Oponentský posudek disertační práce
“Influence of velocity model uncertainty in earthquake source inversions”
(Vliv neurčitosti rychlostního modelu při studiu zemětřesného zdroje)
vypracované RNDr. Miroslavem Halló

Disertační práce se zabývá problematikou určování seismických momentových tenzorů zemětřesení ze záznamů seismických vln s důrazem na určení jejich nepřesnosti vzhledem k neurčitosti rychlostního modelu. Jde o důležitou a vědecky nosnou problematiku, které se věnuje v současnosti velká pozornost a která nalézá množství aplikací v zemětřesné seismologii. Jádro práce tvoří 4 kapitoly, dále práce obsahuje úvod, závěr, seznam literatury a dodatky s programy v jazyce Fortran a Matlab a nakonec dodatek ilustrující tektonický režim v Zemi. Dvě kapitoly disertace byly publikovány samostatně ve formě vědeckého článku v časopisech Geophysical Journal International (Halló & Gallovič, 2016) a Earth, Planets and Space (Halló et al., 2017). V obou článcích je doktorand prvním autorem.

V první kapitole doktorand stručně shrnuje matematický popis zdroje seismických vln, bodového i konečných rozměrů, definuje momentový tenzor (MT) a uvádí jeho rozklad na izotropní složku, složku dvojitého dipólu a na kompenzovaný lineární vektorový dipól (CLVD), a nakonec se věnuje Bayesově pravděpodobnostní formulaci inverze momentového tenzoru. V druhé kapitole se doktorand snaží nalézt nový, rychlý odhad nepřesností Greenových funkcí (GF) potřebný k určení chyb momentových tenzorů získaných inverzí vlnových záznamů zemětřesení. K tomu je potřeba určit kovariance GF, jež popisují nepřesnost rychlostního modelu a jež se standardně počítají časově náročnou metodou Monte-Carlo. Pro výpočet přibližných kovariancí GF je navržena řada zjednodušení: (1) variabilitu GF postihovat pouze variabilitou v času příchodu vlnových obrazů a zanedbávat změnu jejich amplitudy a tvaru v závislosti na poruše rychlostního modelu, statistické rozložení odchylek v časech příchodu považovat za rovnoměrné, zavést předpoklad stacionarity přibližné kovariance, atd. Jednotlivá přiblížení jsou testována na syntetických datech a na příkladu určování momentového tenzoru zemětřesení z 25.4.2012 (Mw = 4.3) v Korintském zálivu. V kapitole 3 je zjednodušený odhad nepřesností GF aplikován při výpočtu momentových tenzorů a jejich chyb pro zemětřesnou sérii v japonské oblasti Kumamoto v roce 2016. Analýzou chyb momentových tenzorů 5 předtřesů a 6 dotřesů v magnitudovém rozsahu 4.8-6.5 je ukázáno, že některá zemětřesení mají prokazatelnou nestřižnou složku CLVD orientovanou ve směru napěťové osy σ3. Z momentových tenzorů je odhadnuto tektonické napětí v ohniskové oblasti a dále pravděpodobná orientace plochy zlomu. V kapitole 4 je pravděpodobnostní formulace inverze seismického zdroje aplikována na kinematický model konečného zdroje s adaptivní parametrizací skluzu na zlomu. Inverze je testována na datech z hlavního otřesu zemětřesné série v japonské oblasti Kumamoto s magnitudem Mw 7.1 z 16.4.2016.

Předložená práce má solidní formální i jazykovou úroveň (je napsaná v anglickém jazyce), obrázky jsou ilustrativní, práce zahrnuje tvorbu programových nástrojů i vlastní zpracování seismických dat. Kvalita práce je doložena tím, že hlavní výsledky byly publikovány v mezinárodních časopisech.

K disertaci mám přesto řadu připomínek a dotazů. Očekávám, že doktorand se k mým připomínkám vyjádří a dotazy zodpoví při obhajobě práce.

