# Monitorovanie úbytku vody vo vybraných regiónoch pomocou globálnych modelov tiažového poľa družicovej misie GRACE

Adam Novák, Barbora Korekáčová

## Abstract

Launch of satellite mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) led to significant improvement in the Earth's mass changes observation, enabling the recovery of monthly estimates of changes in continental water storage. Knowledge of temporal changes in height of continental water storage represents valuable information about regional and global hydrology as it makes up essential part of global hydrological cycle. Total continental water storage is considered as the sum of water stored as snow and ice, in and on vegetation covers, in the unsaturated soil zone, in groundwater and surface waters like rivers, wetlands, lakes and reservoirs.

Due to limited Equivalent Water Thickness (EWT) computational options a new approach based on modifying existing source code of software GrafLab has been proposed. For results verification, the Ganges-Brahmaputra aquifer system was chosen for computation. This area is undergoing long term extreme droughts and poor water resources management, which causes many scientists to carry out researches dealing with this problem. Our results revealed periodical seasonal variations of great amplitudes and decreasing continental water trend, corresponding with results of similar studies in the same area and hydrological reports. Using the Least-Squares linear regression of EWT data averaged through the Ganges-Brahmaputra aquifer system a decrease in height of continental water storage of 4.9mm/year has been estimated.

Subsequently, the GRACE data from Danube river basin area have been processed because of significant transport, economic and environmental importance for Slovakia. The Least-Squares linear regression of EWT data averaged through the Danube basin during more than 15 years period, suggests a decreasing of 1.2mm/year. Amplitudes of seasonal changes in Danube basin have been much smaller than in Ganges-Brahmaputra area, which is presumptively caused by absence of monsoon period. Remarkable minima and maxima correspond with meteorological records, droughts and floods which occurred in this area since 2002.

## Anotácia

Výsledky družicovej misie GRACE priniesli nové možnosti pozorovania presunov kontinentálnych hydrologických hmôt, prostredníctvom pozorovania variácie tiažového zrýchlenia prepočítaného na ekvivalentné výšky kontinentálneho vodného stĺpca. Mesačné modely tiažového poľa Zeme družicovej misie GRACE boli použité pri monitorovaní kontinentálnej vody v dvoch oblastiach.

## Kľúčové slová

Družicová misia GRACE, ekvivalentná výška kontinentálneho vodného stĺpca, mesačné modely tiažového poľa Zeme

### Annotation

Results of satellite mission GRACE brought new possibilities in the Earth's mass changes observation, including the possibility of monitoring of continental water storage. Monthly solutions of Earth gravity field were used in calculations of continental water storage changes in two regions.

## Key words

Satellite mission GRACE, continental water storage, monthly Earth gravity field solutions

# 1 Úvod

Voda je základnou podmienkou pre existenciu života na Zemi. Ako pitnú vodu označujeme takú vodu, ktorá je vhodná na každodenné použitie, zbavená nečistôt a obsahuje vyvážené množstvo minerálnych látok tak, aby jej užívanie neškodilo zdraviu. Jedným z prirodzených zdrojov pitnej vody je voda podzemná, ktorá je sústredená pod zemským povrchom v horninovom prostredí, nespevnených sedimentoch a pôde (Graham, 1999). Napriek tomu, že sa na Zemi nachádza len v

obmedzenom množstve, podzemná voda je jediným zdrojom pitnej vody pre takmer tretinu svetového obyvateľstva. Je však vo veľkej miere čerpaná pre potreby poľnohospodárstva, strojníctva a mnohých ďalších odvetví priemyslu. Využívanie jej zdrojov však v mnohých prípadoch býva neúmerne väčšie ako ich prirodzené dopĺňanie. Vzniká preto potreba tieto zdroje monitorovať za účelom predídenia ich úplnému vyčerpaniu (Hirji a kol., 2016)

Nakoľko neexistuje jednotná globálna hydrologická sieť, ktorá by zahŕňala dáta získané unifikovaným spôsobom pozemného zberu a následného spracovania, veľkým prínosom v efektívnom, dlhodobom pozorovaní zmien množstva podzemnej vody priniesla družicová misia GRACE (<u>http://earth.esa.int/hydrospace07/participants/84231/pres\_84231.pdf</u>). Jej výsledkom je časový rad globálnych modelov tiažového poľa Zeme, ktoré môžeme ďalej analyzovať. Presun tekutých zložiek Zeme je z časového hľadiska omnoho dynamickejší proces ako v prípade presunu tuhých zložiek. Presuny vodných hmôt vnútri tekutého obalu Zeme sú zároveň najväčším zdrojom krátkodobých zmien tiažového poľa Zeme (Ramilien a kol.,2008). Pri štúdiu presunov kontinentálnej vody boli použité mesačné globálne geopotenciálne modely, ktoré sú výsledkom činnosti troch oficiálnych spracovateľských centier družicovej misie GRACE.

