

NEISTOTA V URČENÍ KOREKCIÍ ABSOLÚTNÝCH GRAVIMETRICKÝCH MERANÍ

UNCERTAINTY IN THE DETERMINATION OF ABSOLUTE GRAVITY CORRECTIONS

Michal Mikolaj¹, Marcel Mojzeš²

Abstract

Absolute gravimeters are measuring the free-fall acceleration. This acceleration is transformed to gravity through gravity corrections. The resulting precision of the gravity is strongly influenced by the accuracy of the correction determination. The gravity is standardly corrected for earth and ocean tides as well as the atmospheric correction and the effect of polar motion. The gravity is also reduced to the height of the station using the vertical gravity gradient. The purpose of this paper is to analyze the errors which are introduced to the gravity through corrections. Empirically estimated standard deviation of standard correction is approximately $6 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-2}$. The largest error comes from the reduction of the determined gravity to a certain height.

Kľúčové slová

Chyby, gravitačné zrýchlenie, slapy, atmosféra, presnosť

1 ÚVOD

Možnosť využitia absolútnych gravimetrických meraní narastá so zvyšujúcou sa presnosťou určenia tiažového zrýchlenia. Výsledky gravimetrických meraní nájdu uplatnenie hlavne pri tvorbe referenčných rámcov a v oblasti geodynamiky. Súčasná meracia technika poskytuje presnosť na úrovni $1 \mu\text{Gal}$ ($10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Táto hodnota neobsahuje chyby, ktoré sú do meraní zavádzané prostredníctvom korekcií. Práve korekcie prevádzajú meranú hodnotu zrýchlenia voľného pádu na tiažové zrýchlenie. Absolútne gravimetrické merania sú štandardne redukované o vplyv slapov, atmosféry a zmeny polohy pólu. Takto určená hodnota tiažového zrýchlenia je navyše často redukovaná na výškovú úroveň stabilizovaného bodu. Prevod medzi jednotlivými výškovými úrovňami je realizovaný pomocou vertikálneho gradientu tiažového zrýchlenia, ktorého presnosť je pre výslednú strednú chybu redukovaného tiažového zrýchlenia kľúčová. Účelom článku je zhrnúť súčasný stav výpočtu korekcií absolútnych gravimetrických meraní a zároveň empiricky analyzovať možné chyby pri zavádzaní spomínaných korekcií. Vzhľadom na dostupnosť a časové obdobie merania, je

¹ Ing. Michal Mikolaj, STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geodetických základov, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, Slovenská republika, +421(2)59274345
michal.mikolaj@stuba.sk

² Doc. Ing. Marcel Mojzeš, PhD., STU v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra geodetických základov, Radlinského 11, 813 68 Bratislava, Slovenská republika, +421(2)59274536
marcel.mojzes@stuba.sk

výhodné pre tieto účely využiť výsledky supravodivých gravimetrov projektu GGP (<http://isdc.gfz-potsdam.de/>). Konkrétne sú použité merania na staniciach Pecný, Viedeň a Wettzell.

