

DOLOČITEV VPLIVA LUNE NA GEOMAGNETNI ŠUM

THE INFLUENCE OF THE MOON ON GEOMAGNETIC NOISE

Miran Kuhar, Rudi Čop, Polona Pavlovčič Prešeren

UDK: 528.27:523.3

Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01

Prispelo: 4. 5. 2020

Sprejeto: 5. 7. 2020

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2020.03.303-319

SCIENTIFIC ARTICLE

Received: 4. 5. 2020

Accepted: 5. 7. 2020

IZVLEČEK

Vpliv Lune na geomagnetne meritve je dvajsetkrat manjši od vpliva Sonca, zato ga z dnevnih magnetogramov ni mogoče enostavno določiti. Proučujemo ga lahko šele po skrbno izbrani časovni vrsti magnetogramov, pridobljenih v posebnih obdobjih, in sicer v času minimalne intenzitete dogajanja na Soncu, ko v atmosferi ni prisotnih razelektritev ali prehodov nevihtnih front ter na širšem območju geomagnetnega observatorija ni bilo potresov. Začetek 25. Sončevega cikla in zimski solsticij v letu 2019 sta bila več kot primerno časovno izhodišče za proučevanje vpliva gravitacijskega učinka Lune na geomagnetni šum. Za izbrano obdobje smo na observatoriju PIA (Piran) pridobili zaporedje meritev časovnih vrst geomagnetno mirnih dni v tridnevnem obdobju zadnjega knajca in pred mlajem, ki je skoraj sovpadal z zimskim solsticijem. S spektralno analizo dveh obdobji zaporednih luninih men smo numerično ovrednotili vpliv gravitacijskega učinka Lune in rezultate primerjali z mareografskimi meritvami v Koprju. Dokazali smo, da iz geomagnetnih meritev ocenjeni vpliv Lune ustreza modeliranemu vplivu Lune iz rezultatov plimovanja morja. Z ocenjeno določitvijo geomagnetnega šuma zaradi vpliva Lune si bo v prihodnje mogoče pomagati pri oceni drugih naravnih in antropogenih vplivov na geomagnetni šum na observatoriju PIA (Piran).

KLJUČNE BESEDE

šum v geomagnetnem polju, gravitacija Lune, 25. Sončev cikel, zimski solsticij

ABSTRACT

Regarding geomagnetic measurements, the impact of the Moon is twenty times smaller than that of the Sun, so it is not easy to determine from daily magnetograms. The influence can be studied after a carefully selected time series of magnetograms obtained in specific conditions. Specifically, this is in minimum solar intensity with no charges or transitions of weather storm fronts, and no major earthquakes in the wider area. The beginning of the 25th Solar Cycle and 2019 Winter Solstice was an entirely appropriate timeframe for conducting a study of the lunar impact on geomagnetic noise. At the end of 2019, we were able to perform a time series of geomagnetically calm days at the PIA observatory (Piran) during the three-day period from the Third Quarter to the New Moon, which almost coincided with the Winter Solstice. The results of the processing of the geomagnetic measurements were compared with the independent sea level measurements from the tide gauge station in Koper. The spectral analysis of two consecutive lunar periods was used to evaluate the gravitational effect of the Moon. Furthermore, the results were compared with sea tides in Koper. We showed that the estimated influence of the Moon from geomagnetic measurements coincides with the modelled influence of the Moon from the results of sea tides. The results of the geomagnetic noise caused by the influence of the Moon can be used as a starting point for the investigation of other natural and anthropogenic influences on geomagnetic measurements at the geomagnetic observatory PIA (Piran).

KEY WORDS

geomagnetic noise, gravity of the Moon, 25th Solar cycle, Winter Solstice

1 UVOD

Zaradi vse večjega zavedanja, da popolna zanesljivost določitve položaja s tehnologijo GNSS zaradi naravnih ali namernih motenj signala ni mogoča, je v podporo za neprekinjeno določitev položaja treba poznati tudi druge rešitve. Ena od možnosti so inercialni sistemi v povezavi z modeli magnetnega polja Zemlje. Modeli geomagnetnega polja so bili pred satelitskimi tehnikami določitve položaja v navigaciji pomemben vir informacij. Tudi danes se podatki redno posodabljajo za določitev navigacijske reference na večjem delu Zemljine površine, vključno z vodnimi območji in v aviaciji. Geomagnetne modele posodabljajo z združevanjem meritev na geomagnetnih observatorijih, razporejenih po celotni zemeljski obli.

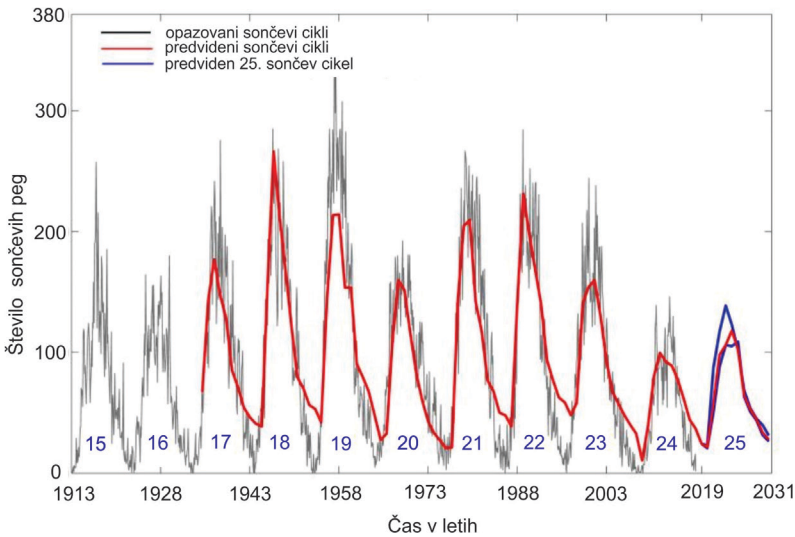
Zemeljsko magnetno (ali geomagnetno) polje se zaradi različnih dejavnikov prostorsko in časovno spreminja. To pomeni, da je treba njegove meritve izvajati neprekinjeno in hkrati proučevati nenadne spremembe ter ugotavljati vzroke in korelacijo z dejavniki vplivov na magnetno polje. Ko Zemljino magnetno polje na nekem območju nenadoma postane šibko, lahko nabiti delci prodrejo v zemeljsko polje in škodijo različnim umetnim satelitom. Geomagnetno polje je na eni strani podlaga za delovanje skupine navigacijskih instrumentov, lahko pa se na primer zgodi, da je zaradi nenadnih sprememb v ionosferi in geomagnetnem polju za neko obdobje povsem onemogočeno delovanje umetnih satelitov ter zemeljskih infrastruktur.

Sistematično opazovanje in spremljanje geomagnetnega polja kot tudi njegovo modeliranje so zelo pomembni. Z meritvami lahko spremljamo razmere v ionosferi, ugotavljamo indukcijo v zemeljski skorji in plašču ter proučujemo razmere v tekoči sredici Zemlje in njenem trdem jedru (Love in Remick, 2007; Chapman in Price, 2007). Še več, dokazano je bilo, da so spremembe v Zemljinem magnetnem polju povezane s pojavom potresov (Čop, 2017; Pavlovčič-Prešeren et al., 2020). V geomagnetno mirnih dnevih na magnetograme vplivajo električni in zračni tokovi v ionosferi, izbruhi na Soncu ter sončni mrki, lunine mene in prevodnost Zemljine skorje (Čop et al., 2015). Če želimo določiti vpliv posameznega dejavnika neodvisno od drugega, moramo za izbrana obdobja podrobno proučiti magnetograme in rezultate obdelav primerjati z drugimi neodvisnimi meritvami.