Článok sa venuje monitorovaniu temporálnych zmien kontinentálnej vody v dvoch oblastiach. Prvou oblasťou je rezervoár podzemnej vody povodia riek Ganga-Brahmaputra. Oblasť je dlhodobo postihovaná extrémnymi suchami a vysokým čerpaním zásob podzemnej vody a viaceré štúdie (Hirji a kol., 2016) poukazujú na to, že v danej oblasti dochádza k dlhodobému úbytku zdrojov podzemnej vody. Druhou oblasťou je povodie rieky Dunaj, ktoré bolo vybrané z dôvodu veľkého dopravného, ekonomického a environmentálneho významu pre Slovenskú republiku a Európu vešobecne.

## 2 Družicová misia Grace

Družicová misia GRACE zahájila svoju činnosť v roku 2002 ako spoločný projekt americkej vedeckej agentúry NASA (National Aeronautics and Space Administration) a nemeckého výskumného centra GFZ (Deutsches GeoforschungsZentrum) . Jej cieľom bolo presné mapovanie tiažového poľa Zeme na dovtedy nedosiahnutej úrovni presnosti a priestorového rozlíšenia (Ditmar a kol., 2012). Bola tvorená dvojicou identických družíc GRACE A a GRACE B, ktoré boli vynesené do výšky približne 500 km nad zemský povrch a okolo Zeme obiehali vo vzdialenosti približne 220 km za sebou. Okrem modelovania statického modelu tiažového poľa Zeme družice slúžili najmä na monitorovanie jeho zmien s priestorovým rozlíšením 300 – 400 km v závislosti napríklad od sily signálu, alebo zemepisnej šírky (Wahr a kol., 2004). Mapovanie prebiehalo s časovým rozlíšením desať dní až jeden mesiac. Predpokladaná dĺžka trvania misie GRACE bola odhadovaná na 5 rokov, nakoniec družice svoju vedeckú činnosť ukončili až v roku 2017.



Obrázok 1: Družice misie GRACE (internetový zdroj: <u>https://www.nasa.gov/</u>)

Princíp určovania parametrov tiažového poľa Zeme je založený na meraní vzájomnej vzdialeností medzi dvojicou družíc a súčasným modelovaním zmien vo vzájomnej vzdialenosti spôsobených negravitačnými vplyvmi. Presuny zemských hmôt (a s tým súvisiace zmeny tiažového poľa Zeme) spôsobovali v určitých miestach nad zemským povrchom spomalenia alebo zrýchlenia družíc misie GRACE a nepatrne tak bola ovplyvnia ich vzájomná vzdialenosť (Buis, 2017). Znázornenie korelácie medzi meranou vzdialenosťou družíc a zmenou tiažového zrýchlenia na zemskom povrchu sa nachádza na Obrázku 2.



*Obrázok 2: Korelácia medzi zmenami vzdialenosti družíc GRACE A a B a zmenami tiažového zrýchlenia (Frappart a kol., 2018)* 

Variácia vzdialenosti bola nepretržite meraná pomocou lokačného zariadenia pracujúceho v pásme K rádiového spektra (KBR) s frekvenciou 24 GHz. Každá družica je okrem lokačného zariadenia vybavená sústavou akcelerometrov, ktoré slúžia na určovanie negravitačných vplyvov, prijímačom GNSS slúžiacim na určenie polohy družice a ďalšími zariadeniami (Tapley a kol., 2004). Merané údaje z družíc boli vysielané do pozemných staníc, kde sa dáta z oboch družíc skombinovali, čím sa minimalizoval vplyv ionosféry na meranú vzdialenosť a zohľadnili sa korekcie vzdialenosti z pôsobenia negravitačných vplyvov. Výsledná vzájomná vzdialenosť družíc bola určovaná s presnosťou na úrovni mikrometrov (Wahr, 2015).

#### 2.1 Produkty družicovej misie GRACE

Neupravené dáta vysielané z družice na Zem boli z pôvodných, interných dát misie transformované do "zmysluplných" veličín ako napr. vzájomná vzdialenosť družíc, negravitačné poruchové zrýchlenia a ďalšie. Takéto dáta nazývame *Level 1 data*. Sú voľne dostupné, vďaka čomu je užívateľovi umožnené ich individuálne spracovanie a následné zhotovenie vlastných modelov tiažového poľa Zeme.

Jednotlivé spracovateľské centrá okrem poskytovania dát úrovne 1 vykonávajú aj ich spracovanie, čím vznikajú tzv. *Level 2 Data*, ktoré sú poskytované vo forme súboru sférických harmonických koeficientov do určitého stupňa a rádu spriemerovaných pre jednotlivé časové intervaly. Aplikáciou vhodných modelov atmosféry a slapov získavame globálne geopotenciálne

modely (GGM). Podľa použitého časového intervalu rozlišujeme GGM s mesačným ale aj týždenným a denným časovým rozstupom (Ditmar a kol., 2012).

