. Změna magnetického pole se měří v nT/rok.

2.1.2. Fyzikální veličiny

Magnetizace M [A/m] je vektorová veličina popisující schopnost látky / horniny si ve vnějším magnetickém poli vytvořit sekundární magnetické pole. Její velikost závisí na vlastnostech působícího pole, látek nebo prostředí

$$M = \kappa H, \quad (1)$$

kde κ je *magnetická susceptibilita* a H *intenzita magnetického pole* [A/m] (Ampér na metr).

Intenzita magnetického pole H [A/m] je vektorová veličina vyjadřující míru silových účinků magnetického pole

$$H = B / \mu . \quad (2)$$

Magnetická indukce B [T] charakterizuje silový a indukční vliv pole vztahem

$$B = \mu H, \quad (3)$$

kde μ je *permeabilita* [H/m] (Henry na metr) a H je *intenzita magnetického pole* [A/m].

Magnetická permeabilita μ [H/m] je míra schopnosti materiálu či prostředí zprostředkovat magnetický tok. Jedná se o koeficient úměrnosti mezi *magnetickou indukcí* B a *intenzitou magnetického pole* H

$$\mu = B / H. \quad (4)$$

Relativní permeabilita μ_r je bezrozměrná veličina uvádějící podíl *magnetické permeability* μ a *permeability vakua* μ_0 a vyjadřuje, kolikrát prostupnější pro magnetické pole je dané prostředí oproti vakuu

$$\mu_r = \mu / \mu_0 . \quad (5)$$

Magnetická susceptibilita κ je fyzikální veličina popisující chování materiálu ve vnějším magnetickém poli. V geologii je definována jako schopnost minerálů nebo horniny stát se magnetickými. Spočítá se poměrem *magnetizace* M ku *intenzitě magnetického pole* H

$$\kappa = M / H, \quad (6)$$

výsledkem je bezrozměrné číslo pohybující se v intervalu [-1, 1].

U magnetismu hornin se používá tzv. **Königsbergův koeficient** Q , který vyjadřuje, kolikrát větším podílem přispívá remanentní magnetizace M_n k celkové magnetizaci ve vztahu k indukované magnetizaci M_i

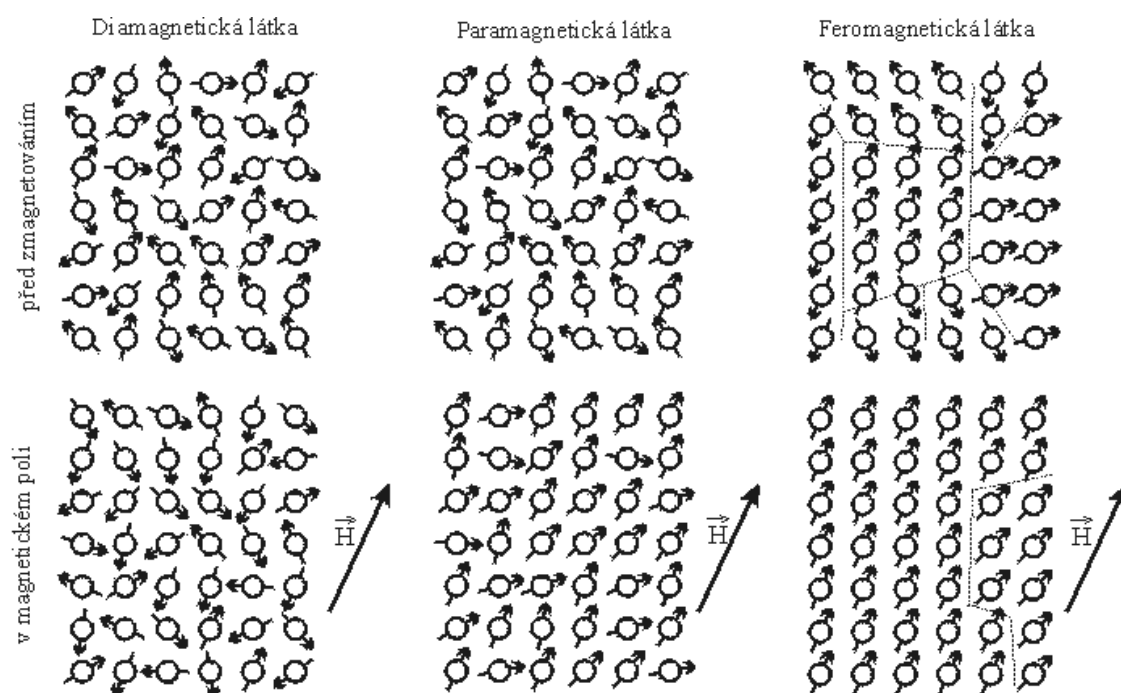
$$Q = M_n / M_i . \quad (7)$$

Magnetizaci lze také definovat jako vektorový součet podílů magnetických momentů všech přítomných atomů m_i ku objemu materiálu V

$$M = \sum m_i / V . \quad (8)$$

2.2. Magnetické vlastnosti látek

Na základě magnetické susceptibility dělíme minerály na diamagnetické, paramagnetické a ferromagnetické (Obr. 3).



Obr. 3: Diamagnetické, paramagnetické a ferromagnetické látky a jejich chování ve vnějším magnetickém poli. Kroužky se šipkami představují „atomové magnety“, H je vektor intenzity vnějšího magnetického pole. Převzato z muzeum.mineral.cz

Diamagnetické látky mají nízké až záporné hodnoty magnetické susceptibility a nejsou závislé na teplotě. To vede k tomu, že mírně zeslabují vnější magnetické pole a jejich magnetický moment je nulový. Ve vnějším magnetickém poli se tyto látky magnetují opačným směrem. Do této skupiny řadíme např. diamant, galenit, grafit, halit, kalcit, křemen a sádrovec.

Paramagnetické látky se vyznačují malými kladnými hodnotami magnetické susceptibility při pokojové teplotě a vnější magnetické pole tak mírně zesilují. Za působení magnetického pole se minerály orientují ve směru, ale po jeho vymizení se magnetizace ztrácí. Do této skupiny patří např. amfibol, biotit, chlorit, olivín, pyrit a pyroxen.

Ferromagnetické látky jsou charakteristické tím, že mají vysokou magnetickou susceptibilitu, která je závislá na teplotě. Velmi reagují na magnetické pole a jeho magnetizaci si uchovávají i po jeho vymizení. Svůj magnetismus tyto látky ztrácí, až když se jejich teplota dostane nad tzv. *Curieho teplotu*. V takových případech se pak stávají paramagnetickými. Pro paleomagnetismus jsou nejdůležitějšími nositeli ferromagnetizace magnetit a hematit. Dále pak goethit, maghemit, pyrhotin a titanomagnetit.

2.2.1. Remanentní magnetizace

Většina hornin na Zemi obsahuje několik – někdy až desítek – procent přírodních ferromagnetických minerálů, které jsou hlavním nositelem jejich magnetizace. V období vzniku horniny a během její existence na ni působí mnoho fyzikálních a chemických faktorů (např. tlak a teplota) a zachovává se v ní směr geomagnetického pole právě z dob vzniku. Jsou-li magnetické vlastnosti stejné ve všech směrech (horniny jsou magneticky izotropní), pak je směr každé této magnetizace totožný se směrem geomagnetického pole působícího v době jejího vzniku. Remanentní, tedy zbytková, magnetizace vzniká působením vnějšího magnetického pole na horninu v období jejího vzniku i po dobu její existence a ferromagnetické minerály si ji uchovávají i po zániku vnějšího magnetického pole. Velikost remanentní magnetizace u vyvřelých hornin je 10^{-3} až 10^{-1} A/m, u sedimentů max. 10^{-2} A/m, ale nejčastěji 10^{-3} A/m, u metamorfitů záleží na druhu protolitu a charakteru přeměny.

V rámci **přirozené remanentní magnetizace (NRM)** můžeme rozlišit termoremanentní magnetizaci (TRM), chemickou remanentní magnetizaci (ChRM), izotermální remanentní magnetizaci (IRM), viskózní remanentní magnetizaci (VRM) a detritickou remanentní magnetizaci (DRM).

Termoremanentní magnetizace (TRM) vzniká při rychlém chladnutí magmatu na zemském povrchu. Jeho teplota se dostává pod Curieho teplotu ferromagnetických minerálů, ty se stávají paramagnetické a jejich magnetizace se orientuje do směru působícího magnetického pole.

Chemická remanentní magnetizace (ChRM) vzniká za nižších teplot v geomagnetickém poli při krystalizaci nových ferromagnetických minerálů.

Izotermální remanentní magnetizace (IRM) vzniká krátkodobým působením geomagnetického pole na ferromagnetické minerály v hornině za konstantního tlaku a teploty.

Viskózní remanentní magnetizace (VRM) je změna magnetizace v závislosti na čase, která je běžná ve všech typech hornin. Je charakteristická tím, že její směr je podobný současnému magnetickému poli a vzniká jeho dlouhodobým působením.

Detritická remanentní magnetizace (DRM) vzniká v sedimentárních horninách v průběhu ukládání částic ferromagnetických minerálů, které se natáčí ve směru geomagnetického pole.

2.2.3. Demagnetizace

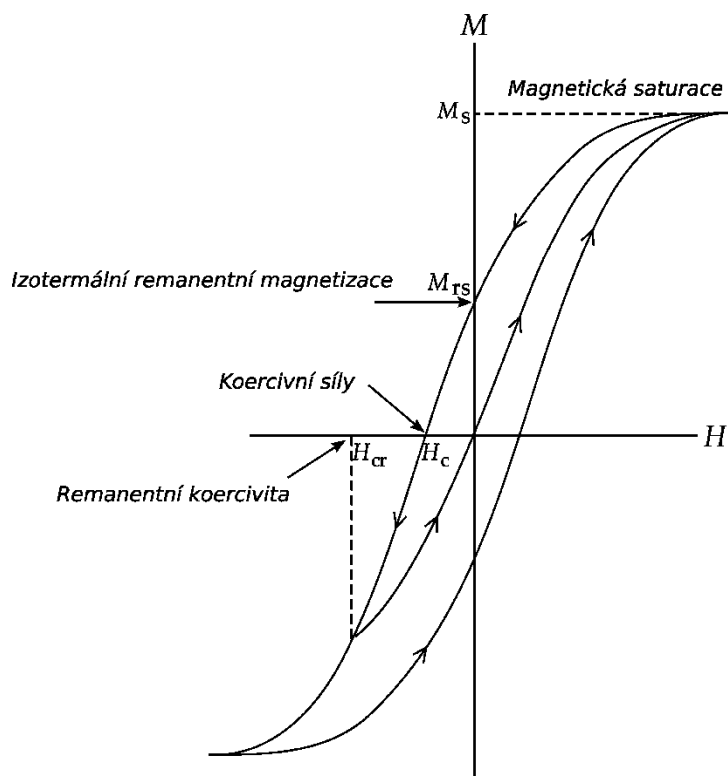
Demagnetizace je proces, při kterém se snižují hodnoty remanentní magnetizace. Rozlišujeme dva druhy demagnetizace.

Demagnetizace střídavým polem probíhá v permalloyovém krytu (magneticky měkká slitina Fe a Ni, která obsahuje až 80 % Ni), kde vnější magnetické pole neprochází dovnitř. Vzorek se vkládá mezi cívky a vystaví se střídavému magnetickému poli. Průběh znázorňuje sinusoida o frekvenci 400 Hz s lineárním poklesem amplitudy v čase. Doba rozpadu pole z maxima na nulu je cca 1 minuta. Magnetická zrna s nižší koercivitou (schopností odolávat demagnetizaci externím magnetickým polem) ztrácí svůj magnetický moment při nižších hodnotách magnetizačních polí. Tímto postupem se odděluje stabilní moment horniny od momentů méně stabilních, které kompromitují primární magnetizaci (Butler, 1992).