2 VPLYV PRESNOSTI GRAVIMERA FG5

Pre analýzu presnosti je v tomto prípade študovaný len absolútny gravimeter FG5. Dôvodom je fakt, že prevažná väčšina meraní vykonávaných v posledných desiatich rokoch je realizovaná práve gravimetrami FG5. Inak tomu nie je ani na území Slovenskej republiky, kde boli merania realizované absolútnym gravimetrom FG5 no. 215 z VÚGTK geodetického observatória Pecný. Výsledky meraní spomínaným gravimetrom obsahujú informácie o vnútornej a vonkajšej presnosti. Vnútorná presnosť určenia absolútneho tiažového zrýchlenia sa vo väčšine prípadov pohybuje na úrovni $0.3 \mu\text{Gal}$ (*Palinkáš a Kostecký, 2010b*). Z porovnania výsledkov získaných súčasným meraním skupiny gravimetrov na jednom mieste možno získať informáciu o vonkajšej presnosti. Tá sa pohybuje v rozmedzí $2 - 2.5 \mu\text{Gal}$ (*Francis et al., 2004; Francis et al., 2010; Vitushkin et al., 2010*) a vyjadruje ofset medzi jednotlivými gravimetrami. Ako bolo spomenuté, v prípade merania na území Slovenska je používaný jeden absolútny gravimeter. Z tohto dôvodu je zaujímavá informácia o dlhodobej reprodukovateľnosti, ktorá je v prípade gravimetra FG5 no. 215 $1.2 \mu\text{Gal}$ (*Palinkáš a Kostecký, 2010a*). Táto stredná chyba zahŕňa vplyv prístrojovej chyby ako aj vplyv chyby určenia štandardných korekcií. V tomto prípade je podiel chybného výpočtu korekcií odhadnutý na $1 \mu\text{Gal}$. Prístrojová chyba je odhadnutá na $0.7 \mu\text{Gal}$. Tento odhad je optimistický a v rozpore s odhadom prístrojovej chyby gravimetra FG5 z roku 1995, kde je stredná chyba $1.1 \mu\text{Gal}$ (*Niebauer et al., 1995*). Hlavný cieľ, ktorým je určovať tiažové zrýchlenie s presnosťou lepšou ako $1 \mu\text{Gal}$, čo by nám umožnilo detekovať zmeny vo výške na úrovni 3 mm , je v súčasnej dobe nedosiahnuteľný. Spomínané hodnoty navyše neobsahujú informáciu o systematických chybách.

Potlačenie chýb, ktoré výrazne ovplyvňujú výslednú hodnotu prístrojovej chyby (Coriolisov efekt, tzv. Air – Gap modulation efekt, vplyv externého magnetického poľa a iné) sľubuje nový gravimeter s označením FG5 – X (<http://www.microglacoste.com/fg5x.php>).

3 ŠTANDARDNÉ KOREKcie

Pod štandardnými korekciami budeme rozumieť korekciu zemských a oceánskych slapov, atmosférickú korekciu, ako aj korekciu vyplývajúcu zo zmeny odstredivého zrýchlenia vplyvom zmeny polohy pólu. Prostredníctvom týchto korekcií sa prevádza zrýchlenie voľného pádu na tiažové zrýchlenie. Úlohou korekcií je vziať hodnotu meraní k určitej referenčnej hodnote. Referenčnou hodnotou môže byť Zem bez účinkov nebeských telies, štandardná atmosféra alebo referenčný pól rotácie. Výhodou takto zadefinovaných referenčných hodnôt je možnosť porovnávania a interpretácie hodnôt získaných v rôznych časových obdobiach.

3.1 Slapová korekcia

Ako prvý je analyzovaný účinok nebeských telies, ktoré označujeme ako slapy. Slapová korekcia dosahuje pri výpočte štandardných korekcií spravidla najväčšiu amplitúdu. Samotný výpočet slapov sa vykonáva pomocou koeficientov slapových vln, pričom v gravimetrii sa používa slapový systém zero – tide (*IAG Resolution No. 9, 1983*). Slapové koeficienty sa použijú pri rozvoji slapového potenciálu, v tomto prípade pri rozvoji podľa Tamuru (*Tamura, 1987*). Z analytického hľadiska nám tento prístup zaručuje presnosť $0.01 \mu\text{Gal}$ (*Wilhelm et al., 1997*).

Chyby spojené so slapovou korekciou pramena hlavne z použitia nesprávnych koeficientov slapových vln. Korektné odstránenie slapových efektov vyžaduje odhad slapových koeficientov v mieste pozorovania. To však z praktického hľadiska nie je možné a pre body na území Slovenska sa používajú koeficienty slapových vln určených na Geodetickom observatóriu Pecný (*Palinkáš a Kostelecký, 2010b*). K získaniu informácie o vhodnosti použitia slapových koeficientov pre miesta vzdialené stovky kilometrov od pôvodného miesta určenia, bol vykonaný výpočet porovnávajúci korekcie určené z rôznych koeficientov slapových vln. Konkrétne boli použité koeficienty pre stanice Pecný, Viedeň a Wettzell. Pre porovnanie je zároveň použitý teoretický slapový model WDD (*Dehand et al., 1999*) generovaný v prostredí programu TSoft (*Van Camp et al., 2005*), resp. model oceánskych slapov GOT00.2 (*Ray, 1999*) (<http://froste.oso.chalmers.se/loading/>). Výsledky sú zobrazené v tabuľke č. 1. Prvý riadok určuje miesto výpočtu a zároveň referenčnú hodnotu určenú z miestnych slapových koeficientov. V druhom riadku sú potom názvy staníc, kde boli koeficienty odvodené. Tie boli použité pre výpočet korekcie v mieste výpočtu a hlavné štatistické ukazovatele rozdielov jednotlivých korekcií sú potom zobrazené v ďalších riadkoch. Dôležité je spomenúť, že pre všetky prípady s výnimkou teoretického modelu, sú použité identické koeficienty pre slapy s frekvenciou nižšou ako 0.50 cpd (cyklov za deň). Slapovým vlnám vo frekvenčnom pásme 4 dni až 19.5 roka je priradený amplitúdový faktor 1.16. Tieto vlny dosahujú za 3 roky pozorovania amplitúdu približne 10 μGal . V niektorých prípadoch sa spomínanému frekvenčnému pásmu pridáva amplitúdový faktor 1.164, ktorý tak v tomto prípade zmení výsledok len nepatrne (0.04 μGal).

