



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
ÚSTAV GEODÉZIE
INSTITUTE OF GEODESY

ANALÝZA VYBRANÝCH VARIACÍ TÍHOVÉHO POLE VLIVEM DYNAMIKY HMOT

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF PHD THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. TOMÁŠ VOLAŘÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF WEIGEL, CSc.

BRNO 2016

Klíčová slova

tíhový potenciál, variace tíhového zrychlení, supravodivý gravimetr, atmosféra, půdní vlhkost

Keywords

gravity potential, variations of gravity acceleration, superconducting gravimeter, atmosphere, soil moisture

Obsah

1	ÚVOD	4
1.1	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
2	SOUČASNÝ STAV	6
2.1	RELATIVNÍ TÍHOVÁ MĚŘENÍ STANIČNÍ	6
2.2	TECHNOLOGIE DRUŽICOVÝCH TÍHOVÝCH MĚŘENÍ	7
2.2.1	GRAVITY RECOVERY AND CLIMATE EXPERIMENT (GRACE)	7
2.2.2	GRAVITY FIELD AND STEADY-STATE OCEAN CIRCULATION EXPLORER (GOCE)	8
2.2.3	GGOS	8
3	USKUTEČNĚNÉ EXPERIMENTY	9
3.1	VYTĚŽOVÁNÍ GLOBÁLNÍCH MODELŮ GEOPOTENCIÁLU	10
3.2	ANALÝZA DLOUHODOBÝCH TÍHOVÝCH MĚŘENÍ	11
4	PŘÍNOSY PRÁCE	16
5	LITERATURA	17
	CURRICULUM VITÆ	18
	ABSTRACT	23

1 Úvod

Zdokonalení přístrojové techniky v oblasti geovědních disciplín umožňuje získávat stále detailnější, podrobnější a přesnější informace o tíhovém poli Země a na základě těchto poznatků lze získávat představu o přesunu hmot a konfrontovat naměřené hodnoty s modelovými hypotézami. Zejména v dnešní době, kdy se klade důraz na zkoumání příčin a důsledků globálních změn klimatu a životního prostředí obecně, je zapotřebí provádět přesná měření geodynamických jevů a jejich správná vyhodnocení.

Současně došlo ke zvýšení přesnosti pozemních gravimetrů na úroveň, která umožňuje detekovat časové variace, které se dříve skryly v šumu měření. Tato práce se věnuje zkoumání vlivů prostředí na přesná měření tíhových veličin a změny v čase. Význam zpracování přesných dat v globálním měřítku autor spatřuje ve zvýšení znalostí o geodynamických procesech a možnosti jejich interpretace v dalších oborech, například klimatologie.

Disertační práce přináší nový pohled na možnosti zpracování tíhových měření a společného využití globálních modelů s multidisciplinárním přesahem.

1.1 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je provést analýzu různých přístupů k redukci vlivu atmosférických a hydrosférických hmot na tíhová měření a dále zkombinovat data z různých zdrojů pro využití pro modelování tíhového pole na území většího rozsahu. Dále si tato práce klade za cíl navrhnout proces výpočtu vlivu atmosféry na model kvazigeoidu a jeho časové variace. Zároveň si klade za cíl jednotlivé složky a zdroje dat vzájemně ověřit. Výstupem této práce by měly být doporučení pro další práce v oblasti modelování kvazigeoidu a tíhového pole.

2 Současný stav

V současnosti probíhají mezinárodní aktivity na poli sledování geodynamických jevů a procesů pomocí opakovaných terestrických měření jak absolutními metodami gravimetrie, tak relativními gravimetry dlouhodobým sledováním variací tíhového zrychlení na stanicích. Současně se využívají družicové technologie pro globální monitoring změn tíhového pole a dalších veličin.

2.1 Relativní tíhová měření staniční

Kontinuální sledování změn tíhového pole v čase probíhá od dob konstrukce prvních gravimetrů. Počátkem bylo vybudování tzv. slapových stanic, na kterých byly určovány charakteristiky jednotlivých slapových vln. Jednou z takových stanic je i slapová stanice na Geodetické observatoři Pecný, která vznikla jako samostatná laboratoř v roce 1972. Dlouhodobě zde probíhala registrace slapových variací pomocí gravimetru Askania Gs15. Od roku 2007 probíhají měření pomocí supravodivého gravimetru GWR OSG-050.

Dlouhodobé kontinuální sledování časových variací tíhového zrychlení na stanicích má značný význam při zkoumání globálních změn klimatu. Jakákoliv změna v přesunu hmot je zachycena měřením a z časových řad patrná. Dále je na odbornících, aby dané fenomény správně interpretovali a uvedli do souvislostí. Nicméně vždy vede ke zvýšení znalostí o daném jevu.

Obsáhlou prací je (Virtanen, 2006), který komentuje podstatný vliv sněhové pokrývky na stanici Metsähovi. Dále porovnává lokální vliv podzemní vody a regionální zatěžovací účinek.

Výsledné časové řady měření supravodivým gravimetrem jsou silně ovlivněny atmosferickými hmotami. Díky tomu, že je supravodivý gravimetr integrální senzor, sčítají se všechny tíhové účinky (lokální, regionální i globální) na daném místě do jediného výstupu. Úkolem zpracování observací je separovat z tohoto výstupu ty vlivy, které se neřadí k tíhovému poli Země a způsobují pouze anomální variace. V současné době se korekce těchto jevů provádí dvěma způsoby, které můžeme rozdělit podle principu na fyzikální a statistické (regresní) metody.

2.2 Technologie družicových tíhových měření

Již v době vypuštění první družice na oběžnou dráhu byl zahájen výzkum sledování poruchového potenciálu na základě deformací drah družic. Později byly vytvořeny družice specializované na sledování tíhového pole Země a jeho změny v čase. Vesmírných programů s tímto účelem bylo mnoho, v disertační práci autor uvádí vesmírnou misi GRACE americké NASA a evropský projekt GOCE.