V návrhu družicovej misie GRACE boli zadefinované tri oficiálne spracovateľské centrá, a to Deutsches GeoForschungs Zentrum (GFZ), The University of Texas, Center for Space Research (CSR) a Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (JPL), ktoré tvoria GRACE Science Data System (Godah a kol., 2015). GGM sú voľne dostupné na internetovej stránke Medzinárodného centra pre globálne modely tiažového poľa Zeme (ICGEM), kde sú rozdelené podľa použitých časových intervalov.

Od začiatku spracovania dát družicovej misie GRACE do globálnych geopotenciálnych modelov vzniklo postupne celkovo šesť riešení (Release) s označením RL01 – RL06, ktoré sa líšia prístupom spracovania (Dahle a kol, 2014).

GGM založené na dátach družicovej misie GRACE sú silne ovplyvnené šumom, ktorý vzniká v dôsledku geometrie dráhy družíc misie, chýb senzora KBR, ale pravdepodobne aj následkom obmedzených možností spracovania dát. Tento nepriaznivý jav sa prejavuje vo všetkých veličinách vypočítaných z GGM založených na dátach misie GRACE v podobe prúžkov v meridiánovom smere (označovaných aj ako artefakty). Aplikáciou vhodných filtrov môžeme tento šum minimalizovať, pričom ale musíme dbať na zachovanie gravitačného signálu, ktorý umožňuje analýzu variácií tiažového poľa Zeme (Godah a kol., 2015).

Donedávna sa pri filtrácií GGM vďaka svojej jednoduchej implementácií a intuitívnej interpretácii často využíval tzv. Gaussov filter (Wahr a kol., 1998). Novší prístup k filtrácii dát využíva pravdepodobnostné vyhladzovacie dekorelačné metódy v spojení s vyhladením dát, pozri (Kusche, 2007) a (Kusche, 2009). Úlohou dekorelácie je identifikovať a odstrániť nežiaduce odľahlé korelácie medzi dvojicou koeficientov buď na základe ich empirickej analýzy, alebo použitím apriórneho modelu geometrie dráhy družíc (Kusche, 2009). Filtre majú označenie DDK1 – DDK8 a odlišujú sa stupňom vyhladenia dát v závislosti od hodnoty tzv. váhovacieho parametra.

# 3 Vzťah medzi zmenami tiažového poľa Zeme a zmenami kontinentálnej hydrológie

Najväčším zdrojom krátkodobých zmien tiažového poľa Zeme je podľa (Ramilien a kol.,2008) presun vodných hmôt vnútri tekutého obalu Zeme. Pokiaľ máme dostupné údaje o časových zmenách tiažového poľa Zeme vo forme mesačných GGM, dokážeme inverziou zmeny tiažového potenciálu získať údaje o časových zmenách kontinentálnej hydrológie. Množstvo kontinentálnej vody v zvolenom bode môžeme vyjadriť pomocou veličiny Equivalent Water Thickness, ďalej označovanej ako *EWT*. Veličina *EWT* v sebe zahŕňa všetky zložky kontinentálneho vodného zdroja v danom bode, akými sú podzemná voda, snehová a ľadová pokrývka, vlhkosť pôdy, voda vo vegetácií alebo voda nachádzajúca sa v riekach a jazerách (Rodell a Famiglietti, 1999). Z uvedených zložiek tvorí najväčšiu časť celkového kontinentálneho vodného zdroja práve podzemná voda.

Pre ľubovoľný bod na zemskom povrchu môžeme *EWT* vypočítať zo sférických harmonických koeficientov pomocou vzťahu podľa (Wahr a kol., 1998):

$$EWT = \frac{R \cdot \rho_{av}}{3} \sum_{n=0}^{n_{max}} \frac{2n+1}{1+k_n} \sum_{k=0}^{n} \left( C_{n,k} \cdot \cos k\lambda + S_{n,k} \cdot \sin k\lambda \right) \cdot \bar{P}_{n,k}(\sin \varphi) \quad , \tag{1}$$

kde premenná *R* znamená priemerný polomer použitého referenčného elipsoidu,  $\rho_{av}$  je priemerná hustota Zeme, *n a k* sú stupne a rády sférických harmonických koeficientov,  $k_n$  sú Loveho čísla prislúchajúce jednotlivým stupňom *n* sférických harmonických koeficientov,  $C_{nk}$  a  $S_{nk}$  sú úplné, normované sférické harmonické koeficienty,  $\overline{P}_{nk}(\sin(\varphi))$  predstavuje normované Legendreove funkcie a  $\varphi$  a  $\lambda$  sú zemepisné šírky a dĺžky výpočtových bodov. Výsledkom výpočtu je hodnota výšky vodného stĺpca v jednotkách  $kg \cdot m^{-2}$ , čo je hodnota ekvivalentná milimetrom, pretože 1 kg vody s hustotou 1000 kg  $\cdot m^{-3}$  rozliaty na plochu 1 m<sup>2</sup> bude predstavovať 1 mm hrubú vrstvu.

