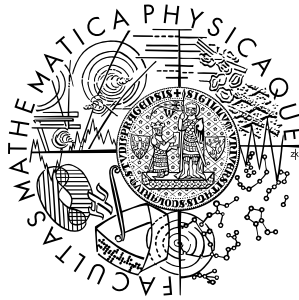


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Ľubica Valentová

### **Globální rotace zemské litosféry: Mýtus, nebo realita?**

Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Ondřej Čadek, CSc.  
Studijní program: obecná fyzika

2007

Na tomto mieste by som chcela špeciálne poďakovať vedúcemu bakalárskej práce Doc. RNDr. Ondřejovi Čádkovi, CSc. za motiváciu a nekonečnú trpezlivosť a mojim rodičom za podporu.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 3. 8. 2007

Ľubica Valentová

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Súčasný stav problematiky</b>	<b>7</b>
2.1	Popis pohybu platní . . . . .	7
2.2	Anizotropia a jej vznik . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Korelačná analýza</b>	<b>16</b>
3.1	Korelácia a miera zhody . . . . .	16
3.2	Spôsob výpočtu . . . . .	18
3.3	Výsledky a diskusia . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Zhrnutie</b>	<b>28</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>30</b>

Název práce: Globální rotace zemské litosféry: Mýtus, nebo realita?

Autor: Ľubica Valentová

Katedra (ústav): Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: Doc. RNDr. Ondřej Čadek, CSc.

e-mail vedoucího: oc@karel.troja.mff.cuni.cz

Abstrakt: V predloženej práci skúmame súvislosť globálnych pohybov litosféry so seizmickou azimutálnou anizotropiou získanou pomocou inverzie Rayleighových vln. Pomocou korelácií medzi smermi azimutálnej anizotropie a smermi rýchlostí hľadáme polohy Eulerových pólov globálnej rotácie litosféry. Porovnáваме, ako sa mení poloha pólov pre dáta seizmickej anizotropie v rôznych hĺbkach pre celú Zem, oblasti oceánskych platní a oblasť Pacifickéj platne. Najväčší súhlas medzi nami nájdenou pozíciou pólu a pozíciou pólu určenú zo súčasného pohybu platní voči sústave horúcich škvŕnám sme našli pre hĺbku okolo 200 km. So zvyšujúcou sa hĺbkou sme objavili posun pólov, ktorý by mohol zodpovedať pohybom pólov globálnej rotácie do minulosti. Rovnako skúmame zmenu polohy pólov pre oblasti oceánskeho dna s rôznym vekom.

Klíčová slova: platňová tektonika, globálna rotácia, Eulerov pól, azimutálna anizotropia

Title: Global lithospheric rotation: Myth or reality?

Author: Ľubica Valentová

Department: Department of geophysics

Supervisor: Doc. RNDr. Ondřej Čadek, CSc.

Supervisor's e-mail address: oc@karel.troja.mff.cuni.cz

Abstract: In this work we study the relationship between global lithospheric motion and seismic azimuthal anisotropy, which was obtained from inversion of Rayleigh waves. Using correlations between directions of azimuthal anisotropy and velocity of motions we find the position of Euler poles of global lithospheric rotation. We compare changes in the position of poles using dates of azimuthal anisotropy for different depths over the area of the Earth, oceanic plates and Pacific plate. We found the best agreement between our position of pole and pole determined for present-day plate motions with respect to hotspot reference frame in depth around 200 km. The shift in the position of poles with increasing depth may correspond to the shift into the past. We also study changes in position with regard to seafloor areas of different ages.

Keywords: plate tectonics, global rotation, Euler pole, azimuthal anisotropy

# Kapitola 1

## Úvod

Litosféra je najvrchnejšia vrstva Zeme [1]. Jej hrúbka sa mení v rozsahu niekoľkých kilometrov až 150 km. Zahŕňa zemskú kôru a vrchnú časť zemského plášťa. Je zložená z pevných a relatívne chladných hornín, ktoré sa na geologických časových škálach nedeformujú. Nie nadarmo jej názov pochádza z gréckeho slova "lithos" znamenajúceho kameň. Pod litosférou sa nachádza horúca vrstva astenosféry, ktorá sa naopak ľahko deformuje. Preto sa litosféra môže po astenosfére pohybovať s relatívne malým odporom.

Model, podľa ktorého je litosféra rozdelená na niekoľko platní, sa nazýva platňová tektonika. Táto teória dobre vystihuje oblasti zvýšenej seizmicity a vulkanizmu na hraniciach platní. Platne sa voči sebe navzájom pohybujú relatívnymi rýchlosťami, ktoré predstavujú niekoľko desiatok mm za rok. Litosféra neustále vzniká a zaniká. Vznik litosféry súvisí s procesom rozširovania morského dna na oceánskych chrbtoch. Keďže povrch Zeme zostáva konštantný, platne zanikajú v procese zvanom subdukcia: jedna platňa sa ponára pod druhú. Vznik a zánik nových platní popisuje Wilsonov cyklus. Okrem divergentného a konvergentného pohybu sa platne pohybujú pozdĺž seba na tzv. transformných zlomoch. Podrobnejšie o pohyboch platní nájdeme napr. v [1].

O tom, že litosférické platne sa voči sebe pohybujú, existuje množstvo dôkazov. Pomocou paleomagnetických meraní na kontinentoch, možno pre každý kontinent stanoviť polohu geomagnetického pólu a z rozdielov týchto polôh určiť vzájomný pohyb kontinentálnych platní. Paleomagnetické merania na oceánskom dne ukazujú pásovú štruktúru s opačnou polaritou magnetického pólu rovnobežnou s osou stredooceánskych chrbtov. Dokážeme teda určiť, ako rýchlo sa od seba vzdávajú platne na chrbtoch. Modernejšia metóda ako určiť vzájomný pohyb tektonických platní je GPS, družicový systém na určovanie polohy.

Otázkou zostáva, či okrem relatívneho pohybu platní voči sebe existuje aj pohyb platní ako celku voči nejakej pevnému bodu vo vnútri Zeme. Ta-

kýto priemerný pohyb sa potom bude nazývať globálna rotácia. S určením absolútneho pohybu litosféry je to zložitejšie. Ako prvé, nemožno určiť bod vo vnútri Zeme, ktorý by bol úplne pevný. Používajú sa preto hlavne dve referenčné sústavy: sústava spojená s horúcimi škvrnami a tzv. no-net-rotation [2]. Horúca škvrna pre nás predstavuje miesto na Zemi, ktoré sa nepohybuje s tektonickými platňami. Príkladom horúcej škvorny je ostrov Havaj. Vďaka pôsobeniu horúcej škvorny vzniklo Havajské súostrovie. Toto súostrovie nám teda mapuje absolútny pohyb Pacifickej platne.

My sa na problém globálnej rotácie pozrieme z hľadiska seizmickej anizotropie. Anizotropia v plášti súvisí so schopnosťou olivínu šíriť seizmické vlny rôznou rýchlosťou pre rôzne osi tohoto kryštálu [3]. Ak sú kryštály olivínu v plášti usporiadané náhodne, anizotropiu seizmických vln v konečnom dôsledku nezistíme. V prípade, že kryštalická mriežka bude uprednostňovať určitý smer, v dátach sa objaví anizotropia. Ak predpokladáme, že rýchla os olivínu sa zarovnáva podľa smeru toku v plášti a tento tok je spôsobený hlavne pohybom platní, máme teda súvislosť medzi rýchlymi smermi azimutálnej anizotropie s pohybom litosféry.

V tejto práci budeme korelovať rýchle smery azimutálnej anizotropie povrchových vln so smermi rýchlostí v danom mieste. Ďalej skúsime nájsť možnú polohu pólu globálnej rotácie pomocou korelácie rýchleho smeru anizotropie so smerom rýchlosti rotácie pre daný pól. Teda hľadáme smer rýchlostí globálneho pohybu tak, aby najviac zodpovedal seizmickej anizotropii v plášti. Okrem toho porovnáme polohy pólov globálnej rotácie v minulosti, určené pomocou iných metód, s nami nájdenými rotačnými pólmi pre anizotropie v rôznych hĺbkach.

# Kapitola 2

## Súčasný stav problematiky

### 2.1 Popis pohybu platní

Pohyb tuhej platne po zemskom povrchu sa dá popísať pomocou jedného vektoru. Táto vlastnosť je odvodená z Eulerovho teorému [1]: Každá čiara na povrchu gule sa dá presunúť na akúkoľvek pozíciu a akúkoľvek orientáciu pomocou jednoduchej rotácie okolo vhodne zvolenej osi prechádzajúcej stredom gule. Pre nás to teda znamená, že každá tuhá platňa sa pohybuje po povrchu rotáciou okolo jednoznačne zvolenej osi. Miesto, kde táto os pretína povrch, sa nazýva pól rotácie. Eulerov vektor potom bude daný polohou pólu na Zemi a uhlovou rýchlosťou rotácie  $\omega$ . Pre vzájomný pohyb sa poloha pólu určuje pomocou orientácie hrebeňov stredo oceánskych chrbtov, magnetických pásov a transformných zlomov, uhlová rýchlosť z rýchlosti rozširovania dna, z šírky magnetických pásov a požiadavky zachovania konštantného povrchu.