2.2.1 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)

Mise GRACE vznikla pod zastřešujícím programem Earth System Science Pathfinder (ESSP) amerického Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku (orig. National Aeronautics and Space Administration – NASA). Program začal v květnu 1997 a v březnu 2002 došlo k vypuštění páru družic do vesmíru. Životnost mise byla navržena na dobu pěti let, avšak družice jsou v provozu doposud.

Observace mise GRACE jsou zpracovávány třemi centry – Center for Space Research (CSR) na Univerzitě v Texasu, GeoForschungZentrum (GFZ) v Postupimi a Jet Propulsion Laboratory (JPL) NASA. Jak bylo uvedeno dříve, produkty jsou rozděleny do několika kategorií. Finální globální model středního (mean) tíhového potenciálu je v kategorii Level-2 označený jako GRACE Gravity Model 03 (GGM03) a byl v této třetí verzi publikován v roce 2008. Kategorie Level-2 dále obsahuje i koeficienty neslapového atmosférického potenciálu (non-tidal atmosphere coefficients). Soubory s těmito koeficienty jsou v názvu označeny zkratkou GAA (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Dále jsou k dispozici koeficienty potenciálu generovaného oceánskými přesuny hmot (GAB) a kombinace obou výše uvedených označená jako GAC.

2.2.2 Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE)

V návaznosti na projekt GRACE byl v rámci aktivit Evropské kosmické agentury (ESA) realizován projekt GOCE. Kosmický segment se skládal z jedné družice. Vesmírná mise trvala od 17. března 2009 do 11. listopadu 2013, tedy necelých 5 let, přičemž navrhovaná životnost byla 20 měsíců.

V rámci projektu GOCE existuje několik produktů reprezentujících globální model geopotenciálu. Finální soubor koeficientů je označen jako EGM_GOC_2 a kromě hodnot koeficientů obsahuje i odhady charakteristik přesnosti. Existuje i několik realizací od různých autorů. Jejich výčet lze dohledat např. na (GFZ, [online](#)).

Jak popisuje (Yildiz, 2011), globální model geopotenciálu z dat GOCE může dávat lepší výsledky v regionálním rozsahu než EGM2008. Pro výpočet výšek kvazigeoidu používá kolokaci nejmenších čtverců (least-square collocation – LSC) s odstraněním dlouhovlnného efektu pomocí EGM2008 a krátkovlnného pomocí lokální topografie přímo z vertikálního gradientu poruchového potenciálu T_{zz} . Uvádí, že výsledná přesnost tíhových anomálií, respektive výšek kvazigeoidu dosahuje hodnot 11 mGal, resp. 18 cm.

2.2.3 GGOS

Mezinárodní geodetické asociace (IAG) spravuje zastřešující systém observací Země pod názvem Global Geodetic Observing System (GGOS). Systém v sobě zahrnuje infrastrukturu pro sledování Země a výzkum globálních změn. Hlavním tématem je „Global deformation and mass exchange processes in the System Earth“, tedy globální deformace a procesy přesunů hmot. Cílem je shromažďovat data a informace o Zemi a snižovat dopady přírodních katastrof. GGOS Atmosphere je projekt Technické univerzity ve Vídni, který se zabýval zkoumáním vlivu atmosféry na různé geodetické observace. Z hlediska GNSS měření bylo zkoumáno např. troposférické zpoždění. Podobně zatížení vlivem atmosféry činí až jeden centimetr, což je vliv, který již nelze zanedbat (IAG, [online](#)).

3 Uskutečněné experimenty

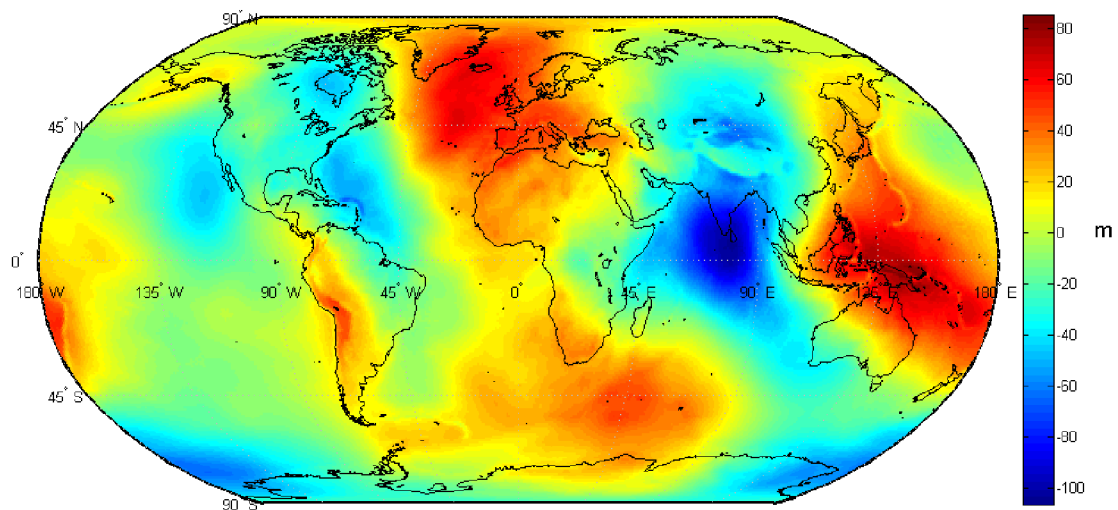
Pro naplnění cílů disertační práce bylo provedeno několik na sebe navazujících výzkumných aktivit, v rámci kterých bylo uskutečněno jak měření v terénu, tak získána a zpracována data z družicových misí a globálních modelů topografie a klimatických dat. Následně probíhalo zpracování těchto dat, vzájemné ověření a vyhodnocení. Výsledky většiny aktivit byly již publikovány a byla s nimi tedy seznámena odborná veřejnost.

Od roku 2009 autor spolupracoval s Geodetickou observatoří Pecný na zpracování dat ze supravodivého gravimetru SG-050. Zároveň v té době probíhal vývoj a implementace zařízení pro měření astro-geodetických tížnicových odchylek MAAS-1 vyvinutého na Ústavu geodézie VUT v Brně. V rámci několika výzkumných projektů byly ověřeny výsledky dosahované tímto zařízením, stanoveny charakteristiky přesnosti a dále byly provedeny observace astrogeodetických tížnicových odchylek v několika oblastech pokrývajících území jak plošnou sítí, tak podélným profilem, které poskytly možnost výpočtu lokálního modelu kvazigeoidu.