Pri skúmaní zmien veličiny *EWT* je omnoho výhodnejšie pracovať s rozdielmi hodnôt oproti zvolenému referenčnému modelu  $\Delta EWT$ , aby bolo zmeny možné ľahšie pozorovať. Voľba vhodného referenčného modelu je v tomto prípade veľmi dôležitá, podľa (Janák, 2019) je najvhodnejšie referenčný model vypočítať ako priemer všetkých dostupných mesačných modelov použitého riešenia (Release).

Rozdiely mesačných hodnôt oproti referenčnému model<br/>u $\varDelta EWT$  potom vypočítame pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$\Delta EWT_t = EWT_t - EWT_{mean} \quad , \tag{2}$$

kde index *t* vyjadruje časovú príslušnosť dát ku konkrétnemu mesiacu. Takýmto spôsobom určujeme zmeny množstva kontinentálnej vody  $\Delta EWT$  vzhľadom k priemerným hodnotám  $EWT_{mean}$  za celé obdobie z ktorého máme dostupné dáta.

## 4 Výber testovacej oblasti

Testovanie správnosti výpočtu bolo vykonané pre dáta z oblasti rezervoáru podzemnej vody povodia riek Ganga-Brahmaputra, ktorý patrí do systému 37 najväčších svetových rezervoárov podzemnej vody WHYMAP (Worldwide Hydrological Mapping and Assessment Program). Zo severnej strany je povodie ohraničené pohorím Himaláje, pre ktoré je charakteristické veľké množstvo snehu a ľadovej pokrývky, ktoré sú súčasťou kontinentálneho vodného stĺpca. Zo západu je povodie ohraničené Thárskou púšťou a z juhu pohorím Vindhya, ktoré predstavujú pomerne suché oblasti.

Územie rezervoáru čelí v dôsledku nesprávneho hospodárenia a klimatickým zmenám dlhodobo extrémnym suchám a nedostatku vodných zdrojov (Hirji a kol., 2016). V súvislosti so spomínanými nepriaznivými podmienkami je preto predmetom veľkého množstva štúdií ktoré vykazujú klesajúci trend v množstve či už kontinentálnej, alebo podzemnej vody.



Obrázok 3: Oblasť rezervoáru podzemnej vody povodí riek Ganga- Brahmaputra

Existuje viacero nástrojov určených na prácu s dátovými produktami družicovej misie GRACE vytvorených v rôznych programovacích jazykoch (Python - Nielsen a kol., 2012, MATLAB - Bucha a Janák, 2013), ako aj o interaktívne on-line prístupy k rovnakej problematike (výpočtové centrum služby ICGEM). Nevýhodou týchto nástrojov však je, že sa zaoberajú hlavne výpočtom statických funkcionálov zemskej tiaže, prípadne neumožňujú použitie najnovších riešení mesačných GGM alebo zadanie vlastného časového intervalu dát. Výpočtové centrum služby ICGEM (International Center for Global Gravity field models) obsahuje nástroj na určenie *EWT*, výpočet však treba prácne vykonať pre každý mesiac zvlášť, čo je časovo veľmi zdĺhavé. V tejto práci bol preto zvolený taký prístup k výpočtu *EWT*, ktorý modifikuje zdrojový kód softvéru GrafLab (Bucha a Janák, 2013) a umožňuje automatizáciu výpočtu požadovanej veličiny.

Hodnoty *EWT* boli určené z mesačných GGM pre celú Zem s krokom 0.5° v zemepisnej šírke a dĺžke. Pri výpočte bolo použité riešenie Release 06 vypracované nemeckým spracovateľským centrom GFZ filtrované dekorelačným filtrom DDK1. Ďalším spracovaním boli v prostredí softvéru MATLAB z celej ohraničenej oblasti vyselektované iba také body, ktoré sa nachádzajú vnútri polygónu definujúceho hranice povodia riek Ganga-Brahmaputra. Pre každý vybraný bod bola z mesačných hodnôt *EWT* individuálne vypočítaná jeho priemerná hodnota *EWT<sub>mean</sub>* a následne mohol byť určený rozdiel mesačnej hodnoty voči priemernej  $\Delta EWT$ . V poslednom kroku boli z rozdielových mesačných hodnôt všetkých výpočtových bodov nachádzajúcich sa vo vnútri povodia vypočítané priemerné mesačné hodnoty celého povodia. Priebeh mesačných priemerov hodnôt časových variácií *EWT* v povodí rieky Ganga - Brahmaputra je znázornený na Obrázku 4. Použitím lineárnej regresie bol určený trend (Obrázok 4) charakterizujúci zmeny množstva kontinentálnej vody v povodí riek Ganga-Brahmaputra.