1.1 Izhodišče in cilj raziskave

V letu 2019 se je pričel 25. Sončev cikel (Čop, 2020), ki ima trenutno najmanjšo intenziteto dogajanja (slika 1). Večino dni na Sončevem disku ni bilo opaziti sončnih peg, izbruhi na njem so bili zelo redki in tudi geomagnetne nevihte niso bile pogoste. V sredini decembra 2019 je količina kozmičnih žarkov (Forbush, 1993), merjenih na površini Zemlje, dosegla rekordno visoko vrednost. Od leta 1964, ko se meritve kozmičnih žarkov opravljajo redno, je dosegla ekstremno vrednost še v obdobju 2009–2010, v minimumu 23. Sončevega cikla (Oulu Neutron Monitor, 2020).

V tem obdobju ter med zimskim solsticijem (od 23. do 25. decembra 2019), ko je imelo Sonce precej manjši vpliv na geomagnetno polje, je bilo smiselno narediti študijo primerjave obdobja z visoko količino kozmičnih žarkov (od 15. do 18. decembra 2019). Hkrati smo v dani raziskavi želeli numerično oceniti in z meritvami na mareografski postaji ovrednotiti vpliv Lune na geomagnetne meritve v minimumu 25. Sončevega cikla.



Slika 1: Zaporedje zadnjih Sončevih ciklov v odvisnosti od let s predvideni potekom 25. Sončevega cikla (qrznnow.com, 2020).

Za proučevanje geomagnetnih meritev z observatorija PIA (Piran) smo izbrali po tri zaporedne geomagnetno mirne dneve S_q (angl. *Solar quiet*), da je bil vpliv nekaterih naravnih virov, kot so razelektritve v atmosferi in prehodi nevihtnih front, na geomagnetni šum najmanjši. Za opazovanje vpliva luninih men na geomagnetne meritve smo enominutne srednje vrednosti merilnih rezultatov preslikali v frekvenčni prostor. Ker gravitacijski sili Sonca in Lune vplivata tudi na morje, smo v frekvenčnem prostoru primerjali rezultate geomagnetnih meritev s plimovanjem morja v Kopru.

2 GEOMAGNETIZEM IN IONOSFERSKO ELEKTRIČNI DINAMO

Pomembna spoznanja o povezavi med pojavi polarnih sijev in spremembami položaja magnetne igle je prvi prispeval švedski astronom in fizik Anders Celsius (1701–1744). S tem se je v prvi polovici 18. stoletja začel razvoj znanja o električnih tokih v ionosferi. Da so polarni siji posledica električnih tokov v zgornjih plasteh atmosfere, je s poskusom dokazal norveški fizik Kristian Birkeland (1867–1917) konec 19. stoletja. Sistem električnih tokov, ki povzročajo polarni sij, je ostal v ospredju zanimanja geofizikov še vse preteklo stoletje. Za proučevanja ionosfere so v teh treh stoletjih postopoma razvili različne merilne metode in instrumente. V drugi polovici 20. stoletja so se začele meritve ionosfere z raketami in umetnimi sateliti, dogajanje v njej pa so analizirali z računalniškimi modeli. Danes stanje v ionosferi lahko neprekinjeno modeliramo tudi z obdelavo opazovanj GNSS (Sterle et al., 2013), vendar, čeprav znamo razmeroma dobro oceniti porazdelitev prostih elektronov, še vedno ne poznamo dejstev o spremembi njene prevodnosti v odvisnosti od kraja in časa (Brekke, 2018).

Ob kakršnikoli spremembi zračnega tlaka v zračnih plasteh atmosfere in zaradi gravitacijskega vpliva Sonca ter Lune nastajajo dodatni električni toki v plasteh atmosfere, ki so električno prevodne. Zaradi vertikalnega premikanja zračnih mas v teh plasteh, ki se obenem premikajo v zemeljskem magnetnem polju, skozi tečejo električni toki. Ti učinkujejo na zemeljsko magnetno polje (Chapman, 1918; Chapman, 1919). S proučevanjem spremembe komponente Z zemeljskega magnetnega polja je britanski

fizik Arthur Schuster (1851–1934) z ionosferskim dinamom razložil dnevno variacijo geomagnetnega polja (Schuster, 1907).

2.1 Vpliv Sonca in Lune na magnetno polje Zemlje

Obhodni čas Lune okoli Zemlje je v povprečju 27,321661 dneva z ekscentričnostjo 0,0549 in naklonskim kotom $5,145^\circ$ glede na ravnino ekliptike. S površine Zemlje to kroženje opazujemo kot lunine mene in njegovo ekscentričnost v različni velikosti polne lune. Masa Sonca je neprimerno večja od Lunine, vendar je zaradi njegove oddaljenosti od Zemlje, ki je 390-krat večja od oddaljenosti Lune od Zemlje, njegova gravitacijska sila le 0,46 Lunine (De Jong et al., 2002; Kowalik in Luick, 2013). Vektorska vsota obeh gravitacijskih sil vpliva na Zemljo, na njeno kopno, oceane in morja ter na njeno atmosfero. Skupaj s sevanjem Sonca in magnetnim poljem Zemlje soustvarja ionosferski dinamo.

S statistično analizo merilnih podatkov iz svetovnega sistema geomagnetnih observatorijev je Sydney Chapman (1888–1970) dokazal, da komponento S (angl. solar) in komponento L (angl. lunar) povzročajo električni toki v ionosferi, ki so zelo blizu sferični obliki in koncentrični glede na površino Zemlje. V geomagnetno mirnih dneh edino ti komponenti povzročata dnevne spremembe zemeljskega magnetnega polja (Matsushita, 1968; Chapman, 1961). Že v preteklosti so meritve geomagnetnega polja pokazale, da je magnetno polje ob polni luni in mlaju različno (Fraser-Smith, 1969). Vpliv Sonca in Lune na magnetno polje Zemlje so obravnavali za posamezne geomagnetne observatorije (Klausner et al., 2013; Bilge in Tulunay, 1997; Anad et al., 2008), področja geomagnetnega ekvatorja (Yizengaw in Carter, 2017; Soddoqui, 2017), celine (Cambell et al., 1998; Obiekezie Obiadazie in Agbo, 2013) in obdobja, daljša od deset let (Yamazaki et al., 2012; Yamazaki in Koch, 2014; Courtilot in Le Mouel, 1988). Uporabljali so različne metode obdelave merilnih podatkov, pri čemer v novejših raziskavah izstopajo analize z valčki (angl. wavelet analysis) (Kumar in Foufoula-Gergiou, 1997; Kumar, 1994) in uporaba časovnih oken, ki so daljša od lunarnega ali sinodskega meseca (29,5306 dneva).

2.2 Geomagnetne meritve in določitev mirnih dni, S_q

Električni toki elektronov in pozitivnih ionov se širijo po medplanetarnem prostoru od Sonca proti Zemlji; pojav imenujemo Sončev veter. Magnetno polje Zemlje električne toke, ki tečejo v bližnjem vesolju (angl. geospace) v magnetosferi na višini nad 200 kilometrov, zavrtinči okoli magnetnih silnic. Verjetnost za rekombinacijo elektronov in pozitivnih ionov je namreč na teh višinah zelo majhna, ker je njihova gibljivost zelo velika. Ta upada z gostoto zraka in zato prevodnost zračnih plasti narašča skoraj eksponentno z njihovo višino. Ta je odvisna tudi od lokalnega časa in enajstletnega cikla sončnih peg (Jursa, 1985). Na višini od 85 do 200 kilometrov nad površino Zemlje se absorbirajo že vsa rentgenska sevanja in ultravijolični žarki krajših valovnih dolžin, ki izhajajo s Sonca. Nastaja atmosferska plazma, ki je električno prevodna. Toki, ki nastajajo zaradi Sončevega sevanja in privlačnosti Sonca (angl. S-variation) ter zaradi privlačnosti Lune (angl. L-variation), premikajo ionosfersko plazmo v skladu z Lorentzovo silo, upoštevajoč magnetno polje Zemlje. Zaradi vrtenja Zemlje okoli svoje osi in vrtenja Lune okoli nje se gibanje ionosferske plazme širi kot atmosferski val. Pri tem nastajajo električna polja, prav takšna kot v električnih

navitjih dinama, ki poženejo električni tok po zaključenih električnih tokokrogih. Električni toki v ionosferi povzročajo dnevno spremembo magnetnega polja Zemlje, merjenega na njeni površini, in so sestavni del ionosferskega dinama. Njegovo proučevanje je najenostavnejše v geomagnetno mirnih dneh. Takrat na Zemljino magnetno polje ne vplivajo izbruhi na Soncu CME (angl. Coronal Mass Ejections) ali povečana hitrost sončnega vetra CIR (angl. Corotating Interaction Regions). V teh dneh Zemlja ne prehaja skozi mejno področje magnetnega polja v medplanetarnem prostoru (Cliver et al., 2004; Čop, 2016).