Aktuálně výzkumné práce pokračují měřeními astrogeodetických tížnicových odchylek v horské lokalitě Králický sněžník a vyhodnocováním astronomicko-topografické nivelace.

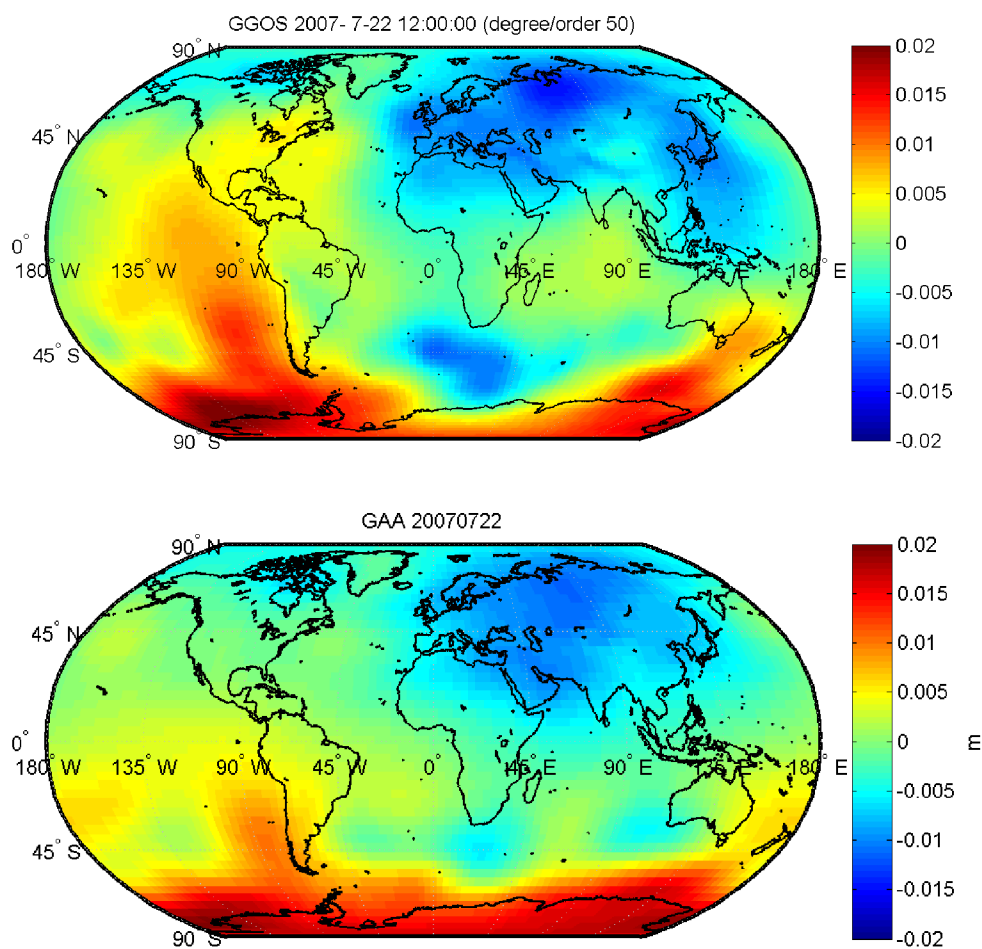
3.1 Vytěžování globálních modelů geopotenciálu

Ze souboru Stokesových koeficientů lze pro libovolné místo na Zemi vypočítat hodnotu veličiny odvozené z tíhového potenciálu. Pokud globální model geopotenciálu reflektuje i časové variace a je k dispozici například v měsíčním intervalu (GRACE) nebo 6hodinovém (GGOS Atmo), lze hodnoty vypočítat také pro daný časový interval, resp. lze určit časovou řadu variací v daném bodě. Práce autora využila obě tyto možnosti, tedy jak výpočet pro dané místo na Zemi (např. stanici Pecný), tak pro zadané území reflektující nejvyšší stupeň modelu a tedy smysluplné prostorové rozlišení výsledných hodnot (například model GOCE se stupněm 250 na Obr. 1).



Obr. 1 vizualizace geoidu z modelu GOCE

Časové variace byly následně využity pro kombinaci s daty z terestrických observací, která je popsána v následující kapitole. Po ověření algoritmů na základě modelu GOCE, byly provedeny výpočty pro konkrétní časové období let 2007-2009, pro které byly zároveň k dispozici observace ze stanice Pecný. Byly vypočteny hodnoty změn tíhového zrychlení z modelu GRACE GAA RL05 a modelu GGOS Atmo, verze 13 a 21. Porovnání obou modelů pro konkrétní datum 22. 7. 2007 viz Obr. 2. Časové variace pro lokalitu Pecný byly uloženy pro následné zpracování ve formátu TSF.



Obr. 2 výška geoidu model GGSO Atmo (nahore) a model GRACE GAA (dole)