V súčasnosti existuje niekoľko metód na určenie absolútneho pohybu platní. Prvý využíva stopy, ktoré po sebe zanechalo pôsobenie horúcich škvŕn pri pohybe litosféry. Horúce škvŕny často ležia na koncoch takmer lineárnych vulkanických chrbtov. Iné metódy vychádzajú z predpokladu, že litosféra nevykladá na astenosféru žiaden moment síl [2]. Keďže presné pôsobenie medzi nimi nie je známe, existujú v tomto prípade alternatívne modely absolútneho platňových pohybov vedúce k blízkym hodnotám. Najznámejší je už spomínaný model no-net-rotation, ktorý je definovaný tak, aby

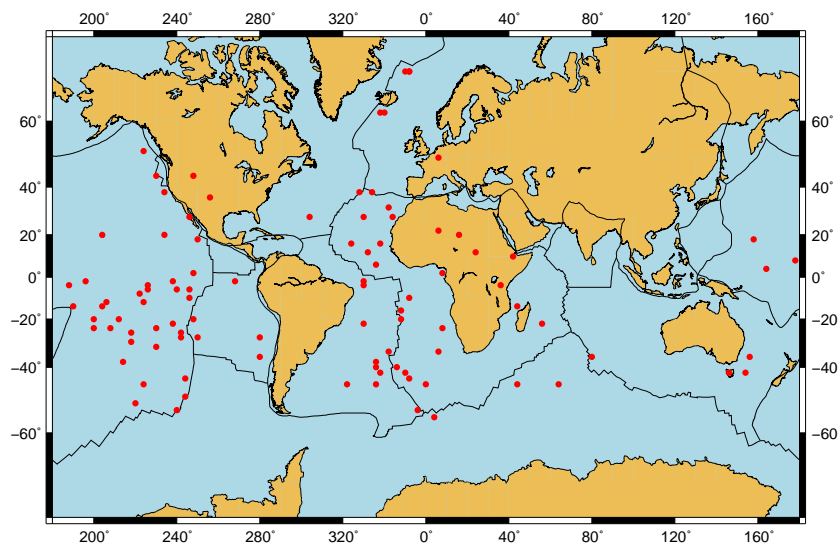
$$\int \mathbf{v} \times \mathbf{r} dS = 0 \quad (2.1)$$

kde  $\mathbf{v}$  je povrchová rýchlosť a  $\mathbf{r}$  poloha. Výhodou použitia tejto referenčnej sústavy je, že pohyb paleomagnetickej osi v tejto sústave je podstatne menší ako pohyb medzi horúcimi škvŕnami a paleomagnetickou osou [2].

Dáta absolútneho pohybu platní sme mali určené pre referenčnú sústavu horúcich škvŕn. Horúce škvŕny sa voči sebe navzájom pohybujú rýchlosťami

niekoľko mm za rok, čo je rádovo nižšia rýchlosť ako rýchlosť pohybu tektonických platní. Na obrázku 2.1 vidíme globálne rozloženie horúcich škvŕn. Horúce škvŕny sú anomálne oblasti povrchového vulkanizmu, ktorý nemožno spojiť s procesmi prebiehajúcimi na tektonických platniach [1]. Predpokladá sa, že súvisia s pôsobením plúm v plášti na litosféru. Plášťová pluma je označenie pre kvazicylindrické koncentrované stúpanie horúcich plášťových hornín. Predstavuje základnú formu plášťovej konvekcie. Plumy nie sú priamo pozorované v plášti, pretože sú tenké. Mnohé, čo o nich vieme, bolo zistené z laboratórnych experimentov a teoretických výpočtov. Vznikajú v horúcej hraničnej vrstve v plášti, sú výsledkom gravitačnej nestability ohrievaného materiálu voči chladnejšiemu vo vyšších vrstvách [1].

Obrázok 2.1: Rozloženie hlavných tektonických platní a horúcich škvŕn (zakreslené pomocou červených bodov)



V tabuľke 2.1 sú dané Eulerove vektory pre tektonické platne vzhľadom k sústave horúcich škvŕn v modeli HS3-NUVEL1A <sup>1</sup>. V poslednom riadku je Eulerov vektor zodpovedajúci zistenej globálnej rotácii. V tomto modeli sú priemerné pohyby platní za posledných 5.8 miliónov rokov vzhľadom k 11 horúcim škvŕnám na 4 platniach: Pacifická (6), Nazca (3), Juhoamerická (1) a Severoamerická (1).

<sup>1</sup>Gripp, A.E., and R.G. Gordon, Young tracks of hotspots and current plate velocities, *Geophys. J. Int.*, 150, 321-361, 2002.



Tabuľka 2.1: Polohy Eulerových rotačných pólov hlavných platní a veľkosti uhlových rýchlostí určené voči sústave horúcich škvŕn (model HS3-NUVEL1A)

Platňa	Zem. šírka [°]	Zem.dĺžka [°]	$\omega$ [°/Myr]
Africká	-43.386	21.136	0.1987
Antarktická	-47.339	74.514	0.2024
Arabská	2.951	23.175	0.5083
Austrálska	-0.091	44.482	0.7467
Karibská	-73.212	25.925	0.2827
Kokosová	13.171	-116.997	1.1621
Eurázijská	-61.901	73.474	0.2047
Indická	3.069	26.467	0.5211
Juan de Fuca	-39.211	61.633	1.0122
Severoamerická	-74.705	13.4	0.3835
Nazca	35.879	-90.913	0.3231
Pacifická	-61.467	90.326	1.0613
Filipínska	-53.88	-16.668	1.1543
Juhoamerická	-70.583	80.401	0.4358
Globálna rot.	-55.908	69.93	0.4359

Keď poznáme Eulerove vektory, môžeme v každom bode vypočítať vektor rýchlostí. Na obrázku 2.2 je vykreslené vektorové pole rýchlostí pre Eulerove vektory z tabuľky 2.1. Na obrázku 2.3 je pole rýchlostí, ak odčítame od daných rýchlostí rýchlosť globálnej rotácie danú v poslednom riadku tabuľky.

V [2] boli skúmané absolútne pohyby platní za posledných 65 miliónov rokov. Toto obdobie bolo rozdelené na šesť intervalov, pričom hranice intervalov zodpovedajú hlavným reorganizáciám platní. Najstarší interval 64-56 Ma zodpovedá paleocénu, interval 56-48 Ma obsahuje na krajoch reorganizácie. Približne 43 Ma nastala veľká zmena v pohybe Pacifickej platne, pozorovaná na stope Havajskej horúcej škvŕny ako zahnutie medzi dvoma lineárnymi úsekmi Cisárskych a Havajských ostrovov. Predpokladá sa, že táto reorientácia bola spôsobená kolíziou medzi Indickou platňou a Áziou, ktorá jej prekážala v rýchlom pohybe smerom na sever. Posledná významná reorganizácia nastala pred 25 miliónmi rokov rozlomením platne Farallon na dnešnú Nazcu a Kokosovú platňu. Nájdené póly globálnej rotácie vzhľadom na sústavu horúcich škvŕn sú pre dané obdobia v tabuľke 2.2.

Súčasný pohyby platní vykazujú určité znaky: čím väčšiu plochu zaberá na platni kontinent, tým je platňa pomalšia. Teda oceánske platne sú rýchlejšie ako kontinentálne, platne sa pohybujú v rovníkových oblastiach rýchlejšie ako v polárnych. Rýchlosť platne sa tiež zvyšuje s podielom subdukujúcej hranice. Gordonovi a Jurdyovej sa v [2] podarilo nájsť prvé tri

Tabuľka 2.2: Polohy Eulerových pólov globálnej rotácie voči sústave horúcich škvŕn v cenozoickom období podľa [2]

obdobie [Ma]	zem. dĺžka[°]	zem. šírka[°]
10-0	32.6	-30.1
25-10	58.9	-54.1
43-25	103.4	-71.0
48-43	123.3	-8.5
56-48	108.7	17.5
64-56	86.1	18.2

vlastnosti aj pre pohyb platní v minulosti. Ďalej zistili, že v treťohorách boli uhlové rýchlosti platní v referenčnej sústave horúcich škvŕn a v sústave no-net-rotation takmer identické.