3 GEOMAGNETNI OBSERVATORIJ V SLOVENIJI

Na podlagi terenskih geomagnetnih meritev ter zbranih priporočil in podatkov je bila za izbiro primernege mesta za geomagnetni observatorij na ozemlju Slovenije narejena obsežna študija GIS (Paliska et al., 2010). Najprej je bil vzpostavljen observatorij na Sinjem Vrhu (SNV), in sicer na visokogorski planoti Gora nad Ajdovščino. Leta 2011 je bil vključen v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET (angl. International Real-time Magnetic Observatory Network). Že predhodne meritve na več postajah po Sloveniji so pokazale, da je v magnetnem polju prisoten visok šum. Zato smo dodatno preverili protonski magnetometer, s katerim smo opravljali izhodiščne meritve na drugem geomagnetnem observatoriju (Čop in Kosovac, 2010). Ker pri njem nismo odkrili napake, smo naredili več dodatnih meritev od obale Piranskega zaliva do Sinjega Vrha približno po isti geografski dolžini. Odkrili smo, da je šum v magnetnem polju pri obali Jadranskega morja precej nižji kot v notranjosti Slovenije.

3.1 Vzpostavitev geomagnetnega observatorija PIA v slovenski Istri

Odločili smo se, da prestavimo lokacijo geomagnetnega observatorija. Izbrali smo jo v skladu s priporočili, naj observatorij stoji v magnetno mirnem okolju, ki naj bo oddaljeno od železnice, daljnovodov, prometa in ljudi. Po priporočilih morajo biti tudi stavbe observatorija zgrajene na stabilnih tleh in iz nemagnetnih materialov. Gradnjo observatorija PIA (Piran) v slovenskem delu Istre smo začeli načrtovati v začetku leta 2014 in ga januarja naslednje leto vključili v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET. Postavili smo ga na robu vasi Sv. Peter nad Dragonjo ($\varphi = 45,46^\circ \text{ N}$; $\lambda = 13,69^\circ \text{ E}$). Stoji na območju varovanega ozemlja Natura 2000, zaradi česar je bilo treba zagotoviti tudi prost prehod divjih živali. Ker je jugozahodni del Slovenije s strelami najbolj obremenjen del Evrope, smo morali razviti uspešno zaščito pred atmosferskimi razelektritvami (Čop et al., 2014). Zaradi zanesljivega prenosa merilnih podatkov smo morali proučiti in upoštevati vpliv Sonca na širjenje signalov mobilne telefonije (Čop, 2016). Ker so v slovenskem delu Istre boljše vremenske in podnebne razmere kot na Gori nad Ajdovščino, je bila gradnja observatorija enostavnejša, hitrejša in cenejša.

Observatorij SNV je bil od observatorija PIA oddaljen 52,9 kilometra (azimut $21,68^\circ$). V prvem delu leta 2015 sta delovala še oba, zato smo lahko z merilnimi podatki iz tega obdobja naredili primerjavo velikosti geomagnetnega šuma (preglednica 1) na obeh merilnih mestih (Čop et al., 2011). Ravnj geomagnetnega šuma se torej povečujejo od observatorija PIA proti severu, kjer na meji z Republiko Avstrijo stojijo mlada gorovja Kamniško-Savinjskih Alp in Karavank. S tem se je potrdilo, da je bila odločitev o spremembi lokacije observatorija smiselna.

Preglednica 1: Geomagnetne meritve na observatorijih SVN in PIA 14. avgusta 2015 od 00:00 do 03:00 UTC (Čop et al., 2011).

Observatorij	F [nT]	σ [nT]	σ^*100/F [%]	σ [%] / σ_{PIA} [%]
SNV (Sinji Vrh, Slovenija)	47.746,01	0,82100	1,7195E-3	1,24
PIA (Piran, Slovenija)	47.410,55	0,65858	1,3891E-3	1,00

3.2 Oprema na observatoriju

Za neprekinjeno merjenje spremembe geomagnetnega polja na observatoriju PIA smo izbrali triosni magnetometer *fluxgate*, ki je bil prilagojen na razmere v Sloveniji (Flux-gate Magnetometer LEMI-022_SI, 2014). Izkušnje na observatoriju SNV so pokazale, da so prav ti magnetometri najbolj občutljivi za atmosferske razelektritve. Zaradi nadpovprečne ravni magnetnega šuma na ozemlju Slovenije smo se odločili za digitalni triosni magnetometer *fluxgate* s hitrostjo vzorčenja 1 sps (angl. samples per second).

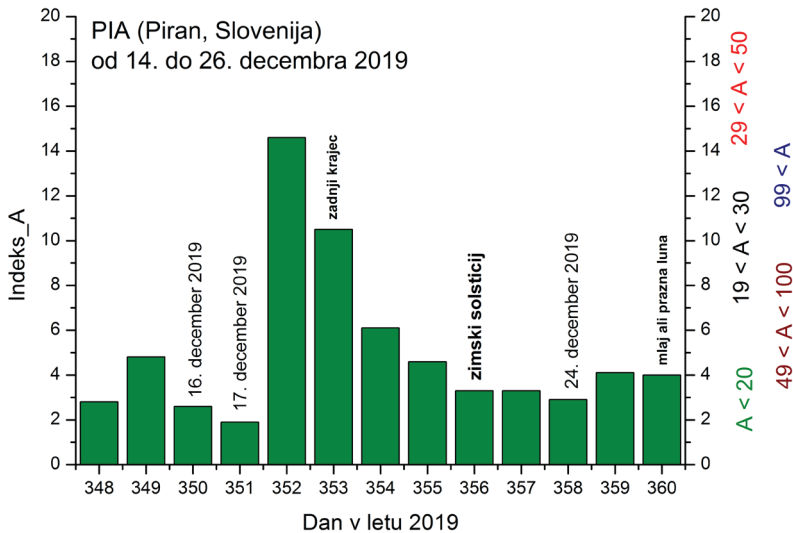
Za spremljanje pojavov geomagnetnih impulzov, naravnih resonančnih frekvenc našega planeta in razmer v ionosferi smo v letu 2017 zgradili sprejemnik ELF/ULF (angl. extremely low frequency/ultra low frequency). Z usmeritvijo njegove antene v horizontalno ravnino smo odkrili, da so v frekvenčnem področju od 1 Hz do 99 Hz prisotne motnje umetnega izvora. Osnovni frekvenci javne električne mreže 50 Hz dodajajo višje harmonske frekvence nelinearni induktivni porabniki, kot so asinhronski električni motorji. Tem se pridružijo še bočni pasovi zaradi elektronske regulacije vrtljajev z modulacijo PPM (angl. pulse position modulation), ki vplivajo tudi na območje pod 1 Hz (Čop in Henigman, 2018). Raziskava je med drugim potrdila, da je bila izbira hitrosti vzorčenja digitalnega magnetometra pravilna.

