

Modeliranje plimovanja trdne Zemlje za geodetsko določanje 3D-položaja točk kombinirane geodetske mreže

Polona Pavlovčič Prešeren*, Miran Kuhar*

Povzetek

Prispevek opisuje plimovanje trdne zemeljske skorje, ki je posledica sprememb gravitacijskega potenciala trdne Zemlje zaradi delovanja privlačnih sil nebesnih teles. Pojav je potrebno upoštevati pri prehodih med različnimi geodetskimi referenčnimi osnovami. Glede na velikostni red pojava, ki tekom enega dneva lahko znaša tudi do več kot 30 cm, ga moramo upoštevati pri gravimetričnih meritvah, pri GNSS-določanju absolutnega položaja in pri relativnem določanju, če obdelujemo daljše vektorje. Pri vzpostavitvi povezave med horizontalnim terestričnim koordinatnim sistemom in višinskim sistemom je potrebno plimovanju trdne Zemlje posvetiti večjo pozornost, saj je v definiciji terestričnih koordinatnih sistemov vpliv v celoti odstranjen, medtem ko je v višinskih sistemih pojav odstranjen le deloma.

KLJUČNE BESEDE: plimovanje trdne Zemlje, gravitacijski potencial, nebesna telesa, horizontalni terestrični koordinatni sistem, višinski sistem

Uvod

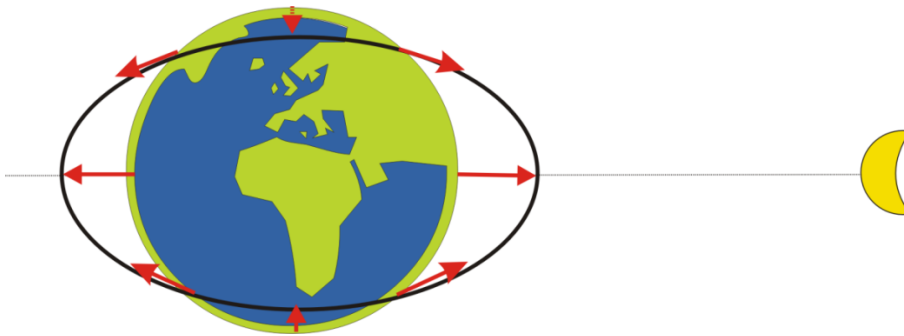
Znanstveno razpravo o plimovanju srečamo že v Galilejevem *Dialogu o dveh svetovnih sistemih*, kjer je predpostavil, da je eden od vzrokov za plimovanje rotacija Zemlje. Danes Galilejevo domnevo lahko spremenimo v trditev, ki je nekoliko pomanjkljiva, saj ne vključuje upoštevanja delovanja privlačnih sil nebesnih teles. Nasprotno kot Galileo je Johannes Kepler zagovarjal, da na plimovanje vpliva privlačnost Lune in pojav ni v zvezi z Zemljino rotacijo. Galileo je plimovanje povezoval z rotacijo Zemlje in ne s privlačnimi silami nebesnih teles zato, ker je predpostavljal, da gravitacijska sila Lune najbolj deluje na predele Zemlje, ki so nebesnemu telesu najbližji, in najmanj na tiste, ki so od nebesnega telesa najbolj oddaljeni. Posledično je sklepal, da bi ob upoštevanju privlačnih sil nebesnih teles plimovanje moralo imeti dvakrat daljšo periodo, kot jo ima sicer. Nesoglasje med Galilejevim in Keplerjevim razmišljanjem je razrešil Isaac Newton, ki je z modeliranjem gravitacijskih sil vzdolž zveznice med nebesnim telesom in Zemljo potrdil Keplerjevo domnevo. Pokazal je, da se zaradi zunanjih privlačnih sil teles celotna Zemlja deformira v elipsoid in zato plima nastane tudi na nasprotni strani Zemlje, čeprav je tam privlačnost Lune manjša. Ta vpliva na manjšo »gravitacijsko napetost« v vodnih masah, kar povzroči, da je amplituda plimovanja nekoliko manjša kot na predelih Zemlje, ki so bližje nebesnemu telesu. Od takrat vemo, zakaj plima nastane dvakrat dnevno, vendar zaradi lunarnega dneva vsak dan 50 minut kasneje kot prejšnji dan.

