

Variácie ľadovcovej pokrývky vybraných ostrovov súostrovia Špicbergy z dát družicových misií GRACE a GRACE-Follow On

Ing. Barbora Korekáčová,
prof. Ing. Juraj Janák, PhD.,
Katedra globálnej geodézie
a geoinformatiky, Stavebná fakulta,
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Abstrakt

Družicové misie GRACE a GRACE-FO poskytujú dáta vhodné na modelovanie zmien tiažového poľa Zeme. Článok popisuje proces výpočtu časových variácií ľadovcovej hmoty na vybraných ostrovoch súostrovia Špicbergy, ktorá sa prejavuje variáciou tiažového poľa Zeme. Z globálnych geopotenciálnych modelov misií GRACE a GRACE-FO boli určené zmeny tiažového poľa v záujmovej oblasti vzhľadom k dlhodobému priemeru, vyjadrené v metrickej miere veličinou nazývanou ekvivalentná výška vodného stĺpca. Spomínaná misia GRACE a GRACE-FO nedokáže dostatočne presne odhadnúť geopotenciálne koeficienty stupňa 1, 2 a 3, a preto je jedným z cieľov článku posúdenie štatistickej významnosti rozdielov v modelovaní hmoty v prípade nahradenia týchto koeficientov. Použitie štatistického Studentovho testu ukázalo, či sa hodnoty vypočítané z pôvodných a modifikovaných globálnych geopotenciálnych modelov významne odlišujú. Výsledky sú percentuálne vyjadrené v článku. Hlavným cieľom bolo určiť z globálnych geopotenciálnych modelov GRACE alebo GRACE-FO v kombinácii s hydrologickým modelom GLDAS NOAH a modelom postglaciálneho izostatického vyrovnania založeného na ľadovcovej histórii ICE-5G časový rad znázorňujúci zmeny celkovej ľadovcovej hmoty pokrývajúcej štyri najväčšie ostrovy súostrovia Špicbergy a odhadnúť jej lineárny trend v zmysle ekvivalentnej výšky vodného stĺpca.

Ice Mass Variations of Selected Svalbard Archipelago Islands Based on GRACE and GRACE-Follow On Data

Abstract

GRACE and GRACE-FO satellite missions provide us with important data necessary for temporal gravity field variations modelling. This paper describes the computational process of ice mass variations of land ice on selected Svalbard archipelago islands derived from gravity field variations. Monthly GRACE and GRACE-FO global geopotential models were used to evaluate the gravity field variations relative to the long-term average, expressed in a metric measure by the quantity named equivalent water thickness. As the GRACE and GRACE-FO missions are not able to estimate accurately low-degree spherical harmonic coefficients of 1st, 2nd and 3rd order, one aim of the paper is to test, whether their replacement would cause statistically significant improvement in the evaluation. By applying statistical Student test, we determined whether there is a significant change in solutions based on original and modified models. Percentage results of the test are presented. The main aim of the paper was compilation of the ice mass variation time series in the area of selected Svalbard archipelago islands based on the combination of GRACE and GRACE-FO global geopotential models, global hydrological model GLDAS NOAH and GIA model ICE-5G and estimate the value of linear trend in terms of equivalent water thickness.

Keywords: gravity field variation, spherical harmonic coefficients, glacial isostatic adjustment, global hydrological model, ice mass balance

1. Úvod

Družicová misia GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) [1] bola na obežnú dráhu Zeme vynesená 17. 3. 2002 a svoju činnosť ukončila v roku 2017. Pokračujúca misia GRACE-Follow On (GRACE-FO) mapuje tiažové pole Zeme od 22. 5. 2018 až doteraz. Kombináciou dát družicových misií teda dokážeme s približne ročnou prestávkou modelovať a analyzovať geodynamické javy po dobu takmer dvadsiatich rokov.

Obe misie sú tvorené dvojicou družíc ktoré, obiehajú okolo zemského povrchu, veľmi presne merajú svoju vzájomnú vzdialenosť. Družicový pár reaguje na aktuálne tiažové pole Zeme spomalením alebo zrýchlením najprv jednej a následne druhej družice, čím dochádza k zmenám ich vzájomnej vzdialenosti.

Družice svoju konfiguráciu nad zemským povrchom zopakujú približne každých 30 dní. Z meraní ich vzájomných vzdialeností je preto možné zostaviť mesačné glo-

bálne geopotenciálne modely (GGM) tiažového poľa Zeme do vybraného stupňa a rádu sférických harmonických koeficientov (SHK). Spracovaním mesačných GGM získavame informáciu o mesačných zmenách v tiažovom poli Zeme, ktoré sú prevažne spôsobené presunmi hmôt v hydrosfére. Pri analýze prírodných javov sú najčastejšie používanými GGM modely do stupňa a rádu sférických harmonických koeficientov $n_{\max} = 60$, na základe ktorých dokážeme podľa [2] modelovať časové zmeny s priestorovým rozlíšením približne 300 km.