Obrázok 4: Priemerné hodnoty ΔEWT rezervoáru podzemnej vody povodia Ganga-Brahmaputra v rokoch 2003 až 2015

Na Obrázku 4 môžeme vidieť, že trend jednoznačne poukazuje na úbytok kontinentálnej vody, čím potvrdzuje výsledky ostatných štúdií množstva kontinentálnej vody v danej oblasti. Deriváciou funkcie regresnej priamky podľa času bol určený ročný pokles hladiny kontinentálnej vody o 4.9mm. Takto získaný trend hodnôt môže slúžiť aj na predikciu výšky kontinentálneho vodného stĺpca v budúcnosti. Po zbavení hodnôt  $\Delta EWT$  trendu (Obrázok 5), môžeme určiť periódu ich sezónnych zmien, prípadne lokálne minimá a maximá.

Na hodnotách veličiny  $\Delta EWT$  zbavených trendu (Obrázok 5) môžeme vidieť, že ich zmeny majú približne periodický charakter s periódou jedného roka a ročné maximá nastávajú na konci monzúnového obdobia v druhej polovici kalendárneho roka. Prvý výraznejší deficit kontinentálnej vody môžeme pozorovať v roku 2004 a v ďalších dvoch nasledujúcich rokoch, kedy bol v skúmanom území zaznamenaný podpriemerný úhrn monzúnových zrážok (Tyalagadi a kol., 2015).

Podľa ročnej meteorologickej správy Indického oddelenia meteorológie dosiahlo množstvo monzúnových zrážok v roku 2009 len 77% priemernej hodnoty, čo je tretí najmenší ročný úhrn zrážok od začiatku pozorovania (Tyalagadi a kol., 2015). Tento jav môžeme pozorovať na Obrázku 5 vo výraznom poklese ročného maxima  $\Delta EWT$  a následne aj vo výraznom suchu v roku 2010, ktoré po tejto udalosti nasledovalo. Obe suchá sú podľa (Tyalagadi a kol., 2015) pripisované klimatickému fenoménu El Niño.



Obrázok 5: Priemerné hodnoty ∆EWT rezervoáru podzemnej vody povodia Ganga-Brahmaputra v rokoch 2003 až 2015 zbavené trendu

Výrazné poklesy hladiny podzemnej vody nastali v povodí rieky Ganga-Brahmaputra okrem rokov 2004 a 2010 aj vo februári 2015, kedy oblasť povodia rieky čelila extrémnym suchám, čo môžeme pozorovať aj na Obrázku 5. V rokoch 2014 a 2015 bol v Indii 12% deficit zrážok. Ten sa následne v roku 2016 vyšplhal až na hodnotu 14%. V roku 2016 indická vláda preto vzhľadom na pretrvávajúce extrémne podmienky oficiálne vyhlásila stav sucha pre veľkú časť Indie, do ktorej spadala aj oblasť povodia rieky Ganga-Brahmaputra. Tieto suchá ovplyvnili až 330 miliónov obyvateľov Indie (UNICEF, 2016). Krízové stavy sucha sú pravdepodobne vyvolané klimatickými zmenami, ale aj nehospodárnym nakladaním so zdrojmi podzemnej vody.

# 5 Prípadová štúdia pre povodie rieky Dunaj

Povodie rieky Dunaj je s rozlohou 797 335 km<sup>2</sup> po Volge druhé najväčšie v Európe a zasahuje do územia nasledujúcich štátov Albánsko, Bosna a Hercegovina, Bulharsko, Česká republika, Čierna hora, Chorvátsko, Kosovo, Macedónsko, Maďarsko, Moldavsko, Nemecko, Poľsko, Rakúsko, Rumunsko, Slovensko, Slovinsko, Srbsko, Švajčiarsko, Taliansko, Ukrajina. Povodie Dunaja bolo vybraté z dôvodu veľkého dopravného, ekonomického a environmentálneho významu pre Slovenskú republiku. Hranice povodia tejto rieky boli získané z on-line databázy *Interactive Database of the World's River Basins* (CEO Water Mandate, 2016) vo formáte \*.*shapefile* a znázornené sú na Obrázku 6.



Obrázok 6: Znázornenie hraníc povodia rieky Dunaj

Pri výpočte  $\Delta EWT$  v oblasti povodia rieky Dunaj boli použité rovnaké dáta stiahnuté zo stránky ICGEM a rovnaký postup ako v prípade povodia riek Ganga-Brahmaputra. Pre celé povodie bol rovnako pomocou metódy najmenších štvorcov, vzťahmi lineárnej regresie určený trend charakterizujúci dlhodobé časové zmeny kontinentálneho vodného stĺpca v povodí rieky Dunaj (Obrázok 7).