3.2 Analýza dlouhodobých tíhových měření

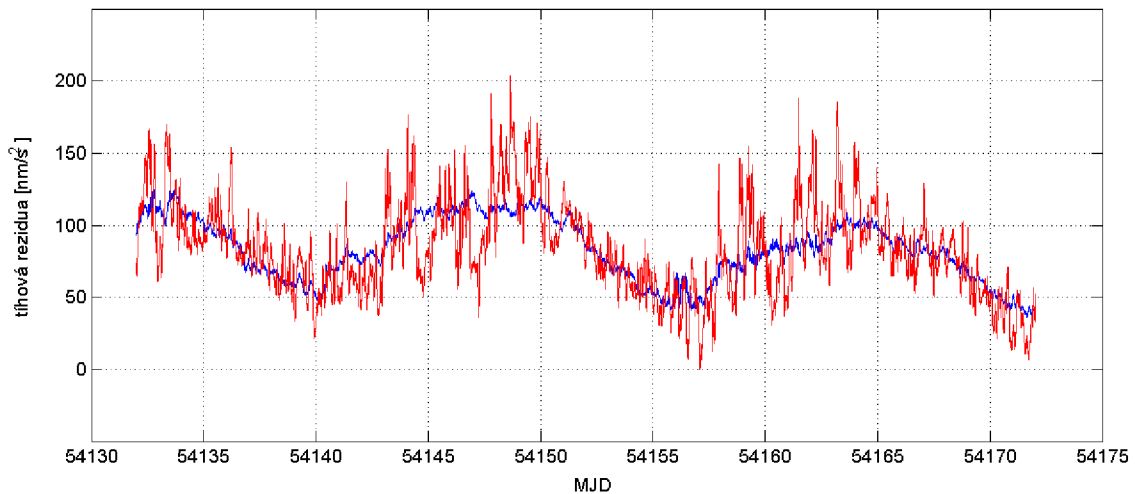
V přechodí kapitole je uveden postup výpočtu variací pomocí dat z globálních modelů geopotenciálu. Z výše uvedených výsledků prostorových analýz plynou závěry, které je vhodné ověřit kombinací s nezávisle určenými observacemi. Ve spolupráci s Geodetickou observatoří Pecný byla detailně analyzována data ze supravodivého gravimetru OSG-050.

Data z GO Pecný z období únor 2007 až prosinec 2009 byla využita pro provedení vlastního experimentu redukce atmosféry z tíhových měření. Minutový záznam změn tíhového zrychlení byl před zpracováním opraven o vlivy slapů, pohybu pólu a chod gravimetru. Takto připravený signál byl použit spolu se signálem atmosferického tlaku pro vlastní experiment a převeden na konzistentní časový interval 6 hodin. Dále byly k dispozici tíhové účinky

atmosféry počítané zprostředkovaně službou Atmacs. Provedené metody a jejich porovnání je uvedeno dále.

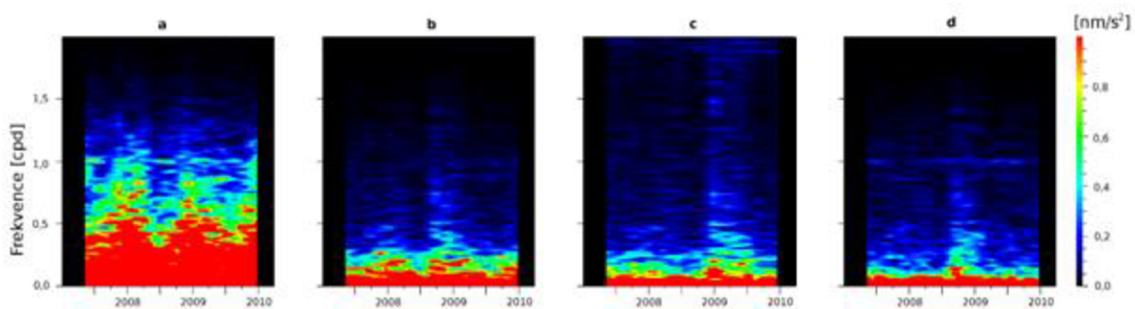
Jednoduchou korekcí tlaku je zavedení regresního koeficientu s konstantní hodnotou, která co nejlépe vystihuje vzájemnou korelaci obou signálů. Tato hodnota se podle různých prací (např. Boy, Hinderer, 2005) blíží $-3,0 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$. Denní změny tlaku mohou dosahovat hodnoty až 50 hPa. S přihlédnutím k regresnímu koeficientu zjistíme, že tíhové variace vlivem atmosféry mohou dosahovat rozdílu minima a maxima cca 150 nm/s^2 ($15 \text{ }\mu\text{Gal}$). V tomto experimentu byl použit právě tento koeficient, který je součtem přímého tíhového účinku a deformačního, který působí opačným směrem se zhruba desetinovou velikostí. Přímý účinek je tedy $-3,3 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$ a deformační $+0,3 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$, výsledný regresní koeficient, který byl použit pro redukci atmosféry byl $-3,0 \text{ nms}^{-2}/\text{hPa}$. Zpracování bylo provedeno v programu TSoft použitím jednoduchého výrazu a zpracováním v časové oblasti.

Přenosová funkce je v oboru komplexních čísel dána čtyřmi veličinami: magnitudou, fází, časovým zpožděním a korelačním koeficientem. Tyto produkty byly vypočteny v programu TSoft pomocí funkce Calculate \rightarrow Transfer function. Hodnota amplitudy a fáze se přitom snadno převede na reálnou a imaginární složky komplexních čísel. Podobně i signál tlaku a tíhových změn se pomocí FFT převede do oboru komplexních čísel a v tomto oboru dojde k odečtení přenosové funkce vynásobené komplexním tlakem od komplexních tíhových změn. Následně byl proveden zpětný převod z frekvenční do časové oblasti pomocí inverzní FFT. Tímto procesem vznikne signál, kde je vliv atmosféry redukován frekvenčně-závislou regresí pomocí přenosové funkce (viz Obr. 3).



