

## Vyjádření školitele k disertační práci Elišky Zábranové

Numerical modeling of free oscillations applied to superconducting-gravimeter data in a low-frequency seismic range

Původním záměrem při zadávání práce bylo rozvinout novou metodu výpočtu vlastních kmitů (kvazi)sférických těles, která je založena na diferenčních schématech s pseudospektrální přesností aplikovaných na soustavy obyčejných diferenciálních rovnic získaných pro jednotlivé stupně sférického harmonického rozvoje pohybové a Poissonovy rovnice. Použitím této diskretizace se pro každý harmonický stupeň původní systém nekonečně mnoha kmitů aproximuje systémem s konečným počtem kmitů, jejichž počet je dán jemností diskretizace. Výhodou této metody je, že všechny kmity se pro jeden stupeň harmonického rozvoje získají najednou řešením příslušného maticového vlastního problému, a není tedy třeba zabývat se každým kmitem zvlášť, jak je tomu při použití klasických metod. Analogicky lze počítat i elastické slapy.

Doktorandka měla nejdříve prozkoumat vlastnosti a použitelnost metody, tj. zjistit do jak vysokých stupňů a s jakým rozlišením tento přístup ještě dobře funguje při použití současných běžně dostupných výpočetních prostředků. Poté se měla věnovat aplikacím, které by využívaly sílu metody. Typicky se jedná o situace, kdy je potřeba vědět, jak se mění slapy a spektrum vlastních kmitů při porovnávání různých strukturálních modelů tělesa, což je typická situace v planetologii. V této fázi své práce popsala základní vlastnosti metody pro výpočet slapů ve sborníku *Mission and Passion: Science* vydaném Českým národním komitétem geodetickým a geofyzikálním u příležitosti osmdesátých narozenin prof. Buršy.

Nenadále však došlo k velikým zemětřesením: chilskému v r. 2010, japonskému v r. 2011 a dvojitému sumatránskému v r. 2012. Doktorandka v té době pracovala na částečný úvazek v *Centru dynamiky Země* vedeném prof. Kosteckým na VÚGTK a uvědomila si, že díky zapojení gravimetrické části Centra do Globálního geodynamického projektu může získat unikátní data z celosvětové sítě supravodivých gravimetrů, která jsou v submilihertzové spektrální oblasti patrně kvalitnější než data z širokopásmových seismometrů. Díky ochotě a péči ing. Pálinskáše měla tato data brzy k dispozici, velmi rychle se je naučila zpracovávat, a mohla tak přistoupit k jejich využití pro studie mechanismů zdroje zmíněných velikých zemětřesení. Cílem bylo zjistit, zda rutinní seismologické postupy, které jsou založeny na inverzi dat v jiném frekvenčním pásmu, jsou u extrémně velikých zemětřeseních spolehlivé i v nízkofrekvenční oblasti.

To však znamenalo výrazně vylepšit metodu, protože u těchto aplikací nelze zanedbat frekvenční závislost strukturálních elastických parametrů; vlastní maticový problém se tím stává nelineární, neboť matice úlohy je frekvenčně závislá. Doktorandka ukázala, že s touto komplikací se lze pro většinu kmitů vypořádat tím, že původní úloha se řeší na několika vhodně zvolených referenčních frekvencích a následně se použije interpolace. Dále bylo třeba do výpočtů zahrnout i štěpení vlastních frekvencí vlivem zploštění Země a Coriolisovy síly, k čemuž použila standardní teorii z literatury. Po překonání těchto překážek bylo možné přistoupit k vlastním studiím zdroje.

Doktorandka začala nejdříve řešením relativně jednoduché přímé úlohy: pro japonské zemětřesení spočítala syntetický gravimetrický signál na Geodetické observatoři Pecný pro několik agenturních modelů zdroje a porovnávala ho s daty z místního supravodivého gravimetru. Zjistila, že rozdíly v jednotlivých syntetických signálech jsou v submilihertzové oblasti patrné, takže bylo zřejmé, že má smysl zabývat se obrácenou úlohou na zdroj. Výsledky této studie publikovala v časopise *Studia geophysica et geodaetica*. Pozoruhodné je, že některé partie z tohoto článku se objevily ve výroční zprávě Institute of Seismological Research v Gujaratu za l. 2011-2012.

Poté přišla s vynikajícím nápadem: amplituda radiálních kmitů závisí pouze na složce  $M_{rr}$  seismického momentového tenzoru, je-li izotropní složka nulová, což je v případě studovaných mělkých velkých zemětřesení patrně rozumný předpoklad. Druhým volným parametrem je pak hloubka zdroje. Ve spektru chilského a japonského zemětřesení jsou první dva radiální kmity výrazné, takže lze řešit samostatnou obrácenou úlohu pouze pro radiální kmity. Brzy se však ukázalo, že situace je o něco složitější v tom, že faktory kvality radiálních kmitů nejsou známy natolik dobře, aby je bylo možné převzít z literatury, a je tedy nutné zahrnout je mezi určované parametry. V případě radiálních kmitů to však nekomplikuje původní obrácenou úlohu, protože faktory kvality radiálních kmitů lze určit přímočaře z poklesu amplitud kmitů v čase. Výsledky pro radiální kmity se pak podařilo rychle a bez větších problémů opublikovat v časopise *Geophysical Research Letters* a jsem potěšen tím, že jsou již několikrát citovány.

Práce pak pokračovala řešením obdobné obrácené úlohy pro případ sféroidálních kmitů. Sféroidální kmity v principu závisejí na čtyřech složkách seismického momentového tenzoru. V případě, že izotropní složka momentového tenzoru je nulová, se počet volných parametrů redukuje na tři. Obrácená úloha pro sféroidální kmity je však mnohem komplikovanější v tom, že faktory kvality základních sféroidálních kmitů také nejsou známy dostatečně spolehlivě a doktorandce se je nepodařilo určit přímo z dat, protože v tomto případě zde hraje roli i frekvenční štěpení jednotlivých multipletů na singlety. Faktory kvality tedy bylo třeba zahrnout do inverze, která se tím stává lineárně-nelineární. Pro řešení této úlohy pak doktorandka zvolila iterační přístup, kdy se v jednom kroku fixují parametry zdroje a určují se faktory kvality, kdežto v následujícím kroku se fixují faktory kvality a určují se parametry zdroje. Ukázalo se, že tento iterační přístup rychle konverguje, úloha je tedy v principu poměrně snadno řešitelná a výsledky jsou dostatečně robustní. Po určitých peripetiích se tuto studii podařilo opublikovat v časopise *Physics of the Earth and Planetary Interiors*.

V souhrnu konstatuji, že RNDr. Eliška Zábranová na katedře geofyziky MFF UK úspěšně otevřela dveře pro nový směr výzkumu, který je i plodem spolupráce katedry s geodynamickou skupinou na VÚGTK. Velice bych si přál, aby tyto dveře zůstaly otevřené i nadále.

V Plavsku, 4.8.2015

Doc. RNDr. Ctirad Matyska, DrSc.