Obrázok 7: Priemerné hodnoty AEWT povodia rieky Dunaj v rokoch 2003 až 2015

Deriváciou odhadnutej funkcie regresnej priamky bol určená hodnota ročného poklesu hladiny kontinentálnej vody v povodí -1.2mm/rok. Priemerné mesačné hodnoty povodia ∆EWT boli následne zbavené trendu, aby ich extrémne hodnoty mohli byť porovnané s analýzami Medzinárodného centra pre ochranu povodia rieky Dunaj (ICPDR).



Obrázok 8: Priemerné hodnoty AEWT povodia rieky Dunaj v rokoch 2003 až 2015

Rok 2003 bol v oblasti povodia Dunaja charakteristický nadpriemernými teplotami a podpriemerným ročným úhrnom následkom čoho boli najhoršie suchá v oblasti povodia rieky Dunaj od roku 1840, ktoré môžeme pozorovať na Obrázku 8. Roky 2004 a 2012 sa oproti roku 2003 javia rovnako suché, no treba si uvedomiť fakt, že úbytok kontintálnej vody voči sezónnemu maximu nebol až tak rapídny, nakoľko maximálna hodnota v týchto rokoch bola omnoho nižšia ako v roku 2003 (Cogen, 2015).

Na Obrázku 7 sú v priebehu hodnôt  $\triangle EWT$  viditeľné výrazné maximá zodpovedajúce rokom 2003, 2006, 2010, 2011 a 2013. Tieto maximá korešpondujú s dátami centra ICPDR, podľa ktorých došlo na území povodia Dunaja v rokoch 2002, 2006, 2010 a 2013 k záplavám. Môžeme teda konštatovať, že výrazný nárast výšky vodného stĺpca kontinentálnej vody v roku 2003 bol následkom jarných povodní v roku 2002 (Pekarova a kol, 2013). Ďalšie povodne nastali v dôsledku topenia snehovej pokrývky a silných dažďov v roku 2006 a postihli hlavne strednú a východnú Európu. Tieto povodne boli špecifické tým, že zvýšená hladina vody bola zaznamenaná nielen v povodí rieky Dunaj, ale aj v prípade jeho prítokov Tisa a Sáva, čo spôsobilo prekročenie známych hodnôt tzv. storočnej vody v centrálnej a spodnej časti Dunaja (Wachter, 2007). Klimatický rok 2009-2010 bol význačný nadpriemerným množstvom dažďových a snehových zrážok. Narozdiel od rokov 2002 a 2006, kedy boli záplavy spôsobené krátkymi ale výdatnými zrážkovými úhrnmi, v roku 2010 záplavy spôsobila spomínaná celoročná zvýšená zrážková aktivita. Záplavy vo výraznej miere postihli takmer všetky štáty ležiace na území povodia rieky Dunaj okrem Nemecka a Rakúska (Liska a kol, 2012). Na Obrázku 7 vidíme, že takýto stav pretrvával až do roku 2011. Podľa (Liska a Major, 2014), ktorý záplavy v roku 2013 prirovnáva k tým z roku 2002, došlo v tomto období v ich dôsledku k veľkým škodám na území Nemecka, Rakúska, Slovenska, Maďarska a Rumunska.

# 6 Zhrnutie výsledkov

Výsledky družicovej misie GRACE priniesli nové možnosti monitorovania časových variácií tiažového poľa Zeme. Porovnaním mesačných globálnych geopotenciálnych modelov môžeme pozorovať krátkodobé zmeny tiažového poľa Zeme, ktoré sú spôsobené najmä presunmi kontinentálnych hydrologických hmôt. Inverziou zmien tiažového poľa Zeme dokážeme určiť zmeny vo výške kontinentálneho vodného stĺpca, ktorý je v článku označovaný ako hodnota EWT (Equivalent Water Thickness). Tá v sebe zahŕňa všetky zložky kontinentálnej vody ako podzemnú vodu, vodu riek a jazier, vodu v podobe ľadu a snehu a vodu obsiahnutú v rastlinách.

V dôsledku obmedzených existujúcich možností výpočtu EWT sme zvolili nový prístup, ktorý spočíval v modifikácií zdrojového kódu softvéru GrafLab. Výsledky získané použitím nového prístupu boli odtestované na oblasti rezervoáru podzemnej vody povodia riek Ganga - Brahmaputra, ktorá dlhodobo čelí extrémným suchám a nehospodárnemu narábaniu s vodnými zdrojmi. V dôsledku alarmujúceho stavu vodných zdrojov je v danej oblasti dostupné množstvo štúdií zameraných na problematiku ich monitorovania.

Do oblasti povodí riek Ganga - Brahmaputra prinášajú monzúny každoročne veľké množstvo zrážok. Keďže sa obodobia monzúnov striedajú s obdobiami sucha, je predpoklad že sezónne dochádza v hodnotách EWT k veľkým zmenám, ktoré majú periodický priebeh.Výsledky výpočtu potvrdili predpoklad veľkých periodických temporálnych zmien vo výške kontinentálneho vodného stĺpca (sezónny rozdiel výšky hladiny až 30cm) a zároveň klesajúci charakter množstva kontinentálnej vody -4.9 mm/rok. Výrazné minimá a maximá zmien EWT zodpovedajú štatistickým meteorologickým údajom v danej oblasti.