4 METODOLOGIJA RAZISKAVE

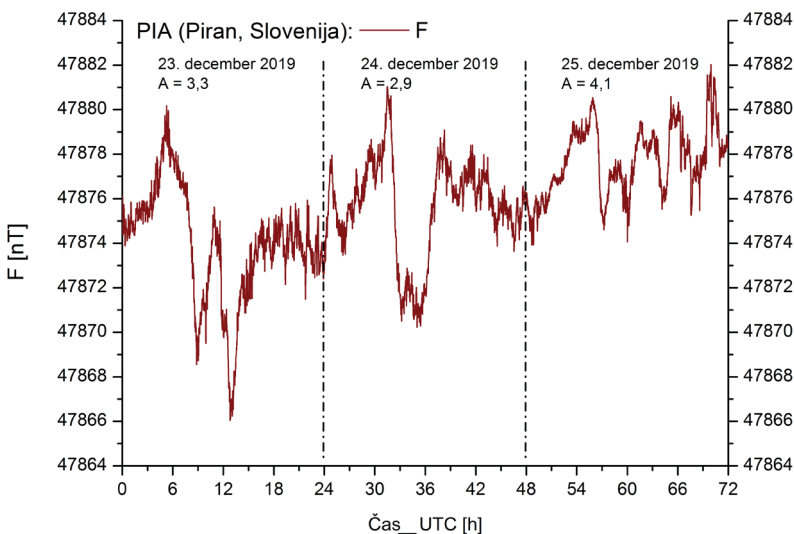
4.1 Obdelava geomagnetnih meritev, uporabljenih v raziskavi

Pri geomagnetnih observatorijih na srednjih geografskih širinah, kjer leži tudi observatorij PIA, za opis stanja geomagnetnega polja uporabljamo geomagnetni indeks K . Geomagnetni indeks K na observatorijih računamo iz enominutnih srednjih vrednosti meritev spremembe zemeljskega magnetnega polja (Rostoker, 1972; Menvielle et al., 1995). Izračun geomagnetnega indeksa je bil podrobneje že opisan v Čop (2017).

Indeks K podaja relativno spremembo v triurnem časovnem intervalu glede na geomagnetno miren dan. Izračunan je iz meritev horizontalnih komponent zemeljskega magnetnega polja na posameznem geomagnetnem observatoriju v času UTC (angl. Coordinated Universal Time). Vrednosti indeksa K so prilagojene vsakemu observatoriju posebej, vendar se v daljšem časovnem obdobju ponovijo na vseh observatorijih približno enakokrat. Ker je indeks K logaritmične oblike, bi bila dnevna vsota vrednosti vseh osmih indeksov posameznega dneva geometrijska vsota. Linearni ekvivalent geomagnetnega indeksa K je indeks a . Vsota vseh osmih indeksov a posameznega dne je indeks A (angl. daily equivalent), ki pa je aritmetična vrsta (Čop et al., 2015). Indeks A preseže vrednost $A = 48$ ob geomagnetnih nevihtah manjše jakosti in lahko doseže največjo vrednost $A_{\max} = 400$. Razvidno je, da so bile v obdobju od 14. do 26. decembra 2019 vrednosti indeksov nizke, z izjemo od 18. do 20. decembra 2019 (slika 2). Za tri dneve okoli zimskega solsticija 2019 so bile vrednosti indeksov A podobne in več kot desetkrat manjše kot med geomagnetnimi nevihtami (slika 3).



Slika 2: Vrednost geomagnetnega indeksa A (angl. daily equivalent) od 14. decembra do 26. decembra 2019, v dneh okoli zimskega solsticija 2019.



Slika 3: Trije geomagnetno mirni dnevi Sq izbranega izhodiščnega obdobja na observatoriju PIA od 23. do 25. decembra 2019.

Načeloma naj bi bili magnetogrami sosednjih observatorijev v mirnih geomagnetnih dnevih podobni. Če se na posameznem observatoriju pojavi večji šum, lahko sklepamo na lokalne naravne ali antropogene vplive. Z lokalnimi spremembami geomagnetnega polja lahko napovemo tudi tektonska dogajanja (Čop, 2017; Pavlovčič-Prešeren et al., 2020). V dani raziskavi smo za primerjavo uporabili geomagnetne meritve z dveh observatorijev v Italiji, in sicer DUR (Duronio) in CTS (Castello Tesino) (slika 4).



Slika 4: Observatorij PIA v Piranu in sosednji geomagnetni observatoriji. V raziskavi uporabljena observatorija: CTS (Castello Tesino) in DUR (Duronio) v Italiji.

4.2 Primerjava geomagnetnih meritev s sosednjih observatorijev

Za matematično predstavitev povezave med dvema signaloma se uporablja korelacija, s katero se izmeri njuna medsebojna odvisnost. Za obravnavo signalov, ki vsebujejo impulze, je najprimernejša linearna korelacija. Splošna definicija za iskanje podobnosti dveh signalov $f(n)$ in $g(n)$ enake dolžine M sledi enačbi:

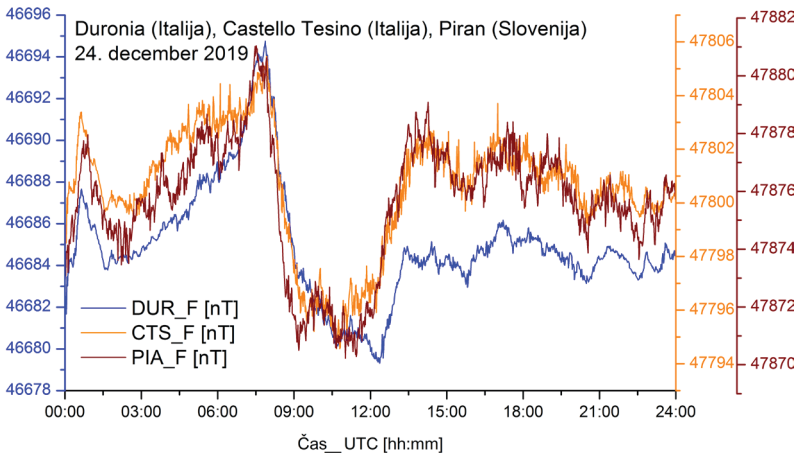
$$y(m) = \sum_{n=0}^{M-1} f(n) \cdot g(n-m), \quad (1)$$

pri čemer m predstavlja zamik drugega signala glede na prvega. Za signala enakih dolžin, ki se navezujeta na podatke iz različnih virov (na primer lokacij), izračunamo enostavni linearni koeficient korelacije r_{xy} :

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (2)$$

Če je korelacijski koeficient tudi normaliziran, potem je njegova vrednost med -1 in $+1$. Pozitivni korelacijski koeficient nakazuje usklajenost sprememb v časovni vrsti obeh signalov, negativni ali antikorelacija pa nakazuje značilne pojave naraščanja enega ob hkratnem upadanju drugega signala. Vrednost normaliziranega korelacijskega koeficienta 0 (nič) pomeni, da sta signala med seboj popolnoma neodvisna oziroma si nista podobna. Signala sta si popolnoma enaka, če je vrednost normaliziranega korelacijskega koeficienta -1 ali $+1$, rezultat avtokorelacije pa daje vrednost 1.

Linearna koeficienta korelacije med merilnimi podatki, izmerjenimi 24. decembra 2019 (slika 5) na geomagnetnem observatoriju DUR (Duronio), CTS (Castello Tesino) in PIA (Piran), sta pozitivna in znašata $r_{\text{DUR-CTS}} = 0,81987$ in $r_{\text{CTS-PIA}} = 0,92327$. Korelacija med merilnimi podatki observatorija PIA in observatorija CTS (Castello Tesino) je v obravnavanem obdobju tako za vsaj 12,61 % večja kot korelacija z merilnimi rezultati njima sosednjih observatorijev.



Slika 5: Primerjava amplitudno premaknjenih magnetogramov z observatorija PIA s podatki geomagnetnih observatorijev CTS (Castello Tesino) in DUR (Duronio) v Italiji.