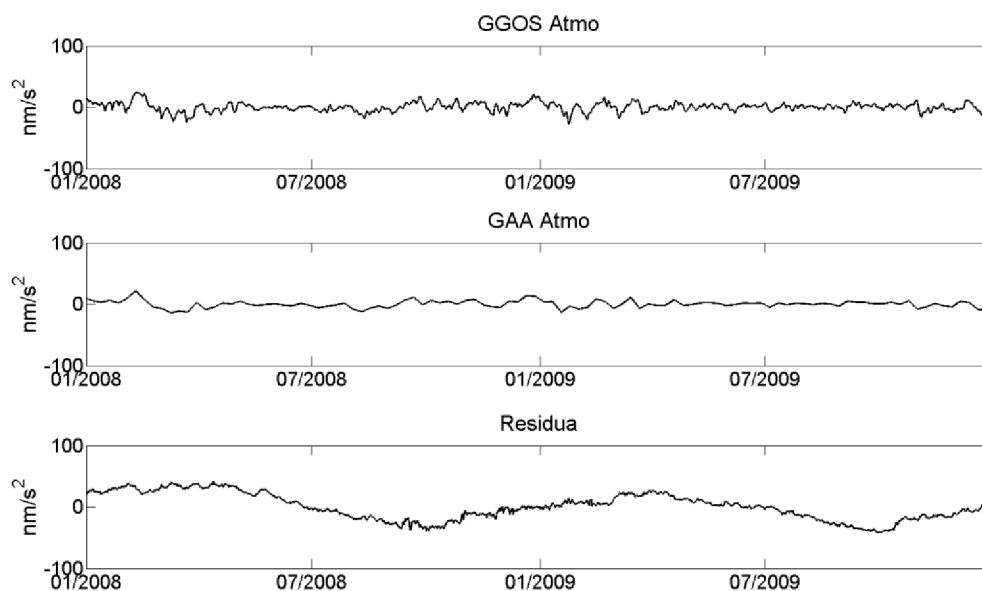
Obr. 3 původní signál tíhových reziduí (červeně) a signál opravený frekvenčně-závislou přenosovou funkcí (modře), datum je vyjádřeno pomocí modifikovaného Juliánského data (MJD)

Výsledné signály byly porovnány s dostupnými daty ze služby Atmacs (BKG). Jako charakteristiku signálu lze s výhodou využít spektrogram, který popisuje sílu (výkon) jednotlivých frekvencí v čase. Porovnáním spektrogramů jednotlivých signálů (Obr. 4) dojdeme k závěru, že nejlépe redukuje vliv atmosféry fyzikální model BKG a signifikantní je i rozdíl mezi konstantním koeficientem a přenosovou funkcí.



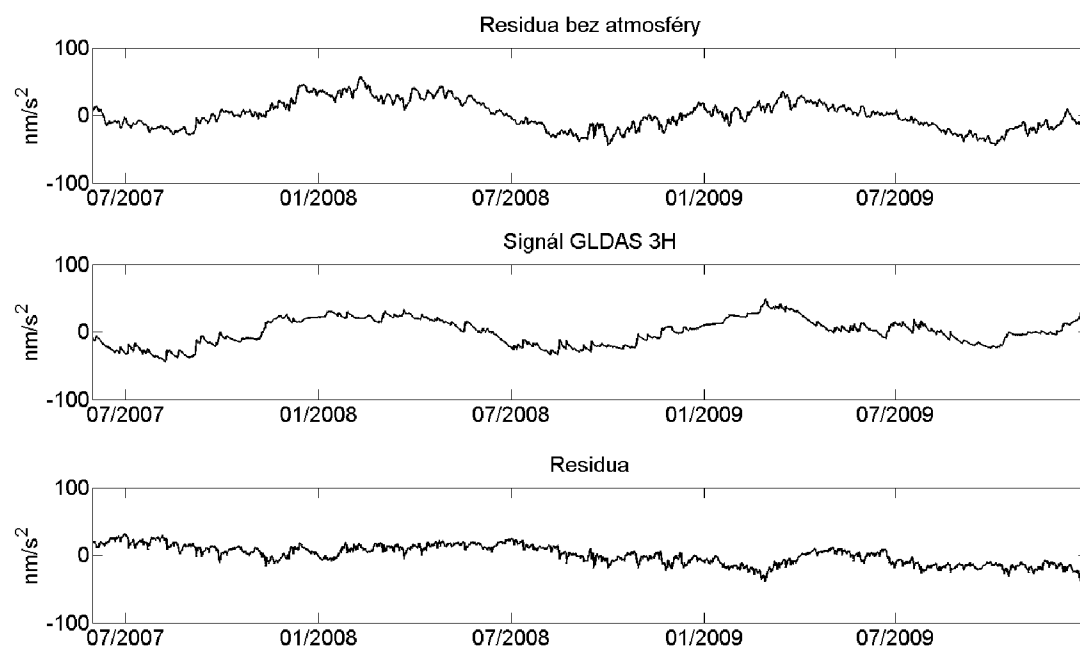
Obr. 4 spektrogramy signálu tíhových reziduí: (a) neopraveného; (b) opraveného konstantním koeficientem; (c) opraveného frekvenčně-závislou přenosovou funkcí a (d) opraveného pomocí atmosférických modelů BKG

Výsledný signál byl porovnán s výpočtem na základě modelu GGOS Atmosphere a GRACE GAA a byla ověřena možnost využití těchto modelů pro výpočty variací v lokalitách a zájmových územích, kde není k dispozici měřené tíhové zrychlení a kdy nás zajímají variace vlivem atmosféry. Byla prokázána podobná přesnost jako v případě modelování na základě lokálních observací atmosférického tlaku (viz Obr. 5).



Obr. 5 Porovnání modelu GGOS a GRACE GAA

Následně byl proveden výpočet vlivu hydrosféry (půdní vlhkosti) pro stanici Pecný z modelu GLDAS s 3hodinovým časovým intervalem pro období leden 2007 až prosinec 2009. Signál tíhových reziduí byl již opraven o vliv atmosféry pomocí frekvenčně závislé regrese, z Obr. 6 je patrný průběh časových řad jednotlivých signálů. Výsledná rezidua opravená o vliv hydrosféry pomocí modelu GLDAS dosahovala rozdílu minima a maxima cca 20 nm/s², což je významné snížení sezónní variace signálu.



Obr. 6 redukce signálu hydrosféry na stanici Pecný pomocí modelu GLDAS

4 Přínosy práce

Tato disertační práce se zabývala vlivem atmosféry a hydrosféry na časové variace (poruchy) tíhového pole a zprostředkovaně na měřené tíhové zrychlení a tížnicové odchylky.

Výsledky porovnání nezávislého určení kvazigeoidu na území Brna ukázaly možnosti určení lokálního modelu s milimetrovou přesností. Na této úrovni už musí být uvažováno s časovými variacemi vlivem neslapových a nerotačních účinků. V této práci byl vyčíslen vliv atmosféry pomocí časových variací. Dosažené hodnoty ukazují, že výška geoidu se díky mění v řádu centimetrů. Tato hodnota odpovídá dosavadní literatuře, nicméně vyžaduje další ověření.