Cieľom práce je určenie variácií množstva ľadovcovej hmoty vyjadrenej v zmysle ekvivalentnej výšky vodného stĺpca v oblasti vybraných ostrovov súostrovia Špicbergy. Praktický experiment je realizovaný na základe globálnych geopotenciálnych modelov družicových misií GRACE a GRACE-FO s modifikovanými hodnotami vybraných sférických harmonických koeficientov (SHK). Pri výpočte boli použité údaje z globálnych hydrologických modelov a uvážený efekt postglaciálneho izostatického vyrovnania.

2. Dáta a metódy

Celkový gravitačný signál zachytený družicami misie GRACE je generovaný hmotami zemského telesa, hydrosféry a atmosféry. Pri spracovaní signálu do mesačných modelov tiažového poľa je vplyv atmosféry a oceánu odstránený ešte pred ich tvorbou, použitím 6-hodinových meteorologických modelov centra ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) [3].

Aby sme z gravitačného signálu obsiahnutého v tiažových modeloch Zeme získali len náš požadovaný parameter, ktorým je v tomto prípade variácia ľadovcovej hmoty (ΔIMB – Ice Mass Balance) vyjadrená v zmysle výšky vodného stĺpca pomocou jednotiek cm w.e. (w.e. – water equivalent), je potrebné vysporiadať sa aj so všetkými ostatnými prispievajúcimi parametrami, teda s gravitačným signálom litosféry a zostávajúcich zložiek hydrosféry.

2.1 Určenie variácií celkovej výšky vodného stĺpca z modelov tiažového poľa Zeme

Pri výpočte variácií ľadovcových hmôt bolo použitých 198 dekorelovaných mesačných modelov tiažového poľa Zeme spracovateľského centra CSR (Center for Space Research, The University of Texas in Austin) do stupňa a rádu SHK 60. Modely sú dostupné na webovej stránke služby ICGEM [4]. Pri analýzach geodynamických javov však tieto modely nie sú postačujúce v takej forme, v akej sú poskytované, a je potrebné ich modifikovať.

Súčasťou definície družicových misií GRACE a GRACE-FO je použitie geocentrického súradnicového systému. Jeho začiatok je totožný s dlhodobým priemerom polohy geocentra a sférické harmonické koeficienty prvého stupňa, vyjadrujúce umiestnenie telesa aproximujúceho Zem v rámci súradnicového systému, sú preto konštantné. Geocentrum ako hmotný stred Zeme však reaguje na presuny zemských hmôt zmenou svojej polohy v čase, čím zároveň dochádza k zmenám koeficientov prvého stupňa. Presuny geocentra (voči jeho fixnej polohe v geocentrickom súradnicovom systéme) je nutné uvážiť pri skúmaní javov súvisiacich s pohybom zemských hmôt. Jednou z metód, ktoré sa v súčasnosti využívajú pri monitorovaní polohy geocentra, je laserová lokácia družíc (SLR) [5]. Sférické harmonické koeficienty prvého stupňa ($C_{1,0}$, $C_{1,1}$, $S_{1,1}$) boli nahradené hodnotami z dátového súboru GRACE / GRACE-FO Geocenter Coefficients CSR RL06 [6], ktorý však nie je súčasťou oficiálnej dokumentácie družicových misií, a v súčasnosti nie je priebežne dopĺňaný so stále pribúdajúcimi mesačnými modelmi misie GRACE-FO.

Sférický harmonický koeficient $C_{2,0}$ súvisiaci so sploštním Zeme, je družicovými misiami GRACE a GRACE-FO určený s nedostatočnou presnosťou. Pri spracovaní dát misie GRACE je preto žiaduce jeho nahradenie presnejšie určenými hodnotami. Metóda, ktorá sa pri určovaní koeficientu $C_{2,0}$ ukázala ako spoľahlivejšia, je laserová lokácia družíc [7].

Rovnako aj v prípade koeficientu $C_{3,0}$ je vhodné nahradiť ho hodnotami určenými pomocou SLR. Dôvodom jeho nedostatočne presného určenia misiami GRACE alebo GRACE-FO sú výpadky vo fungovaní akcelerometrov na družiciach. Pomocou laserovej lokácie družíc však mohol byť sférický harmonický koeficient $C_{3,0}$ určený s lepšou presnosťou ako pomocou GRACE až po štarte družicovej misie LARES v roku 2012. Zavedenie korekcií koeficientu $C_{3,0}$ je dôležité najmä pri výpočtoch v oblasti Antarktídy [7].