Za obravnavano obdobje zimskega solsticija se izračunani indeksi K za observatorij PIA in sosednja dva v Italiji (slika 5) razlikujejo, čeprav je trend meritev podoben. Magnetogram z observatorija DUR (Duronio) (Geomagnetic INGV Data Portal, 2019) je manj obremenjen z magnetnim šumom (slika 5). Podobno lastnost imajo magnetogrami geomagnetnih observatorijev Sloveniji sosednjih držav, na primer iz Hrvaške ali Madžarske. Zanimivo je, da se meritve na observatorijih CTS (Castello Tessino) in PIA (Piran) bolj skladajo glede na meritve DUR (Duronio) (slika 5). Razlog za to je najbrž v podobnem tektonskem dogajanju na danem območju. Vemo, da oba stojita v bližini severnega roba Jadranske tektonske mikroplošče (Weber et al., 2010; Pavlovčič-Prešeren et al., 2020), na območju, kjer se plošča giblje pod pritiskom afriške tektonske plošče in se zato zariva v Evrazijo (Cuffaro et al., 2010; Serpelloni et al., 2013).

4.3 Primerjava geomagnetnih meritev z observatorija PIA iz decembra 2019

Zaporedne tridnevne meritve sprememb magnetnega polja Zemlje z observatorija PIA smo izbrali v času okoli zimskega solsticija 2019, ki je nastopil 22. decembra 2019 ob 04:19 UTC (MICA, 2012). Takrat ima v geomagnetno mirnih dneh Sonce najmanjši vpliv na geomagnetno polje. Tudi magnetosfera je stabilnejša kot ob enakonočjih, ko se v njej pogosteje pojavljajo razpoke (Oul Neutron Monitor, 2020). Za preslikave merilnih podatkov iz časovnega v frekvenčni prostor smo uporabili spektralno analizo MEM (angl. maximum entropy method), ki je učinkovitejša od standardnih oblik Fourierove transformacije FFT (angl. fast fourier transform) (Bergland, 1969) in se uporablja tudi v praktično delujočih sistemih (Kesler in Hayking, 1978). Fourierova transformacija se uporablja za opis linearnih sistemov in odkrivanje frekvenčnih komponent, ki sestavljajo opazovano nihanje. Z izbiro manj učinkovitega algoritma za transformacijo FFT bi zmanjšali točnost izločitve vpliva gravitacije v meritvah spremembe geomagnetnega polja. Kompleksne vrednosti period so izbrane tako, da so njihove realne vrednosti zaporedje ulomkov časa. Začetne vrednosti tega zaporedja, ki smo jih uporabili v raziskavi, so predstavljene v preglednici 2. V članku smo se omejili le na predstavitev njihovih amplitud, ker bi se z upoštevanjem tudi njihovih faznih premaknitvev in močnostnega spektra PSD (angl. power spectral density) zelo povečal obseg članka

in zmanjšala njegova preglednost. Sama predstavitev vpliva Lune na zemeljsko magnetno polje, ki se skriva v njegovem šumu, pa se s tem ne bi pomembno izboljšala.

Signal zapišemo v obliki:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (3)$$

pri čemer je zvezen signal, odvisen od časa. Če je to nihanje vzorčeno ali se obdeluje digitalno, je uporabnejša diskretna Fourierova transformacija DFT (angl. discrete Fourier transform):

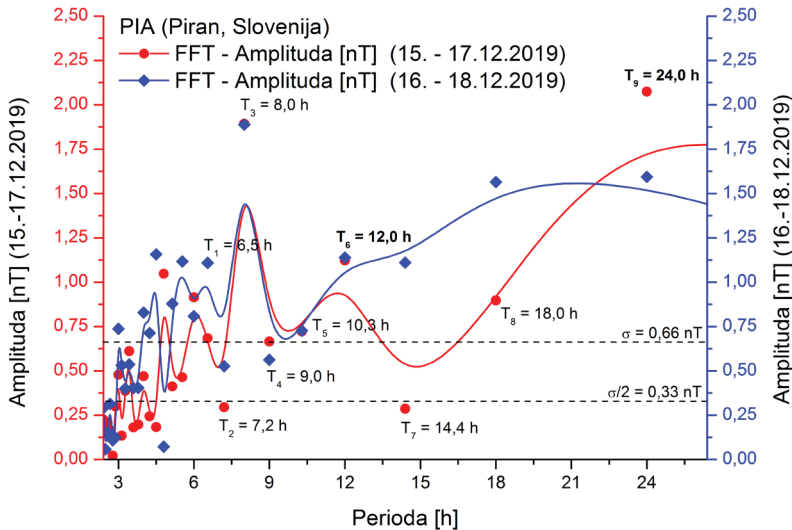
$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nm/N}, \quad (4)$$

kjer je $x(n)$ diskretno zaporedje vrednosti sicer časovno zvezne funkcije $x(t)$. Transformacija ima nekatere omejitve, ker se uporablja nad vzorci in v omejenem časovnem intervalu. Uporabnejša oblika transformacije DFT je transformacija FFT, ki z različnimi oblikami algoritmov omogoča hitrejši čas obdelave podatkov. Za FFT običajno zastopnost amplitud po frekvencah smo nadomestili z njeno inverzno vrednostjo, z zastopnostjo po periodah. Širino časovnega okna smo izbrali tako, da so bile v periodnem prostoru zanesljivo predstavljene vse periode, ki so značilne za posamezen geomagnetno miren dan (Smith, 1999; Lyons, 2011). Posamezno obravnavano tridnevno zaporedje je moralo biti resnično geomagnetno mirno (slika 2).

Za vse preslikave, izračune in primerjave smo uporabili enominutne srednje vrednosti enosekundnih merilnih podatkov. Tako je bila 24. decembra 2019 dnevna sprememba absolutne vrednosti vektorja magnetnega polja vsega $dF = 47.881,04 \text{ nT} - 47.870,22 \text{ nT} = 10,82 \text{ nT}$ ali 0,023 % srednje vrednosti $F = 47.875,65 \text{ nT}$ (slika 3). Tega dne je bila vrednost geomagnetnega polja $A = 2,9$ (slika 2). Podatki z vremenoslovne postaje na Letališču Portorož, ki je od observatorija PIA oddaljena 5,91 kilometra zračne črte (azimut = 288,21°), so potrdili, da je bilo v opazovanih tridnevnih obdobjih vreme stabilno in le občasno delno oblačno (ARSO, 2020). To pomeni, da ni vplivalo na spremembe v magnetnem polju Zemlje, ki se lahko zgodijo ob razelektritvah v atmosferi in prehodih vremenskih front MCS (angl. mesoscale convective system) (Čop, 2015). V izbranih obdobjih so bili na ozemlju Slovenije registrirani potresi manjše jakosti, najmočnejši je bil 23. decembra 2019 z magnitudo 1,6 po Evropski potresni lestvici (ARSO, 2020). Ker potresi povzročajo spremembe v količini energije v lokalnem magnetnem polju in zato dodatni magnetni šum (Čop, 2017; Pavlovčič-Prešeren et al., 2020), smo za izhodiščno obdobje izbrali tri zaporedne dneve z osrednjim 24. decembrom 2019, to je tik pred mlajem, 26. decembra 2019 ob 05:15 UTC (MICA, 2012). Za primerjavo smo izbrali tri zaporedne dni pred predhodnim zadnjim krajcem Lune, ki je bil 19. decembra 2019 ob 21:13 UTC. Vendar smo to obdobje zamaknili, saj je bil dan pred zadnjim krajcem Lune (18. december 2019) geomagnetno precej nestabilen (angl. geomagnetic unrest), kar potrjuje tudi povečan geomagnetni indeks na $A = 14,6$ (slika 2). Na sliki 6 je predstavljena primerjava v frekvenčnem prostoru tridnevnega obdobja z osrednjim 16. decembrom 2019 s tridnevnim obdobjem z osrednjim 17. decembrom 2019, ki potrjuje geomagnetno nestabilnost tridnevnega obdobja od 16. do 18. decembra 2019.