Danes s pojmom »plimovanje Zemlje« (angl. *Earth tides*) opisujemo pojav odzivanja oceanov in trdne zemeljske skorje na privlačne sile nebesnih teles. Pojav učinkuje na spremembe v gravitacijskem polju Zemlje in deformira Zemljo. Vpliv Lune je dvakrat večji od Sonca, medtem ko je vpliv ostalih nebesnih teles tako majhen, da ga v izračunih

* UL, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

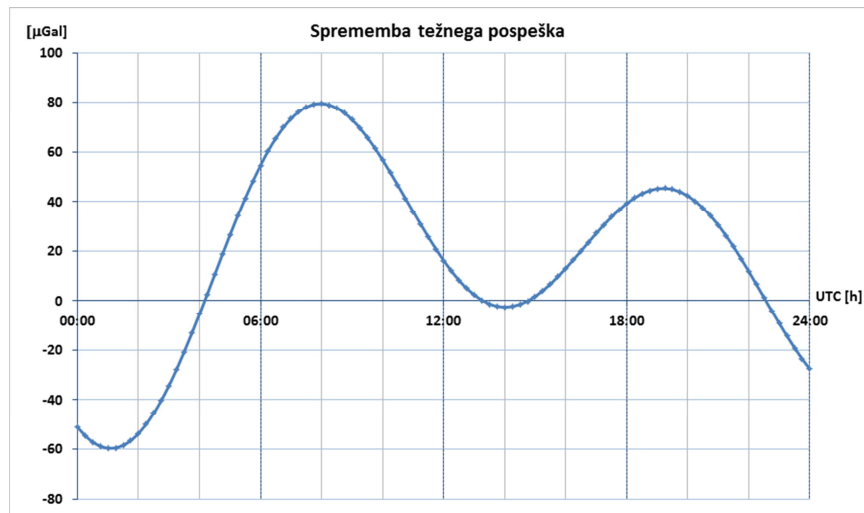
zanemarimo. V modeliranju večkrat zanemarimo tudi dejstvo kroženja Lune okoli Zemlje, saj je obhodni čas Lune daljši od rotacije Zemlje. Podrobnejše proučevanje pojava nam omogoča modelirati pojav in procese odzivanja Zemlje na privlačne sile. Modele potrebujemo pri redukciji geodetskih opazovanj, predvsem pri gravimetričnih meritvah in pri določanju položaja z globalnimi navigacijskimi satelitskimi sistemi (GNSS). Plimovanje zemeljske skorje je ključno tudi pri obravnavanju različnih vrst koordinatnih sistemov in povezovanju horizontalnih terestričnih z višinskimi sistemi.

Modeliranje plimovanja trdne Zemlje je glede na oceanografsko bolj enostavno, saj trdna Zemlja ni podvržena tolikšnim prostorsko-časovnim spremembam. Hkrati je pojav veliko lažje predstaviti matematično in fizikalno. Plimovanje morij in oceanov je odvisno od razčlenjenosti obal, medtem ko plimovanje trdne Zemlje obravnavamo globalno. Nebesna telesa vplivajo na spremembo celotne oblike Zemlje, vendar ne v vseh smereh enako. Gre za preoblikovanje/deformacijo Zemlje v elipsoid, kjer deformacija poteka v smeri povezave med Zemljo in zunanjim telesom (Luno, Soncem) (Wang, 1997), vendar je na najbolj oddaljeni točki nekoliko manjši kot na območjih bližje nebesnemu telesu. Deformacijo oblike Zemlje zaradi plimovanja prikazujemo na sliki 1.



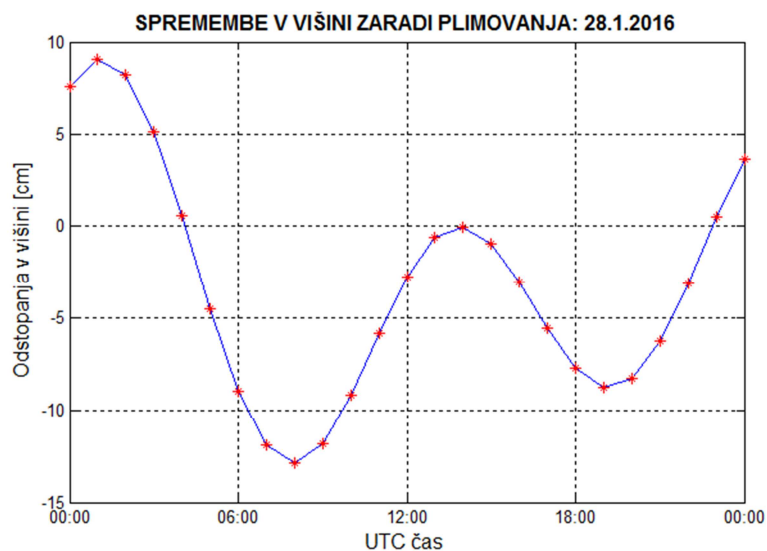
Slika 1: Shematični prikaz vpliva Lune na globalno spremembo oblike površja Zemlje.