## 2.2 Anizotropia a jej vznik

Seizmická tomografia sa zaoberá rozložením rýchlostí seizmických vĺn v plášti. Umožňuje nám získať predstavu o zložení vnútra Zeme. Pre plášť bola na základe seizmických rýchlostí a ďalších dát (xenolity z vyvretej magmy, štúdium meteoritov) navrhnutá modelová hornina pyrolit, z ktorého sa parciálnym tavením získa bazalt tvoriaci oceánsku kôru. Zvyšnú časť tvorí peridotit, ktorý má vyššiu hustotu ako bazalt, a preto zostáva vo vrchnom plášti. Je zložený hlavne z olivínu a ortopyroxénu [1].

Seizmické vlny sa nešíria v plášti rovnakou rýchlosťou v každom smere. Štiepenie S-vĺn, rozdiely v disperzii Rayleighových a Loveových vĺn a azimutálna závislosť rýchlostí priestrových vĺn dokazujú existenciu ako radiálnej tak aj azimutálnej anizotropie [3]. My sme v našej práci používali azimutálnu anizotropiu získanú z povrchových Rayleighových vĺn, ktorá vykazuje jeden rýchly smer šírenia. Na obrázkoch 2.4, 2.5 a 2.6 sú vykreslené rýchle smery azimutálnej anizotropie Rayleighových vĺn v troch rôznych hĺbkach. Používame dáta anizotropie z modelu ako v [4].

Vývoj anizotropie z izotropných olivínových polykryštálov je daný vývojom preferovanej orientácie mriežky (LPO, lattice preferred orientation) [3]. LPO však ovplyvňuje množstvo procesov. Keďže v olivínových kryštáloch sa nachádzajú defekty ako dislokácie a hranice medzi jednotlivými zrnami, budú po vystavení deformácie prebiehať procesy spojené s ich pohybom. Pri malých deformáciach predpokladáme, že kryštály olivínu sú deformované hlavne šmykom a os kryštálu olivínu sa zarovnáva s hlavnou poloosou elipsoidu konečného pretvorenia (FSE, finite strain ellipsoid). Pri vysokých teplotách a hodnotách deformácie sa situácia komplikuje v dôsledku výraznej dynamickej rekryštalizácie.

Dynamická rekryštalizácia [3] prebieha takmer vždy po dosiahnutí určitej miery deformácie v látke. Označujeme ňou zmenu tvaru, veľkosti alebo orientácie zrna vyvolanej deformáciou bez akejkoľvek chemickej zmeny. Je spojená so zmenami mikroštruktúry, orientácii kryštalografických osí a reologických vlastností. V deformovaných kryštáloch je závislá na uloženej energii, ktorá je funkciou hustoty dislokácií. Dynamická rekryštalizácia je reprezentovaná dvoma procesmi: sub-grain rotation (vyskytuje sa pri nízkych teplotách a napätiach, nadbytok dislokácií v zrne, rotácia mriežky podzrn, hromadenie dislokácií na ich hraniciach, vytvorí sa veľmi mobilná hranica) a grain-boundary migration GBM (vyskytuje sa pri vysokých napätiach a teplotách, migrácia hranice zrna do zrna s veľkou deformáciou). Ak má kryštál uloženú vysokú energiu, ľahko bude pohltý zrnami s nižšou energiou pri GBM. Zrno s vysokou energiou má ale tendenciu vytvárať nové podzrná s nízkou energiou, ktoré pri GBM rastú. Rekryštalizované zrná majú vyššie hustoty dislokácií a teda LPO rekryštalizovaných zrn korešponduje s preferovanými smermi nukleácie. Výsledná LPO potom odráža rovnováhu medzi nukleáciou a migráciou. Keďže konvekcia v zemskom plášti indukuje vysoké napätia, predpokladá sa, že LPO je ovplyvnená najmä dynamickou rekryštalizáciou.

Vzniká teda otázka: Za akých podmienok sa zarovná LPO olivínu tak, že súhlasí s prúdením v plášti? Podľa [5] bol rozdelený vývoj orientácie do 3 štádií:

1. Dominancia plastickej deformácie, až kým sa v kryštále nevytvoria dostatočné rozdiely v uloženej energii, potrebnej na spustenie GBM. V tomto štádiu je LPO zarovnaná s FSE.
2. Vplyv dynamickej rekryštalizácie, rast zrn v preferovanej orientácii. Ale LPO je stále ovplyvnená aj plasticou deformáciou, teda nezarovnáva sa so smerom toku.
3. Narastanie dominancie plastickej deformácie a otáčanie osi LPO k asymptotickej osi FSE pre  $t \rightarrow \infty$ , zodpovedajúcej stabilnému stavu. Ak je táto os zarovnaná so smerom prúdenia a mení sa dostatočne pomaly, aby ju mohla LPO nasledovať, bude výsledná orientácia mriežky olivínu odrážať prúdenie v plášti.

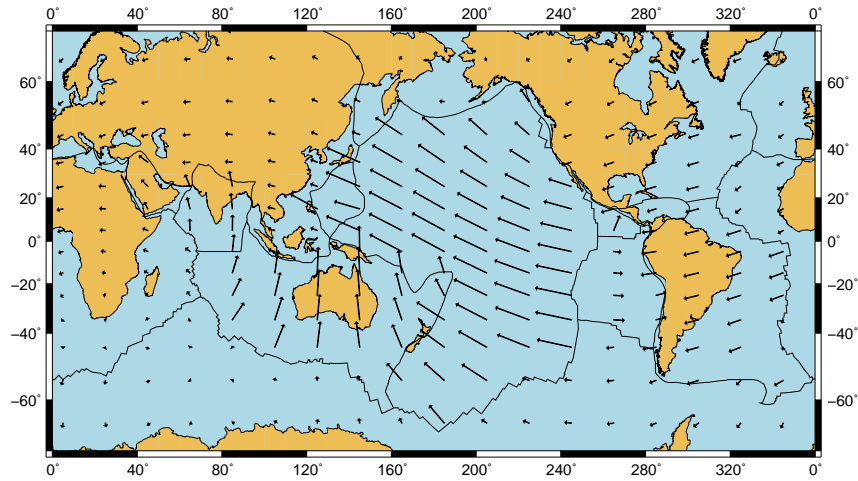
Obecne však LPO nevníma smer prúdenia, ale tenzor gradientu rýchlosti a situácia sa komplikuje. Laboratórne experimenty ukazujú odlišnú závislosť vývoja LPO materiálov nasýtených vodou, ktoré síce nie sú v plášti obvyklé, môžu sa ale objaviť v subdukčných oblastiach. Ďalšou komplikáciou je fázový prechod olivínu na rozhraní v hĺbke 410 km, pretože ďalej nie je známy vplyv toku na vývoj anizotropie.

Podľa [6] z dát seizmickej anizotropie a rozloženia rýchlostí možno rozdeliť vrchný plášť do 3 vrstiev:

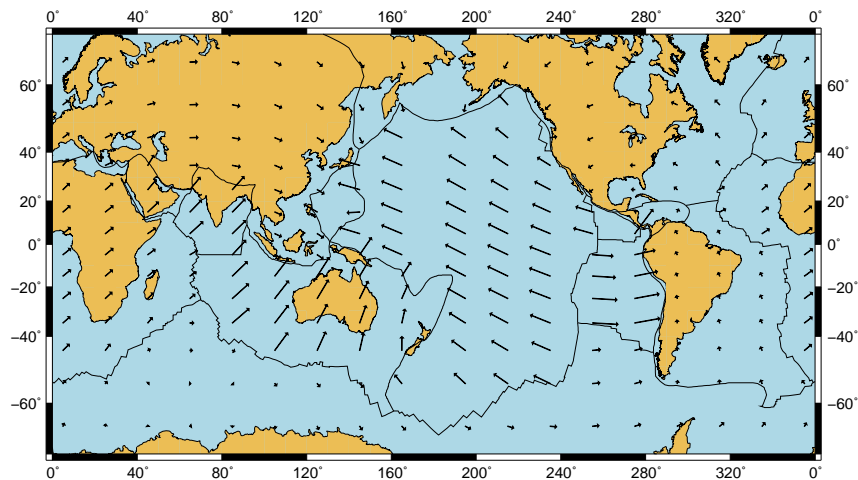
1. do 300 km, kde v plášťovej konvekcii prevláda pôsobenie tektonických pohybov, tiež charakterizované výraznou anizotropiou
2. medzi 300 a 450 km je prechodná zóna
3. pod 450 km, kde je amplitúda laterálnych heterogenít rýchlostí a anizotropií malá v porovnaní s prvou vrstvou, prevláda tu jednoduchá konvekcia s dvoma prúdmi smerom dole a dvoma smerom hore

V novšom modeli [4] sa berie do úvahy vplyv kontinentov a oceánov. Bola nájdená nezanedbateľná anizotropia pod oceánskymi platňami a pod Austrálskou platňou, ktorá silne koreluje so súčasnými pohybmi. Pod ostatnými kontinentmi je anizotropia s absotúnymi pohybmi platní korelovaná len slabô. Predpokladá sa, že je to spôsobené rýchlym pohybom Austrálie oproti ostatným kontinentom, vyvolávajúcím dostatočnú deformáciu, aby vznikla anizotropia.