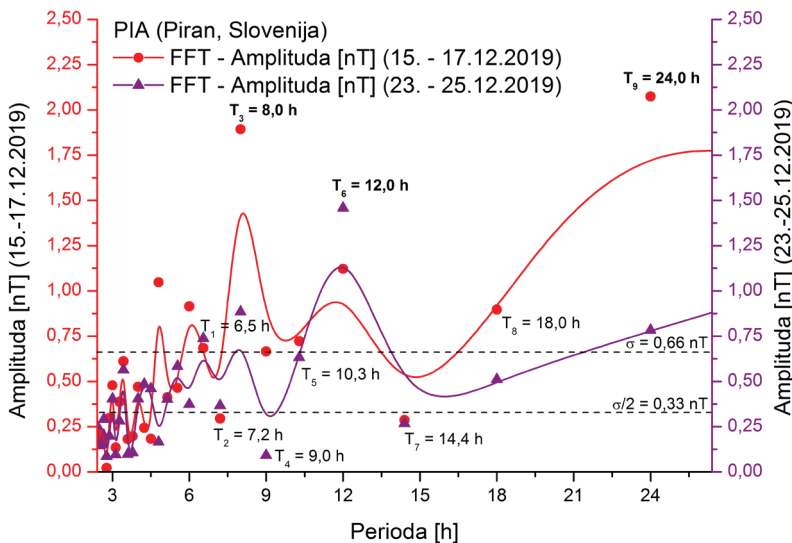
S slike 6 je razvidno, da se amplitude period $T_3 = 8 \text{ h}$, $T_5 = 10,3 \text{ h}$ in $T_6 = 12 \text{ h}$ za primerjalni obdobji 15.–17. december in 16.–18. december niso spremenile. Zaradi povečane geomagnetne aktivnosti pa so se v obdobju 16.–18. december izrazito povečale amplitude period $T_7 = 14,4 \text{ h}$ in $T_8 = 18,0 \text{ h}$, medtem ko

se je amplituda periode $T_9 = 24,0$ h znižala. Pričakovano so se povečale tudi amplitude period, manjše od $T_2 = 7,2$ h, vendar so te že blizu ali celo pod srednjo ravno magnetnega šuma $\sigma = 0,66$ nT (Čop et al., 2011).



Slika 6: V frekvenčnem prostoru primerjane enominutne srednje vrednosti merilnih podatkov z observatorija PIA v primerjalni skupini treh dni in v skupini z zamikom en dan.

Slika 7 prikazuje primerjavo izbranega tridnevnega obdobja z osrednjim dnevom, 24. decembrom 2019, s predhodnim obdobjem z osrednjim dnevom 16. december 2019. Razvidno je močno znižanje amplitud period $T_3 = 8,0$ h, $T_4 = 9,0$ h, $T_8 = 18,0$ h ter $T_9 = 24,0$ h, medtem ko se je amplituda periode $T_6 = 12,0$ h povečala. Ta je postala največja v izhodiščnem obdobju z osrednjim 24. decembrom 2019 (preglednica 1).



Slika 7: V frekvenčnem prostoru primerjane enominutne srednje vrednosti merilnih podatkov, izmerjenih na observatoriju PIA v primerjalnih in izhodiščnih treh dnevih (za osrednja datuma 16. in 24. december 2019).

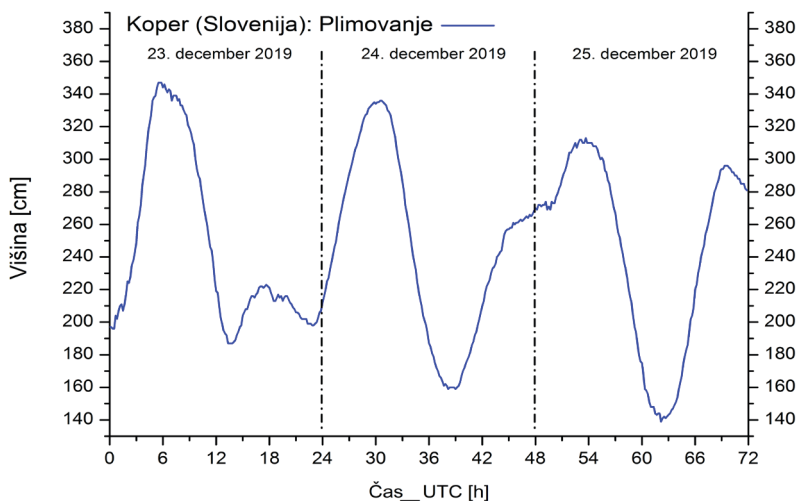
S slike je opazen značilen trend vpliva Lune, ki se zgodi, ko je Luna v zenitu opazovališča, tj. ko je opazovališču najbližje, oziroma na nasprotni strani Zemlje, v zveznici zenit–opazovališče–Luna. Pomembni periodi pri plimovanju sta $T_6 = 12,0$ h in $T_9 = 24,0$ h, zanimivo pa je, da iz geomagnetnih meritev pridobimo še en vrh, in sicer ob periodi $T_3 = 8,0$ h, ki pri spremljanju plimovanja trdne Zemlje in morij ni značilen.

Preglednica 2: Primerjava tridnevnih obdobij geomagnetnih meritev z osrednjima dnevo 16. in 24. december 2019.

	Perioda		Amplituda		$A_{2G} - A_{1G}$ [%]	
	[dan]	[dan]	[h]	Amplituda		
				2019-12-(15-17) A_{1G} [nT]	2019-12-(23-25) A_{2G} [nT]	
T1	0,273	3/11	6,5	0,68415	0,73785	7,8
T2	0,300	3/10	7,2	0,29502	0,36595	24,0
T3	0,333	1/3	8,0	1,89346	0,88432	-53,3
T4	0,375	3/8	9,0	0,66526	0,09129	-86,3
T5	0,429	3/7	10,3	0,72217	0,63240	-12,4
T6	0,500	1/2	12,0	1,12234	1,45763	29,9
T7	0,600	3/5	14,4	0,28666	0,26667	-7,0
T8	0,750	3/4	18,0	0,89710	0,51075	-43,1
T9	1,000	1/1	24,0	2,07449	0,78262	-62,3
	1,500	3/2	36,0	1,35826	1,28340	-5,5

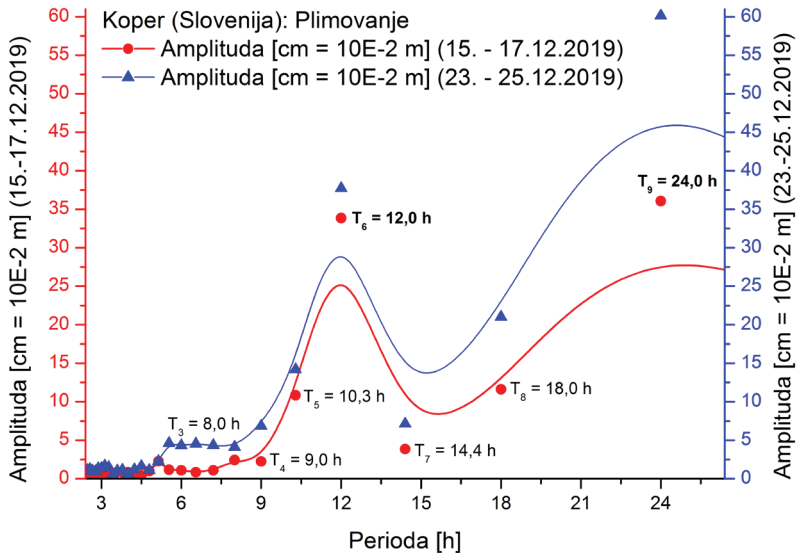
4.4 Podatki plimovanje morja z mareografa v Kopru

Kakovost izračunov vpliva Lune iz geomagnetnih meritev smo želeli preveriti na podlagi neodvisnih podatkov meritev, na katere ima Luna očiten vpliv. V ta namen smo pridobili podatke plimovanja morja, saj je tu gravitacijski vpliv Lune veliko očitnejši kot vpliv Sonca, ravno obratno kot pri geomagnetnih meritvah. Podatke plimovanja smo pridobili za mareografsko postajo Koper (ARSO, 2019), ki je od observatorija PIA oddaljena 10,42 kilometra zračne črte (azimut = 16,88°). Da bi mareografske meritve lahko primerjali z delovanjem ionsferskega dinama, smo naredili pretvorbo meritev plimovanja iz časovnega v frekvenčni prostor.