Plimovanje vpliva na spremembo oblike Zemlje in na spremembe težnega pospeška. Spremembe pospeška zaradi vpliva zunanjih teles lahko znašajo tudi do $300 \mu\text{Gal}$, tj. $3 \mu\text{ms}^{-2}$ (Ducarme, 2002). To pomeni, da moramo v primeru gravimetričnih meritev plimovanje ustrezno modelirati in v izračunih upoštevati. Na sliki 2 prikazujemo dnevno spremembo težnega pospeška za 28. januar 2016 za območje Ljubljane (Spiridonov in sod., 2015). Največja razlika težnih pospeškov znaša $140 \mu\text{Gal}$. Spremembe v gravitacijskem polju posledično vplivajo na fizikalno določitev višin. Zato podoben vendar zrcalen izris dobimo, če prikažemo dnevne spremembe v višinah (slika 3).



Slika 2: Spremembe težnega pospeška za Ljubljano za obdobje 24 ur (28. 1. 2016).

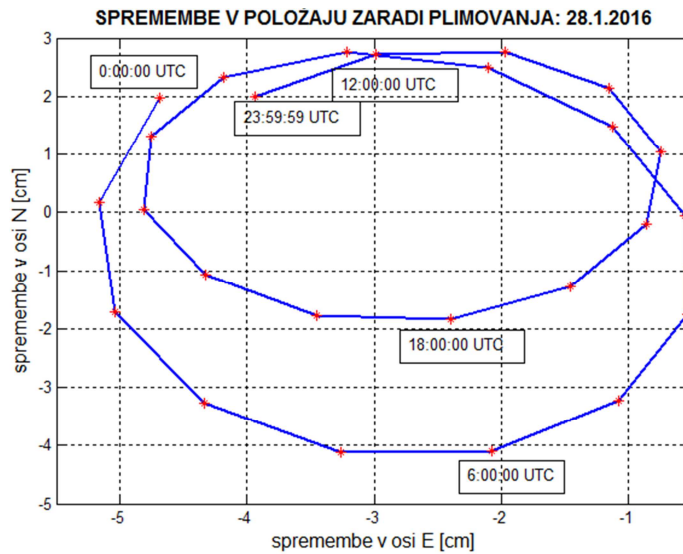
Ker je površje Zemlje na eni za 12.740 km bliže Luni kot na drugi strani, je tam velikost privlačne sile glede na diametralno stran za 7 % večja. To pomeni, da je vpliv plimovanja v danem primeru večji na območju bliže Luni. Na sliki 3 prikazujemo spremembe v višinski komponenti položaja za 28. 1. 2016 za točko v Ljubljani na Jamovi cesti 2 s položajem v globalnem koordinatnem sistemu: $\phi = 46^{\circ} 02' 44,72''$ S, $\lambda = 14^{\circ} 29' 41,80''$ V. Ekstremni vrednosti vrhov, ko smo najbližje oziroma najbolj oddaljeni od Lune, se razlikujeta za več kot 9 cm. Amplituda plimovanja za obravnavani datum in izbrano območje znaša nekaj manj kot 22 cm. Plimovanje vpliva tudi na spremembo položaja, vendar so spremembe manjše.



Slika 3: Spremembe v višini za Ljubljano za obdobje 24 ur (28. 1. 2016).