Tepelná demagnetizace izoluje různé složky magnetizace zaznamenané ve vzorcích. Ty se postupně v nemagnetické peci zahřívají na vysoké teploty, které jsou ale zároveň nižší než blokující teploty ferromagnetických minerálů a poté se ochladí na pokojovou teplotu. Zahřívání probíhá nejčastěji s krokem 40 °C v rozmezí teplot 80–580 °C pro vzorky obsahující magnetit, 80–680 °C pro vzorky s hematitem a 80–900 °C pro vzorky se železem. To způsobí, že všechna zrna s blokující teplotou nižší než teplota demagnetizace, získají nulovou TRM při $H = 0$ a tím se zbaví části NRM (Butler, 1992).

2.2.4. Hysterezní smyčka

Hysterezní smyčka / křivka vyjadřuje závislost *magnetizace* M na plynulých změnách *intenzity magnetického pole* H (Obr. 4). Zvětšováním hodnoty intenzity magnetického pole se zvyšuje hodnota *magnetizace*, až dosáhne bodu M_s – hodnoty magnetické saturace, které ferromagnetické látky dosahují v silných magnetických polích; pokud je magnetické pole redukováno na nulu, ferromagnetická látka si uchová indukovanou magnetizaci. Zbytková magnetizace se nazývá remanentní, resp. izotermální remanentní magnetizace (IRM) – pokud je materiál magnetován až do saturovaného stavu, remanence = saturace – IRM (M_{rs}). Podíl M_{rs} / M_s závisí na velikosti zrna. Pokud je na IRM aplikováno opačně působící pole, část materiálu se remagnetizuje v antiparalelním směru. Indukovaná magnetizace pro určitou hodnotu H_c (koercivní síly) v opačném poli původní remanentní magnetizaci anuluje. Pokud je v této fázi odebráno opačně působící pole, zbytková remanence je menší než původní IRM. Opakováním tohoto procesu v silnějším opačném poli se objeví parametr H_{cr} – remanentní koercivita. Ta má za následek absolutní anulaci IRM, takže zbytková remanence je rovna nule. Poměr H_{cr} ku H_c také závisí na velikosti zrn (Lowrie, 2007).



Obr. 4: Hysterezní smyčka podle Lowrie (2007).

Magnetické minerály, které obvykle tvoří horniny, mají často přirozené remanence s koercivními parametry vysokých hodnot. Podle tvaru hysterezní smyčky můžeme rozdělit materiály na *magneticky měkké* (jejich smyčka je úzká, lze je snadno zmagnetizovat a bez působení vnějšího magnetického pole jejich vlastní zanikne) a na *magneticky tvrdé* (mají širší smyčku, jsou odolné vůči vlivům vnějšího pole a chovají se jako permanentní magnet). Hraniční hodnotou mezi magneticky měkkým a tvrdým materiálem je 1kA/m.

2.3. Paleomagnetismus

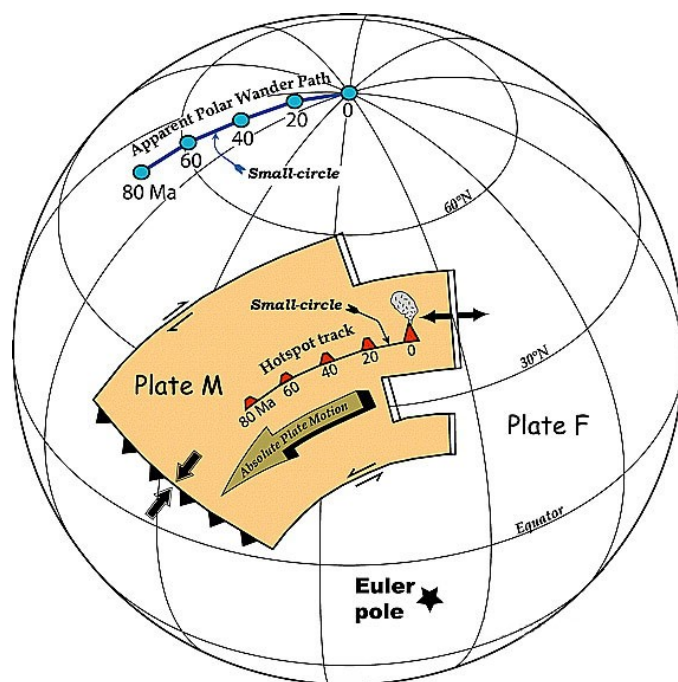
Paleomagnetismus je vědní disciplína zabývající se studiem záznamu remanentní magnetizace hornin, která se utvářela v průběhu geologické minulosti Země. V následující kapitole vycházíme z textu knihy *Paleomagnetism: Continents and Oceans* od Michaela W. McElhinnyho a Phillipa L. McFadena (2000). Paleomagnetická data (především z magmatických a sedimentárních hornin) slouží k pochopení chování magnetického pole Země a rekonstrukci pohybu litosférických desek pomocí tzv. *Zdánlivého putování pólů*.

Magnetické póly – severní a jižní – jsou body, kde jsou siločáry kolmé k zemskému povrchu a magnetická inklinace je zde rovna $+90^\circ$, resp. -90° a jejich pozice je v čase nestabilní (Obr.1). Poloha severního magnetického pólu odpovídá přibližně poloze geografického jižního pólu.

Virtuální geomagnetický pól (VGP) je myšlený bod na zemském povrchu, ve kterém by se v určitý moment nacházel magnetický pól, pokud by směr remanence v této lokalitě byl v důsledku zemského dipólu v jeho centru.

Paleomagnetický pól je bod, jehož poloha lze vypočítat jako průměr inklinací a deklinací VGP za dostatečně dlouhý časový úsek (tisíce až miliony let).

Zdánlivé putování pólů je pojem popisující pohyb litosférických desek vůči fixnímu bodu – geomagnetickému pólu. Paleomagnetická data se dají využít při rekonstrukci zdánlivých cest pólů pro jednotlivá území / kontinenty. Každá z těchto cest leží na opačné straně než kontinent, ke kterému náleží. K pochopení těchto pohybů slouží tzv. Eulerova věta o pevném bodě. Jakýkoli pohyb tuhého tělesa po povrchu koule může být reprezentován jako rotace kolem zvoleného bodu – Eulerova pólu (Obr.5).

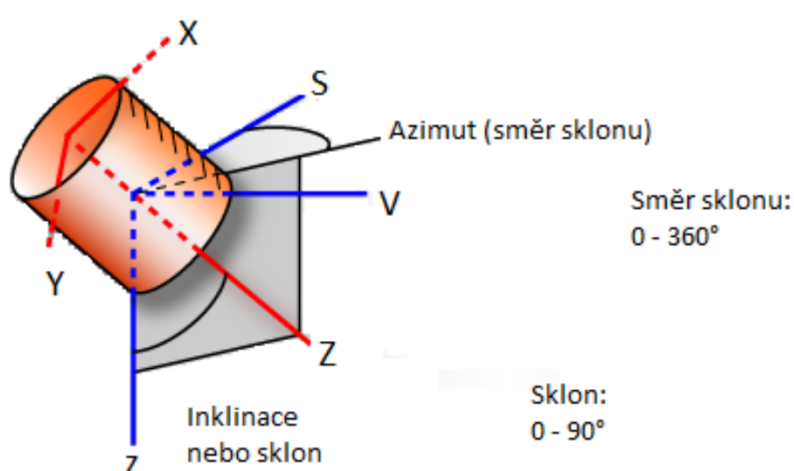


Obr. 5: Pohyb po povrchu kulové plochy podle Torsvika (2007). Deska F je nehybná, deska M se otáčí kolem Eulerova pólu.

3. Metodika sběru a analýzy dat

3.1. Odběr vzorků

Pro paleomagnetické studie jsou odebírány orientované horninové vzorky (Obr. 6) ručně přímo v terénu, kde se řádně popisují a označují (název lokality, číslo vzorku, tektonické znaménko a hodnoty naměřené geologickým kompasem). Vzorky jsou odebírány nemagnetickými kladivy či dláty a nesmí být zvětralé. Pro určení paleomagnetických pólů je potřeba z 10 až 20 výchozů odebrat v rozmezí 5-10 m alespoň 6-10 různě orientovaných vzorků (Krs, 1969).



Obr. 6: Orientace vzorku při odběru.

3.2. Magnetometry

Remanentní magnetizace se dá měřit buď rotačním nebo kryogenickým magnetometrem. Rotační magnetometr se skládá z velké cívky, ve které je indukován signál rotováním vzorku ve vysoké frekvenci – okolo 100 Hz. Indukované napětí je přímo úměrné velikosti změny toku v cívce. Jedno měření s přesností 10^{-3} A/m trvá 10–15 minut. Kryogenický magnetometr je nejcitlivější a nejrychlejší přístroj, který se aktuálně používá. Senzor se skládá z cívky vložené do tekutého hélia. Při teplotě 4 K (cca -269 °C) je cívka supervodivá. Malá změna magnetického pole indukuje poměrně velký proud, který je díky supervodivým podmínkám stálý, dokud není vzorek z pole odebrán. Většina kryogenických magnetometrů obsahuje set cívek, které během pár sekund změří dvě nebo tři magnetizace zároveň. Citlivost přístroje je $5 \cdot 10^{-6}$ A/m (Lowrie, 2007).

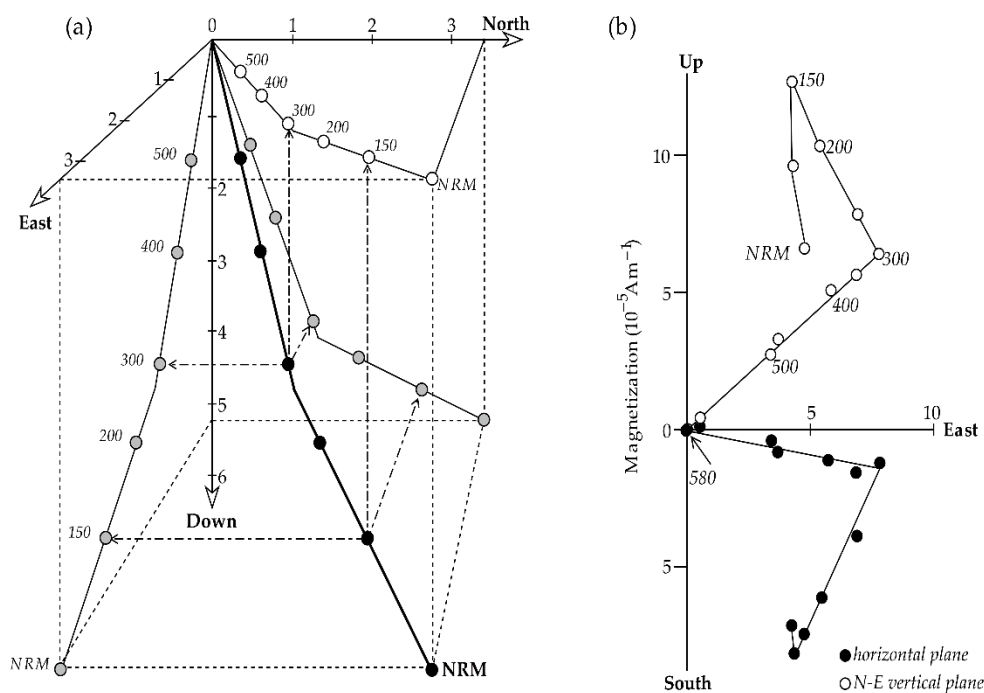
3.3. Stereografická projekce

Laboratorním procesem, tzv. *magnetickým čištěním*, se izoluje primární magnetizace od nežádoucích komponent. Směr je určen bodem, kde protíná jednotkovou kouli se středem v daném bodě. Toto převede sadu směrů na sadu bodů. Body se vynášejí do Schmidovy (Lambertovy) plochojevné projekce, která nedeformuje hustotu rozložení bodů – zachovává plochu. Obecně se v geologii používají stereografické projekce všech dat na spodní polokouli, v paleomagnetismu se na spodní polokouli vynášejí data s pozitivními, dolu směřujícími, inklinacemi; odlišným (prázdným) symbolem jako projekce na svrchní polokouli se pak vynášejí data s negativními, vzhůru směřujícími, inklinacemi (Lowrie, 2007).