Výsledky z tabuľky 1 potvrdzujú, že slapové koeficienty odvodené na určitej stanici možno použiť pre stanice vzdialené stovky kilometrov, pričom merania na Slovensku je vzhľadom na vzdialenosť výhodnejšie redukovať s využitím slapových koeficientov získaných pre Viedeň. V takomto prípade by sme mohli predpokladať, že stredná chyba určenia slapovej korekcie je na úrovni 0.2 μGal . Kombináciou slapového modelu WDD a GOT00.2 vnášame do meraní výraznejšie chyby. Netreba spomínať, že slapové koeficienty sú v daných miestach odvodené s určitou strednou chybou, ktorá v tomto prípade nie je braná do úvahy.

Tab. 1 Rozdiely slapových korekcií určených na základe rôznych koeficientov slapových vln

μGal	Viedeň	Viedeň	Viedeň	Wettzell	Pecný	Pecný
	Pecný	WDD + GOT00.2	Wettzell	WDD + GOT00.2	Wettzell	DDW + GOT00.2
SD	0.10	0.45	0.18	0.40	0.09	0.50
max	0.24	1.06	0.40	0.93	0.24	1.27
min	-0.22	-1.36	-0.39	-1.37	-0.23	-1.43

3.2 Atmosférická korekcia

Prostredníctvom atmosférickej korekcie sa odstraňujú účinky variácie atmosférického tlaku, resp. presunov a zmien atmosférických hmôt. Potrebné je odstrániť priame účinky atmosféry ako aj zmeny vo výške spôsobené deformáciou zemského povrchu pod vplyvom atmosféry. Tento komplexný problém je v prípade absolútnych gravimetrických meraní riešený relatívne jednoduchým spôsobom. K výpočtu korekcie sa využíva empirický vzorec prevládajúci variáciu tlaku na zmeny tiažového zrýchlenia. Použité sú vzťahy 1 – 2 (*Torge, 1989*). Referenčnou hodnotou je v tomto prípade štandardná atmosféra (2). Sybol α vo vzorci (1) reprezentuje regresný parameter.

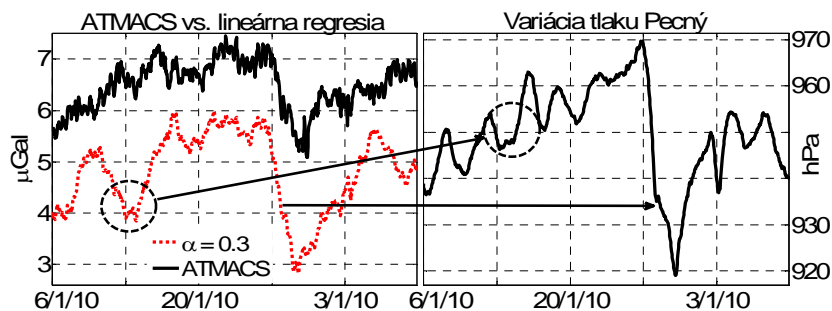
$$dg_{ATM} = \alpha(p - p_0) \quad (1)$$

$$p_0 = 1013.25 \left(1 - \frac{0.0065H}{288.15} \right)^{5.2559} \quad [hPa] \quad (2)$$