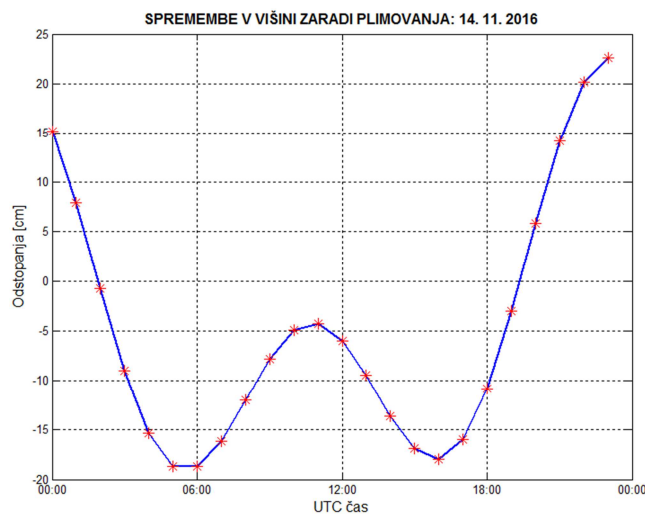
Na sliki 4 prikazujemo spremembo horizontalnega položaja, ki tekom enega dneva znaša do 6 cm v posamezni horizontalni komponenti položaja. Sprememba 3D-položaja zaradi plimovanja ni vsak dan enaka, ampak je odvisna od oddaljenosti Lune od Zemlje. Do največjih vrednosti v položaju zaradi privlačne sile Lune pride v trenutku, ko je Luna v

perigeju, to je najbližje Zemlji. Po preteku 15 luninih ciklusov, kar znaša približno 14 mesecev, Luna zopet pride v točko perigeja.



Slika 4: Spremembe v položaju za Ljubljano za obdobje 24 ur.

V letu 2016 bo Luna najbližje Zemlji 14. novembra. Takrat bo oddaljenost med Zemljo in Luno znašala 356.511 km in posledično bodo tudi amplitude plimovanja trdne Zemlje največje. V času tako imenovane »superlune« bo amplituda plimovanja znašala več kot 40 cm, torej 18 cm več kot na dan konference SZGG 2016 (slika 5).



Slika 5: Slika prikazuje spremembe v višinski komponenti določitve položaja zaradi plimovanja v času pojava »superlune« 2016.

Modeliranje potenciala plimovanja trdne Zemlje

Plimovanje trdne Zemlje v definicijah višinskih sistemov najprej obravnavamo kot direktni vpliv zunanjih nebesnih teles na spremembo potenciala Zemlje. Pojav postane kompleksen v trenutku, ko se Zemlja na direktni vpliv odzove. Govorimo o indirektnem učinku ali odzivu Zemlje na privlačne sile nebesnih teles. Zemljin odziv na plimovanje je

mogoče dobro globalno opisati z elastičnimi parametri, ki za seizmološke študije niso dovolj. Seizmološko obravnavanje je veliko bolj kompleksno, saj so lokalna dogajanja na površju Zemlje opisana z večjim številom parametrov. Globalno plimovanje trdne zemeljske skorje v seizmoloških študijah je pomembno v študijah določitve časovne in prostorske korelacije pojava potresov z elastičnim, tj. indirektnim odzivom trdne Zemljine skorje (Métivier in sod., 2009; Tanaka in sod., 2002; Chen in sod., 2012). Z geodetskega vidika, kjer Zemljo obravnavamo kot osnovo za določanje položaja, pa je ustrezno globalno obravnavanje direktnega plimovanja in indirektnega učinka bolj pomembno. Različne referenčne osnove v obliki koordinatnih sistemov plimovanje trdne Zemlje ne obravnavajo na enak način, zato je pri združevanju različnih vrst podatkov (npr. GNSS in fizikalno določenih višin) problematiko plimovanja potrebno poznati in jo na ustrezen način upoštevati.

Plimovanje lahko opišemo z modeli, pri čemer poznamo ravnotežni potencial plimovanja (angl. *equilibrium tidal potential*), ki nastane zaradi delovanja zunanjih sil na Zemljo. Računamo ga s pomočjo gravitacijske in astronomske teorije. Nadalje modeli opisujejo odziv oceanov in trdne Zemlje na delovanje zunanjih sil. Model plimovanja trdne Zemlje podaja informacije o odzivu brezoceanskih območij na delovanje zunanjih sil (angl. *body tides*). Model plimovanja oceanov vključuje odziv oceanov in elastičnost zemeljske skorje (angl. *load tides*). Gre za spremembe trdne Zemlje (pravzaprav kopnega) zaradi sprememb položajev vodnih mas, ki nastanejo zaradi plimovanja. Oba odziva skupaj vplivata na spremembo trdnega dela zemeljske skorje. Nazadnje govorimo o modelu, ki opisuje spremembe v položajih točk (angl. *site distortions*).