- Ačkoliv má práce slušnou formální úroveň, doktorand se nevyvaroval překlepů a gramatických chyb, jež lze nalézt bohužel i v českém abstraktu.
- Při generování možných rychlostních modelů pomocí náhodných poruch mi chybí uvážení variace Q-faktoru P a S vln. Z jakého důvodu není tento parametr uvažován? Lze odhadnout, nakolik by změnilo zavedení Q-faktoru výsledky?
- Navržený odhad chyb momentového tenzoru je založen na řadě zjednodušujících předpokladů. Např. se na str. 21 předpokládá, že modelový prostor parametrů m_{prior} je lineární a je charakterizován Gaussovským rozložením chyb. Na základě čeho vyplývá platnost tohoto předpokladu, pokud uvažujeme nepřesnosti rychlostního modelu?
- Na str. 36 autor zavádí stacionarizovanou kovarianční funkci, přičemž v jejím důsledku chybovost rychlostního modelu generuje šum nejen v oblasti GF, ale podél celého seismogramu. Je takováto operace přípustná a korektní a co fyzikálně znamená?
- Na str. 41 je uvedeno, že přestože je použit nepřesný statistický model pro náhodně posunuté signály, tak přibližná kovariance postihuje i variaci v amplitudách signálu a blíží se výsledku náročné metody Monte-Carlo ('In other words, the variations in amplitudes represent an artifact of using an inappropriate statistical model for the randomly shifted signal in a mathematical sense. Nevertheless, despite being an artifact, we consider it advantageous for our purpose since the ACF then captures more general variability that is closer to the reference one obtained by the expensive MC approach'). Myslím, že takové vysvětlení je neuspokojivé, protože není jasné, zda jde o náhodu poplatnou danému analyzovanému konkrétnímu signálu či nikoliv. Příčina shody s Monte-Carlo potřebuje hlubší analýzu.
- Na str. 47-48 je popsána parametrizace zdroje navržená Kikuchim a Kanamorim (1991) s poukazem, že tato parametrizace je výhodná, neboť umožňuje předem napočítat elementární seismogramy potřebné pro inverzi MT a odhad chyb. Nerozumím tomu, v čem je výhodnější než přímý výpočet Greenových funkcí.
- Základním problémem při odhadu chyb momentového tenzoru způsobených nepřesností rychlostního modelu spočívá v časově náročném výpočtu GF pro různé realizace modelu. Tento krok je v práci nahrazen předpokladem, že model ovlivňuje především čas příchodu vlny. Statistické rozložení času příchodu vln na stanice je pak základem pro výpočet kovariančních funkcí a pro následný odhad chyb MT. Řada inverzních metod z vlnových obrazů ovšem není čistě lineární a je na časový posun mezi syntetickým a pozorovaným signálem necitlivá. Jedná se např. o inverzi amplitudových spekter nebo o inverzi v časové oblasti, která zavádí korekci na časový posun. V tomto případě je navržený postup neaplikovatelný. Využití navržené metodiky je tak úzce omezené a časem bude podle všeho metoda nepoužitelná.
- Přirozeně se tak nabízí postup, kdy časově náročný výpočet GF pro množství alternativních rychlostních modelů se zjednoduší pomocí náhodných posuvů a taktéž náhodného šumu v amplitudách (viz Vavryčuk & Kuehn, GJI, 2012) a odhad chyb řešení v závislosti na rychlostním modelu se provádí přímo násobnou inverzí. Jelikož jde o lineární problém s případnými drobnými modifikacemi, výpočet je nenáročný. Tento postup je i mnohem obecnější, protože počítá chyby i pro nelineární inverze. Očekávám, že se doktorand vyjádří k tomuto postupu.
- V kapitole 3 je provedena analýza několika nejsilnějších předtřesů a dotřesů zemětřesné série v japonské oblasti Kumamoto. Zajímalo by mne, proč bylo analyzováno velmi omezené množství jevů? Pro věrohodné interpretace fyzikálních

příčin nestřižných složek MT a pro napěťové analýzy je potřeba analyzovat násobně větší počet jevů.

- Na str. 79, autor práce zmiňuje, že při analýze byly vyloučeny stanice s příliš blízkou epicentrální vzdáleností z důvodu splnění podmínky aproximace bodového zdroje. Jaký konkrétní tvar podmínka měla a jaká vzdálenost byla použita pro jednotlivá magnituda ($4.8 < Mw < 6.5$)?
- Popisky os a symbolů u obrázků 3.3-3.5 mají příliš malou velikost.
- Na str. 85 je uvedeno, že chyba lokace je ±1.5 km v horizontálním i vertikálním směru. Přitom zemětřesení byla zaznamenána lokální síti o 12 stanicích s epicentrální vzdáleností do 60 km, viz obr. 3.3. Proč je chyba lokace tak velká? Je to dáno nepřesnou znalostí modelu? Pokud ano, může model s 10% variací rychlostí, uvažovaný při odhadu chyb MT, generovat tak velkou lokační chybu?
- Při analýze nestřižných složek MT (str. 87 a dále) se směšují osy P/T/N ohniskových mechanismů s hlavními osami napětí.
- Inverze MT ukázala, že MT některých analyzovaných zemětřesení mají významné nestřižné složky. Autor tyto MT rozkládá do dvou střižných mechanismů ('major DC' a 'minor DC') při zachování společné T osy (str. 87 a dále). Následně ale zmiňuje, že tyto mechanismy nelze považovat za mechanismy odpovídající prasknutí asperity na aktivním zlomu, protože momentový rozklad je čistě formálním popisem ('the major and minor DC sources cannot be understood as two asperities of an activated fault system; the decomposition is merely mathematical description of a complex earthquake'). V tom případě ovšem nerozumím, proč vůbec byl rozklad prováděn a čím je tedy přínosný pro interpretaci?
- Pokud je nestřižná složka CLVD orientována ve směru hlavního směru napětí $\sigma 3$, pak se nabízí rozložit MT na střižnou část a na tahovou část s osou ve směru $\sigma 3$. Byl takový rozklad prováděn?
- Na str. 90-93 je rekonstruována geometrie zlomových ploch aktivovaných jednotlivými jevy. V analýze velmi chybí souhrnný obrázek s P/T osami nalezených ohniskových mechanismů, který by přehledně demonstroval variabilitu mechanismů.
- Přehlednosti obr. 3.8 by velmi pomohlo, kdyby ohniska předtřesů a dotřesů byla barevně odlišena.
- Obr. 3.10 s vizualizací zlomových ploch je velmi nepřehledný. Výše zmíněná ohnisková sféra s P/T osami by byla mnohem názornější. Za dané nepřesnosti lokace a při analýze MT pouze u několika jevů je v podstatě nemožné spolehlivě rekonstruovat geometrii zlomů či zlomových segmentů v ohniskové oblasti. Taková analýza vůbec neměla být prezentována.
- V závěru kapitoly 3 se autor pokouší o seismotektonickou interpretaci výsledků a spekuluje o stavu napětí v ohniskové zóně. Svá tvrzení opírá o inverzi napětí provedenou separátně pro předtřesy a pro dotřesy (viz obr. 3.11). Bohužel malé množství použitých jevů pro inverzi napětí výsledky analýzy znevěrohodňují a je potřeba je brát s rezervou. Zajímavé náznaky změny napěťového režimu v průběhu zemětřesné série jsou tak pouze spíše spekulativního charakteru.
- Je třeba taktéž podotknout, že výskyt strike-slipových a normálových jevů ještě nemusí nutně poukazovat na dva různé napěťové režimy v ohniskové oblasti.