3.4. Analytické metody

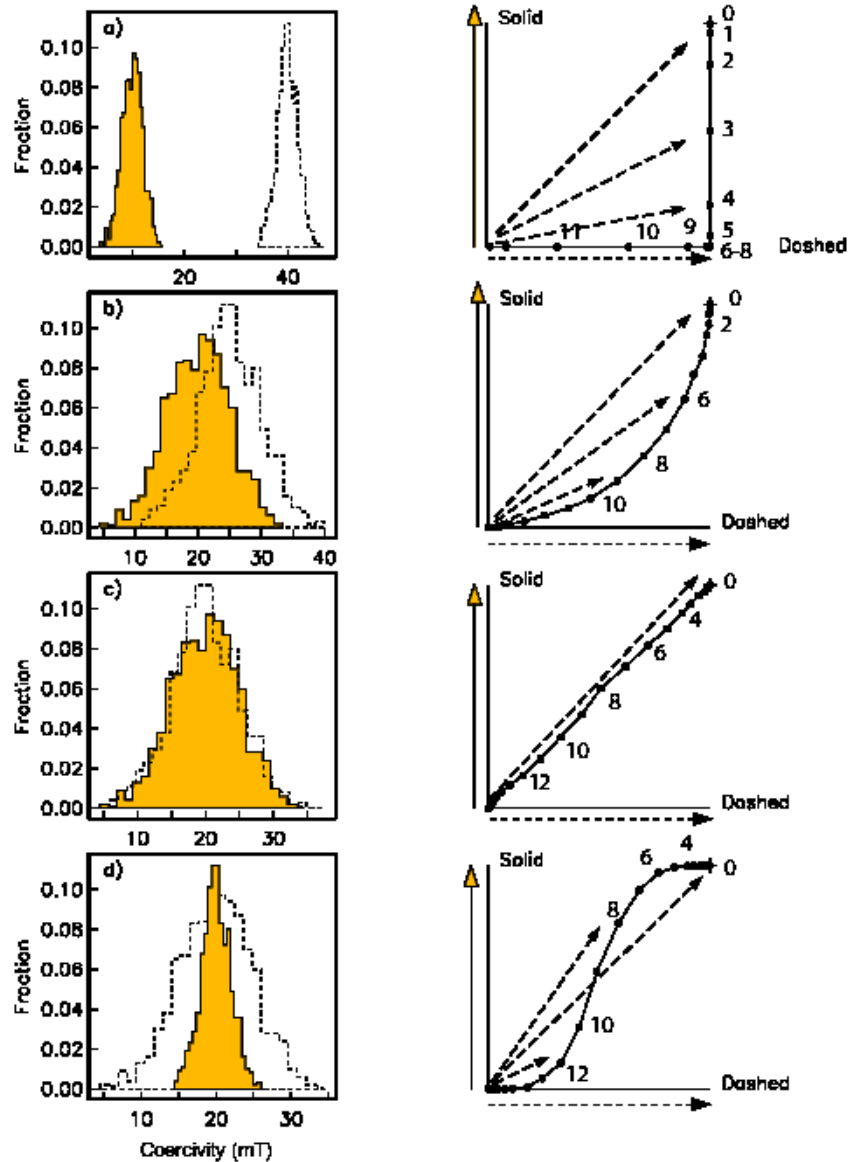
3.4.1. Zijderveldovy demagnetizační diagramy

Jako analytická metoda se od 60. let nejčastěji využívá konstrukce vektorového diagramu podle nizozemského vědce J.D.A. Zijdervelda. V každém kroku demagnetizace se magnetizace rozloží na severní (X), východní (Y) a vertikální (Z) komponentu. Do Zijderveldova grafu se vynášejí severní ku východní komponentě, nebo horizontální (severní či východní) ku vertikální komponentě (Obr.7).



Obr. 7: Zijderveldův diagram. V části a) je schematicky zobrazena projekce jednotlivých kroků demagnetizace jako bodů na třech ortogonálních plochách (horizontální, severojižní a východozápadní). V části b) je demagnetizační diagram ukázán pro konkrétní vzorek vápence. Převzato z Lowrieho (2007).

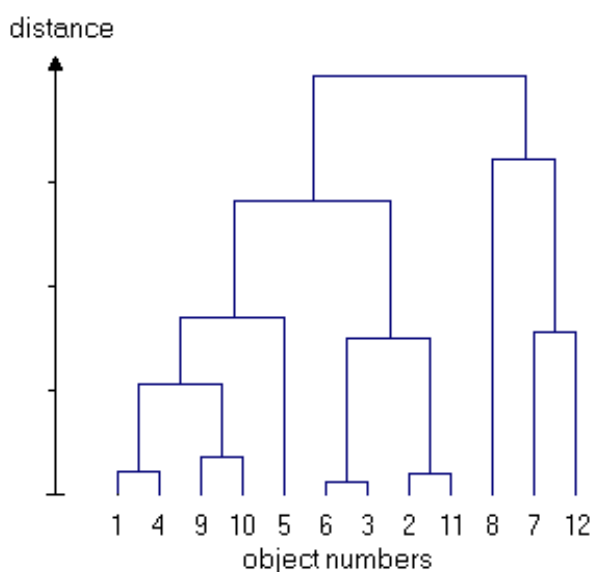
Komponenty NRM s rozlišnými koercivitami nebo blokuujícími teplotami se zobrazují v diagramu jako lineární segmenty (Obr.8). Pokud se v hornině vyskytuje více než 1 magnetická komponenta, je možné, že se koercivity nebo blokuující teploty zčásti překrývají. V průběhu demagnetizace takovéto horniny se vektor projeví zahnutou trajektorií. Pokud se koercivity nebo blokuující teploty překrývají úplně, v diagramu se neprojeví žádný lineární úsek křivky. V takovémto případě nemá vzorek žádnou stabilní magnetickou komponentu (Lowrie, 2007).



Obr.8: Vztah koercivit a demagnetizačních křivek. Převzato z Tauxe (2010).

3.4.2. Shluková analýza

Cílem této metody je v dané množině bodů ve vícerozměrném prostoru identifikovat podobné objekty a kategorizovat je do shluků. Zavádí míru podobnosti mezi body (v našem případě úhly ve 3D) a nahradí je jedním bodem. Proces se opakuje a postupná hierarchická agregace shluků se následně zobrazí pomocí dendrogramu. Dendrogram (Obr. 9) je binární strom, kde každá vodorovná linie představuje novou úroveň shlukování. Horizontální řez dendrogramem je rozkladem shlukovací sekvence.



Obr. 9: Ukázka dendrogramu, převzato od Lohningera (1999). Na horizontální osu je vyneseno počet dat, na vertikální jejich vzdálenost.

3.4.3. Fisherova statistická metoda

Podle Fishera (1953) se získaná data vyhodnocují pomocí Fisherovy statistické metody. Každý paleomagnetický směr ze sady dat je považován za vektor. Každý vektor má jednotkovou délku, ale odlišný směr. Konečné body každého vektoru leží na povrchu jednotkové kružnice a tvoří oblasti distribuce bodů. Odhad hlavního směru jednotkových vektorů populace N se dá určit jako jejich vektorový průměr R . Ve většině případů nejsou vektory paralelní a jejich vektorovým součtem dostaneme výsledný vektor o délce $R \leq N$. Hustota rozložení P_{δ_A} bodů je dána rovnicí:

$$P_{\delta_A} = \frac{\kappa}{4\pi \sinh \kappa} \exp(\kappa \cos \psi), \quad (9)$$

kde $P_{\delta A}$ je hodnota určující pravděpodobnost, že data padnou do malé oblasti δA v okruhu úhlu ψ od hlavního směru. Hlavní směr se objevuje ve $\psi = 0$ a hustota rozložení je zde maximální. Kappa je koncentrační parametr a popisuje rozptyl směrů. Pokud se $\kappa = 0$, body jsou stejnoměrně rozloženy (není zde žádná přednostní orientace) a pokud je kappa velké číslo, body se shlukují v těsné blízkosti okolo hlavního směru. Jednotkový vektor i -tého směru je určen směrovými kosiny (l_i, m_i, n_i) jako:

$$\begin{aligned} \text{Severní komponenta: } l_i &= \cos D_i \cos I_i \\ \text{Východní komponenta: } m_i &= \sin D_i \cos I_i \\ \text{Horizontální komponenta: } n_i &= \sin I_i. \end{aligned} \quad (10)$$

Máme-li vzorek N bodů, nejlepší odhad správného hlavního směru je směr výsledku vektorového součtu N jednotlivých jednotkových vektorů; tedy,

$$X = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N l_i, \quad X = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N m_i, \quad X = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N n_i, \quad (11)$$

kde $R (\leq N)$ je velikost vektorového součtu dána vzorcem:

$$R^2 = \left(\sum l_i\right)^2 + \left(\sum m_i\right)^2 + \left(\sum n_i\right)^2. \quad (12)$$

Odhad koncentračního parametru kappa, k je dán vzorcem:

$$k = \frac{N-1}{N-R}. \quad (13)$$

Použitím koncentračního parametru lze spočítat směrodatnou odchylku α_{95} ($p = 0.05$), která reprezentuje okolí hlavního směru, za kterým leží už jen 5 % bodů

$$\alpha_{95} = \cos^{-1} \left[1 - \frac{N-R}{R} \left[\left(\frac{1}{p} \right)^{\frac{1}{N-1}} - 1 \right] \right]. \quad (14)$$

V paleomagnetismu se běžně tento vzorec aproximuje na:

$$\alpha_{95} = \frac{140}{\sqrt{kN}}. \quad (15)$$

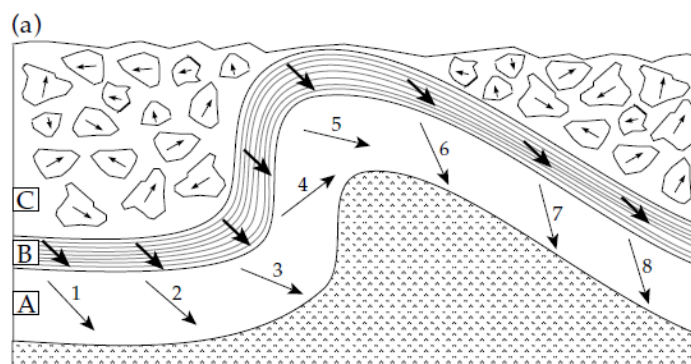
Dále se stanovuje tzv. *CSD – circular standart deviaton* – kruhová standartní odchylka vzorcem

$$CSD \approx \frac{81}{\sqrt{k}}, \quad (16)$$

což je okruh, který obsahuje přibližně 68 % dat.

3.4.4. Vrásový test

Aplikuje se na vzorky z vrstev, které byly původně horizontální a pozdějšími tektonickými událostmi byly zvrásněny. Pokud je paleomagnetický směr ve vzorku stabilní, projeví se stejnou rotací jako zvrásněná vrstva – vektory míří různými směry – vzorek vykazuje pretektonickou magnetizaci (Obr.10, a) – Vrstva A). Pokud se magnetizace v hornině objeví až post tektonicky, bude mít ve všech bodech stejný směr (Obr. 10, a) – Vrstva B). Pokud se magnetizace objeví zároveň s deformací, směry magnetizace se změní, ale méně než v prvním případě. Takové magnetizaci říkáme syntektonická (Lowrie, 2007).