Matematično lahko proces opišemo z enačbo (Agnew, 2007):

$$y(t) = \int x_T(t - \tau)w_T(\tau) d\tau + n(t)$$

kjer sta $x_T(t)$ sila plimovanja in $n(t)$ pripadajoči šum. S funkcijo $w_T(\tau)$ opišemo odziv lokalnega območja na plimovanje.

Modeli plimovanja trdne Zemlje

V konvencijah službe IERS (angl. *International Earth Rotation Service*) podajajo dva modela plimovanja trdne Zemlje. Prvega so predstavili v letu 1992 (McCarthy, 1992) in ga v letu 2003 nadgradili (McCarthy in Petit, 2004). Razlog za to je bila zaznana napaka v izračunih daljših vektorjev s programom *Bernese 4.2* in *5.0* (Hugentobler, 2004). Šlo je za napako modeliranja, ki je vodila do centimeterske napake izračunov v višinah in do 4 mm napake v modeliranju troposferske refrakcije. Plimovanje trdne Zemlje na uporabnike tehnologije GNSS ni povzročalo večjih težav vse do pojava tehnike absolutnega določanja položaja s faznimi opazovanji PPP (angl. *Precise Point Positioning*), saj se je bilo vplivu v obdelavi krajših vektorjev moč izogniti na osnovi modeliranja faznih razlik opazovanj GNSS.

V splošnem plimovanje trdne Zemlje razdelimo na direktni vpliv in indirektni odziv Zemlje. Direktni vpliv na količine, kot so gravitacijski potencial in oblika ekvipotencialnih ploskev, lahko modeliramo na osnovi znanih informacij o masah teles (Zemlja, Luna, Sonce in druga) in njihovih položajih v nebesnem koordinatnem sistemu. Direktni vpliv plimovanja spremeni elastičnost Zemlje in povzroča tako imenovani indirektni odziv Zemlje na vpliv zunanjih sil. Izračun indirektnega učinka zahteva poznavanje konstant *Love* in *Shida*, ki numerično opisujejo elastičnost Zemlje. Plimovanje trdne Zemlje kot

časovno odvisen pojav razdelimo v modeliranje pojava na stalno (časovno neodvisno) in periodično (časovno odvisno) komponento. Podobno kot spremembe potenciala modeliramo tudi deformacijo Zemlje zaradi stalnega in periodičnega vpliva delovanja nebesnih teles.

Problem plimovanja trdne Zemlje (potenciala in zemeljske skorje) v definicijah obravnavamo tako, da (Ekman, 1996):

- plimovanje iz modeliranja potenciala kot tudi deformacij površja Zemlje odstranimo v celoti (angl. *tide free geopotential/crust*),
- pri modeliranju odstranimo periodičen vpliv, medtem ko stalen vpliv zunanjih sil na potencial in deformacije zemeljskega površja ostane (angl. *mean tide potential/crust*),
- podobno kot v prvem primeru (*tide free*) odstranimo periodičen in stalen vpliv nebesnih teles, vendar v danem primeru ostane indirektni stalen odziv Zemlje na delovanje zunanjih sil (angl. *zero tide crust*).

Odstranitev plimovanja v celoti (»tide free«)

Matematično lahko stalno deformacijo oblike Zemlje in njen odziv, ki nastane zaradi delovanja privlačnih sil Lune in Sonca, v celoti odstranimo. To pomeni, da iz vseh količin, ki jih dobimo z opazovanji v fizičnem prostoru Zemlje in so vezane na potencialno polje Zemlje, odstranimo tako direktni vpliv zunanjih teles (periodičen in stalen) kot indirektni odziv Zemlje na ta vpliv. Računsko to pomeni, da nebesna telesa, ki vplivajo na spremembo potencialnega polja Zemlje, postavimo v neskončnost in kot taka ne vplivajo niti na spremembe v potencialu niti na deformacijo Zemlje. Ker plimovanje odstranimo v celoti, se v teh sistemih oblike Zemlje precej razlikuje od dejanske oblike.

Stalen vpliv plimovanja trdne Zemlje za opis časovno odvisnega plimovanja trdne Zemlje obravnavamo s h - in k - koeficienti *Love* in koeficientom l - *Shida*. V danem primeru govorimo o s plimovanjem neobremenjenih koordinatnih sistemih (angl. *non-tidal* ali *tide free systems*). Med te uvrščamo vse različice mednarodnega terestričnega referenčnega sistema ITRSyy (angl. *International Terrestrial Reference System*) in iz njega izpeljane regionalne koordinatne sisteme, kot je tudi ETRS89 (angl. *European Terrestrial Reference System 1989*).