Bylo prezentováno několik přístupů k procesu eliminace vlivu atmosféry ze signálu dlouhodobých observací relativního tíhového zrychlení. Dále bylo prezentováno využití globálního klimatického modelu GLDAS pro určení průběhu klimatických veličin v daném místě a čase. Byl ověřen výpočet variace vlivem podzemní vody a půdní vlhkosti a tento výpočet byl ověřen na nezávislých datech. Autor na základě analýzy a dalších znalostí navrhuje v budoucnu zabývat se bilancí výpar/odtok.

Výsledky této práce a popisy jednotlivých metod by měly být využity pro budoucí výzkumné aktivity. Autor spatřuje velký potenciál v mezioborovém výzkumu v souvislosti s aktuálním trendem globální změny klimatu, kde by mohly být znalosti geodynamických procesů s výhodou využity.

5 Literatura

1. Boy J. P., Hinderer J. (2005): Study of the seasonal gravity signal in superconducting gravimeter data. In *Journal of Geodynamics*. Elsevier, 2005. 227-233.
2. GFZ Potsdam [online]: International Centre for Global Earth Models (ICGEM). Citováno červen 2016. Dostupné <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>
3. IAG [online]: The Global Geodetic Observing System Portal. Citováno červen 2016. Dostupné <http://www.ggos-portal.org/>
4. Virtanen H. (2006): Studies of Earth Dynamics with the Superconducting Gravimeter. Academic dissertation. University of Helsinki, Helsinki, 2006.
5. Yildiz H., Forsberg R., Tscherning C. C., Strykowski G. (2011): Impact of GOCE on the Nordic gravity field modelling. In Proc. of 4th International GOCE User Workshop. Munich, Germany, 2011.

Curriculum vitae

Ing. Tomáš Volařík

Vzdělání:

- 1996-2004 **Všeobecné středoškolské s maturitou**, Gymnázium Jana Amose Komenského, Uherský Brod,
- 2004-2007 **Bakalářské**, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, studijní program Geodézie a kartografie,
- 2007-2009 **Navazující magisterské**, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, studijní program Geodézie a kartografie (diplomová práce: Využití služeb sítí permanentních stanic v Uherském Brodě a okolí),
- 2009-doposud **Doktorské**, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, studijní program Geodézie a kartografie (školitel doc. Ing. Josef Weigel, CSc.).

Zaměstnání:

- listopad 2012 – březen 2013 **GEODIS Brno, s. r. o.**: vývoj webových aplikací v ASP.NET, mapová aplikace sítě referenčních stanic TopNET, zobrazení prostorových dat na webu z prostorové databáze PostGIS.
- listopad 2012 – doposud **Regionální výzkumné centrum AdMaS, Fakulta stavební VUT v Brně, pozice Junior Researcher**: vytěžování prostorových dat, tvorba 3D modelů budov a městských částí, analýzy prostředí na základě globálního klimatického modelu GLDAS, tvorba digitálního modelu reliéfu a terénu (DMT, DMR), technologie laserového skenování.
- **prosinec 2014** – doposud **Ústav geodézie, Fakulta stavební VUT v Brně, pozice asistent**: výuka předmětu Digitální model terénu, ArcInfo a komplexní projekt. Vedení diplomových prací.

Výzkum:

- **geodynamika**: studium časových a prostorových tíhových variací měřených absolutním gravimetrem, supravodivým gravimetrem nebo pomocí družicových kampaní (GRACE, GOCE),
- **geodézie a gravimetrie**: pozemní relativní tíhová měření realizovaná gravimetrem Lacoste&Romberg Model G, výpočet a interpretace tíhového zrychlení a tíhových anomálií opravených o rušivé vlivy slapů, atmosféry a topografie; měření astronomických tížnicových odchylek, zpracování, výpočet převýšení astronomického kvazigeoidu a dalších souvisejících geofyzikálních a geodetických veličin; výpočet modelu gravimetrického kvazigeoidu z Fayeových anomálií s použitím detailního DMT pro korekci vlivu topografie,
- spolupráce s Výzkumným ústavem v Ondřejově (Pecný) a oddělením geofyziky na Univerzitě v Lucembursku.
- **GNSS**: testování přesnosti služeb RTK poskytovaných sítěmi permanentních stanic, porovnání jednotlivých sítí a služeb individuálního a síťového řešení.

Stáže a pobyty:

- únor a srpen 2010: kooperace při měření absolutním gravimetrem, zpracování měření supravodivého gravimetru, advisor Ing. Vojtech Pálinkáš, Ph. D.
- říjen 2011-leden 2012: pracovní stáž Erasmus: Oddělení geofyziky, Fakulta věd, technologií a komunikace, Univerzita v Lucembursku, Lucembursko (mentor: prof. Olivier Francis)
 - měření a výpočet vertikálního tíhového gradientu v podzemní geodynamické laboratoři ve Walferdange (gravimetr Scintrex CG-5),
 - křížové zpracování srovnávacího měření absolutních gravimetrů ECAG 2011,
- červenec 2012-srpen 2012: Free Movers pracovní stáž : Oddělení geofyziky, Fakulta věd, technologií a komunikace, Univerzita v Lucembursku, Lucembursko (mentor: prof. Olivier Francis a Dr. Christian Rothleitner):
 - vývoj vlastního programu na zpracování dat interferometru z absolutního gravimetru a gradiometru a výpočet tíhového zrychlení/gradientu,
 - hydrologické efekty na měření supravodivým gravimetrem,
 - použití Stokesových harmonických koeficientů globálních tíhových modelů (GRACE, GOCE, EGM) pro výpočet geofyzikálních a geodetických veličin – tíhového zrychlení, tíhových anomálií, výškových anomálií a výšek geoidu.
- červen 2013: Northumbria University: konzultace informačního modelování budov, účast na soutěži BIM Competition, GIS analýzy, prof. Steven Lockley.