(b)

	Vrstva A	Vrstva B
Směry před odvrásněním		
Směry po odvrásnění		

Obr. 10: Vrásový test podle Lowrieho, 2007.

V praxi provádíme porovnání směrů před aplikováním vrásového testu se směry po korekci. Pokud jsou vzorky se stabilní magnetizací odebrány ve všech částech vrásy, jejich neopravené směry budou rozptýlené. Po provedení testu by se rozptyl měl redukovat a směry by se měli sdružovat do jednoho bodu, který je blízký původní magnetizaci (Obr 10, b) – Vrstva A). Testu s takovýmto výsledkem říkáme pozitivní vrásový test. Pokud je magnetizace nestabilní nebo vznikla post tektonicky, vrásový test zvýší rozptyl distribuce bodů – v tomto případě hovoříme o negativním vrásovém testu (Obr. 10, b) – Vrstva B).

4. Geologie studované oblasti

Mongolsko je součástí centrálního asijského orogenního pásu (CAOB) – akrečního orogenu, který je situován mezi 3 kratony - Siberijský na severu, Severočínský a Tarim na jihu (Hendrix, et al. 1992; Sengör et al. 1993; Windley et al. 2007). Avšak formace a evoluce CAOB stále není dokonale pochopena a jeho jednotlivé části jsou studovány mnoha výzkumy. Geologická stavba oblasti byla zkoumána už v 50. letech minulého století ruskými a mongolskými geology a za posledních 30 let zde bylo provedeno mnoho studií.

4.1. Tektonické zóny

Podle Krönera (2010), který navazuje na myšlenky Zonenshaina (1973), Ruzhentseva a Mossakovskiyho (1995) je mongolská oroklina alpidní útvar dělící se od severu k jihu na 4 tektonické zóny:

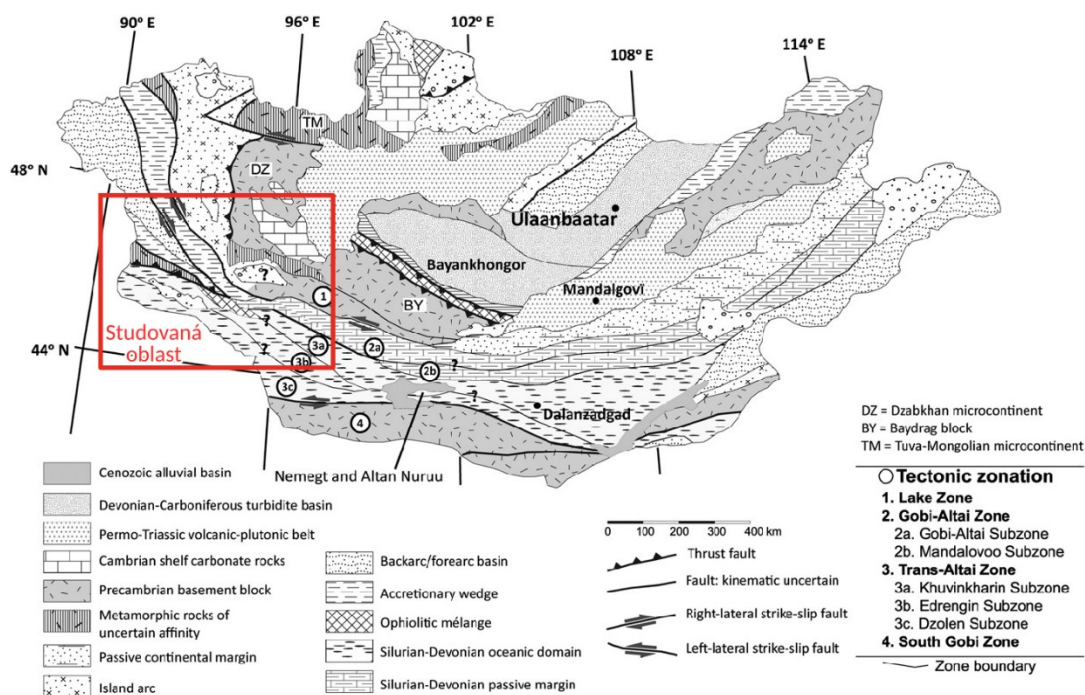
Jezerní zóna (Obr. 11, 1) (pozdně proterozoický až spodnokambrický akreční klín a ofiolit nasunutý během pozdního kambria až spodního ordoviku na proterozoické kontinentální bloky Baydrag a Dhabzkan)

Mongolská nebo Gobi-Altajská zóna (Obr. 11, 2) (spodnoordovické vulkanosedimentární sekvence, do nichž intrudovaly devono-karbonské magmatity)

Trans-Altajská zóna (Obr. 11, 3) (vulkanosedimentární horniny oceánského typu překrývající ultrabazický basement). Trans-Altajská zóna se skládá ze dvou hlavních tektonických domén – Trans-Altajská oblast *sensus stricto* (tři tektonické jednotky: Khubinkhar, Edren a Baaran) a jižně postavená

oblast Shargyn Gobi (jednotky Zoolen a Baytag). Tyto dvě hlavní tektonické domény jsou odděleny Trans-Altajskou střížnou zónou propagovanou severozápadním – jihovýchodním směrem.

Zóna Jižní Gobi (Obr. 11, 4) (proterozoický basement pokrytý spodnopaleozoickými sledy)



Obr. 11: Zjednodušená mapa litotektonických jednotek Mongolska, upraveno podle Rippingtona, et al. (2013).

Badarch et al. (2002) už vyčleňují na území Mongolska 44 terránů 7 genetických typů. 5 z nich je klasifikováno jako severní (Kaledonská) doména a od dvou typů jižní (Variské) domény je odděluje tzv. Centrální mongolský lineament.

Území severní domény je tvořeno metamorfními horninami prekambriického a spodnopaleozoického stáří, neoproterozoickými ofiolity, spodnopaleozoickými vulkanity ostrovních oblouků a s tím spojenými vulkanoklastickými sedimenty. Také se zde objevují granitické horniny různých věků i složení, devonské až karbonské sedimentární sekvence a permské vulkanické (plutonické) pásy s marinními i suchozemskými sedimenty.

Jižní doména je charakteristická spodně až středně paleozoickými vulkanity a vulkanoklastiky s fragmenty ofiolitů a serpentínovou melanzí pojenou s ostrovním obloukem. Podél jeho severního okraje se vyskytují na fosílie bohaté silurské a devonské vápence. Velmi rozšířené jsou zde pennsylvánské až permské vulkanity. Podle Segnöra and Natal'ina (1996) se na jihovýchodě nachází

permské vápence a turbidity a menší množství vulkanitů, které jsou interpretovány jako pozůstatky suturní zóny mezi Altaidy a Manchuridským orogenním pásem.

Do východních částí obou domén intrudovaly četné mesozoické, na vzácné kovy bohaté, granitoidní plutony, které jsou překryty svrchnojurskými až křídovými terigenními vulkanity a sedimenty.

4.2. Tektonické události

Lehmann et al. (2010) uvádí, že ve studované oblasti mongolské části centrálního asijského orogenního pásma proběhly 3 hlavní tektonické události.

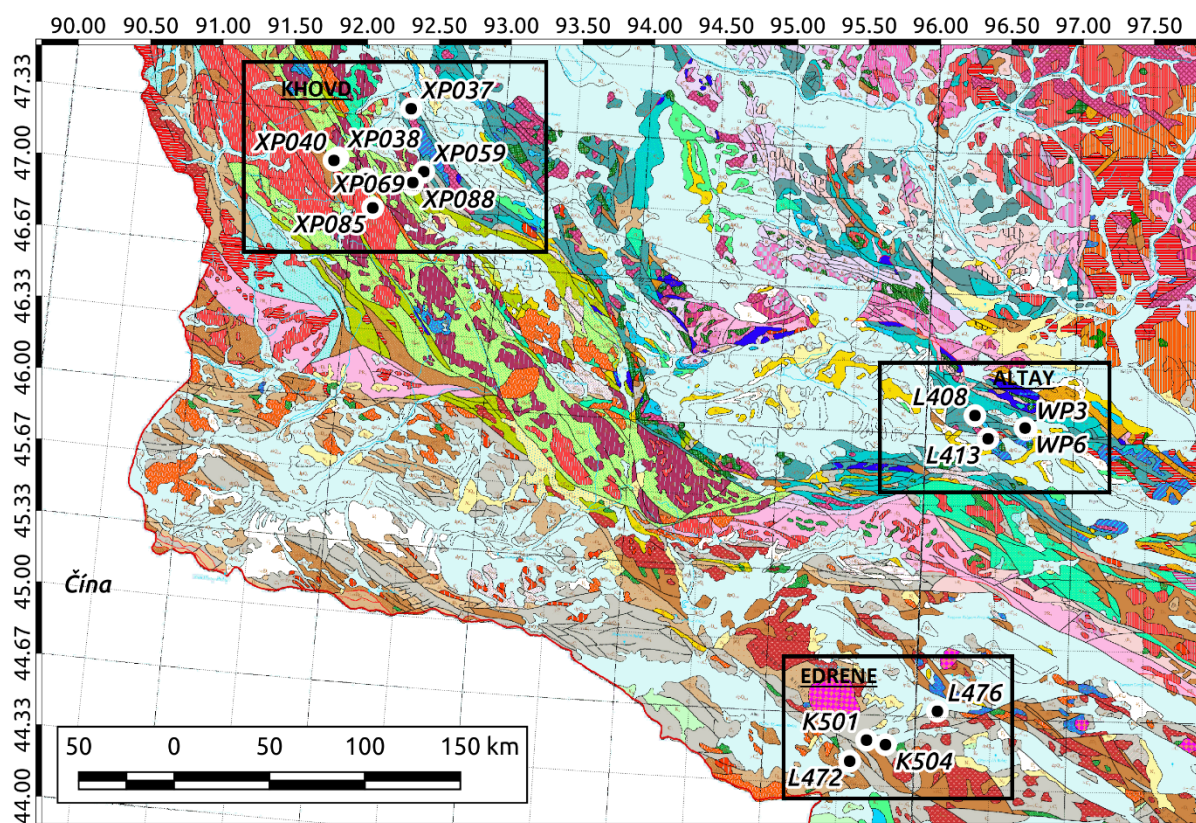
- 1) Subhorizontální D1 násun spodnodevonských ofiolitů přes svrchnodevonské a karbonské sekvence v oblasti Zoolen. Tato událost byla doprovázena S1 foliací v podmínkách facie zelených břidlic. Tato událost je interpretována v souladu s myšlenkami Zonenshaina et al. (1975) jako obraz hlavní svrchnodevonské až spodnokarbonské fáze akrece a kolize.
- 2) Většina paleozoických sekvencí je převrásněna vzpřímenými vrásami severojižního průběhu, což je lokálně spojeno se subvertikální kliváží S2. Tyto struktury zaznamenaly při svém vzniku podél severozápadního okraje plutonu Gobi Tien Shan podmínky až amfibolitové facie. V plutonu je hlavní subsolidová foliace paralelní s regionální S2 a je možno odhadovat deformační událost D2, která časově koresponduje s umístěním intruze před 300–290 miliony let.
- 3) 3 střížné zóny velkého měřítka propagující se SZ-JV směrem – Edren, Trans-Altajská a Tomörtyn přetínají území studované oblasti a lemují slabě deformovanou doménu tvořenou více méně jednotkami Khubinkhar, Baaran a Baytag. Tyto střížné zóny jsou charakteristické až 20 km širokou vertikální „klivážovou frontou“ SV-JZ průběhu spojenou s metamorfózou ve facii zelených břidlic a rozsáhlou hydrotermální alterací. Tyto struktury byly datovány Lehmannem et al. (2010) a Guyem et al. (2014) použitím metod ^{40}Ar - ^{39}Ar a K-Ar na muskovitu a určeny jako pozdně permského až raně triasového stáří. Stavba S2 je ve slabě deformovaných doménách vrásněna vzpřímenými vrásami východozápadního průběhu.