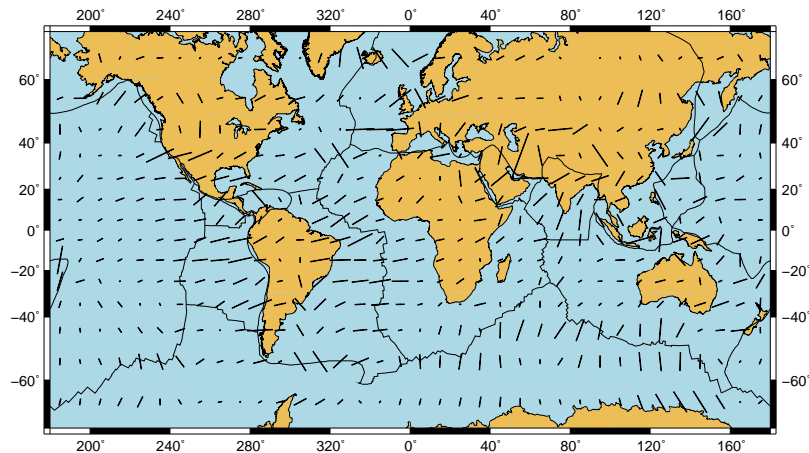
Obrázok 2.2: Rýchlostné pole pre absolútny pohyb platní voči sústave horúcich škvŕn určené z tabuľky 2.1. Najvyššia hodnota veľkosti rýchlosti zodpovedá 11.80 cm/rok



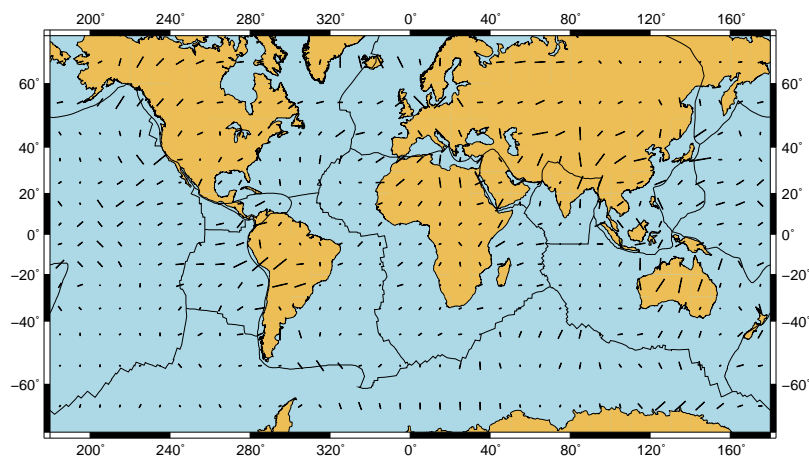
Obrázok 2.3: Rýchlostné pole pre pohyb platní voči sústave horúcich škvŕn po odčítaní vektoru rýchlosti globálnej rotácie. Najvyššia hodnota veľkosti rýchlosti zodpovedá 9.73 cm/rok



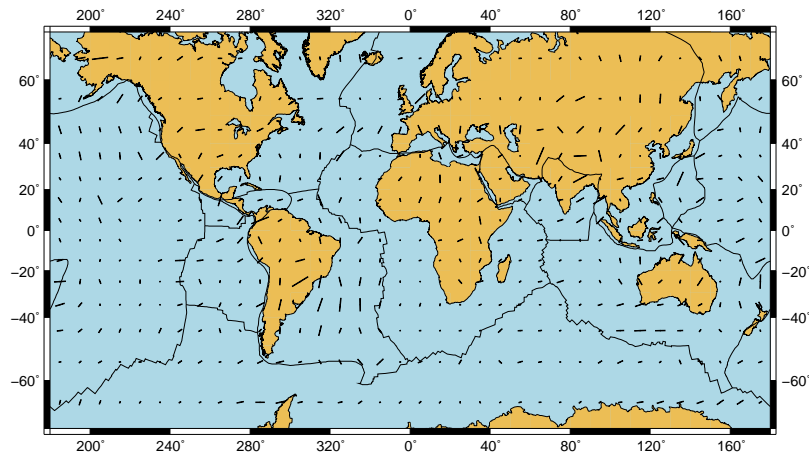
Obrázok 2.4: Rýchle smery azimutálne anizotropie Rayleighových vln v hĺbke 100 km. Najväčšia amplitúda na obrázku zodpovedá veľkosti 6.33%.



Obrázok 2.5: Rýchle smery azimutálne anizotropie Rayleighových vln v hĺbke 200 km. Najväčšia amplitúda na obrázku zodpovedá veľkosti 2.89%.



Obrázok 2.6: Rýchle smery azimutálne anizotropie Rayleighových vln v hĺbke 300 km. Najväčšia amplitúda na obrázku zodpovedá veľkosti 2.45%.



# Kapitola 3

## Korelačná analýza

Vo výpočtoch používame pole rýchlostí dané v predchádzajúcej kapitole, spočítané z dát v tabuľke 2.1, a dáta azimutálnej anizotropie Rayleighových povrchových vln. Pri výpočtoch sme používali programovací jazyk Fortran. Všetky obrázky sú vykreslené pomocou programu GMT v cylindrickej projekcii (Mercator popr. ekvidistantná)

### 3.1 Korelácia a miera zhody

Koreláciu medzi dvoma vektormi definujeme pomocou uhla, ktoré tieto vektory zvierajú. Podľa našej predstavy budú vektory úplne korelované, tj. korelačný koeficient rovný 1, ak majú rovnaký smer a orientáciu. V našom prípade smer anizotropie nie je orientovaný, teda vektor rýchlosti môže s ním zviazať uhol z intervalu  $[0^\circ, 90^\circ]$ . Budeme preto požadovať, aby pre navzájom kolmé vektory korelačný koeficient vyšiel -1. Definujeme preto korelačný koeficient medzi smerom azimutálnej anizotropie a smerom rýchlosti ako

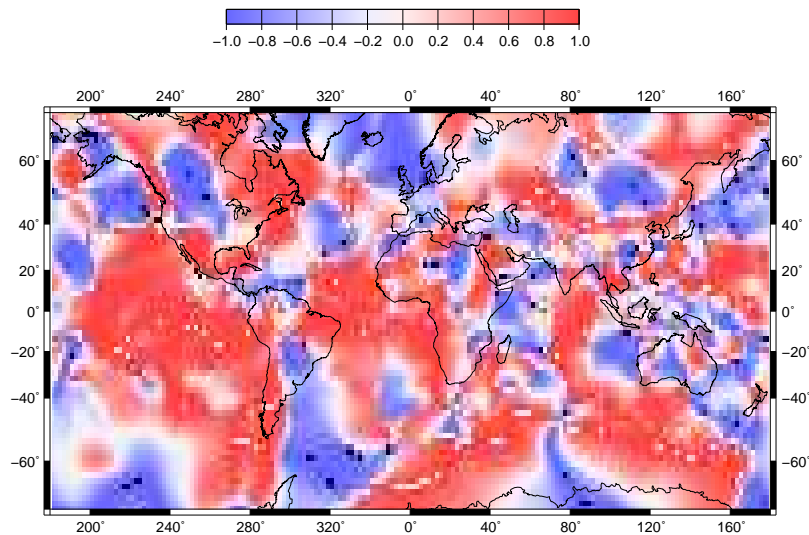
$$\rho = \cos(2\alpha)$$

kde  $\alpha$  je uhol, ktorý tieto dva smery zvierajú.