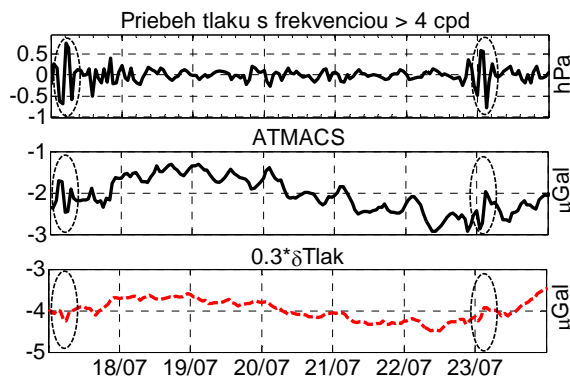
Na základe rezolúcie I.A.G. (*IAG Resolution No. 9, 1983*) je odporúčaný parameter $0.3 \mu\text{Gal/hPa}$. Regresný parameter je však závislý od miesta a času pozorovania ako aj od frekvencie variácie tlaku (*Meurers, 2004*). Z tohto dôvodu by bol v ideálnom prípade určený regresný parameter pre každé miesto pozorovania zvlášť.

Nevýhodou použitia vzorcov 1 – 2 je aj fakt, že pre výpočet celkovej atmosférickej korekcie je použitý len miestne meraný tlak. Korekcia tak neodráža regionálnu a globálnu variáciu atmosféry. Oveľa sofistikovanejší prístup k výpočtu atmosférickej korekcie je použitý pri modeli nazývanom ATMACS (*Klugel a Wziontek, 2009*). Jedná sa o priestorové modelovanie atmosférickej korekcie s využitím meteorologických modelov pokrývajúcich celú Zem. Poskytovaná služba (<http://atmacs.bkg.bund.de/docs/data.php>) však pokrýva len vybrané stanice projektu GGP. Lepšie výsledky získané pomocou 3D modelovania je možné demonštrovať na obrázku č. 1. Štandardná odchýlka rozdielu medzi modelom ATMACS a lineárnym regresným parametrom 0.3 pre body Wetzell a Pecný je $0.4 \mu\text{Gal}$ s maximálnymi rozdielmi do $1.8 \mu\text{Gal}$. Model ATMACS nie je bezchybný a stredná chyba je tak pravdepodobne vyššia. Slabou stránkou modelu ATMACS je rozlíšenie 6 hodín. Nevýhodu nízkeho časového rozlíšenia vstupných dát modelu ATMACS možno demonštrovať na obrázku č. 2, kde je vykreslený priebeh tiažového zrýchlenia získaný aplikáciou atmosférickej korekcie ATMACS, resp. pomocou vzorca (1). Zároveň je v obrázku č. 2 znázornená variácia tlaku získaná odfiltrovaním nízkofrekvenčnej zložky ($< 4 \text{ cpd} \sim 6 \text{ hod}$). Je teda výhodné kombinovať poskytované výsledky modelu ATMACS s lokálne meranými hodnotami tlaku.

Od roku 2010 je pre absolútny gravimetrický bod Modra rozsah rozdielu ($p - p_0$) 54 hPa . Zmenu $1 \mu\text{Gal}$ vyvolá v tomto prípade zmena lineárneho regresného parametra o $0.018 \mu\text{Gal/hPa}$, čo len potvrdzuje, že výpočet atmosférickej korekcie je z hľadiska presnosti kritický.



Obr. 1 Variácia tiažového zrýchlenia po odstránení atmosférickej korekcie pomocou modelu AMACS, resp. lineárnou regresiou a korelácia s tlakom.



Obr. 2 Variácia tiažového zrýchlenia po odstránení atmosférickej korekcie pomocou modelu AMACS, resp. lineárnou regresiou.