Slika 8: Visoko morje v treh zaporednih dneh, izmerjeno na mareografu Koper v treh zaporednih dneh pred mlajem 26. decembra 2019.

Izbrane meritve so bile v tridnevnem obdobju od 23. decembra do 25. decembra 2019 (slika 8), tik pred mlajem. Za primerjavo smo vzeli tridnevno obdobje pred zadnjim krajcem Lune od 15. decembra do 17. decembra 2019. Preslikava dveh merilnih obdobji plimovanja v frekvenčni prostor je predstavljena na sliki 9.



Slika 9: V frekvenčnem prostoru primerjano plimovanje v primerjalnih in v izhodiščnih treh dneh, izmerjeno na mareografski postaji Koper.

Glede na obliko krivulje, ki predstavlja spremembo plimovanja (slika 8), je bil rezultat preslikave v frekvenčni prostor pričakovan (slika 9). Osnovna harmonska frekvenca je s svojo periodo blizu tako Luninemu (perioda luninih men je 29,5306 dneva) kot tudi Sončevemu dnevju (24,0 ur). Druga harmonska frekvenca s periodo 0,5 dneva je tista, ki povzroča nesimetrično popačitev osnovne sinusne krivulje. Nastaja zaradi nasprotnega položaja Lune in Sonca glede na Zemljo. Izstopajoči periodi pri plimovanju (slika 9) sta $T_6 = 12,0$ h in $T_9 = 24,0$ h, pri čemer se od zadnjega krajca do mlaja povečata za 66,8 % oziroma 11,4 %.

5 OBRAVNAVA REZULTATOV

Luna in Sonce vplivata s svojima gravitacijskima silama na Zemljo v razmerju 100/46. Razlog za večji gravitacijski vpliv Lune, ki je precej manjša od Sonca, je njena bližina Zemlji (Volland, 1988). V nasprotju s plimovanjem morja, kjer je vpliv Lune vseskozi očiten, ga je z magnetogramov težko razbrati, saj je šibko in nima izrazitih polov. Dejstvo je, da na spremembo geomagnetnega polja Zemlje veliko očitneje delujejo pojavi na Soncu. Na podlagi primerjave geomagnetnih meritev z odčitki plimovanja morja lahko rečemo, da je plimovanje (slika 8) bližje sinusni krivulji kot pa dnevne spremembe lokalnega magnetnega polja (slika 3). Dodatno lahko vidimo, da so za obravnavano obdobje v obeh primerih značilne ekstremne vrednosti na obeh vrstah podatkov, ki tudi značilno sovpadajo. Gravitacijski vpliv Lune in Sonca na morja, oceane in tudi trdno zemeljsko skorjo je neprimerno enostavneje opazovati z mareografskih odčitkov kot pa iz sprememb magnetnega polja Zemlje zaradi ionosferskega dinamika. Vendar je

tudi napovedovanje gibanja vodnih mas zahtevno in omejeno zanesljivo, saj na plimovanje vplivajo tudi vremenski dejavniki. Srednja višina morja, izmerjena na mareografski postaji Koper, od 23. do 27. decembra 2019 je znašala $h_{\text{mean}} = 245,9$ centimetra. Teden dni prej je bila ta višina $h_{\text{mean}} = 238,0$ centimetra, oziroma nižja za $dh = 7,9 \text{ cm} = 3,3 \%$, vendar celotne razlike ne moremo pripisati samo vplivu Lune.

Če primerjamo geomagnetno mirne dneve ob zadnjem kraju in prazni Luni (mlaju), ugotovimo, da ne izstopata le periodi $T_6 = 12,0 \text{ h}$ in $T_9 = 24,0 \text{ h}$, temveč tudi $T_3 = 8,0 \text{ h}$ (preglednica 2). Ta se je od zadnjega kraja zmanjšala za 53,3 %. Eden od razlogov je gotovo simetrična popačitev osnovnega celodnevnege vala zaradi spremembe medsebojnega položaja Lune in Sonca glede na Zemljo. Zato se v zimskem obdobju v magnetogramu sicer geomagnetno mirnega dne ne opazi vedno poldneva po sončni uri, kot je to primer za 25. december 2019 (slika 3). Od 23. do 27. decembra 2019 se je srednja vrednost $F_{\text{mean}} = 47.875,8 \text{ nT}$ povišala od tiste iz tridnevnega obdobja od 15. do 17. decembra 2019 $F_{\text{mean}} = 47.872,9 \text{ nT}$ za $dF = 2,9 \text{ nT}$, kar znaša 0,006 %. Ta sprememba je večja od srednje vrednosti geomagnetnega šuma $\sigma = 0,66 \text{ nT}$. Iz rezultatov v preglednici 2 je očitno, da so geomagnetne meritve sledile trendu plimovanja morja na mareografski postaji Koper. Očitna razlika amplitud v obdobju zadnjega kraja in prazne Lune je značilna tako pri meritvah na mareografu kot tudi pri odčitkih z magnetogramov.

Značilno ujemanje meritev z mareografske postaje v Kopru in magnetogramov observatorija PIA v geomagnetno mirnih dnevih je pokazala, da lahko v nadaljnjih študijah proučevanja šuma magnetogramov uporabimo tudi zunanji vir podatkov z mareografske postaje v Kopru in jih pretvorimo v šum geomagnetnih meritev zaradi vpliva Lune. V tej raziskavi pridobljeni rezultati bodo zato služili za oceno in odstranitev vpliva Lune tudi v obdobjih z večjo intenziteto dogajanj v geomagnetnem polju, nastalih zaradi drugih vplivov, ki jih nameravamo proučevati.

6 SKLEP

Slovenija leži na srednjih zemljepisnih širinah severne poloble in ni pod vplivom ekvatorialnega električnega toka, ki teče v ionosferi nad ekvatorjem, kot tudi ne pod vplivom posebnih razmer okoli magnetnih polov. Glede na rezultate meritev sprememb magnetnega polja Zemlje, merjenih na geomagnetnih observatorijih v sosednjih državah, je na ozemlju Slovenije prisotna visoka stopnja geomagnetnega šuma. Prav ta postavlja omejitve pri geomagnetnih meritvah po priporočilih mednarodne organizacije IAGA (angl. International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Zato so raziskave, kjer skušamo ločiti posamezne vplive na geomagnetni šum, zelo pomembne. V danem prispevku nam je uspelo predstaviti oceno vpliva Lune z magnetogramov. V prihodnje bomo oceno vpliva Lune z mareografske postaje lahko uporabili za odstranitev vpliva, da bo mogoče bolje oceniti druge dejavnike, ki vplivajo na geomagnetni šum na observatoriju PIA. Še vedno ostajata aktualni problematiki proučevanja geomagnetnega šuma na meritve v povezavi z antropogenim vplivom kot tudi določitev sprememb geomagnetnih meritev s tektonskimi dogajanjmi v Sloveniji ali njeni okolici.

Literatura in viri:

- Anad, F., Amory-Mazaudier, C., Hamoudi, M., Bourouis, S., Abtout, A., Yizengaw, E. (2016). Sq solar variation at Medea Observatory (Algeria), from 2008 to 2011. *Advances in Space Research*, 58 (9), 1682–1695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.06.029>
- Anderson, D., Fuller-Rowell, T. (1999). *The Ionosphere*. SE-14. Boulder (US): Space Environmental Center.
- ARSO (2020). Zadnji potresi. Ljubljana: Agencija RS za okolje. <http://potresi.arso.gov.si/>, pridobljeno 29. 12. 2019.