Pri zmene koeficientov $C_{2,0}$ a $C_{3,0}$ bol použitý súbor koeficientov NASA GSFC SLR C20 and C30 solutions [7], ktoré sú určené na základe laserovej lokácie družíc LAGEOS-1, LAGEOS-2, Stella, Starlette, AJISAI, LARES a Larets [7]. Koeficienty $C_{2,0}$ sú dostupné pre celé obdobie trvania misií GRACE a GRACE-FO, koeficienty $C_{3,0}$ sú dostupné až od roku 2012, sú však taktiež aktualizované s pribúdajúcimi mesačnými geopotenciálnymi modelmi GRACE-FO.

Pomocou takto modifikovaných globálnych geopotenciálnych modelov je možný prepočet gravitačného signálu na jemu ekvivalentnú celkovú výšku vodného stĺpca, ktorú označujeme EWT – Equivalent Water Thickness. Aby sme získali časové variácie tejto veličiny (ΔEWT) vzhľadom k dlhodobému priemeru, od mesačných GGM odpočítavame referenčný model, ktorým bol v tejto práci statický model tiažového poľa Zeme GGM05C [8]. Výpočet ΔEWT bol vykonaný podľa vzťahu (14) uvedenom v [9] v prostredí softvéru GrafLab [10].

Aby sme zistili, či je dôsledok zmeny spomínaných sférických harmonických koeficientov štatisticky významný, bol za predpokladu normálneho rozdelenia pravdepodobnosti vykonaný Studentov test na overenie rovnosti stredných hodnôt. Testovali sme modely variácií EWT v oblasti Špicberských ostrovov, ktoré boli vypočítané na základe štyroch typov vstupných dát. Prvým typom boli globálne geopotenciálne modely v takej forme, v akej boli získané zo služby ICGEM [4], čiže iba z dát družicových misií GRACE alebo GRACE-FO. Pre zjednodušenie si tento typ vstupných dát označíme ako GGM0. Následne boli v týchto pôvodných mesačných modeloch nahradené koeficienty prvého stupňa $C_{1,0}$, $C_{1,1}$, $S_{1,1}$, čím sme získali druhý typ vstupných dát, ktorý označíme GGM1. V treťom type vstupných dát GGM2 boli v pôvodných globálnych geopotenciálnych modeloch nahradené sférické harmonické koeficienty $C_{1,0}$, $C_{1,1}$, $S_{1,1}$ a $C_{2,0}$ a v poslednom – GGM3, koeficienty $C_{1,0}$, $C_{1,1}$, $S_{1,1}$, $C_{2,0}$, $C_{3,0}$. Získali sme tak 4 množiny modelov variácií EWT, ktorých stredné hodnoty sme testovali.

2.2 Odstránenie vplyvu litosféry a hydrosféry

Najvýraznejší vplyv litosféry na gravitačný signál zachytený družicami misií GRACE môžeme pozorovať pôsobením javu, ktorý nazývame postglaciálne izostatické vyrovnanie (Glacial Isostatic Adjustment – GIA). Ide o reakciu elastickej Zeme na postupný úbytok ľadovcov od konca posledného glaciálneho maxima, teda o postupný zdvih zemskej kôry trvajúci približne 21 000 rokov. Táto zmena má lineárny charakter a prejavuje sa najmä v oblasti severnej Kanady, Grónska, v Škandinávii a Antarktíde [11]. Korekcia z postglaciálneho izostatického vyrovnania bola zavedená na základe frekventovane používaného modelu od Geruo A [12]. Jedným z produktov [12] sú aj hodnoty korekcie z postglaciálneho izostatického vyrovnania prepočítané na hodnoty výšky vodného stĺpca.

Zostávajúce zmeny tiažového poľa Zeme sú spôsobené variáciami vodného obalu Zeme, teda presunmi kontinentálnej vody, snehu a ľadu. Do výpočtu variácií ľadovcovej hmoty je preto potrebné zahrnúť aj parametre ako vlhkosť pôdy a množstvo vody obsiahnutej vo vegetácii [11]. Hydrologické parametre vlhkosť pôdy (SM – Soil Moisture), množstvo vody obsiahnuté v snehovej pokrývke (SWE – Snow Water Equivalent), a množstvo vody obsiahnuté vo vegetácii (CAN – Canopy Water Storage) sú súčasťou mesačných hydrologických modelov GLDAS NOAA Land

Surface Model [13] s priestorovým rozlíšením $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Keďže pri spracovaní dát družicových misií GRACE a GRACE-FO pracujeme s hodnotami vztiahnutými k ich dlhodobému priemeru, aj hodnoty hydrologických parametrov sú určované vzhľadom k ich dlhodobému priemeru a označené ΔSM , ΔSWE a ΔCAN .