Morfologicky zde dominují tři SZ-JV až Z-V orientované horské hřbety, které geograficky patří Mongolskému a Gobijskému Altaji s nadmořskými výškami v rozpětí 1350 až 3350 m.

5. Vlastní výzkum a výsledky

5.1. Studovaná oblast

Zájmové území (Obr. 12) bylo pro účely manipulace s daty rozděleno na tři oblasti – Khovd, Altay a Edrene.



Obr. 12: Geologická mapa studované oblasti s vyznačenými lokalitami

Vzorky z oblasti Khovd jsou převážně silurské až permské sedimenty. Jedná se o hnědo-červené jemnozrnné droby, pískovce až prachovce, mnohdy fosiliemi bohaté. Pouze lokality XP037 a XP085 mají odlišný charakter – nachází se zde granity a amfibolity. Vzorky z oblasti Altay jsou jemnozrnné kambrické vulkanity intermediálního (andezity) až kyselého charakteru (ryolity). Z oblasti Edrene jsou analyzovány spodnosedonské až kambrické vulkanity, konkrétně bazalty a andezitické tufy.

5.2. Postup analýzy dat

Data pro tuto studii byla získána pomocí postupné tepelné demagnetizace rotačním magnetometrem typu AGICO JR-5 (Obr. 13) v laboratoři Institutu fyziky Země v Paříži.

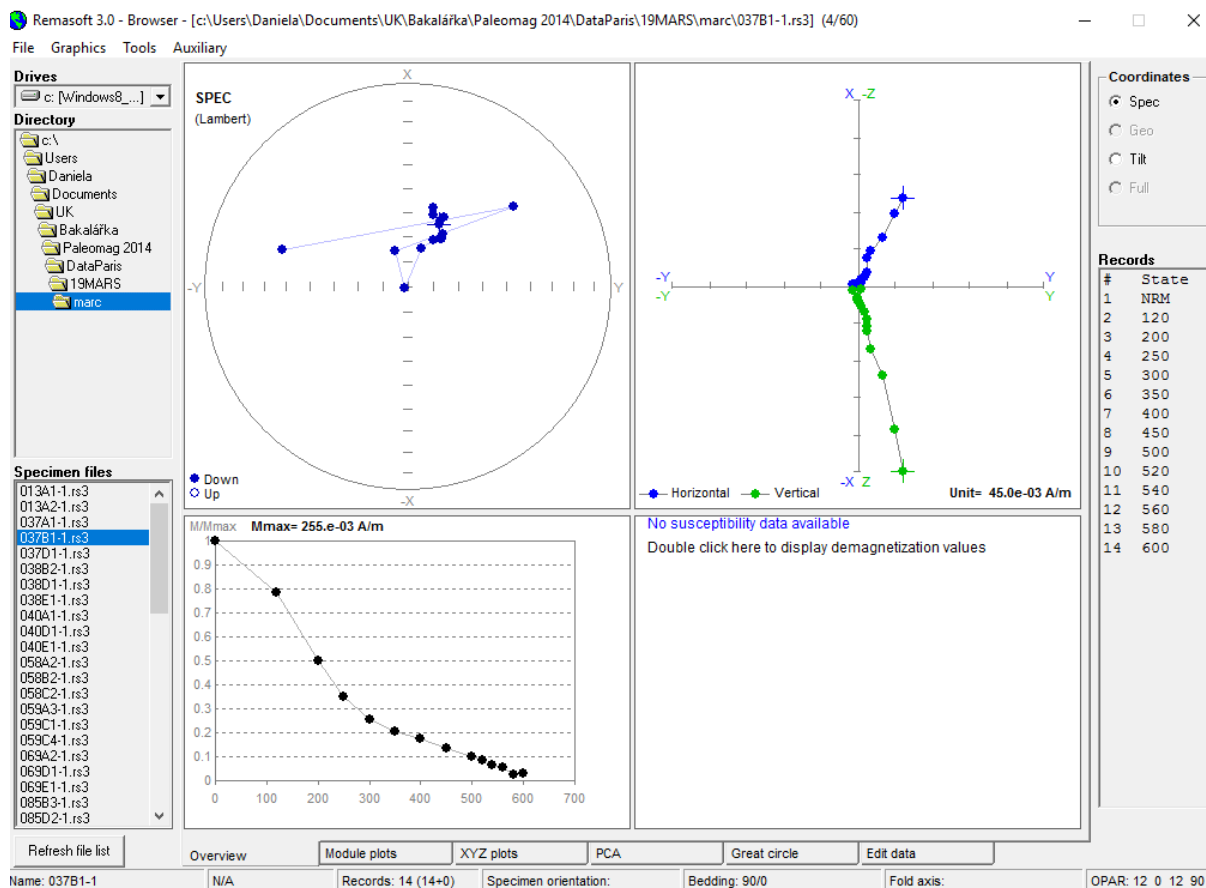


Obr. 13: Rotační magnetometr JR-5 firmy AGICO, s.r.o.

5.2.1. Remasoft 3.0.

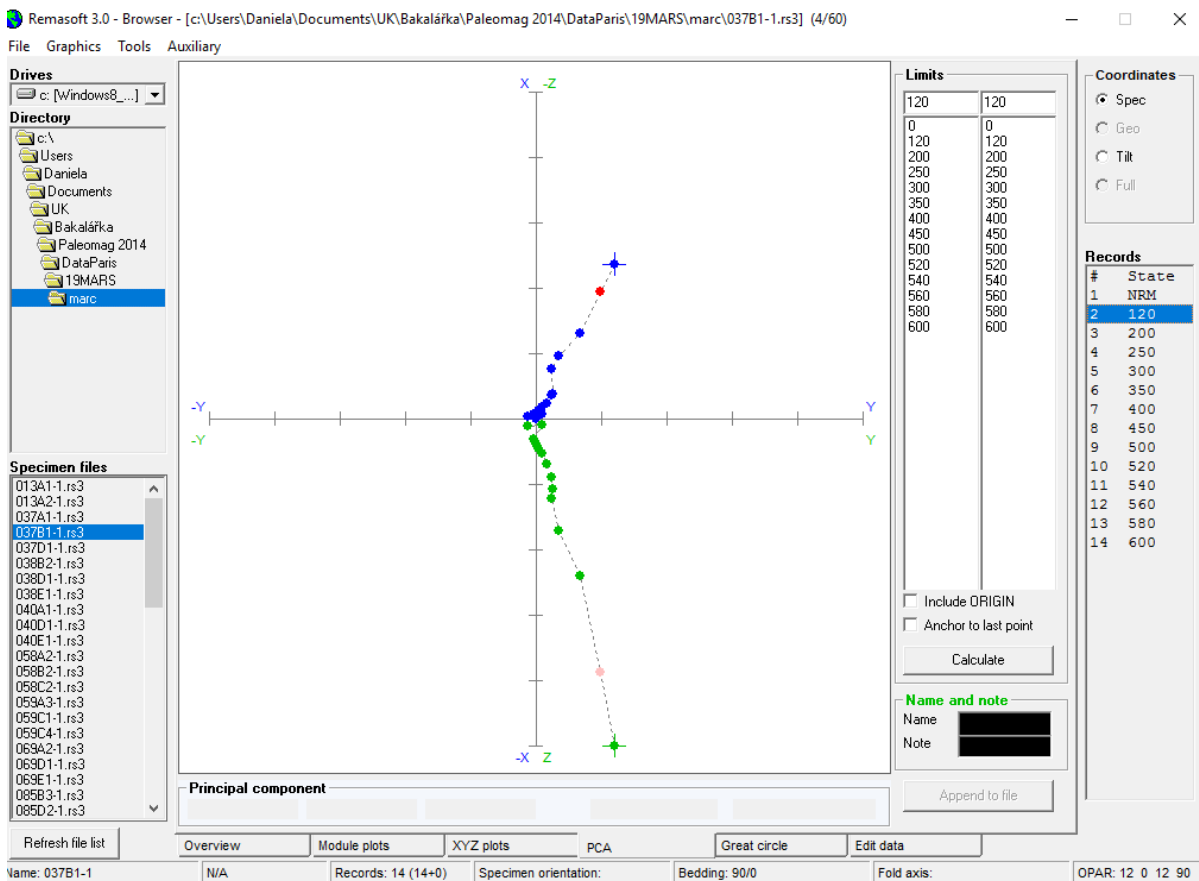
Analýza výstupů demagnetizačních dat ve formátu *.rs3* byla provedena pro všechny válečky; pro každý odděleně. V následující části bude vysvětlen postup práce s programem Remasoft 3.0. společnosti AGICO, s.r.o. a demonstrován na konkrétním případě válečku B1-1 z lokality XP037.

Import dat probíhá po otevření programu přes volbu *File – Convert specimen file(s)* zvolením složky, kde jsou požadovaná data uložena a potvrzením pomocí volby *Select all – Open*. V prvním náhledu souboru, v záložce Overview (Obr.14), můžeme vidět projekci bodů na Lambertovu síť, Zijderveldův graf s horizontální a vertikální komponentou, graf tepelné demagnetizace a sloupeček s teplotním záznamem.



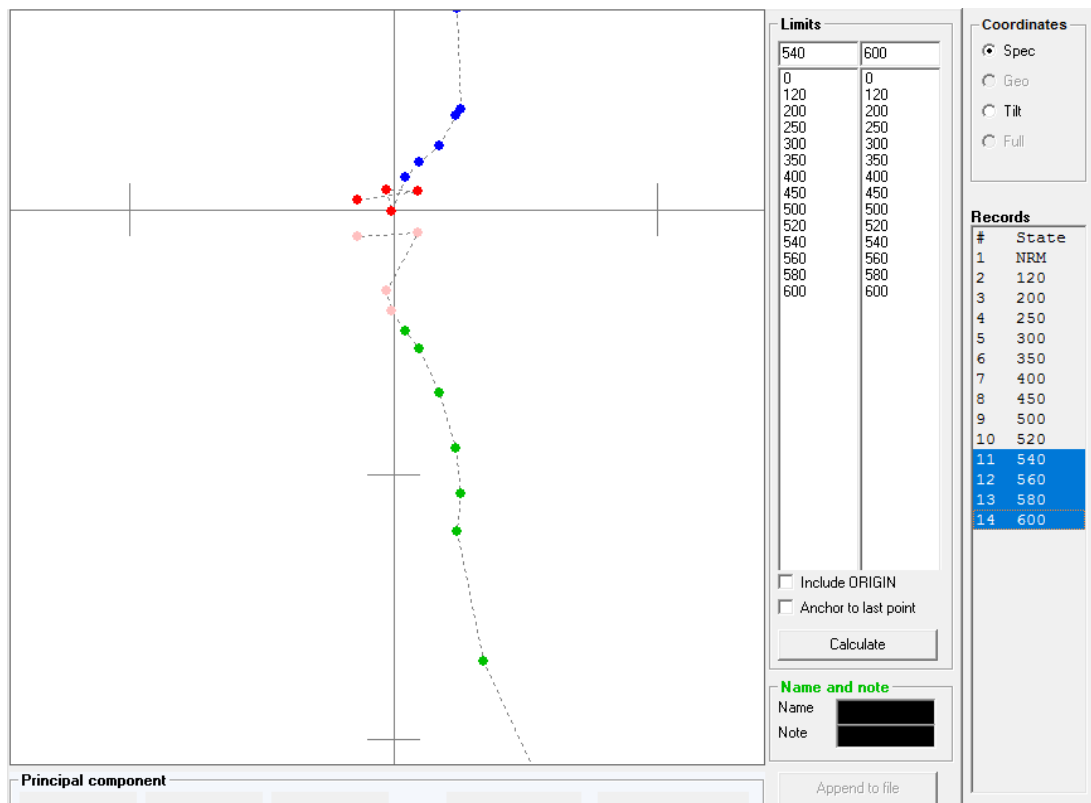
Obr. 14: První náhled v programu Remasoft 3.0. Lokalita XP037, váleček B1-1.