Projekty:

- Centrum kompetence TA ČR: Inteligentní regiony: vedoucí balíčku WP2 Informace pro inteligentní regiony. Posouzení udržitelnosti inteligentních sídel a budov, doba řešení leden 2014 až prosinec 2019.
- OPVaVPI Regionální VaV centra – AdMaS - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie: PhD student, odpovědnost za přípravu technických specifikací vybavení centra. Práce na projektech. Doba řešení leden 2011 až prosinec 2014.
- Národní program udržitelnosti, AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie. Junior Researcher.
- OPVK Inovace studijních programů Geodézie a kartografie, technik ve výzkumu a vývoji. Doba řešení 2010 až 2013.

Projekty specifického výzkumu:

- Vývoj přenosného mapovacího systému pro použití v interiérech (řešitel), zahájení: 01.01.2016, ukončení: 31.12.2016
- Metodika tvorby informačního modelu města na bázi 3D GIS (řešitel), zahájení: 01.01.2015, ukončení: 31.12.2015
- Určování nadmořských výšek v horských oblastech (spoluřešitel), zahájení: 01.01.2015, ukončení: 31.12.2015
- Výpočet kvazigeoidu na území masivu Kralický Sněžník z geodeticko - astronomických měření (spoluřešitel), zahájení: 01.01.2014, ukončení: 31.12.2014
- Nové satelitní technologie a jejich využití při sledování geodynamických jevů a mapování hustotních nehomogenit v zemské kůře (spoluřešitel), zahájení: 01.01.2013, ukončení: 31.12.2013

- Vývoj zařízení a metod pro absolutní kalibraci antén GNSS (spoluřešitel), zahájení: 01.01.2011, ukončení: 31.12.2012
- Vývoj a aplikace automatizovaných měřících systémů v geodézii (spoluřešitel), zahájení: 01.01.2011, ukončení: 31.12.2012
- Nové satelitní technologie a jejich využití při sledování geodynamických jevů a mapování hustotních nehomogenit v zemské kůře (spoluřešitel), zahájení: 01.01.2013, ukončení: 31.12.2013
- Rozvoj nových metod měření v geodézii (spoluřešitel)
- Vývoj a aplikace automatizovaných měřících systémů v geodézii (spoluřešitel)
- Vývoj zařízení a metod pro absolutní kalibraci antén GNSS (spoluřešitel)
- Řešení problematiky mapování surovinových zdrojů a geodynamiky rizikových oblastí s využitím nejmodernějších metod fyzikální geodézie (spoluřešitel)
- Studium tíhového pole na území Brna a okolí (řešitel)
 - astronomická měření v síti AGNES (přístroj MAAS-1) a určení tížnicových odchylek a lokálního modelu kvazigeoidu na území města Brna,
 - prostorové analýzy a příprava a správa prostorových dat v prostředí ArcGIS (ESRI),
- účast na družicové měřické kampani pro lokální geodynamiku v centrální části Stolových hor (česko-polská spolupráce)
 - CACON, KAPŁON, KONTNY, WEIGEL, ŠVÁBENSKÝ, KOPECKÝ: RECENT LOCAL GEODYNAMICS IN THE CENTRAL PART OF THE STOLOWE MTS. In *Acta Geodynamica et Geomateriala*. Vol. 7, No. 3 (159), 335–342, 2010.
- účast na geodetických a geofyzikálních měřeních v tektonické oblasti Diendorf-Čebín
 - POSPÍŠIL, ŠVÁBENSKÝ, WEIGEL, WITISKA: GEODETIC AND GEOPHYSICAL ANALYSES OF DIENDORF-ČEBÍN TECTONIC ZONE. In *Acta Geodynamica et Geomateriala*. Vol. 6, No. 3 (159), 309–321, 2009.

Publikace:

- KRATOCHVÍL, R.; MACHOTKA, R.; VOLAŘÍK, T.; KURUC, M.; JURČÍK, J. Porovnání profilů kvazigeoidu určených různými metodami. GEODETICKÝ A KARTOGRAFICKÝ OBZOR, 2016, roč. 62, č. 6, s. 117-125. ISSN: 1805-7446.
- KRATOCHVÍL, R.; VOLAŘÍK, T. Mobilní Automatizovaný Astronomický Systém Jako Alternativa Nivelaci v Horském Prostředí. In Sborník abstraktů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015. s. 1-7. ISBN: 978-80-214-5091- 2.
- VOLAŘÍK, T.; KURUC, M.; ČERNÝ, M. FROM 3D POINT CLOUD TO INTELLIGENT CITY MODEL. In 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. International multidisciplinary geoconference SGEM. 2015. s. 1-12. ISBN: 978-619-7105-36- 0. ISSN:

1314- 2704.