2.3 Určenie variácií ľadovcovej pokrývky

Variácie ľadovcovej hmoty ΔIMB boli určené odčítaním všetkých spomenutých parametrov od modelu variácií celkovej ekvivalentnej výšky vodného stĺpca ΔEWT podľa vzťahu (1):

$$\Delta IMB = \Delta EWT - GIA - \Delta SM - \Delta SWE - \Delta CAN. \quad (1)$$

Vypočítaná veličina ΔIMB je uvádzaná v zmysle výšky vodného stĺpca, čo znamená, že zmena objemu ľadovca je vyjadrená prostredníctvom zmeny výšky vodného stĺpca vody, ktorá by vznikla roztopením ľadovca, na jednotku plochy. Z variácií ľadovcovej hmoty bol odhadnutý lineárny trend charakterizujúci priemernú zmenu tejto hmoty v čase.

3. Definícia záujmovej oblasti

Predmetom praktického experimentu bolo určenie variácií ľadovcovej hmoty vyjadrených v zmysle ekvivalentnej výšky

vodného stĺpca. Výpočet bol vykonaný pre štyri najväčšie ostrovy súostrovia Špicbergy – Spitsbergen (~ 37 800 km²), Nordaustlandet (~ 14 500 km²), Barentsøya (~ 5 000 km²) a Edgeøya (~ 1 300 km²), ktoré sú znázornené na obr. 1. Súostrovie Špicbergy je z každej strany obkolesené morom a oceánom. Zo severu ho obmýva Arktický oceán, z východnej strany Barentsovo, z juhu Nórske a zo západu Grónske more. Keďže oceánsky gravitačný účinok je z mesačných modelov tiažového poľa Zeme odstránený už pri ich spracovaní, príspevok spomínaných morí a oceánu pri spracovaní dát GRACE a GRACE-FO je v oblasti Špicbergských ostrovov nulový. Pri použití modelov do stupňa 60 a z toho vyplývajúceho priestorového rozlíšenia 300 km sa teda v okolí súostrovia nenachádza žiadne teleso generujúce gravitačný signál, ktorého účinok by bolo potrebné pri spracovaní odstrániť.