Přepneme-li do záložky PCA (Principal Component Analysis), zobrazí se nám Zijderveldův graf a sloupec s teplotními kroky, ve kterých byl váleček demagnetizován (Obr. 15). Kliknutím na určitou teplotu se v grafu zvýrazní bod, který tato hodnota představuje.



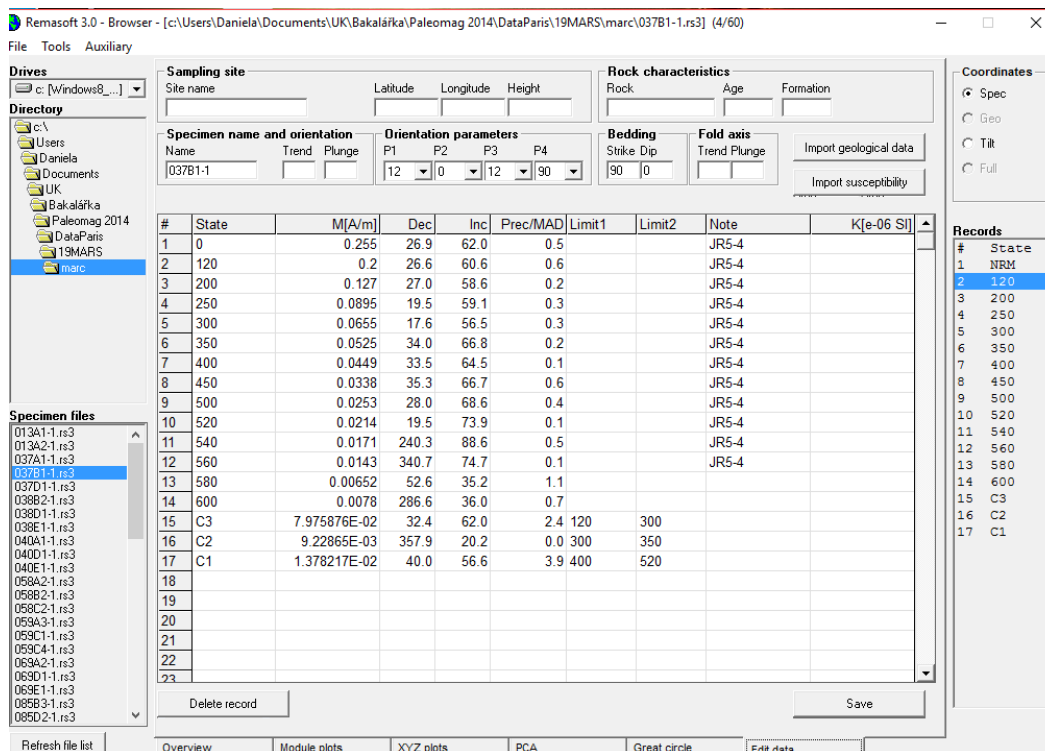
Obr. 15: Analýza hlavních komponent. Lokalita XP037, váleček B1-1. Červeně (a růžově) je vyznačený bod demagnetizace o teplotě 120 °C.

Analýza hlavních komponent se dá obecně rozdělit na nízkoteplotní, středněteplotní a vysokoteplotní krok, s limitami přibližně NRM (tedy 0 °C) – 300 °C, 350–500 °C a 500 °C a výš. V případě, že je demagnetizace nejasná či nekompletní, zvolí se limit od NRM do konce měření a tato analýza se označí jako středněteplotní. V některých případech (Obr. 16) se nedají data jednoznačně určit, protože vykazují chaotický průběh konce demagnetizačního procesu.



Obr.16: Přiblížení grafu. Na obrázku je vidět nejasný průběh demagnetizace mezi 540-600 °C. Tato data nebyla vyhodnocována.

Po rozdělení grafu na teplotní komponenty přepneme do záložky Edit data (Obr. 17), kde se objeví přehled všech teplotních kroků a námi určených limitů s hodnotou magnetizace, výpočtem inklinace, deklinace a směrodatné odchylky.



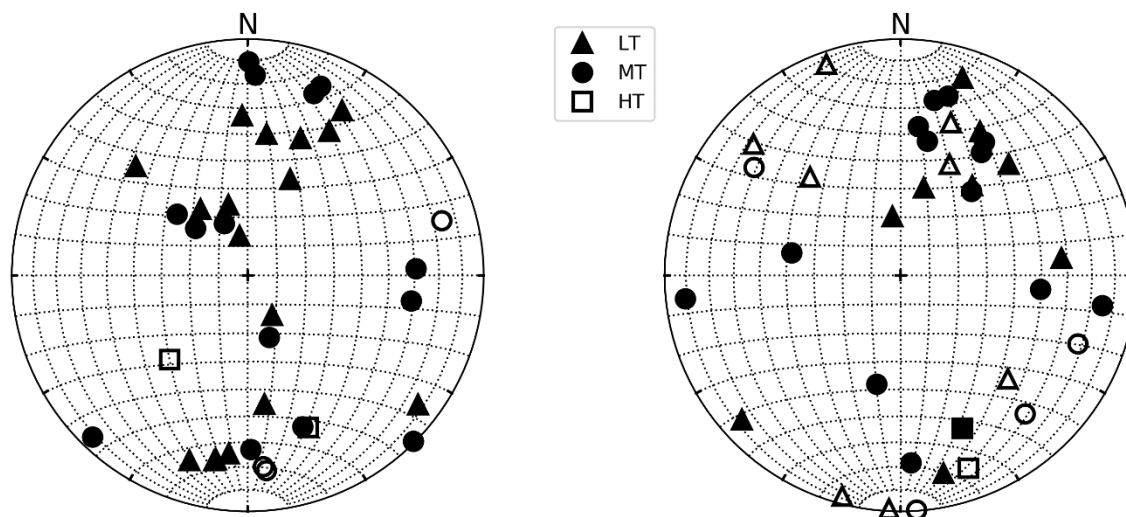
Obr. 17: Záložka Edit data

5.2.2. Prostředí Python

Výsledky analýz teplotních komponent byly ve skupinách Altay, Edrene a Khovd dále zpracovávány pomocí skriptu APSG (<https://github.com/ondrolexa/apsg/tree/0.4.2>) v programovacím jazyce Python a knihovnách NumPy, SciPy a Matplotlib. Data byla vyprojektována do Schmidových stereografických projekcí, na základě jejich podobnosti byla provedena shluková analýza a vypočítána Fisherova statistika. Tento postup bude demonstrován na datech z oblasti Altay.

Výsledky analýz teplotních komponent byly vyneseny do stereografické projekce (Obr.18); nalevo v původních souřadnicích a napravo po provedení vrásového testu – tedy aplikace hodnot sklonu a směru sklonu. Tato vizualizace nám dává první možnost nahlédnout, zda je magnetizace pre nebo post tektonická (vrásový test snižuje, resp. zvyšuje rozptyl distribuce bodů).

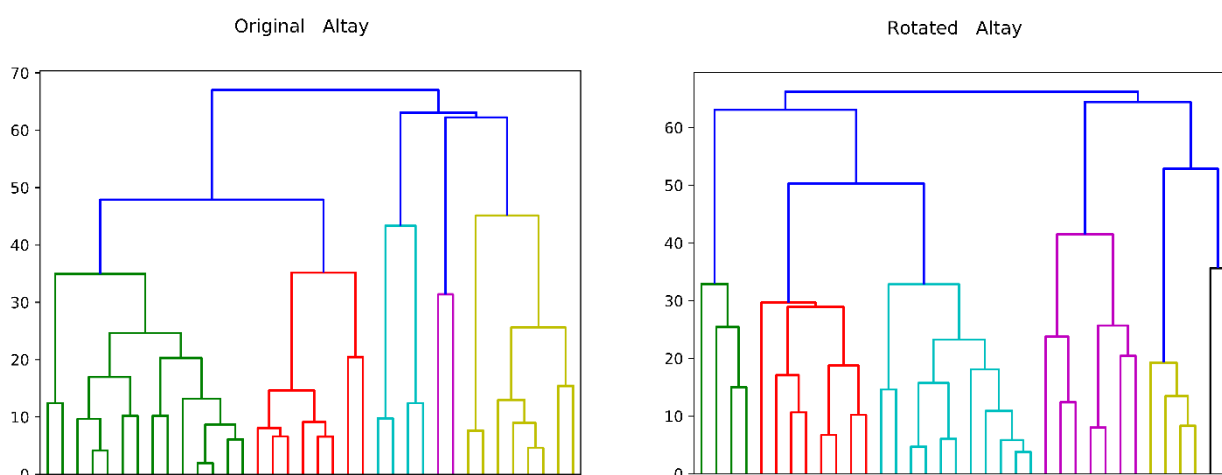
Original Altay Rotated



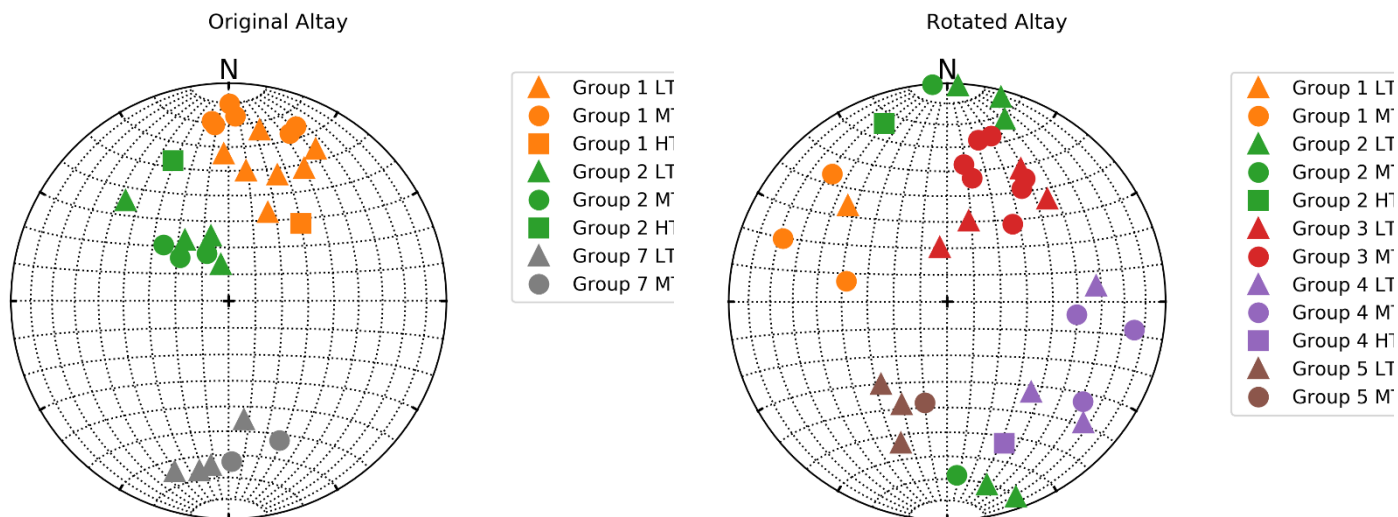
Obr.18: Stereografické projekce oblasti Altaj. Trojúhelníčky označují nízkoteplotní, kolečka středněteplotní a čtverečky vysokoteplotní komponenty. Prázdné symboly značí polaritu promítnutou na svrchní hemisféře.