Po preukázaní správnosti prístupu k spracovaniu v oblasti povodia riek Ganga - Brahmaputra bol následne postup aplikovaný na oblasť povodia rieky Dunaj, ktorá má pre Slovenskú republiku veľký dopravný, ekonomický a environmentálny význam. Na základe výpočtov bol v oblasti povodia rieky Dunaj určený klesajúci trend množstva kontinentálnej vody -1.2 mm/rok. Sezónne zmeny nadobúdali v tejto oblasti menšie hodnoty ako pri povodí Ganga - Brahmaputra, čo je spôsobené neprítomnosťou obodobia monzúnov. Výrazné minimá a maximá hladiny kontinentálnej vody korešpondovali so zaznamenanými suchami a povodňami v oblasti povodia rieky Dunaj.

Aplikáciou parametrov existujúceho hydrologického modelu Global Land Data Assimilation System (GLDAS) ,by bolo možné z celkovej výšky kontinentálneho vodného stĺpca vyčleniť len množstvo prislúchajúce podzemnej vode. Pri práci s uvedeným modelom sa však v súčasnosti stretávame s nedostatočnou znalosťou hydrologických parametrov, ktoré v modely vystupujú. Cieľ do budúcna je preto lepšie porozumieť týmto parametrom a zamerať monitorovanie na zložku podzemnej vody.

Úspešnosť družicovej misie GRACE výustila v roku 2018 do rozhodnutia americkej agentúry NASA a nemeckého výskumného centra GFZ vypustiť na obežnú dráhu dvojicu družíc misie Gravity Recovery And Climate Experiment – Follow On (GRACE-FO), ktorej cieľom je pokračovať v činnosti mapovania časových zmien tiažového poľa Zeme. Družice sú vybavené identickým pristrojovým vybavaním ako v prípade družicovej misie GRACE, no sú doplnené experimentálnym zariadením, ktoré má byť prínosom v určovaní vzájomnej vzdialenosti budúcich generácií družíc programu GRACE. Jedná sa o laserový interferometer, ktorý má v dôsledku vyššej frekvencie lasera predpoklad priniesť spresnenie určovanej vzájomnej vzdialenosti a spresnenie modelov tiažového poľa Zeme (NASA, 2017).

# 7 Zoznam použitej literatúry

BUCHA, B. a JANÁK J.: A MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders: Efficient computation at irregular surfaces. Computers & Geosciences [online]. 2014, 66, 219-227 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.02.005. ISSN 00983004.

BUIS, A.: GRACE Mission: 15 Years of Watching Water on Earth, NASA/JPL, Feature 2017-070, March 15, 2017, URL: <u>https://grace.jpl.nasa.gov/news/89/grace-mission-15-years-of-watching-water-on-earth/</u>

CEO Water Mandate, 2016: Interactive Database of the World's River Basins. Web. <u>http://ceowatermandate.org/riverbasins</u>.

COGEN, M, 2015. International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR) [online] [cit. 21. október 2019]. ISBN 978-1-4724-4571-1; 978-1-4724-4570-4. Dostupné na: <u>https://www.icpdr.org/main/issues/droughts</u>

DAHLE, Ch. a kol.: GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005: Scientific Technical Report STR12/02 - Data. Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences, 2013. DOI: 10.2312/ GFZ.b103 -1202- 25. ISSN 1610-0956.

DITMAR, P. TEIXEIRA DA ENCARNAÇÃO J. a HASHEMI FARAHANI H.: Understanding data noise in gravity field recovery on the basis of inter-satellite ranging measurements acquired by the satellite gravimetry mission GRACE. Journal of Geodesy [online]. 2012, 86(6), 441-465 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s00190-011-0531-6. ISSN 0949-7714.

FRAPPART, Frédéric a Guillaume RAMILLIEN, 2018. *Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review* [online]. 1. jún 2018. B.m.: MDPI AG. Dostupné na: doi:10.3390/rs10060829

GLDAS Specifications. In: LDAS Land Data Assimilation System [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/GLDASspecs.php

GRABS, W. E.: *The State of Hydrological Observation Networks* [online]. World Meteorological Organization [cit.2019-10-21]. Dostupné z: http://earth.esa.int/hydrospace07/participants/84231/pres 84231.pdf

GRAHAM, Nigel, 1999. Guidelines for Drinking-Water Quality, 2nd edition, Addendum to Volume 1 – Recommendations, World Health Organisation, Geneva, 1998, 36 pages. *Urban Water* [online]. 1999, roč. 1, č. 2, s. 183 [cit. 22. október 2019]. ISSN 14620758. Dostupné na: doi:10.1016/s1462-0758(00)00006-6