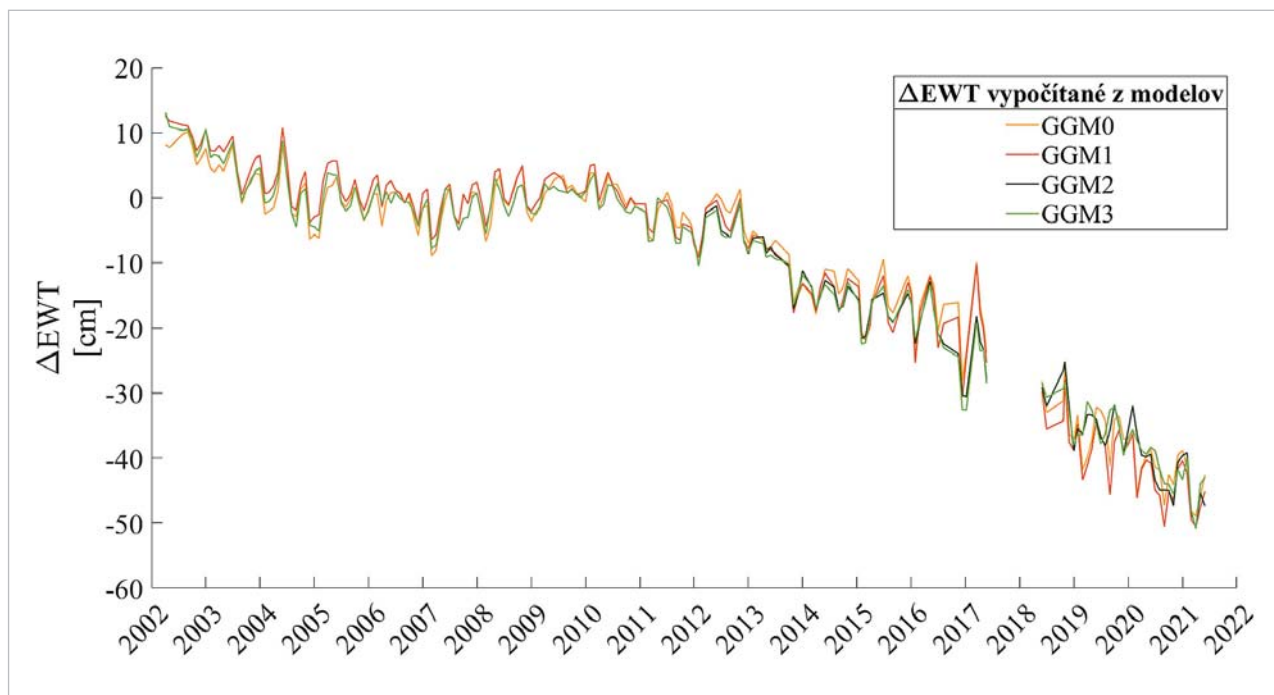
4. Výsledky experimentu

Na základe modelov GGM0, GGM1, GGM2 a GGM3 (viď časť 2.1) boli vypočítané štyri množiny mesačných variácií celkovej výšky vodného stĺpca ΔEWT v záujmovej oblasti. Spriemerovaním hodnôt v danej oblasti sme získali časový rad priebehu variácií celkovej ekvivalentnej výšky vodného stĺpca za celé obdobie trvania misií GRACE a GRACE-FO, ktoré sú znázornené na obr. 2.

Postupné nahrádzanie vybraných sférických harmonických koeficientov spôsobilo zmeny vo výsledných časo-



Obr. 1 Súostrovie Špicbergy



Obr. 2 Priebeh variácií celkovej ekvivalentnej výšky vodného stĺpca vypočítaných zo štyroch rôznych typov vstupných globálnych geopotenciálnych modelov

Tab. 1 Zmeny variácií ekvivalentnej celkovej výšky vodného stĺpca spôsobené nahradením vybraných sférických harmonických koeficientov

$\Delta EWT_{GGM1} - \Delta EWT_{GGM0}$	< - 4,4 cm; 4,4 cm >
$\Delta EWT_{GGM2} - \Delta EWT_{GGM0}$	< - 8,4 cm; 9,2 cm >
$\Delta EWT_{GGM3} - \Delta EWT_{GGM0}$	< -9,4 cm; 8,8 cm >

vých radoch ΔEWT . Podľa toho, na základe akého vstupného dátového modelu boli vypočítané, ich označujeme ΔEWT_{GGMi} , pre $i = 0,1,2,3$. Vyčíslenie týchto rozdielov sa nachádza v tab. 1.

Aby sme zistili, či sú zmeny vo variáciách celkovej výšky vodného stĺpca štatisticky významné, na všetky zodpovedajúce si mesačné modely ΔEWT sme za predpokladu normálneho rozdelenia pravdepodobnosti aplikovali Studentov test na overenie rovnosti ich stredných hodnôt. Pri stanovení akceptačnej a kritickej oblasti sme vychádzali zo štatistických tabuliek pre objem náhodného výberu 60 a pre hladinu významnosti 5 %, podľa ktorých bola kritická hodnota $t_{0,05}(60)$ rovná 2,003.