- WAWERKA, R.; VOLAŘÍK, T.; DERMEKOVÁ, S. Smart housing estate: implementation of ICT user friendly application to raise inhabitant' s sustainability awareness. In 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2015. International multidisciplinary geoconference SGEM. Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Conference proceedings, Volume I. Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 51 "Alexander Malinov" Blvd., 1712 Sofia, Bulgaria, 2015. s. 793-799. ISBN: 978-619-7105-34- 6. ISSN: 1314- 2704.
- MACHOTKA, R.; KRATOCHVÍL, R.; KURUC, M.; VOLAŘÍK, T.; JURČÍK, J. MOBILNÍ AUTOMATICKÝ ASTRONOMICKÝ SYSTÉM - EFEKTIVNÍ NÁSTROJ PRO VÝPOČET ASTRONOMICKO GEODETICKÝCH TÍŽNICOVÝCH ODCHYLEK. Berlín: Stowarzyszenie Geodetów Polskich, 2014. s. 26-26. ISBN: 978-83-61576-29- 7.
- VOLAŘÍK, T.; DERMEKOVÁ, S.; WAWERKA, R.; SUKUP, J. Smart housing estate: multidisciplinary data for environmental modelling. In SGEM 2014. International multidisciplinary geoconference SGEM. 1. Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Ltd., 2014. s. 777-784. ISBN: 978-619-7105-12- 4. ISSN: 1314- 2704.
- KURUC, M.; MACHOTKA, R.; VOLAŘÍK, T. Evaluation of quasigeoid model created by GNSS/ levelling method. Ladek-Zdrój, Poland: 2014. s. 21-21.
- POSPÍŠIL, L.; ČERNOTA, P.; MIKUŠKA, J.; VOLAŘÍK, T.; POSPÍŠIL, J.; PAPČO, J.; ZÁHOREC, P. EXPERIMENTAL GRAVITY AND VERTICAL GRAVITY GRADIENT MEASUREMENTS IN MINE SHAFT STONAVA (Sto-Su-1), OSTRAVA-KARVINÁ DISTRICT, CZECH REPUBLIC. In Nové poznatky z realizácie a interpretácie geodetických meraní. 1. Bratislava: SSGK, 2013. s. 155-157. ISBN: 978-80-86433-58- 5.
- VOLAŘÍK, T.; MACHOTKA, R.; KURUC, M.; PUCHRIK, L.; JURČÍK, J. Determination of quasigeoid in local network using modern astrogeodetic technologies. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 2013, roč. 10, č. 4, s. 437-442. ISSN: 1214- 9705.
- VOLAŘÍK, T.; BAUMANN, H.; FRANCIS, O.; PÁLINKÁŠ, V.; KOSTELECKÝ, J. et al. The European Comparison of Absolute Gravimeters 2011 (ECAG-2011) in Walferdange, Luxembourg: results and recommendations. METROLOGIA, 2013, roč. 50, č. 3, s. 257-268. ISSN: 0026- 1394.
- KALINA, M.; KRATOCHVÍL, R.; KURUC, M.; VOLAŘÍK, T. Polohovací zařízení pro kalibraci GNSS antén. In Juniorstav 2013, Sborník anotací. Brno: Ing. Vladislav Pokorný - LITERA BRNO, 2013. s. 1-5. ISBN: 978-80-214-4669- 4.
- MACHOTKA, R.; VOLAŘÍK, T.; KURUC, M.; PUCHRIK, L. Determination of quasigeoid in local network using modern astrogeodetic technologies. The 13th Czech-Polish Workshop, On Recent Geodynamics of The Sudety Mts. and Adjacent Areas Abstracts. Wroclaw: 2012. s. 53-53.
- VOLAŘÍK, T. KOREKCE ATMOSFERICKÝCH TÍHOVÝCH ÚČINKŮ NA MĚŘENÍ SUPRAVODIVÝM GRAVIMETREM. In Juniorstav 2011. Brno: 2011. s. 1-7. ISBN: 978-80-214-4232- 0.
- VOLAŘÍK, T. Gravity effect of the atmosphere on the superconducting gravimeter data. In XV Miedzynarodowa Konferencja Studenckich Kól Naukowych i XXVII Sejmik SKN. 1. Wroclaw: Wydawnictwo Uniwersytetu

- Przyrodniczego we Wrocławiu, 2010. s. 87-87. ISBN: 978-83-60574-91- 1.
- KURUC, M.; PUCHRIK, L.; VOLAŘÍK, T. Srovnání RTK služeb poskytovaných sítěmi permanentních stanic na území Brna. In Juniorstav 2010, Sborník anotací. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. s. 1-9. ISBN: 978-80-214-4042- 5.
 - VOLAŘÍK, T.; KURUC, M. Opakovatelnost určení prostorové polohy metodou RTK. In Seminář s mezinárodní účastí, GNSS v geodetické praxi, Sborník referátů. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2011. s. 64-71. ISBN: 978-80-86433-52- 3.
 - PUCHRIK, L.; VOLAŘÍK, T.; KURUC, M. TESTOVÁNÍ RTK SLUŽEB POSKYTOVANÝCH SÍTĚMI PERMANENTNÍCH GNSS STANIC PROVOZOVANÝCH V ČESKÉ REPUBLICE. In XVI. mezinárodné slovensko-poľsko-české geodetické dni, zborník anotácií. Bratislava: Slovenská spoločnosť geodetov a kartografů, 2010. s. 1-10. ISBN: 978-80-969692-5- 8.
 - KURUC, M.; PUCHRIK, L.; VOLAŘÍK, T. Srovnání RTK služeb poskytovaných sítěmi GNSS permanentních stanic na území ČR. In Sborník referátů: Družicové metody v geodézii a katastru. Brno: ECON publishing, s.r.o., 2010. s. 86-94. ISBN: 978-80-86433-46- 2.
 - VOLAŘÍK, T. VYUŽITÍ PROSTŘEDÍ GIS PRO ANALÝZU PROSTOROVÝCH VZTAHŮ SÍTĚ CZEPOS. In Juniorstav 2010 sborník anotací. Brno: Akademické nakladatelství CERM s. r. o., 2010. s. 1-6. ISBN: 978-80-214-4042- 5.

Jazykové znalosti:

- angličtina – výborná,
- ruština – dobrá,
- francouzština – základy.

Další znalosti a dovednosti:

- programování v C++ a C# a vývoj vlastních aplikací především pro zpracování ASCII souborů z geofyzikálních přístrojů a zpracování měřených dat,
- vývoj vlastních programů v prostředí MATLAB: zpracování časových řad, spektrální analýza, filtrování dat,
- webové technologie HTML, CSS, ASP.NET, MySQL, MS SQL, OpenLayers
- databázové systémy, návrh datového modelu a SQL, prostorová databáze PostGIS
- prostorové analýzy v prostředí ArcGIS (ESRI), kreslení v CAD MicroStation (Bentley), zpracování prostorových mračen bodů ze skenerů do 3D modelů a BIM

Abstract

This dissertation is focused on a study of selected environmental effects influencing terrestrial gravity observations. Global geopotential models were used to compute quantities of the disturbing gravity field and its variations during time period. Furthermore, analyses of an atmospherical and hydrological effects on the gravity observations were provided. The computation was realized at the station Pecný, however the concept was proved and compared with data from station Strasbourg. Consequently, the results were discussed with respect to quasigeoid modelling established from gravity and astrogeodetic measurements. The result and recommendations for future research are exposed.