GODAH, W., SZELACHOWSKA, M., KRYNSKI, J.: On the selection of GRACE-based GGMs and filtering method for estimating mass variations in the system earth over Poland. Geoinf Issues 7(1(7)):5-14.2015

Hirji, R., Mandal, S., & Pangare, G. (Eds.). (2017). South Asia Groundwater Forum: Regional Challenges and Opportunities for Building Drought and Climate Resilience for Farmers, Cities, and Villages, New Delhi, India: Academic Foundation, 116pp

JANÁK, J.: *Comparison of GRACE monthly gravity field solutions*. Proceedings from Geodesy, Cartography and Geoinformatics 2019 in press.

KUSCHE, J.: Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models. Journal of Geodesy [online]. 2007, 81(11), 733-749 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s00190-007-0143-3. ISSN 0949-7714.

KUSCHE, J., SCHMIDT, R., PETROVIC S. a RIETBROEK,R.: Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model. Journal of Geodesy [online]. 2009, 83(10), 903-913 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s00190-009-0308-3. ISSN 0949-7714.

LISKA, I., HÖBART, A., a TEODOR, D.: 2010 Floods in the Danube River Basin. International Commission for the Protection of the Danube River [online] 2012, [cit. 2019-10-21]. Dostupné z:

https://www.icpdr.org/flowpaper/app/services/view.php?doc=icpdr\_flood\_report\_2010.pdf&format=p df&page={page}&subfolder=default/files/nodes/documents/

LISKA, I. a MAJOR, Z.: *Floods in June 2013in the Danube River Basin.* International Commission for the Protection of the Danube River [online] 2014, [cit. 2019-10-21]. Dostupné z:

https://www.icpdr.org/flowpaper/app/services/view.php?doc=icpdr\_floods-reportweb\_0.pdf&format=pdf&page={page}&subfolder=default/files/nodes/documents/

NASA, 2017. GRACE-FO Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Tracking Earth'sMassinMotion.[cit.2019-04-18]Dostupnéz:https://gracefo.jpl.nasa.gov/system/downloadable\_items/19\_GRACE\_FO\_Mission\_Brochure\_508.pdf

NIELSEN, J., TSCHERNING, C. C., JANSSON, T. R. N. a FORSBERG, R.: Development and User Testing of a Python Interface to the GRAVSOFT Gravity Field Programs. KENYON, Steve, Maria Christina PACINO a Urs MARTI, ed. Geodesy for Planet Earth [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, 2012-7-26, s. 443-449 [cit. 2019-05-08]. International Association of Geodesy Symposia. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1\_53. ISBN 978-3-642-20337-4.

PEKAROVA, Pavla, Dana HALMOVA, Veronika BACOVA MITKOVÁ, Pavol MIKLÁNEK, Jan PEKAR a Peter ŠKODA, 2013. Historic flood marks and flood frequency analysis of the Danube River at Bratislava, Slovakia. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* [online]. 2013, roč. 61. Dostupné na: doi:10.2478/johh-2013-0041

RAMILLIEN, G., FAMIGLIETTI, J.S. a WAHR, J.: Detection of Continental Hydrology and Glaciology Signals from GRACE: A Review. Surveys in Geophysics [online]. 2008, 29(4-5), 361-374 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s10712-008-9048-9. ISSN 0169-3298.

RODELL, M. a FAMIGLIETTI, J.S.: Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field. Water Resources Research [online]. 1999, 35(9), 2705-2723 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1029/1999WR900141. ISSN 00431397.

TAPLEY, B. D., BETTADPUR S., WATKINS, M. a REIGBER, C.: The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. Geophysical Research Letters [online]. 2004, 31(9), n/a-n/a [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1029/2004GL019920. ISSN 00948276.

TYALAGADI, Manjunatha S., Alaka GADGIL a Gaddam KRISHNAKUMAR, 2015. Monsoonal Droughts in India-A Recent Assessment. *Papers on Global Change IGBP* [online]. 2015, roč. 22, č. 1, s. 19–35. ISSN 1730802X. Dostupné na: doi:10.1515/jgbp-2015-0013

UNICEF, 2016. When Coping Crumbles. Drought in India 2015-16

WAHR, J., SWENSON, S., ZLOTNICKI, V., VELICOGNA, I.: Time-variable gravity from GRACE: First results. Geophysical Research Letters [online]. 2004, 31(11), n/a-n/a [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1029/2004GL019779. ISSN 00948276.

WAHR, J., MOLENAAR M. a 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. 2019-04-18]. DOI: 10.1029/98JB02844. ISSN 01480227.

WAHR, J.: Time-Variable Gravity from Satellites. Treatise on Geophysics [online]. Elsevier, 2015, s. 193-213 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00065-8. ISBN 9780444538031.