Odstranitev periodičnega dela plimovanja – srednje plimovanje (»mean tide«)

V tem sistemu odstranimo le periodični del delovanja zunanjih sil na Zemljo. Sistem bi lahko opisali kot fizikalno skladi, saj računsko nebesnih teles ne predstavljamo v neskončnost. Pri matematični predstavitvi moramo razrešiti robni problem, saj so mase, ki določajo spremembo potenciala, tudi izven Zemlje. To pomeni, da spremembe v gravitacijskem potencialu Zemlje nastanejo tako zaradi delovanja mas v notranjosti Zemlje kot tudi zaradi mas izven nje. Težava se pojavi v matematičnem obravnavanju Stokesove enačbe. Zunanja telesa namreč povzročijo dodatno spremembo potenciala, ki ga matematično ne moremo več obravnavati v harmonični obliki. Prva sta teoretično rešitev problema podala [Grafarend in Sansò \(1984\)](#), ki sta predstavila razširjen model potenciala z upoštevanjem zemeljskih in mas nebesnih teles. Kasneje so [Zeman \(1993\)](#) in [Poutanen in](#)

sod. (1996) izpostavili problematiko obravnavanja centrifugalnega potenciala, ki ga izven Zemlje ni. Pokazali so, da je v danem primeru pojav potrebno modelirati posebej za območja na in izven Zemlje.

Spremembo potenciala zaradi delovanja nebesnih teles (zunanjih sil) sestavljata časovno neodvisna (permanentni/stalni del) in časovno odvisna komponenta (periodični del). Odstranitev periodičnega dela vodi do ti. obravnavanja srednjega plimovanja s časovno neodvisno komponento. Potencialno polje srednjega plimovanja (angl. *mean-tide potential field*) določa sistem, ki globalno opisuje, kako voda in ure dejansko tečejo, kar je v neposredni zvezi s splošno relativnostno teorijo.

Odstranitev direktnega vpliva v celoti, medtem ko indirektni vpliv ostane
(»zero tide«)

V dani situaciji odstranimo direktni vpliv potenciala zunanjih privlačnih sil Lune in Sonca v obeh komponentah (periodični in permanentni del), medtem ko indirektni učinek oziroma elastični odziv Zemlje na delovanje privlačnih sil ostane. V tej različici je gravitacijsko polje določeno le na osnovi Zemljinih mas in centrifugalne sile. Podobno kot v sistemih *tide free* tudi tu pri obravnavanju direktnega vpliva, postavimo nebesna telesa v neskončnost. Nasprotno pa pri indirektnem odzivu tega ne moremo več storiti, saj se Zemlja na privlačne sile nebesnih teles v neskončnosti ne bi odzvala. Primer je EVRF 2007 (angl. *European Vertical Reference Frame 2007*).

Problematika povezave terestričnega koordinatnega in višinskega sistema

Obravnavanje plimovanja trdne Zemlje se v terestričnih (ITRSyy in ETRSyy) koordinatnih sistemih razlikuje od obravnavanj vpliva v višinskih sistemih. Medtem ko so vse realizacije ITRSxx in ETRS89 določene v sistemu brez plimovanja trdne Zemlje (angl. *tide free*), pa resolucija IAG iz leta 1983 zahteva izhodiščni sistem (angl. *zero system*) za gravitacijsko polje in enak sistem (angl. *zero = mean system*) za določitev 3D-položajev na Zemlji. Trenutno velja:

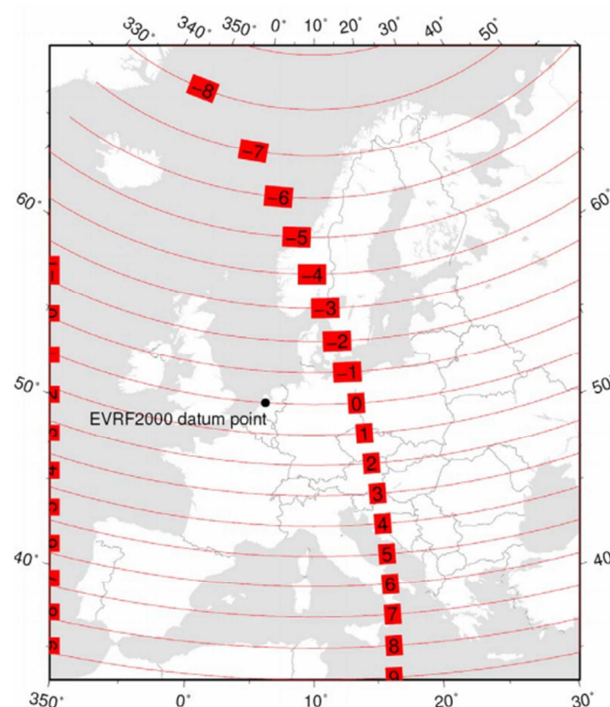
- **zero tide** za gravitacijsko polje, to je upoštevanje le indirektnega vpliva plimovanja trdne Zemlje,
- **tide free** za terestrično določanje položaja (ITRFyy, ETRS89) – vpliv zunanjih sil je v celoti odstranjen in
- neuskkljeno in različno obravnavanje vpliva v razlikah geopotencialnih kot, določenih z geometričnim nivelmanom in gravimetričnimi meritvami.

Zemljini geopotencialni modeli, npr. EGM (angl. *Earth Gravitational Model*), se delijo glede na način obravnavanja plimovanja trdne Zemlje, in sicer je lahko vpliv plimovanja odstranjen (angl. *tide free*) ali pa je upoštevan le indirektni vpliv (angl. *zero tide*). Razlika med različicama je v upoštevanju sfernega koeficienta C_{20} . Modeli EGM so določeni na osnovi koordinat v koordinatnem sestavu ITRFyy in se nanašajo na upoštevanje le indirektnega učinka plimovanja (angl. *zero tide*).

Če v izračunih preciznega nivelmana ne upoštevamo popravkov zaradi vpliva Lune in Sonca (velikokrat jim rečemo luni-solarni popravki), govorimo o srednji različici obravnavanja plimovanja, kjer obravnavamo direktni vpliv, indirektnega pa ne (angl. *mean tide*). Upoštevanje luni-solarnega popravka vodi do konvencionalnega koordinatnega

sistema z odstranjenim vplivom plimovanja v celoti (angl. *tide free system*). Sistemi, kjer upoštevamo le indirektni vpliv plimovanja (angl. *zero tide*), so redki in jih na območju Evrope uporabljajo skandinavske dežele (primer Norveške, Švedske, Finske), ki že v osnovi višine zaradi post-ledenodobnega dvigovanja površja obravnavajo na njim specifičen način.

Po definiciji pri EVRF 2007 upoštevamo le indirektni vpliv. Predhodne realizacije do vključno EVRF 2000 so po definiciji upoštevale vpliv Lune in Sonca (*mean tide*). Danes večina nacionalnih višinskih sistemov še vedno temelji na tej definiciji, medtem ko z GNSS-višinomerstvom določimo višine v sistemu brez plimovanja (angl. *tide free*). [Mäkinen \(2008\)](#) je pokazal, da bi v primeru prehoda višinskega sistema iz *mean tide* v *zero tide* ob enotnem višinskem izhodišču (npr. normalni reper v Amsterdamu – NAP) bile spremembe v višinah do nekaj cm. S slike 6 lahko razberemo, da bi spremembe v višinah za območje Slovenije znašale okoli 3 cm.



Slika 6: Odstopanja višin pri različnih načinih obravnave plimovanja trdne Zemlje ([Mäkinen, 2008](#)).

Zaključek

Vse aktivnosti na področju osnovnega geodetskega referenčnega sistema gredo v smer, ko bo potrebno vzpostaviti povezavo višinskega in terestričnega koordinatnega sistema. Glede na različne postopke pridobivanja podatkov v enem in drugem referenčnem sistemu se bo potrebno problema lotiti z razmislekom o optimalni povezavi med sistemoma, ki problematiko plimovanja zemeljske skorje obravnavata povsem drugače. Hkrati se je potrebno zavedati, da v primeru horizontalnega terestričnega koordinatnega sistema, kjer je vpliv plimovanja v celoti odstranjen, lahko pridobimo koordinate v časovni vrstah. Nasprotno pa dnevne ali tedenske časovne vrste pridobitve višinskih podatkov niso izvedljive. Fizikalne višine so vezane na strogo določen trenutek vzpostavitve višinskega sistema, saj meritve za določitev fizikalnih višin potekajo skozi daljše časovno obdobje. Poleg tega, da bomo v prihodnje morali uskladiti fizikalne višine s terestričnim

koordinatnim sistemom, bomo morali upoštevati še mednarodne smernice za določitev višinskega sistema v smislu obravnavanja problematike plimovanja trdne Zemlje. Danes večina držav, ki na novo določa višinsko komponento prostorskega referenčnega sistema, sledi resoluciji IAG št. 16, ki narekuje strategijo uskladitve nacionalnih višinskih sistemov in modelov geoida v skladu s sistemom *zero tide*, kjer direktni vpliv plimovanja odstranimo, medtem ko indirektni učinek oziroma elastični odziv Zemlje na delovanje privlačnih sil ostane.