3.3 Korekcia z polohy pólu

Z hľadiska veľkosti amplitúdy korekcie možno na tretie miesto zaradiť korekciu vyplývajúcu zo zmeny polohy pólu. Poloha pólu sa dá opísať ako súčet dvoch kužeľovitých pohybov rotačnej osi Zeme. Jedným pohybom je Chandler Wobble s periódou približne 432 dní. Perióda druhého kužeľovitého pohybu, s menším otváracím uhlom, je približne jeden rok. Z meraní vykonávaných prevažne metódou VLBI je tiež badateľný lineárny trend. Zmena tiažového zrýchlenia pramení zo zmeny odstredivého zrýchlenia. Korekcia vyplýva zo vzťahu pre zmenu tiažového zrýchlenia v závislosti od zmeny zemepisných súradníc (3) (*Schweydar, 1917*). Súradnice polohy pólu x , y sú poskytované službou IERS (http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html?__nnn=true). Hodnoty korekcie pre skutočnú Zem dostaneme vynásobením vzťahu (3) amplitúdovým faktorom δ . Práve voľba faktora δ predstavuje najväčší problém, nakoľko uhlovú rýchlosť Zeme ω , polomer r , polohu pólu a súradnice miesta ϕ , λ poznáme s oveľa vyššou presnosťou, než je pre výpočet nutné.

$$dg_{PM}^{Rigid} = -\omega^2 r (x \cos \lambda + y \sin \lambda) \sin 2\phi \quad (3)$$

Ako bolo spomínané, poloha pólu je súčtom dvoch periodických variácií s rozličnými periódami. Amplitúdový faktor je však frekvenčne závislý a jeho určení sa venuje viacerým publikáciám (*Xu et al., 2004; Ducarme et al., 2005; Harnisch a Harnisch, 2009*). Problematické je hlavne určení amplitúdového faktora pre ročnú periódu nakoľko merania sú v tejto frekvenčnej oblasti zašumené prevažne environmentálnymi signálmi. Zhodu však spomínané publikácie nedosahujú ani pri určení δ pre Chandlerovu periódu. Rozdiel medzi prvými dvoma článkami pre $\delta_{Chandler}$ je 0.02. Štandardne sa korekcia absolútnych gravimetrických meraní nerozdeľuje na dve variácie a faktor sa volí $\delta = 1.16$. Stretnúť sa môžeme aj s faktorom $\delta = 1.164$. Rozsah vypočítaný pre pevnú Zem zo vzorca (3) v rokoch 2003 – 2011 pre bod Modra je 7.6 μGal . Desatinu μGal v korekcii teda zapríčiní až rozdielny faktor 0.013. Tieto výsledky sú uspokojivé a presnosť výpočtu korekcie z variácie polohy pólu je postačujúca.

4 VERTIKÁLNY GRADIENT TIAŽOVÉHO ZRÝCHLENIA

Tiažové zrýchlenie určené absolútnym gravimetrom a následným aplikovaním štandardných korekcií možno použiť pri tvorbe referenčných rámcov. Body referenčných rámcov sú však prevažne stabilizované vo výškovej úrovni podlahy. Samotné merania gravimetrom FG5 prebiehajú väčšinou vo výškovom rozmedzí 1.1 – 1.3 m nad bodom a výsledná hodnota

tiažového zrýchlenia je vzťahnutá k efektívnej výške prístroja, t.j. 1.22 m (*Pálinkáš a Kostecký, 2010b*). Z tejto výšky sa určená hodnota prevádza pomocou vertikálneho gradientu tiažového zrýchlenia na výškovú úroveň bodu. Pre samotný výpočet tiažového zrýchlenia v určitej výškovej úrovni používame vzorec (4). V tomto prípade predpokladáme

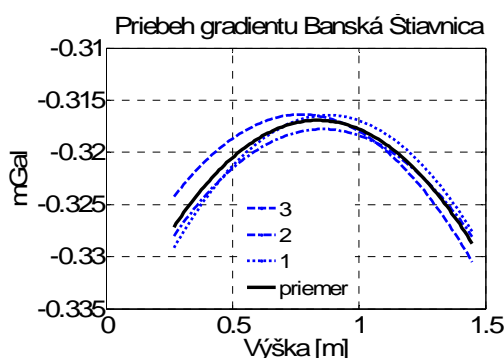
konštantnú hodnotu gradientu (∇g_0). Pri strednej chybe určenia prevýšenia 0.5 mm

a požiadavky na určenie hodnoty g_0 s chybou 1 μGal (g_{Mer} bez chyby) musíme určiť gradient s presnosťou 0.8 $\mu\text{Gal/m}$. Praktické merania vertikálneho gradientu tiažového zrýchlenia, resp. merania rozdielov tiažového zrýchlenia medzi jednotlivými výškovými úrovňami, ukazujú, že spomínaná presnosť 0.8 $\mu\text{Gal/m}$ je takmer nedosiahnuteľná. Pre bod Modra je štandardná odchýlka konštantného gradientu meraného v rôznych epochách 1.9 $\mu\text{Gal/m}$ (*Kučerová, 2011*).