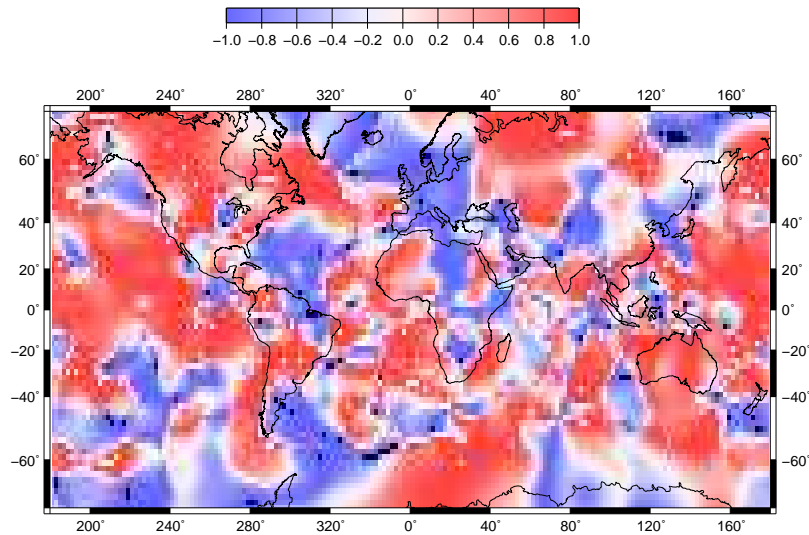
Pre známe smery rýchlostí dosiek a smery azimutálnej anizotropie (obr. 2.4–2.6), sme určili korelačný koeficient definovaný v 3.1. Vypočítané hodnoty sú vynesené na obrázkoch 3.1, 3.2, 3.3 pre rôzne hĺbky. V najmenšej hĺbke (100 km) sú rozsiahle oblasti s kladnými koreláciami na hraniciach platní. Je pozorovateľný pokles oblastí s vyššou koreláciou s narastajúcou hĺbkou. Teda anizotropia vo väčších hĺbkach nesúvisí natoľko so súčasným pohybom tektonických platní, do úvahy už prichádza aj iné prúdenie v plášti (napr. termálna konvekcia). Napriek tomu pod pacifickou platňou je rozsiahla oblasť s kladnými koreláciami aj v hĺbke 300 km. Pacifická doska je veľmi rýchla, preto môže mať hlavný vplyv na plášťovú konvekciu aj vo väčších hĺbkach.



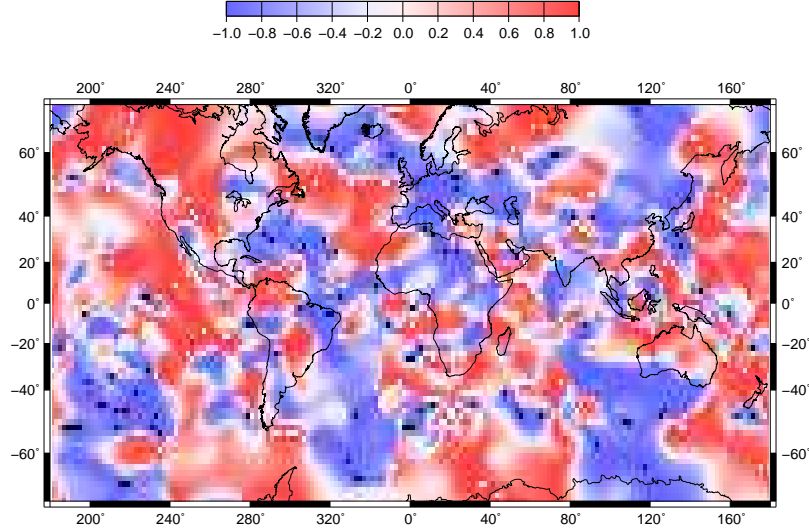
Obrázok 3.1: Hodnoty korelačného koeficientu medzi rýchlosťou absolútneho pohybu platní a rýchlym smerom anizotropie v hĺbke 100 km



Obrázok 3.2: Hodnoty korelačného koeficientu medzi rýchlosťou absolútneho pohybu platní a rýchlym smerom anizotropie v hĺbke 200 km



Obrázok 3.3: Hodnoty korelačného koeficientu medzi rýchlosťou absolútneho pohybu platní a rýchlym smerom anizotropie v hĺbke 300 km



Ak budeme hľadať bod na Zemi, ktorý by najlepšie zodpovedal pólu globálnej rotácie, budeme hľadať maximum funkcie  $S(\vartheta, \phi)$  tzv. miery zhody, definovanej

$$S(\vartheta, \phi) = \int \rho(\vartheta, \phi, \vartheta', \phi') dS' = \int \cos[2\alpha(\vartheta, \phi, \vartheta', \phi')] dS' \quad (3.1)$$

kde integrujeme cez povrch Zeme.  $\vartheta, \phi$  sú súradnice:  $\vartheta \in [0^\circ, 180^\circ]$ ,  $\phi \in [0^\circ, 360^\circ]$ . Uhol  $\alpha$  predstavuje uhol, ktorý zvierá smer anizotropie s vektorom rýchlosti globálnej rotácie v bode  $(\vartheta', \phi')$  v prípade, že pól globálnej rotácie sa nachádza v bode  $(\vartheta, \phi)$ . Inými slovami hľadáme bod, kde sú hodnoty seizmickej azimutálnej anizotropie najviac korelované so smermi rýchlostí globálnej rotácie.

## 3.2 Spôsob výpočtu

Pri výpočte sme využili systematické prehľadávanie priestoru  $(\vartheta, \phi)$ . Priestor bol rozdelený na bunky  $2^\circ \times 2^\circ$ , pre ktoré sme mali určené hodnoty anizotropie. Integrál v 3.1 aproximujeme konečnou sumou. Na výpočet smeru rýchlosti sme využili vzťahy jednoducho plynúce zo zákonov sférickej trigonometrie. Ak by sa rotačný pól nachádzal v bode  $(\vartheta, \phi)$ , bod  $(\vartheta', \phi')$  bude vzdialený od pólu

$$\Delta = \arccos[\cos(\vartheta) \cos(\vartheta') + \sin(\vartheta) \sin(\vartheta') \cos(\phi - \phi')] \quad (3.2)$$

Pre azimut  $A$  vektoru rýchlosti globálnej rotácie v  $(\vartheta', \phi')$  sa dá zo sínovej a kosínovej vety sférickej trigonometrie odvodiť:

Ak

$$\frac{\sin(\vartheta) \sin(\phi - \phi')}{\sin(\Delta)} > 0$$

potom

$$A = \arccos \left[ \frac{\cos(\vartheta) - \cos(\vartheta') \cos(\Delta)}{\sin(\vartheta') \sin(\Delta)} \right] + 90^\circ \quad (3.3)$$

V ostatných prípadoch bude

$$A = -\arccos \left[ \frac{\cos(\vartheta) - \cos(\vartheta') \cos(\Delta)}{\sin(\vartheta') \sin(\Delta)} \right] + 90^\circ \quad (3.4)$$

Uhol  $\alpha$  sme určili jednoducho ako rozdiel azimutov a dosadili

$$S(\vartheta, \phi) = \sum_i \cos(2\alpha_i) \sin \vartheta'_i dS'_i \quad (3.5)$$

kde  $\sin \vartheta$  je jakobián pri integrovaní po sfére.

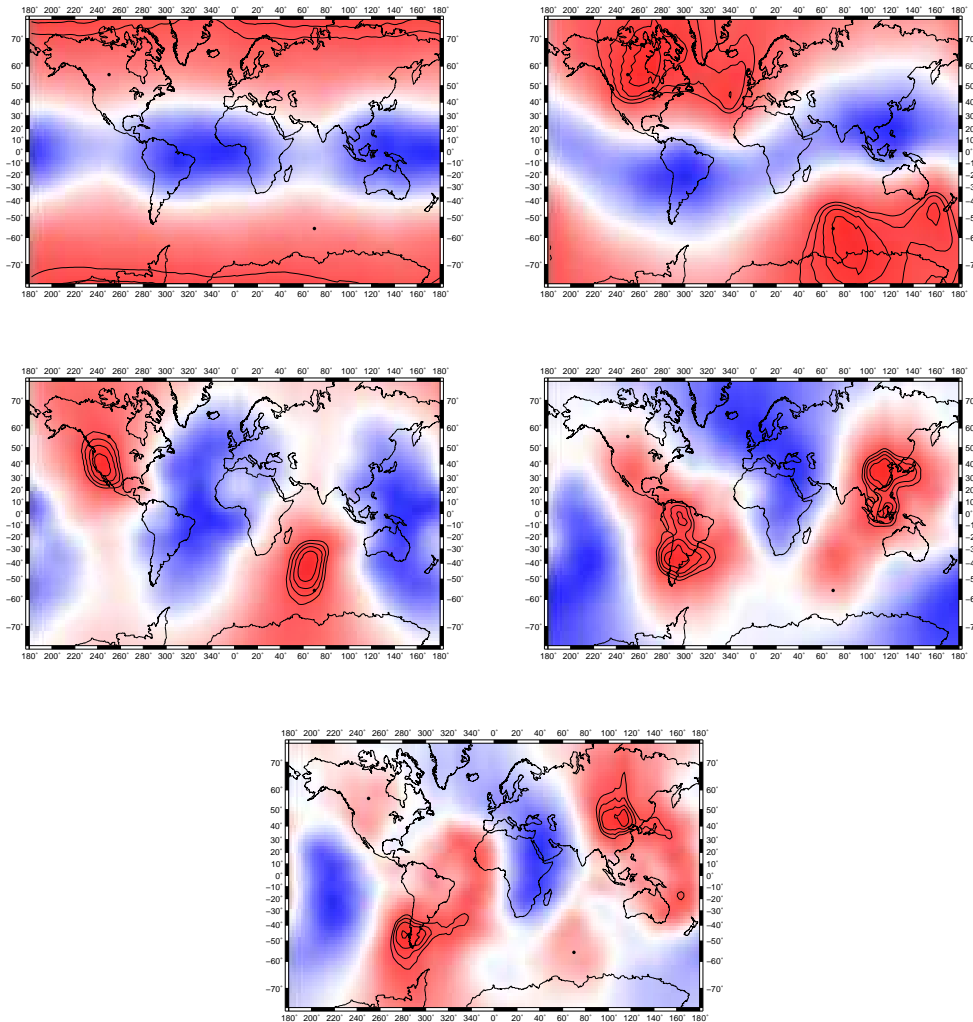
### 3.3 Výsledky a diskusia

Na obrázku 3.4 sú vynesené hodnoty funkcie  $S(\vartheta, \phi)$  pre anizotropné dáta v rôznych hĺbkach. Červené oblasti značia kladné hodnoty  $S$ , modré sú pre záporné. Izočiarami sú vyznačené oblasti s hodnotami  $S$  väčšími ako  $0.8 S_{max}$  pre danú hĺbku. Čierny bod zodpovedá polohe rotačného pólu globálnej rotácie z tabuľky 2.1.