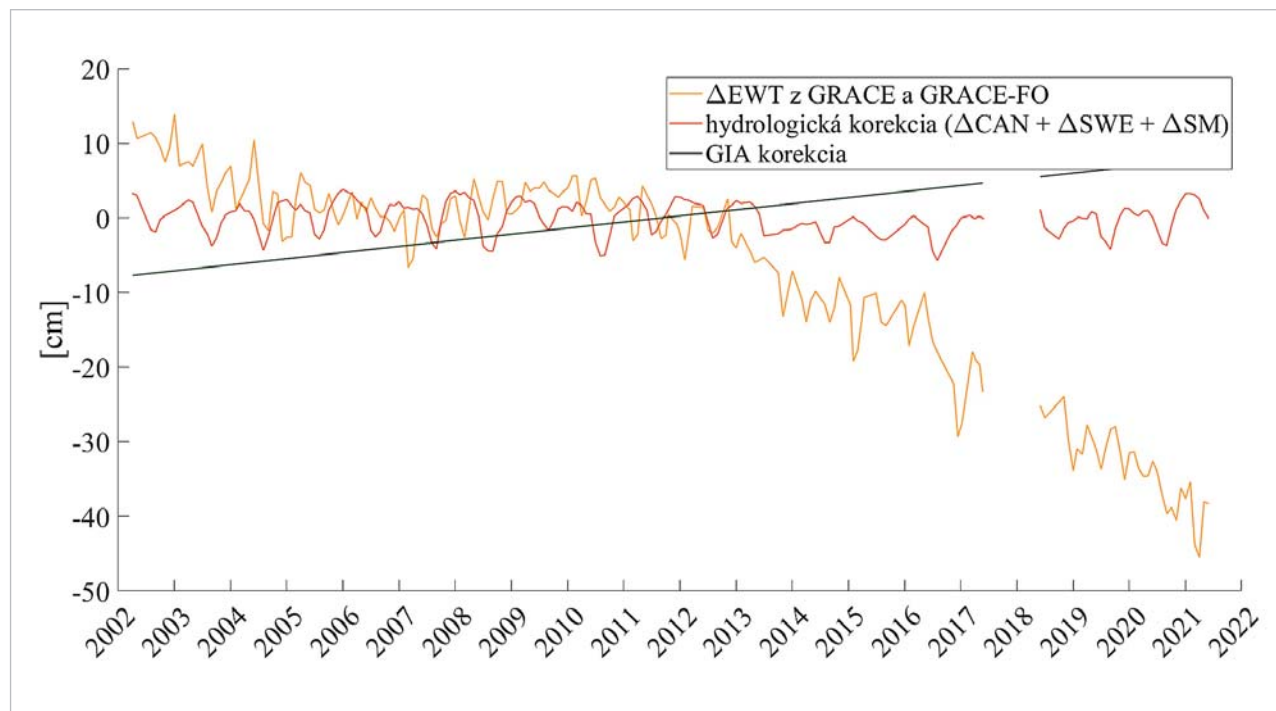
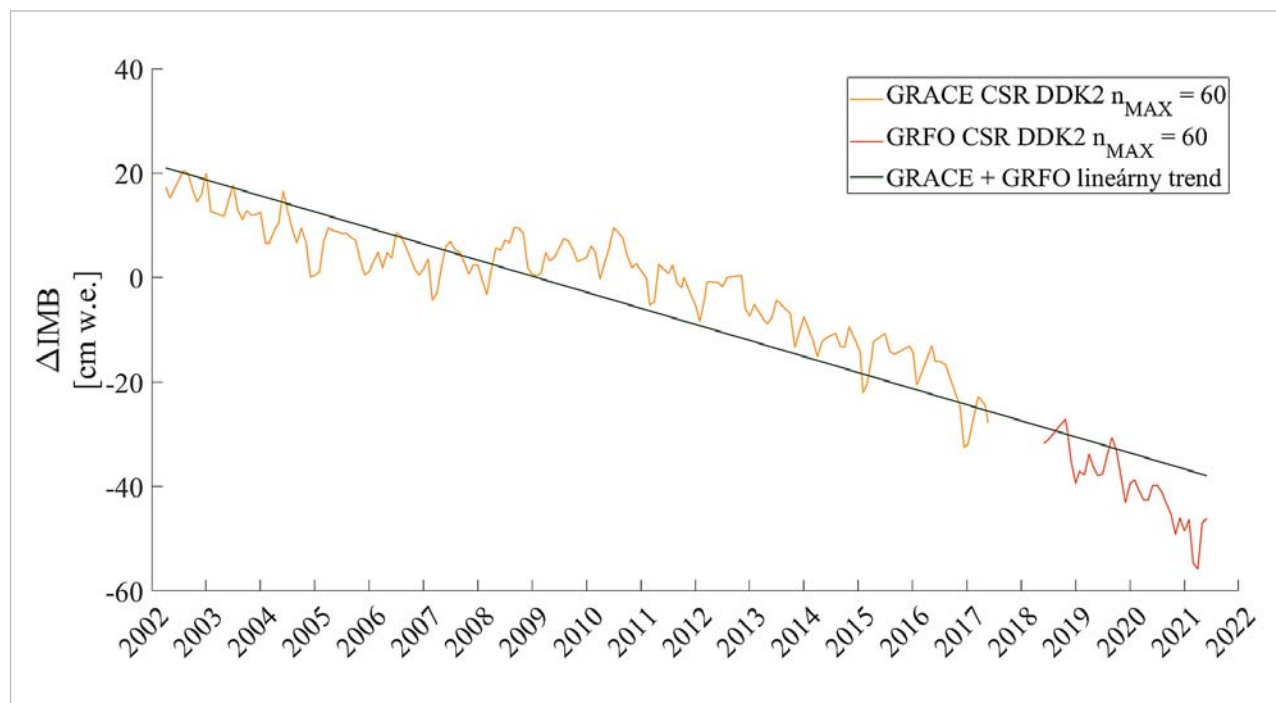
Porovnali sme empirické stredné hodnoty zodpovedajúcich si mesačných modelov variácií EWT v oblasti súostrovia Špicbergy. Pri porovnaní empirických stredných hodnôt zodpovedajúcich si modelov vypočítaných z pôvodných, nemodifikovaných dát (GGM0) a modelov s nahradenými sférickými harmonickými koeficientmi (GGM3), sa do akceptačnej oblasti realizovalo 16 % všetkých testovaných mesačných modelov variácií EWT. Na základe takéhoto testu môžeme povedať, že v prípade zvyšných 84 % zo všetkých mesačných modelov zamietame na hladine