- Na první pohled je zřejmé, že adaptivní skluzová inverze zdroje konečných rozměrů popsaná v kapitole 4 je extrémně náročná. O tom svědčí analyzovaný rozsah relativně vysokých frekvencí 0.05 – 0.5 Hz a počítané detailní rozložení skluzu na ploše z relativně malého počtu stanic (29 stanic v epicentrální vzdálenosti do 55 km). Překvapuje mne, že přestože je metoda inverze skluzu na zlomové ploše konečných rozměrů s uvážením nejistot v rychlostním modelu nově navržena a obsahuje řadu komplikovaných kroků ('trans-dimensional Markov chain Monte Carlo', ‚self-adapting model space', atd.) její funkčnost a správnost není ověřena na syntetickém modelu. Místo toho je metoda aplikována přímo na reálná pozorování. Autor přitom připouští, že bude potřeba rozsáhlé testování, než bude moci být metoda standardně používána. Domnívám se, že takový postup je nepřijatelný a prezentovaná ukázka na reálných datech je bezcenná. Očekávám, že se doktorand k problematice prováděných syntetických testů vyjádří při obhajobě.

Závěrem chci zdůraznit, že téma práce je nesmírně důležité, ale velmi náročné. Odhad chyb je nedílnou součástí výpočtů a rozhoduje o tom, zda jsou výsledky fyzikálně smysluplné nebo nikoliv. Nicméně je třeba zdůraznit, že odhad chyb až na výjimky, týkající se elementárních měření, většinou nepostihuje všechny faktory ovlivňující výsledek a že je tedy vždy spíše orientační. Např. výše zmíněný odhad chyb MT na základě neznalosti rychlostního modelu nebere v této práci v úvahu laterální nehomogenity v prostředí, malé nehomogenity způsobující rozptyl vln, komplikovanou geometrii materiálových rozhraní, anizotropii prostředí, atd. Stejně tak i 10% či 15% variabilita rychlostí ve vstupním rychlostním modelu je hrubý odhad, který lze jen obtížně ověřit. Můžeme se tedy ptát, jakou informační hodnotu má detailní rozložení pravděpodobnosti nestřižné složky MT způsobené neznalostí rychlostního modelu, pokud předpokládáme jednoduchý vrstevnatý izotropní model místo skutečného 3D anizotropního laterálně nehomogenního modelu? Tudíž, odhad chyb musí být rychlý, jednoduchý a bez zbytečných (chybných a zavádějících) detailů, a přesto by měl zachytit podstatné faktory ovlivňující přesnost výsledku.

Z tohoto hlediska oceňuji snahu doktoranda o zjednodušení v postupech tak, aby byly výpočty rychlé a efektivní. Nicméně můj osobní názor je, že Bayesovský přístup tak, jak je v práci navržen a rozpracován, není na danou konkrétní úlohu vhodný. Odhaduji, že přímočará metoda Monte Carlo se zjednodušeným výpočtem GF, jaký koneckonců částečně použil i doktorand, je perspektivnější pro svoji flexibilitu a použitelnost na lineární i nelineární problémy. To ovšem nesnižuje kvalitu předložené práce. Doktorand prokázal, že je schopen samostatně vědecky pracovat a tvůrčím způsobem rozvíjet danou problematiku. Proto doporučuji, aby mu byl po úspěšné obhajobě udělen titul Ph.D.

V Praze 21.8.2018

RNDr. Václav Vavryčuk, DrSc.
Geofyzikální ústav AV ČR, v.v.i.