Shlukovací metodou (Obr. 19, A) byla měření rozdělena do několika skupin, a to jak pro data před korekcí, tak pro data po provedení vrásového testu. Minimální počet měření pro vytvoření shluku byl stanoven na 3. Počítač pak automaticky vyhodnotil tyto skupiny a vynesl je do stereografické projekce (Obr. 19, B). Data, která nespĺnila podmínky, již nebyla ve vyhodnocování zohledněna. Tento postup nám později umožnil lépe vypočítat Fisherovy statistiky a porovnáním výsledků přesněji určit typ magnetizace.

A



B



Obr. 19: A – Dendrogramy pro původní i rotovaná data. Na horizontální osu se vynášejí jednotlivá měření, na vertikální osu velikost úhlu. B – Shlukovací analýza vynesena do stereografické projekce; barvy skupin jsou dány nezávisle na barvách v dendrogramu.

Na základě určených skupin byl vypočítán průměr jejich hodnot, směrodatná odchylka α_{95} , standardní kruhová odchylka, odhad koncentračního parametru k a poměr koncentračních parametrů (Tab. 1). „Grouped Original“ znamená, že data byla seskupena do shluku v originální pozici a následně vypočítána statistika (pro tato data ve sloupci „Original“). Sloupec „Rotated“ vztahující se k řádkům „Grouped Original“ ukazuje hodnoty pro shluky po provedení vrásového testu. Oproti tomu „Grouped Rotated“, sloupec „Original“ znamená, že statistika byla prvně vypočítána pro zrotovaná data vrásovým testem a ve sloupci „Rotated“ odvrátněna zpět na původní data. Sloupec k-ratio popisuje kolikrát se změnila hodnota k .

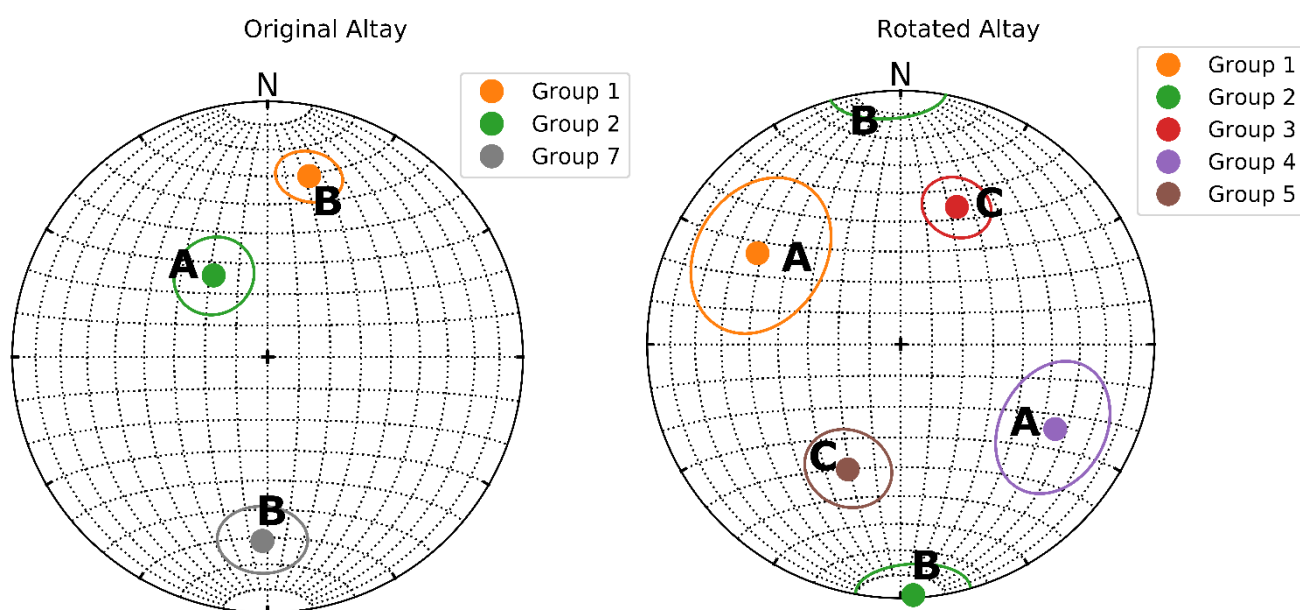
	Group	Original			Rotated			k-ratio
		a95	csd	k	a95	csd	k	
Grouped Original	1	9.284963	18.43975	19.29567	24.92639	43.22244	3.511975	5.49425
	2	12.55012	17.91832	20.43504	40.35763	48.07441	2.838848	7.198357
	7	12.38243	14.73235	30.22917	33.57187	36.47059	4.932698	6.128324
Grouped Rotated	1	49.48756	38.5291	4.419696	23.48306	20.07819	16.275	3.682381
	2	33.90971	42.55587	3.622856	13.19417	18.79177	18.57952	5.128419
	3	28.09499	42.66788	3.60386	10.34711	17.91851	20.43462	5.670202
	4	32.9151	38.99441	4.314847	19.48993	24.94521	10.54377	2.443602
	5	37.33554	30.56007	7.025242	13.19411	11.51756	49.4594	7.040241

Tab.1: Fisherova statistika pro skupinu Altay.

Pokud je hodnota α_{95} v případě skupiny dat „Grouped Original“ ve sloupci „Original“ menší než hodnota k a ve sloupci „Rotated“ je tomu naopak, znamená to negativní výsledek vrásového testu – data se rozptýlí a magnetizace je post tektonická.

Pokud je hodnota α_{95} v případě skupiny dat „Grouped Rotated“ ve sloupci „Original“ větší než hodnota k a ve sloupci „Rotated“ vykazují data opačný trend, opět to znamená negativní výsledek vrásového testu – data se rozptýlí a magnetizace je post tektonická.

Nakonec se na pro přehlednost zobrazí jen střed a standartní odchylka α_{95} a na základě velikosti inklinací se označí skupiny v každé oblasti písmeny A a B pro nízkoinkлинаční data, C a D pro data se střední až relativně strmou inklinací (Obr.20).

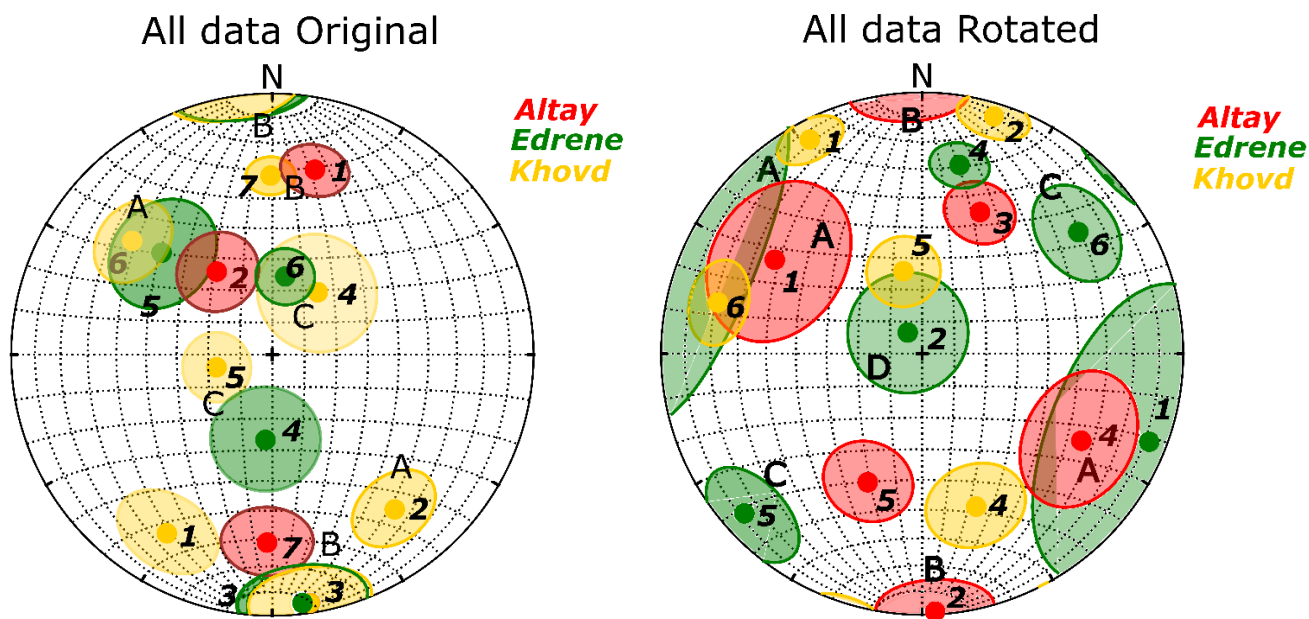


Obr. 20: Zobrazení výsledků všech měření z oblasti Altay pomocí středů dat a směrodatných odchylek.

6. Diskuze

Na základě sdružení dat získaných ze všech oblastí (Obr.21) lze rozlišit minimálně dvě hlavní fáze magnetizace. První skupinu je možné vyčlenit na základě rozmístění dat v pozici před vrásovým testem, kde data tvoří uspořádané shluky kolem středu stereografické projekce. Jedná se převážně o inklinace vysokých hodnot (oblasti C a D), které značí pretektonické či syntektonické magnetizace (komponenty středně až vysokoteplotní). Pokud je hornina postižena vysokoteplotní metamorfózou, kompletně se přepíše její magnetický záznam. Ve studované oblasti byl prokázán průběh permské metamorfózy heterogenního charakteru (Edel et al., 2014), a proto mohou v některých oblastech zůstat tato data zachována.

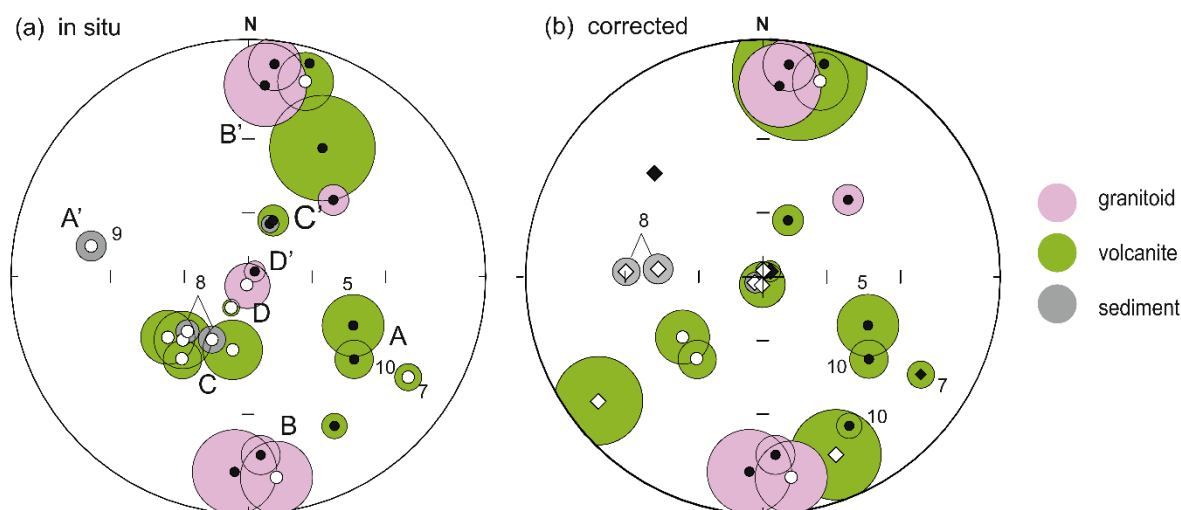
Pokud provedeme vrásový test a poloha dat se nezmění, lze tyto vzorky (oblasti B) interpretovat jako nejmladší magnetizace, které vykazují stejné směry od svrchního triasu až střední jury a reflektují tak svou dnešní polohu. Nízkoinklinační vzorky (oblasti A i B), lze interpretovat jako remagnetizace, a to nezávisle na tom, zda se jedná o nízkoteplotní, středněteplotní či vysokoteplotní komponentu. V našem případě se jedná převážně o komponenty nízkoteplotní.