významnosti $\alpha = 0.05$ hypotézu, že modely pochádzajú z normálne rozdelených súborov s rovnakou strednou hodnotou. Variácie celkovej ekvivalentnej výšky vodného stĺpca (znázornené na obr. 3) sme preto počítali z modelov verzie GGM03, v ktorých sme nahradili všetky spomenuté sférické harmonické koeficienty.

Z modelu Geruo, A. [12], ktorý GIA korekciu prepočítava na výšku vodného stĺpca, bola pre vybrané ostrovy súostrovia Špicbergy určená korekcia efektu postglaciálneho izostatického vyrovnania na úrovni 0,82 cm/rok (obr. 3).

Z modelu GLDAS NOAH [13] boli určené hodnoty mesačných zmien hydrologických parametrov CAN, SWE a SM vzhľadom k ich dlhodobému priemeru (určeného z rokov 2002 - 2021), pohybujúce sa na úrovni od -6 do 4 cm/mesiac (obr. 3).

Variácie ľadovcovej hmoty v záujmovej oblasti po odčítaní GIA korekcie a hydrologických parametrov dosahujú hodnoty od -55,9 do 20,5 cm výšky vodného stĺpca (obr. 4). Použitím regresnej analýzy bola z dát družicových misií GRACE a GRACE-FO určená ročná zmena ľadovcovej hmoty vypočítanej v zmysle ekvivalentnej výšky vodného stĺpca s hodnotou približne -3.1 cm/rok.

Obr. 3 Priebek ΔEWT po uvážení zmien SHK, hydrologickej a GIA korekcie

Obr. 4 Priebek variácií ľadovcovej hmoty v oblasti súostrovia Špicbergy

Na obr. 4 môžeme v priebehu rokov 2002 až 2005 pozorovať zrýchlený úbytok ľadovca nasledovaný relatívne stabilnou situáciou až do roku 2012, po ktorom začal ľadovec v záujmovej oblasti znova rapídne ubúdať. Takéto zmeny ľadovcovej hmoty sú do roku 2015 potvrdené 1611 lokálnymi meraniami na 101 staniciach nachádzajúcich sa v ablačných a akumuláčnych oblastiach ľadovcov a ľadov

cových čiapočiek pokrývajúcich Špicberské ostrovy [14]. Merania boli vykonané v rozmedzí rokov 1967 až 2015 a potvrdzujú, že po relatívne stabilnom období medzi rokmi 2005 až 2012 sa počas teplého leta 2013 ablačná oblasť (teda oblasť, v ktorej úbytok ľadovcovej hmoty prevláda nad jej dopĺňaním) rozšírila, čo malo za následok ďalšie topenie špicberských ľadovcov a ľadovcových čiapočiek.

5. Záver

Práca sa zaoberá určením variácií množstva ľadovcovej hmoty pokrývajúcej územie štyroch najväčších ostrovov súostrovia Špicbergy – Spitsbergen, Nordaustlandet, Barentsøya a Edgeøya. Vybrané sférické harmonické koeficienty určené z meraní družicových misií GRACE a GRACE-FO boli nahradené odhadnutými hodnotami získanými pomocou laserovej lokácie družíc. Studentovým testom na overenie stredných hodnôt sme zistili, že modifikácia sférických harmonických koeficientov má význam v prevažnej väčšine mesačných modelov. V riešenom území zmenila priebeh variácií celkovej výšky vodného stĺpca o hodnoty od -9,9 po 8,4 cm. Odpočítaním hydrologických parametrov vyjadrujúcich množstvo vody obsiahnuté v snehovej pokrývke, vegetácii a pôde a efektu z postglaciálneho izostatického vyrovnania boli určené mesačné zmeny ľadovcovej hmoty na úrovni -55,8 až 20,5 cm v zmysle ekvivalentnej výšky vodného stĺpca. Z variácií ľadovcovej hmoty bol pomocou regresnej analýzy odhadnutý lineárny trend, podľa ktorého ľadovcová hmota pokrývajúca ostrovy súostrovia Špicbergy ubúda s rýchlosťou približne 3,1 cm/rok v zmysle ekvivalentnej výšky vodného stĺpca.