Pre hodnoty funkcie  $S(\vartheta, \phi)$  by sme očakávali, že výsledné hodnoty si budú pre dané hemisféry zodpovedať. Keďže sme ale pre kontrolu počítali hodnoty  $S(\vartheta, \phi)$  na celom priestore parametrov a následne ich vykresľovali v GMT, objavujú sa miestami značné nezhody medzi riešeniami pre obe hemisféry. Podľa všetkého to bude spôsobené vykresľovaním v GMT poprípade zaokrúhľovaním vo výpočtoch.

Podstatným výsledkom viditeľným na obrázkoch 3.4 je, že  $S(\vartheta, \phi)$  nevykazuje množstvo rovnocenných lokálnych maxím a preto poloha pólu globálnej rotácie sa dá celkom jednoznačne určiť. V nižších hĺbkach sú oblasti s kladnými hodnotami  $S$  väčšie a zreteľnejšie, so zväčšujúcou sa hĺbkou sa oblasti maxím zmenšujú a objavuje sa viacero lokálnych maxím. Môžeme to vysvetliť buď zväčšujúcou sa nepresnosťou v dátach anizotropie s hĺbkou alebo vplyvom iných procesov na materiály v plášti a tým na vznikajúcu anizotropiu.

Obrázok 3.4: Hodnoty  $S(\theta, \phi)$  pre dáta anizotropie postupne v hĺbkach 100km, 200km, 300km, 400km, 500km. Červené oblasti zodpovedajú kladným hodnotám  $S$ , modré záporným. Izočiary sú vykreslené pre oblasti 0.80, 0.85, 0.90, 0.95 z hodnoty  $S_{max}$  v danej hĺbke. Pre hĺbku 100 km sú viditeľné len prvé dve izočiary. Čiernym bodom je zakreslený pól globálnej rotácie podľa tabuľky 2.1



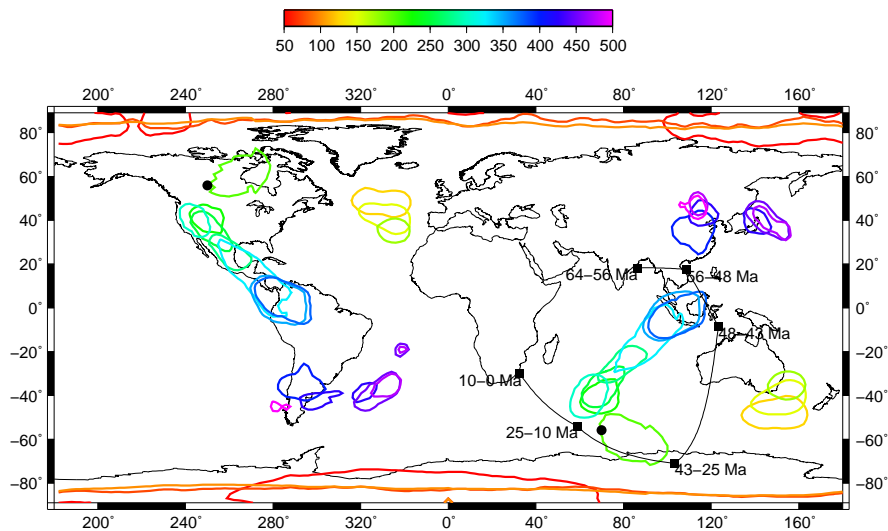
Na obrázkoch 3.4 vidieť, že v hĺbke 100 km zodpovedá nami nájdený pól globálnej rotácie viac geografickému pólu ako pólu globálnej rotácie podľa tabuľky 2.1. Teda pre hĺbku, kde je súčasný pohyb platní najviac korelovaný s anizotropiou, by globálna rotácia litosféry mala pól súhlasiaci s pólom rotačnej osi. Tento fakt naznačuje súvislosť medzi pohybom litosféry a zemskou

rotáciou. S narastajúcou hĺbkou sa nami nájdený pól od geografického odchyľuje a v hĺbkach 200 a 300 km zodpovedá tabuľkovej hodnote. V hĺbkach 400 a 500 km sú síce viditeľné oblasti s kladnými hodnotami  $S$  v blízkosti polohy tabuľkového pólu, maximá  $S(\vartheta, \phi)$  sú ale od nej vzdialené.

Na obrázku 3.5 sú vynesené polohy maxim  $S(\vartheta, \phi)$  pre hĺbky 50–500 km s krokom 25 km. Zaujímavé je sledovať hĺbkové rozloženie: do 100 km hĺbky sú maximá sústredené v okolí geografických pólov. Pre hĺbky 100–200 km sa hromadia do jednej oblasti a mierne sa s hĺbkou posúvajú. Najrozsiahlejšie sú maximá pre hĺbky 200–350 km a opäť pozorujeme spojitý posun s hĺbkou. Pre najväčšie hĺbky sú maximá zdvojené a hromadia sa v dvoch miestach. V týchto hĺbkach už prebehol fázový prechod a preto nie je úplne isté, nakoľko súvisí anizotropia v týchto miestach s pohybmi litosféry.

Zaujímavé je aj porovnanie so známymi polohami pólov globálnej rotácie v minulosti z tabuľky 2.2 (na obrázku sú znázornené čiernymi štvorčekmi). Vidíme, že vzdiaľovanie od geografických pólov a posun smerom k rovníku súhlasí s posunom do minulosti, hoci polohy sa mierne líšia.

Obrázok 3.5: Poloha oblastí s hodnotami  $S$  väčšími ako je 95% maximálnej hodnoty  $S$  pre danú hĺbku. Hĺbka sa mení v rozsahu 50–500 km s krokom 25 km, farbu pre danú hĺbku udáva farebná škála



Keďže pod Pacifickou platňou sa nachádza rozsiahlejšia oblasť kladnej korelácie smerov anizotropie so smerom rýchlostí, integráciu cez celý povrch

v 3.1 sme zamenili za integráciu cez oblasť Pacifickej platne. Zbavíme sa tým vplyvu množstva oblastí, kde anizotropia nesúhlasí s tektonickými pohybmi. Okrem toho predpokladáme, že Pacifická platňa má výrazný vplyv na globálnu rotáciu, pretože je rozľahlá a rýchla. Rovnako si môžeme povšimnúť, že rotačné póly sú relatívne blízke.

Podobne možno spočítať hodnoty  $S(\vartheta, \phi)$  "integráciou" cez oceánske platne, aby sme sa vyhli vplyvu pomalých kontinentov s hlbokými koreňmi. Keďže vypočítaná  $S(\vartheta, \phi)$  má podobné vlastnosti ako pri sumácii cez celý povrch Zeme (jedno výrazné maximum, popr. ako neskôr uvidíme dve), vykreslili sme opäť krivky obklopujúce oblasti s hodnotami väčšími ako 95% z hodnoty  $S_{max}$  pre dané hĺbky: na obrázku 3.6 pre súčet korelácií na oceánskych platniach a na obrázku 3.7 pre súčet korelácií na Pacifickej platni.

Na obrázku 3.6 máme blízku polohu maxima  $S(\vartheta, \phi)$  pólu globálnej rotácie v hĺbkach  $\approx 200\text{--}400$  km. Pekne vidieť spojitý posun maxima  $S(\vartheta, \phi)$  s hĺbkou až do približne 450 km. V tejto hĺbke má funkcia  $S(\vartheta, \phi)$  dve rovnocenné maximá podstatne vzdialené od seba. V hĺbke 500 km je už výrazné len to vzdialenejšie. Toto odskočenie by mohlo podporiť predpoklad, že vo väčších hĺbkach pôsobia výraznejšie na vznik anizotropie iné procesy. Pri porovnaní s polohami pólov v minulosti nevidieť žiadnu spoločnú charakteristiku.