Gradient tiažového zrýchlenia vo svojej podstate nie je konštantný. Dôkazom môžu byť aj výsledky meraní v Banskej Štiavnici, kde bol z dôvodu budovania nového absolútneho gravimetrického bodu zameraný gradient v priebehu 2 dní trikrát. Takto získaný gradient vykazuje kvadratický priebeh (obrázok 3). Jednou z hlavných príčin takéhoto priebehu môže byť účinok blízkych stien budovy, v ktorej sa bod nachádza. Ak meranú hodnotu tiažového zrýchlenia preniesieme z výšky 1.22 m na nulovú úroveň pomocou konštantného a kvadratického gradientu (vzorec (5)), tak získame rozdiel 2.3 μGal . Otázkou je nakoľko dokáže gradient určený v rozsahu výšok 27 – 147 cm (merané gravimetrom CG-5) reprezentovať hodnoty v nulovej výške. Práve v rozsahu od 27 do 0 cm dochádza pri výpočte k zväčšovaniu rozdielu medzi jednotlivými výpočtami. V rozsahu výšok 27 cm až 147 cm je rozdiel medzi výpočtom s konštantným a kvadratickým gradientom do 1 μGal . S uvažovaním hore uvedených príkladov, možno povedať, že pri prenášaní meranej hodnoty absolútneho tiažového zrýchlenia na výškovú úroveň bodu dochádza k najväčším chybám.

$$g_0 = g_{\text{Mer}} + \nabla g_0 (h_0 - h_{\text{Mer}}) \quad (4)$$

$$g_0 = g_{\text{Mer}} + \nabla g_0 (h_0 - h_{\text{Mer}}) + \nabla g_1 (h_0 - h_{\text{Mer}})^2 + \nabla g_2 (h_0 - h_{\text{Mer}})^3 \quad (5)$$



Obr. 3 Priebeh vertikálneho gradientu aproximovaného polynómom 2. stupňa na stanici Banská Štiavnica meraného v troch epochách.

5 ZÁVER

V príspevku boli empiricky analyzované chyby zavádzané do absolútnych gravimetrických meraní prostredníctvom korekcií. Na základe dosiahnutých výsledkov možno povedať, že v prípade aplikácie štandardných korekcií sa najväčšej chyby dopúšťame pri atmosférickej korekcii. Pri výpočte korekcie pomocou jednoduchého empirického vzorca prekročí stredná chyba výpočtu korekcie hranicu $0.4 \mu\text{Gal}$. V tomto prípade je najlepším riešením modelovanie atmosférických účinkov pomocou analytických vzorcov a meteorologických modelov. V prípade slapovej korekcie je na území Slovenska najvýhodnejšie používať slapové koeficienty získané na observatóriu vo Viedni. Stredná chyba získaná z porovnania korekcií vypočítaných z rôznych koeficientov slapových vln je $0.2 \mu\text{Gal}$. Ako postačujúci sa javí súčasný prístup k výpočtu korekcie z polohy pólu, kde stredná chyba takto určenej korekcie neprekročí $0.1 \mu\text{Gal}$.

Ak zoberieme do úvahy prístrojovú chybu $1.1 \mu\text{Gal}$, tak stredná chyba tiažového zrýchlenia po aplikácii štandardných korekcií prekročí hodnotu $1.2 \mu\text{Gal}$. Táto hodnota samozrejme nezahŕňa systematické chyby. V prípade potreby prepočtu určenej hodnoty tiažového zrýchlenia na inú výškovú úroveň dochádza k najväčším chybám. Z tohto dôvodu je potrebné pri budovaní referenčných rámcov uvažovať o udávaní hodnôt tiažového zrýchlenia v rôznych výškových úrovniach nad bodom.