Obr. 21: Finální výstup z naměřených paleomagnetických dat.

V severozápadní oblasti (A) interpretujeme po provedení vrásového testu stáří magnetizací od nejsvrchnějšího karbonu až spodního permu, které od doby svého vzniku rotovaly o 90° kolem vertikální osy. Pokud se magnetizace shlukují v nerotovaném stavu, můžeme je označit jako mladé, post tektonické magnetizace. Jejich poloha se pohybovala ve středních zeměpisných šířkách. Pokud se shlukují až po provedení vrásového testu, rotace proběhla až po magnetizaci. Starší magnetizace (skupiny C a D) naopak horniny získaly v dobách, kdy se území nacházelo na jižní polokouli. Remagnetizace v permotriasu a směrová variace deklinace je výsledkem vrásnění což podporuje teorii o vzniku CAOBS od Lehmana et al. (2002) a Edela et al. (2014). Z našich výsledků je patrná přednostní orientace inklinací a deklinací a rotace proti směru hodinových ručiček kolem vertikální osy v oblasti mezi severem a západem, která naznačuje rotační pohyb od nejsvrchnějšího karbonu až permu a naplňuje představu o vývoji mongolské orokliny.

Edel et al. (2014) ve své paleomagnetické studii zobrazují směry s normální polaritou (na svrchní hemisféře) jako A', B', C', D' a směry s polaritou opačnou (plné symboly na spodní hemisféře) jako A, B, C, D (Obr. 22).



Obr. 22: Výsledky paleomagnetické studie CAOB z roku 2014 z oblasti vzdálené cca 150 km východně od námi studované části Altaj. Upraveno podle Edela et al. (2014).

Data ze skupiny A byla popsána jako remagnetizace po hlavní fázi akrece a kolize a s tím spojenou metamorfózou. Tyto magnetizace jsou zachovány jen v místech, která nebyla (nebo byla jen lehce) zasažena deformací v permotriasu. Jejich vznik souvisí s tektonickými a magmatickými událostmi ze středního až pozdního karbonu, které ovlivňovaly oblast celého jižního Mongolska.

Skupina B vykazuje deformace z pozdního karbonu až svrchního permu, jedná se o remagnetizace spojené s magmatickou či hydrotermální aktivitou, kterou horniny získaly během permu; vzhledem k inklinacím blízkým nule, se oblast jižního Mongolska v této době nacházela v rovníkové pozici.

Skupiny C a D vykazují post tektonickou magnetizaci. Remagnetizace skupin C a D mohou být spojeny s deformací probíhající v oblasti v období aktivity střížných zón Tomörtyn, Trans-Altaj a Edren (230Ma). Inklinace 45° lokalizuje Mongolsko na přibližně 26. severní rovnoběžku, což koreluje s triasovou polohou kratonu Severní Čína.

7. Závěr

V rámci této bakalářské práce byly shrnuty základní principy magnetismu, geomagnetismu, paleomagnetismu, popsány statistické metody a uvedena stručná charakteristika geologie jihozápadní části Mongolska. Část vlastního výzkumu se zabývala postupem zpracování získaných paleomagnetických měření a jejich analýzou a přinesla tyto výsledky:

1. Byly lokalizovány 3 hlavní směry magnetizací, které byly interpretovány jako různá stáří remagnetizace.

2. Nejstarší magnetizace byla interpretována jako pre a syntektonická. Tento výsledek podporuje hypotézu o heterogenitě metamorfózy dané oblasti.
3. Hypotézu Lehmana et al.(2002) podporuje především skupina dat A, která dokazuje rotační pohyb kolem vertikální osy.
4. Nejmladší magnetizace se vyskytují v severojižních oblastech a už nevykazují žádnou deformaci po svém vzniku.

Detailnější analýza CAOB bude předmětem diplomové práce.

8. Přílohy

Na přiloženém CD se nachází následující přílohy:

- Příloha 1:
 - Soubor obsahující kompletní seznam lokalit vždy s názvem, zeměpisnou šířkou a délkou a grafickými výstupy z programu Remasoft 3.0. spolu s tabulkou vyhodnocených dat.

- Příloha 2:
 - Tabulka obsahující seznam lokalit a vzorků, první část. Je zde uveden název lokality, válečku, přiřazení k jedné ze tří skupin, název výstupu z programu Remasoft 3.0., hodnoty inklinací a deklinací pro jednotlivé teplotní komponenty, směr sklonu a sklon naměřený na výchoze a poznámku (např. o složení horniny).
 - Tabulka obsahující seznam lokalit a vzorků, druhá část. Až do sloupce D totožný seznam jako v Příloze 2; poté jsou namísto deklinací a inklinací uvedeny určené teplotní limity pro jednotlivé komponenty a poznámka, jestli měření dosáhlo počátku.

- Příloha 3:
 - Soubor obsahující všechny stereografické projekce pro dané oblasti s vynesnými daty v originální pozici a po provedení vrásového testu.

- Příloha 4:
 - Soubor obsahující všechny stereografické projekce pro dané oblasti s barevně vynesnými teplotními komponentami na skupiny, podle kterých byla následně počítána Fisherova statistika.

- Příloha 5:
 - Tabulka se statistickými údaji rozdělena na tři části – pro každou oblast zvlášť.

- Příloha 6:
 - Stereografické projekce vytvořené pro statistiku spočítanou v tabulkách přílohy 5.

9. Zdroje

Použitá literatura:

BADARCH, G., CUNNINGHAM, W.D., WINDLEY, B.F., 2002: *A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia*. J. Asian Earth Sci. 21, 87–110.

BLOXHAM J. a GUBBINS D., 1989: *The evolution of the Earth's magnetic field*. Scientific American, 261, 30–37.

BOCHNÍČEK J., HEJDA P., 2004: *Magnetické pole Země a kosmické počasí*, Československý časopis pro fyziku., č. 4, s. 200.

BUTLER R. F., 1992: *Paleomagnetism: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications. ISBN 978-0865420700

DUNLOP D. J., ÖZDEMİR Ö., 1997: *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*, Cambridge: Cambridge University Press, 573 s. ISBN 0-521-00098-X

EDEL, J.B., SCHULMANN, K., HANŽL, P., LEXA, O. *Palaeomagnetic and structural constraints on 90° anticlockwise rotation in SW Mongolia during the Permo–Triassic: Implications for Altaid oroclinal bending. Preliminary palaeomagnetic results*. Journal of Asian Earth Sciences [online]. 2014, 157-171 [cit. 2017-03-03].

FISHER, R.A., 1953: *Dispersion on a sphere*. Proc. R. Soc. London, A217, 295-305. [87, 88, 89, 90, 91, 247, 331]

HENDRIX, M.S., GRAHAM, S.S., CARROLL, A.R., SOBEL, E.R., MC KNIGHT, C.L., SCHULEIN, B.J., WANG, Z., 1992: *Sedimentary record and climatic implications of recurrent deformation in the Tianshan: evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar and Turpan basins, northwest China*. Geol. Soc. Am. Bull. 104: 53–79

KRÖNER, A., LEHMANN, J., SCHULMANN, K., DEMOUX, A., LEXA, O., TOMURHUU, D., ŠTÍPSKÁ, P., LIU, D., WINGATE, M.T.D., 2010: *Lithostratigraphic and geochronological constraints on the evolution of the Central Asian Orogenic Belt in SW Mongolia: Early Paleozoic rifting followed by Late Paleozoic accretion*. Am. J. Sci. 310, 523–574.

KRS, M. *Paleomagnetismus*. Praha: Ústřední ústav geologický v Geofondu, 1969. Knihovna Ústředního ústavu geologického, sv. 40.

LEHMANN, J., SCHULMANN, K., LEXA, O., CORSINI, M., KRÖNER, A., ŠTÍPSKÁ, P., TOMURHUU, D., OTGONBATOR, D., 2010: *Structural constraints on the evolution of the Central Asian Orogenic Belt in SW Mongolia*. Am. J. Sci. 310, 575–628 [cit. 2017-03-03].

LOWRIE, W. *Fundamentals of Geophysics*. 2. United States of America, New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-511-35447-2.

MCELHINNY, M. W., MCFADEN P.L. *Paleomagnetism: Continents and Oceans*. Academic Press, 2000. ISBN 0-12-483355-1.

MÜLLER K., OKÁL M., HOFRICHTEROVÁ L., 1985: *Základy hornické geofyziky*. 1. vydání. Praha: SNTL. 220 s.

RIPPINGTON, S., CUNNINGHAM, D., ENGLAND, R., HENDRIKS, B., 2013: *The crustal assembly of southern Mongolia: New structural, lithological and geochronological data from the Nemegt and Altan ranges*. Gondwana Research 23, DOI: 1535–1553.

RUZHENTSEV, S.V., MOSSAKOVSKIY, A.A., 1995: *Geodynamics and tectonic evolution of the Central Asian Paleozoic structures as the result of the interaction between the Pacific and Indo-Atlantic segments of the Earth*. Geotectonics 29, 294–311.

SENGÖR, A.M.C., NATAL'IN, B.A., BURTMAN, V.S., 1993: *Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia*. Nature 364, 299–307.

SENGÖR, A. M. C., NATAL'IN, B.A., 1996: *Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis*, in Yin, A., and Harrison, M., editors, *The Tectonic Evolution of Asia*: Cambridge, Cambridge University Press, p. 486–640.

WINDLEY, B.F., ALEXEIEV, D., XIAO, W., KRÖNER, A., BADARCH, G., 2007: *Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt*. J. Geol. Soc. 164, 31–47.

ZONENSHAIN, L.P., 1973: *The evolution of Central Asiatic geosynclines through seafloor spreading*. Tectonophysics 19, 213–232.

Programovací jazyk:

Ondrej Lexa. (2017). `ondrolexa/apsg`: APSG 0.4.2 release [Data set]. Zenodo. <http://doi.org/10.5281/zenodo.348571>

Zdroje obrázků:

Učebnice mineralogie: Obecná mineralogie. In: Muzeum Mineral.cz [online]. [cit. 2017-03-12].

Dostupné z: http://muzeum.mineral.cz/mineralogie/ucebnice/obecna_min/images/o_5-49.gif

In: University of Montana: Department of Geosciences [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z:

http://hs.umt.edu/geosciences/faculty/sheriff/courses/439-applied-magnetics/images/APW_Euler_Torsvik_2007.jpg

JR-5/5A Spinner Magnetometers. In: AGICO: LABORATORY INSTRUMENTS FOR MEASUREMENTS OF MAGNETIC PROPERTIES OF ROCKS [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z:

<https://www.agico.com/figures/jr5.png>

LOHNINGER, H. Teach/Me Data Analysis: Text-Only Light Edition. In: *Teach/Me Data Analysis* [online].

Springer-Verlag, 1999 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z:

http://www.vias.org/tmdatanaleng/cc_dendrograms.html

TAUXE, L. *Essentials of Paleomagnetism* [online]. In: 2010 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z:

<http://ltauxe.github.io/Essentials-of-Paleomagnetism/WebBook3253x.png>