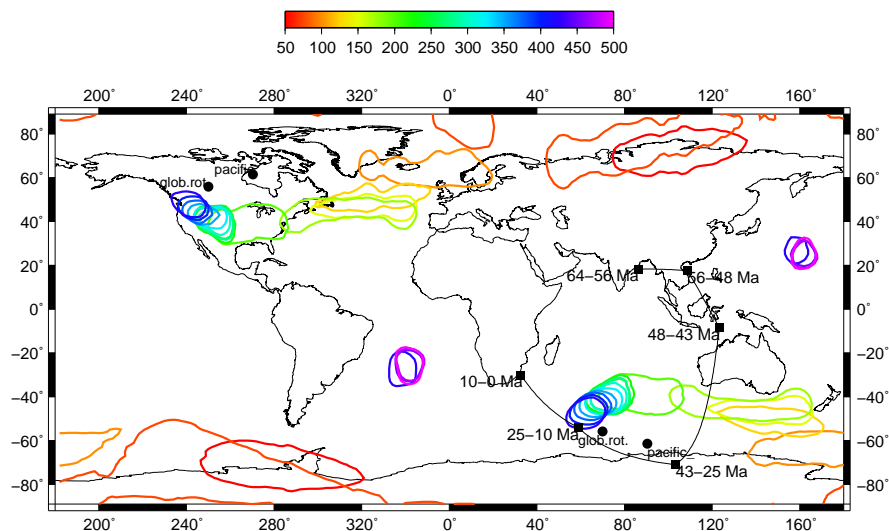
Podobná je situácia na obrázku 3.7: zo začiatku spojitý posun, rozťahnutie a postupné zdvojenie maxima (tentokrát už v hĺbke 300 km) s následným poklesom prvého a zvýraznením druhého. Posun smerom k rovníku by opäť mohol súvisieť s pohybmi v minulosti. Rozdiel oproti predchádzajúcim dvom obrázkom je však v malých hĺbkach. Maximum  $S(\vartheta, \phi)$  sa viac nezhoduje s geografickými pólmi a posun s hĺbkou do 100 km je skôr smerom k pólom. Keďže sa takéto chovanie neobjavilo v predchádzajúcich situáciach, považujeme ho za špecifickú vlastnosť Pacifickej platne.

Ďalej sme sa pokúsili nájsť maximum  $S(\vartheta, \phi)$  pri integrácii cez plochy s rôznym vekom oceánskej kôry pre anizotropie v troch rôznych hĺbkach. Na obrázkoch 3.8–3.10 sú vynesené obrisy maximí pre vek oceánskej kôry od súčasnosti až po 180 Ma.

Očakávali by sme, že pre staršiu oceánsku kôru bude maximum  $S(\vartheta, \phi)$  zodpovedať globálnej rotácii pri väčších hĺbkach, keďže hrúbka litosféry rastie so vzdialenosťou od chrbta a litosféra sa ponára hlbšie. Hoci by sme našli zhodu s nedávnymi pohybmi pri hĺbke 100 km (viď obrázok 3.8), nájdené maximum  $S(\vartheta, \phi)$  vo väčších hĺbkach už tento predpoklad nepodporujú.

Na obrázku 3.8 vidíme, že posun maxima  $S(\vartheta, \phi)$  pre anizotropiu v hĺbke 100 km s narastajúcim vekom vykazuje dva rôzne smery. Prvý posun je východným smerom k pólom do približne 120 Ma. Tu nastáva prudký obrat a maximum sa presúva naspäť na západ, stále však s miernou tendenciou smerom k pólom. Zároveň sa maximum pre "súčasnú" kôru veľmi dobre

Obrázok 3.6: Poloha oblastí s hodnotami  $S$  väčšími ako je 95% maximálnej hodnoty  $S$  pre danú hĺbku, sčítané len na oceánskych platniach. Hĺbka sa mení v rozsahu 50–500 km s krokom 25 km, farbu pre danú hĺbku udáva farebná škála

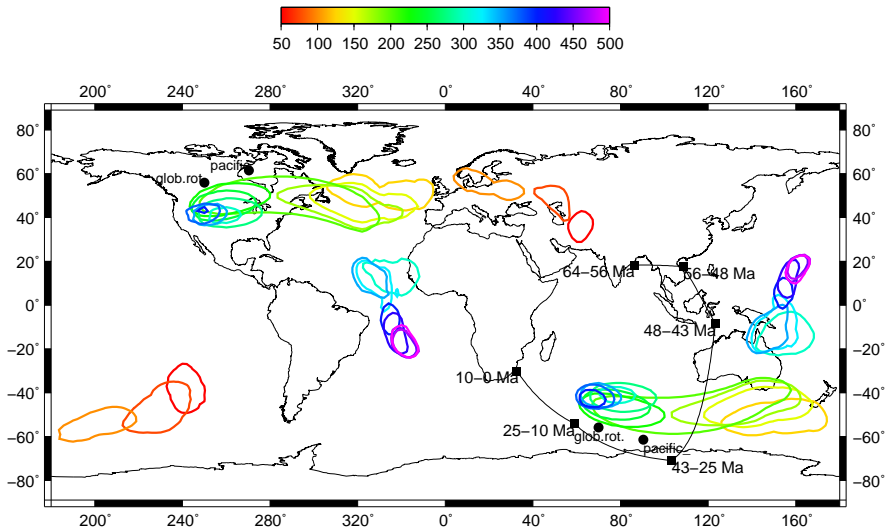


približuje k pólu globálnej rotácie z tabuľky 2.1.

Na tomto obrázku je najväčšia zhoda polôh pólů v minulosti s nami nájdenými maximami funkcie  $S(\vartheta, \phi)$ . Rovnomerný pohyb maxima do asi 40 Ma korešponduje so smerom putovania pólů do minulosti. Odchýlky medzi polohami môžu byť spôsobené jednak šumom dát anizotropie a jednak nepresnosťou v určení polôh pólů. Odskok od tohto rovnomerného pohybu v 40 Ma môže súvisieť s prudkou zmenou v putovaní pólů v minulosti. Pre dávnejšie obdobia však príbuznosť medzi  $S(\vartheta, \phi)$  a minulými pólmi nenačádzame. Obrázky 3.9 a 3.10 neukazujú žiadnu súvislosť medzi nájdenými maximami a pólmi globálnej rotácie v minulosti.

Na obrázku 3.9 sú maximá koncentrované do dvoch oblastí, jedna z nich súhlasí s pólom súčasnej globálnej rotácie. Toto rozdelenie však nesúhlasí s vekom oceánskej kôry, s narastajúcim vekom sa poloha maxima strieda z jedného miesta na druhé. Zaujímavosťou zostáva, že druhá oblasť sa zhoduje s oblasťou maxim funkcie  $S(\vartheta, \phi)$  počítaných pre anizotropiu v hĺbke 150 km pre celú Zem, oceánske platne a Pacifickú platňu (viď obrázky 3.5–3.7).

Obrázok 3.7: Poloha oblastí s hodnotami  $S$  väčšími ako je 95% maximálnej hodnoty  $S$  pre danú hĺbku, súčet v 3.5 len na Pacifickej platni. Hĺbka sa mení v rozsahu 50–500 km s krokom 25 km, farbu pre danú hĺbku udáva farebná škála

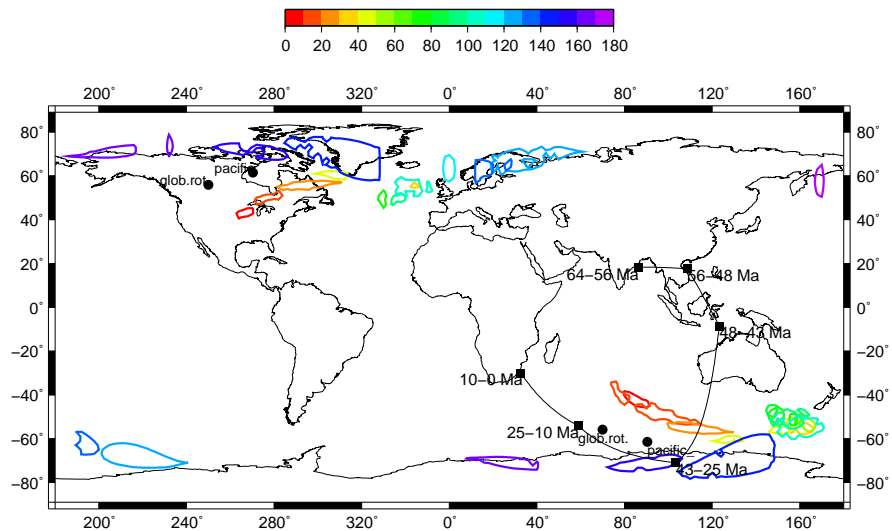


Pre anizotropiu v hĺbke 300 km sú maximá podľa veku oceánskej kôry vykreslené na obrázku 3.10. Opäť možno nájsť určitú zhodu s maximami vykreslenými na obrázkoch 3.5–3.7, súvislosť s vekom je tu opäť nejasná.