Zahvala

Prispevek je nastal v okviru projekta Geodetske uprave Republike Slovenije z naslovom Implementacija kombinirane geodetske mreže in višinske komponente ESRS v državni geodetski referenčni sistem in raziskovalnega programa Geoinformacijska infrastruktura in trajnostni prostorski razvoj Slovenije (P2-0227) Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije – ARRS.

Literatura

- Agnew, D. C. (2007). Earth tides. Treatise on Geophysics. Volume 3: Geodesy. Elsevier, New York, 163–195. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-044452748-6.00056-0>.
- Chen, Y., Liu, L., Wan, W., Ren Z. (2012). Equinoctial asymmetry in solar activity variations of *NmF2* and TEC. *Annales Geophysicae* 30 (3), 613–622. <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-30-613-2012>.
- Ducarme, B. (2002). Introduction to the theory of tides. Proceedings of the joint BGI/ICET 2002 Summer School on Terrestrial Gravity Data Acquisition Techniques, Louvain-la-Neuve, Belgija, 4.–11. september 2002.
- Ekman, M. (1996). The permanent problem of the permanent tide: What to do with it in geodetic reference systems? *Bulletin d'Informations Marees Terrestres*, No. 125, 9508-9513. http://www.eas.slu.edu/GGP/BIM_Past_Issues/1996_bim125_septembre.pdf
- Grafarend, E., Sansò, F. (1984). The multibody space-time geodetic boundary value problem and the Honkasalo term. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical society*, 78 (1), 255–275. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb06483.x>.
- Hugentobler, U. (2004). Bernese GPS Software: Error in Computation of Tides. BSW Electronic Mail. <http://www.aiub.unibe.ch/download/bswmail/bswmail.0190>.
- Mäkinen, J. (2008). The treatment of permanent tide in EUREF products. Symposium of the IAG Sub-commission for Europe (EUREF), Bruselj, Belgija, 18.–21. junij 2008.
- McCarthy, D. D. (1992). IERS standards. IERS Technical Note 13. Central Bureau of IERS, Pariz, Francija, 151 str.
- McCarthy, D. D., Petit, G. (2004). IERS Conventions (2003). IERS Technical Note 32, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt na Majni, Nemčija, 127 str.
- Métivier, L., de Viron, O., Conrad, C. P., Renault, S., Diament, M., Patau, G. (2009). Evidence of earthquake triggering by the solid earth tides. *Earth and Planetary Science Letters* 278 (3–4), 370–375. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.024>.
- Poutanen, M., Vermeer, M., Mäkinen, J. (1996). The permanent tide in GPS positioning. *Journal of Geodesy*, 70 (8), 499–504. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00863622>.
- Spiridonov, E., Vinogradova, O., Boyarskiy, E., Afanasyeva, L. (2015). ATLANTIDA3.1_2014 for Windows: A Software for Tidal Prediction. *Bulletin D'Informations Marees Terrestres*, No. 149, 12062-12081. http://www.eas.slu.edu/GGP/BIM_Recent_Issues/bim149-2015/
- Tanaka, S., Ohtake, M., Sato, H. (2002). Evidence for tidal triggering of earthquakes as revealed from statistical analysis of global data. *Journal of Geophysical Research* 107 (B10), 2211. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JB001577>.

- Zeman, A. (1993). Influence of permanent tides on the shape and gravity field of the Earth: Comparison of different approaches. *Marées Terrestres, Bulletin d'Informations*, 115, 8429–8434.
- Wang, R. (1997). Tidal response of the solid Earth. V: Wilhelm, H., Zürn, W., Wenzel, H.-G. (ur.), *Tidal Phenomena. Lecture Notes in Earth Sciences* 66. Springer-Verlag, Berlin, 27–57. <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0011456>.