Podakovanie

Článok vznikol s podporou grantovej agentúry VEGA v rámci riešenia projektu VEGA 1/0809/21: Spoločné vyhodnotenie variácie vodných hmôt a ľadovej pokrývky na základe dát družicových misií GRACE, SWARM a GRACE-FO.

LITERATÚRA:

- [1] TAPLEY, B. D.-BETTADPUR, S.-WATKINS, M.-REIGBER, C.: The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31, L09607, 2004. doi: 10.1029/2004GL019920.
- [2] BARTHELMES, F.: Definition of functionals of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models: theory and formulas used by the calculation service of the International Centre for Global Earth Models (ICGEM); revised Edition (Scientific Technical Report; 09/02) [online]. Potsdam, GeoForschungsZentrum GFZ, 2013, 32 p. ISSN 1610-0956. doi:10.2312/GFZ.b103-0902-26.
- [3] GRACE Level-1B Atmosphere and Ocean De-aliasing Product (GRACE AOD1B). GFZ German Research Centre for Geosciences. [cit. 2021-9-27]. Dostupné z: <https://www.gfz-potsdam.de/en/aod1b/>.
- [4] INCE, E. S.-BARTHELMES, F.-Sven REISSLAND, S.-ELGER, K.-FÖRSTE, Ch.-FLECHTNER, F.-SCHUH, H.: ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth System Science Data* [online]. 2019, 11(2), 647-674 [cit. 2021-9-27]. ISSN 1866-3516. Dostupné z: doi:10.5194/essd-11-647-2019.
- [5] SUTTERLEY, T. C.-VELICOGNA, I.: Improved Estimates of Geocenter Variability from Time-Variant Gravity and Ocean Model Outputs. *Remote Sensing* [online]. 2019, 11(18) [cit. 2021-9-27]. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11182108.
- [6] Geocenter Estimates from Time-Variant Gravity and Ocean Model Outputs. [cit. 2021-9-27]. Dostupné z: https://figshare.com/articles/dataset/Geocenter_Estimates_from_Time-Variant_Gravity_and_Ocean_Model_Outputs/7388540?file=30419823.
- [7] LOOMIS, B. D.-RACHLIN, K. E.-WIESE, D. N.-LANDERER F. W.-LUTHCKE, S. B.: Replacing GRACE/GRACE-FO With Satellite Laser Ranging: Impacts on Antarctic Ice Sheet Mass Change. *Geophysical Research Letters* [online]. 2020, 47(3) [cit. 2021-9-27]. ISSN 0094-8276. Dostupné z: doi:10.1029/2019GL085488.
- [8] RIES, J.-BETTADPUR, S.-EANES, R.-KANG, Z.-KO, U.-MCCULLOUGH, C.-NAGEL, P.-PIE, N.-POOLE, S.-RICHTER, T.-SAVE, H.-TAPLEY, B.: The Combined Gravity Model GGM05C. GFZ Data Services. [cit. 2021-9-27]. 2016. Dostupné z: <https://doi.org/10.5880/icgem.2016.002>.
- [9] WAHR, J.-MOLENAAR, M.-BRYAN, F.: Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [online]. 1998, 103(B12), 30205-30229. [cit. 2021-9-27]. ISSN 01480227. Dostupné z: doi:10.1029/98JB02844.
- [10] BUCHA, B.-JANÁK, J.: A MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders. *Computers & Geosciences* [online]. 2013, 56, 186-196 [cit. 2021-9-27]. ISSN 00983004. Dostupné z: doi:10.1016/j.cageo.2013.03.012.
- [11] SWENSON, S.-WAHR, J.-MILLY, P. C. D.: Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Water Resources Research* [online]. 2003, 39(8) [cit. 2021-9-27]. ISSN 00431397. Dostupné z: doi:10.1029/2002WR001808.
- [12] GERUO, A.-WAHR, J.-ZHONG, S.: Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. *Geophysical Journal International* [online]. 2012, 192(2), 557-572 [cit. 2021-9-27]. ISSN 0956-540X. Dostupné z: doi:10.1093/gji/ggs030.
- [13] RODELL, M.-HOUSER, P. R.-JAMBOR, U. et al.: The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 2004, 85(3), 381-394 [cit. 2021-9-27]. ISSN 0003-0007. Dostupné z: doi:10.1175/BAMS-85-3-381.
- [14] NOËL, B.-JAKOBS, C. L.-VAN PELT, W. J. J. et al.: Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability. *Nature Communications* [online]. 2020, 11(1). ISSN 2041-1723. doi:10.1038/s41467-020-18356-1.

Do redakcie došlo: 21. 3. 2022

Lektoroval:
prof. Ing. Pavel Novák, Ph.D.,
Západočeská univerzita v Plzni