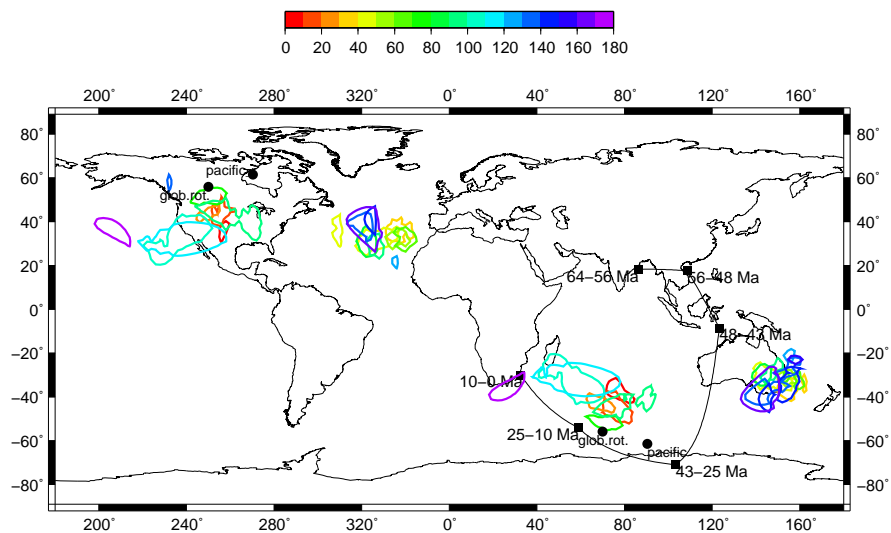
Výsledky zobrazené na obrázkoch 3.9 a 3.10 nevieme zatiaľ vhodne interpretovať, zostávajú otázkou do budúcnosti.



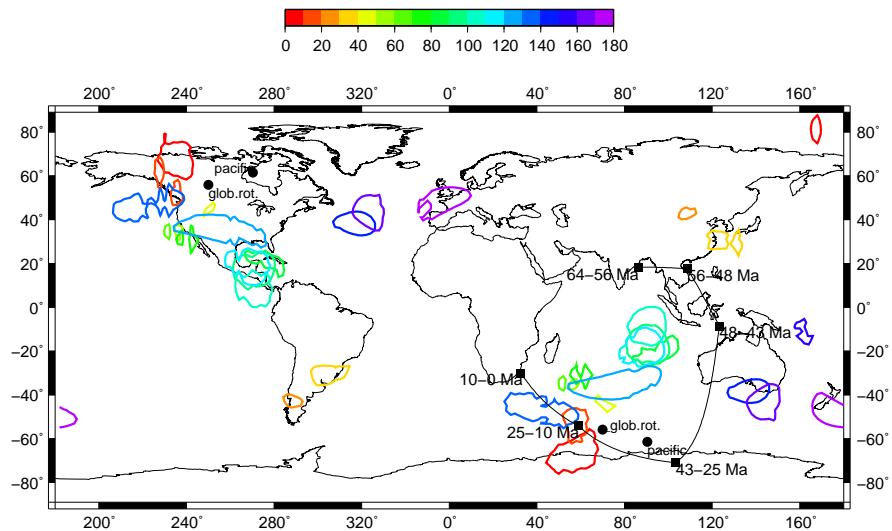
Obrázok 3.8: Polohy oblastí, kde hodnoty  $S$  prekračujú 98% maximálnej hodnoty pre danú oblasť spočítané pre anizotropiu v hĺbke 100 km. Súčet v 3.5 bol pre oblasti oceánskeho dna podľa rôzneho veku na intervaloch dĺžky 10 miliónov rokov pre 0–180 Ma. Rôzny vek je odlišený farebne podľa škály



Obrázok 3.9: Polohy oblastí, kde hodnoty  $S$  prekračujú 96% maximálnej hodnoty pre danú oblasť spočítané pre anizotropiu v hĺbke 200 km. Súčet v 3.5 bol pre oblasti oceánskeho dna podľa rôzneho veku na intervaloch dĺžky 10 miliónov rokov pre 0–180 Ma. Rôzny vek je odlišený farebne podľa škály



Obrázok 3.10: Polohy oblastí, kde hodnoty  $S$  prekračujú 95% maximálnej hodnoty pre danú oblasť spočítané pre anizotropiu v hĺbke 300 km. Súčet v 3.5 bol pre oblasti oceánskeho dna podľa rôzneho veku na intervaloch dĺžky 10 miliónov rokov pre 0–180 Ma. Rôzny vek je odlišený farebne podľa škály



# Kapitola 4

## Zhrnutie

Pomocou dát azimutálnej anizotropie Rayleighových vln sme určili korelácie s absolútnymi platňovými pohybmi voči sústave horúcich škvŕn. Našli sme rozsiahle oblasti, kde sú tieto korelácie vysoké. S narastajúcou hĺbkou však narastajú oblasti so zápornými koreláciami. Predpokladáme, že vo väčších hĺbkach má na vznik anizotropie v plášti vplyv aj iný proces ako deformácia spôsobená pohybom litosféry.

Pomocou vyhodnotenia miery zhody  $S(\vartheta, \phi)$  medzi smermi azimutálnej anizotropie a smermi rýchlostí globálneho pohybu sme hľadali oblasti, v ktorých by mohol ležať pól globálnej rotácie. Dôležitým výsledkom tejto práce je, že dáta azimutálnej anizotropie odrážajú jednoznačne smer globálneho pohybu: (jednoznačnosť maxim  $S(\vartheta, \phi)$ ). Tento smer sa vo väčšine prípadov podobá smeru globálnej rotácie určenej z pohybov platní vzhľadom k sústave horúceich škvŕn, najväčší súhlas sme objavili pre anizotropiu v hĺbke 200 km.

Poloha maxima  $S(\vartheta, \phi)$  sa s narastajúcou hĺbkou mení celkom spojitě, viditeľný odskok nastáva až v hĺbke presahujúcej 400 km. Toto môže mať viacero príčin: prítomnosť rozhrania v 410 km, zmena pohybov v minulosti, prítomnosť veľkého zašumenia v dátach anizotropie a vplyv ďalších procesov na anizotropiu v plášti. Faktom zostáva, že aj v našich najväčších hĺbkach bola objavená oblasť s kladnými koreláciami v blízkosti známych pólov globálnej rotácie. Keďže vznik anizotropie súvisí s komplikovaným procesom vytvárania preferovanej orientácie mriežky v olivínových kryštáloch, zostáva otázkou, či smer anizotropie odráža deformáciu litosférou alebo smer prúdeňa astenosféry alebo kombináciu oboch.

Zmena polôh maxim  $S(\vartheta, \phi)$  s hĺbkou môže byť vysvetlená jednak posunom do minulosti s hĺbkou: bola nájdená tendencia posunutia smerom od pólov k rovníku zodpovedajúca nájdeným globálnym pohybom vzhľadom k sústave horúcich škvŕn v minulých obdobiach. Tento posun sa však dá vysvetliť aj diferenciálnou rotáciou v plášti odlišnou od pohybu litosféry.

Pre meniacu sa polohu maxím  $S(\vartheta, \phi)$  pre rôzny vek oceánskej kôry sme nenašli vhodné vysvetlenie. Tieto výsledky budú ešte podrobené ďalším úvahám.

Aby sme získali lepšiu predstavu o tom, nakoľko anizotropia odráža globálne pohyby, bolo by vhodné využiť aj ďalšie dáta napr. radiálnej anizotropie.

# Literatúra

- [1] Turcotte D. L., G. Schubert, *Geodynamics*, 1–55, Cambridge University Press, 2002.
- [2] Gordon, R. G., and D. M. Jurdy, Cenozoic global plate motions, *J. Geophys. Res.*, *91*, 12389–12406, 1986.
- [3] Kaminski, E., and N. M. Ribe, A kinematic model for recrystallization and texture development in olivine polycrystals, *Earth Planet Sci. Lett.*, *189*, 253–267, 2001.
- [4] Debayle, E., B. Kennett and K. Priestley, Global azimuthal seismic anisotropy and unique plate-motion deformation of Australia, *Nature*, *433*, 509–512, 2005.
- [5] Kaminski, E., and N. M. Ribe, Timescales for the evolution of seismic anisotropy in mantle flow, *Geochem. Geophys. Geosyst*, *3*, 10.1029/2001GC000222, 2002.
- [6] Montagner, J.-P., T. Tanimoto, Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies, *J. Geophys. Res.*, *96*, 20337–20351, 1991.