Pod'akovanie

Autori ďakujú Agentúre Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR pre štrukturálne fondy EÚ a Slovenskej technickej univerzite v Bratislave za finančnú podporu Projektu ITMS 26220220108.

LITERATÚRA

- Dehant V., Defraigne P., Wahr, J.M., 1999: Tides for a convective Earth. In: *Journal of Geophysical Research.*, Vol. 104, No. B1, pp. 1035-1058.
- Ducarme, B., Venedikov, A. P., Arnos, J., Chen, X. D., Sun, H. P., Vieira, R., 2005: Global analysis of the GGP superconducting gravimeters network for the estimation of the pole tide gravimetric amplitude factor. In: *Journal of Geodynamics*, Vol. 41, Issue 1 - 3, pp. 334-344.
- Francis et al., 2010: European Comparison of absolute gravimeters in Walferdange of November 2007. In: *Gravity, Geoid and Earth Observation. International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 135, Part 1, pp. 31-35.
- Francis, O. et al., 2005: Results of the International Comparison of Absolute Gravimeters in Walferdange (Luxembourg) of November 2003 Gravity. In: *Geoid and Space Missions International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 129, Session 7, pp. 272-275.
- Harnisch, M., Harnisch, G., 2009: Polar Motion Influences in the Gravity Data Recorded by Superconducting Gravimeters. In: *Journal of Geodynamics*, Vol. 48, pp. 340 - 347.
- International Association of Geodesy (IAG), 1984: IAG Resolutions adopted at the XVIII General Assembly of the IUGG in Hamburg, August 1983. In: *Bulletin Geodesique*, Vol. 58.

- Klügel T., Wziontek H., 2009: Correcting gravimeters and tiltmeters for atmospheric mass attraction using operational weather models, In: *Journal of Geodynamics*, Vol. 48, Issues 3-5, pp. 204-210.
- Kučerová, E., 2011: Analýza gradientu tiažového zrýchlenia. *Diplomová práca*, Stavebná fakulta STU Bratislava, SvF-5330-39250. Bratislava.
- Meurers, B., 2004: Investigation of temporal gravity variations in SG-records. In: *Journal of Geodynamics*, Vol. 38, pp. 423-435.
- Niebauer, T. M., Sasagava, G.S., Faller, J.E., Hilt, R., Klopping, F., 1995: A new generation of absolute gravimeters. In: *Metrologia*, Vol. 32, pp. 159-180.
- Pálinkáš, V., Kostecký, J., 2010a: Metodika studia variací tíhového pole Země na základě absolutních měření tíhového zrychlení. *Studie č. 1165/2010*. Zdiby.
- Pálinkáš, V., Kostecký, J., 2010b: Absolutní měření tíhového zrychlení na Slovensku v roce 2010, *Technická zpráva č. 1166/2010*. Onřejov.
- Ray, R. D., 1999: A Global Ocean Tide Model From TOPEX/POSEIDON Altimetry: GOT99.2. In: *NASA Technical Memorandum 209478*. Greenbelt.
- Schweydar, W., 1917: Die Bewegung der Drehachse der elastischen Erde im Erdkörper und im Raume. In: *Astron. Nachrichten*, Vol. 203 (4855), pp. 101-116.
- Van Camp, M., Vauterin, P., 2005: Tsoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides, In: *Computers & Geosciences*, Vol. 31(5), pp. 631-640.
- Tamura, Y. A., 1989: Harmonic development of the tide-generating potential, In: *Bulletin d'Information des Marées Terrestres*, Vol. 99, pp. 6813-6855.
- Torge, W., 1989: *Gravimetry*. Berlin.
- Vitushkin et al., 2010: Results of the Seventh International Comparison of Absolute Gravimeters ICAG-2005 at the Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres. In: *Gravity, Geoid and Earth Observation. International Association of Geodesy Symposia*, Vol. 135, Part 1, pp. 47-53.
- Wilhelm, H., Zürn, W., Wenzel, H.G., 1997: *Tidal Phenomena (Lecture Notes in Earth Sciences)*. Berlin.
- Xu, J.-Q., Sun, H.-P., Yang, X.-F., 2004: A study of gravity variations caused by polar motion using superconducting gravimeter data from the GGP network. In: *Journal of Geodesy*, Vol. 78, Issue 3, pp. 201-209.