ARSO (2019). Vode. Postaja Koper – kapitanija – Jadransko morje. Ljubljana: Agencija RS za okolje. https://www.arso.gov.si/vode/podatki/amp/H9350_g_1.html, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Bergland, D. A. (1969). A guided tour of the fast Fourier transform. *IEEE Spectrum*, 6 (7), 41–52. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSPEC.1969.5213896>

Bilge, A. H., Tulunay, Y. K. (1997). Spectral analysis of geomagnetic data from Kandilli Observatory, Istanbul. *Annals of geophysics*, 40 (6), 1591–1598. DOI: <https://doi.org/10.4401/ag-3833>

Brekke, A. (2018). Pioneers of Electric Currents in Geospace. *Electric Currents in Geospace and Beyond*. V: A. Keiling (ur.), O. Marghita (ur.), M. Wheatland (ur.). Geophysical Monograph 235. Washington (DC, US): American Geophysical Union; John Wiley & Sons. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119324522.ch1>

Campbell, W. H., Barton, C. E., Chamalaun, F. H., Welsh, W. (1998). Quiet-day ionospheric currents and their application to upper mantle conductivity in Australia. *Earth Planets Space*, 50, 347–360. DOI: <https://doi.org/10.1186/BF03352121>

Chapman, S. (1918). The diurnal changes of the Earth's magnetism. *The Observatory*, 41, 52–60. <http://adsabs.harvard.edu/full/1918Obs...41...52C>, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Chapman, S. (1919 (1997)). The solar and lunar diurnal variations of terrestrial magnetism. *Philosophical Transactions, A*, 218, 1–118. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1919.0001>

Chapman, S., Price, A. T. (1930 (1997)). The Electric and Magnetic State of the Interior of the Earth, as Inferred from Terrestrial Magnetic Variations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, X*, 229, 427–460. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1930.0010>

Chapman, S. Regular Motions in the Ionosphere: Electric and Magnetic Relationships. *Bulletin American Meteorological Society*, 1961, 42 (2), 85–100. DOI: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-42.2.85>

Cliver, E. W., Svalgaard, L., Ling, A. G. (2004). Origins of the semiannual variation of geomagnetic activity in 1954 and 1996. *Annales Geophysicae*, 22 (1), 93–100. DOI: <https://doi.org/10.5194/angeo-22-93-2004>

Courtilot, V., Le Mouél, J. (1988). Time variations of the Earth's magnetic field: From daily to secular. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1988, 16, 389–476. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.16.050188.002133>

Cuffaro, M., Riguzzi, F., Scorocca, D., Antonioli, F., Carminati, E., Livani, M., Doglioni, C. (2010). On the geodynamics of the northern Adriatic plate. *Rend. Fis. Acc. Lincei (Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali)*, 21 (Suppl 1), 253–279. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12210-010-0098-9>

Čop, R., Kosovac, P. (2010). Primerjalne meritve Overhouserjevega protonskega gradiometra. V: M. Kuhar (ur.): Raziskave s področja geodezije in geofizike 2009. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 23–30. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2010/SZGG2010_Cop_Kosovac.pdf, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Čop, R., Deželjin, D., Mihajlovič, J. S., Kosovac, P. (2011). Preliminary Measurements of Geomagnetic-field Variations in Slovenia. *Elektrotehniški vestnik*, 78 (3), 96–101. <https://ev.fe.uni-lj.si/3-2011/Cop.pdf>, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Čop, R., Milev, G., Deželjin, D., Kosmač, J. (2014). Protection against lightning at a geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems Discussions*, 3(2), 135–141. DOI: <https://doi.org/10.5194/gi-3-135-2014>

Čop, R. (2015). Snowstorm at the geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems*, 4, 155–159. DOI: <https://doi.org/10.5194/gi-4-155-2015>

Čop, R., Deželjin, D., De Reggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K. Determination of local geomagnetic K-index. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697–708. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.697-708>

Čop, R. (2016). Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg. V: M. Kuhar (ur.) Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2017/6%20SZGG_2017_Cop.pdf, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Čop, R. (2016). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (2), 197–211. DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2016.02.197-211>

Čop, R. (2017). Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju. *Elektrotehniški vestnik*, 84 (4), 148–154. <https://ev.fe.uni-lj.si/4-2017/Cop.pdf>, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Čop, R., Henigman, F. (2018). Sprejemnik za elektromagnetne valove frekvenc pod 50 Hz. *Elektrotehniški vestnik*, 2018, 85 (4), 155–161. <https://ev.fe.uni-lj.si/4-2018/Cop.pdf>, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Čop, R. (2020). Spremembe števila geomagnetnih neviht in števila sončnih peg: mesečni, desetletni in stoletni naravni cikli. V: M. Kuhar (ur.) Raziskave s področja geodezije in geofizike 2019. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2020/SZGG_2020_Cop.pdf, pridobljeno: 26. 12. 2019.

Flux-Gate Magnetometer LEMI-022_Sl. User Manual S/N: 021 (2014). Lviv (Ukraina): KMS Technologies; Laboratory for Electromagnetic Innovations.

Forbush, S. E. (1993). Cosmic Ray Intensity Variations During Two Solar Cycles. V: J. A. Van Allen (ur.) Cosmic rays, the sun, and geomagnetism: the works of Scott E. Forbush, 37. Washington, D.C.: American Geophysical Union. DOI: <https://doi.org/10.1029/SP037>

Foufoula-Georgiou, E. (ur.), Kumar, P. (ur.) (1994). *Wavelets in Geophysics*. San Diego: Academic Press, 373 str.

Fraser-Smith, A. C. (1969). A Possible Full-Moon Enhancement of Hydromagnetic Emission Activity. *Journal of Geophysical Research*, 74 (11), 2987–2995. DOI: <https://doi.org/10.1029/JA074i011p02987>

Geomagnetic INGV Data Portal (2020). Roma (Italy): Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. <http://geomag.rm.ingv.it/index.php>, pridobljeno: 30. 12. 2019.

Jursa, A. S. (ur.) (1985). *Handbook of Geophysics and the Space Environment*. Springfield (VA, US): United States Air Force; Air Force Systems Command; Air Force Geophysics Laboratory. http://www.cnofs.org/Handbook_of_Geophysics_1985/, pridobljeno: 26. 12. 2019.

De Jong, C. D., Lachapelle, G., Skone, G., Elema, I. A. (2002). *Hydrography. Series on Mathematical Geodesy and Positioning*. Delft (Netherlands): Delft University. <https://www.delftacademicpress.nl/bij/a033extract.pdf>, pridobljeno: 26. 12. 2019.

- Kesler, S. B., Haykin, S. A. (1978). A comparison of the maximum entropy method and the periodogram method applied to the spectral analysis of computer-simulated radar clutter. *Canadian Electrical Engineering Journal*.
https://ieeexplore.ieee.org/document/6594412, pridobljeno: 26. 12. 2019.
- Klausner, V., Papa, A. R. R., Mendes, O., Domingues, M. O., Frick, P. (2013). Characteristics of solar diurnal variations: A case study based on records from the ground magnetic station at Vassouras, Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 92, 124–136.
DOI: http://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.10.007
- Kowalik, Z., Luick, J. (2013). *The Oceanography of Tides*. Fairbanks (US): University of Alaska, 2013.
- Kumar, P., Foufoula-Georgiou, E. (1997). Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics*, 35 (4), 385–412.
DOI: http://doi.org/10.1029/97RG00427
- Love, J. J., Remick, K. J. (2007). *Magnetic Indices. V: Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Dordrecht (Nizozemska), Springer, 509–512.
DOI: http://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_178
- Lyons, G. R. (2011). *Understanding Digital Signal Processing*. Third edition. Upper Saddle River (NJ, US): Prentice Hall, 2011. <http://www.iro.umontreal.ca/~mignotte/IF3205/Documents/UnderstandingDigitalSignalProcessing.pdf>, pridobljeno: 26. 12. 2019.
- Matsushita, S. (1968). Sq and L Current Systems in the Ionosphere. *Geophysical Journal International*, 15 (1–2), 109–125.
DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1968.tb05751.x
- Menvielle, M., Papitashvili, N., Häkkinen, L., Sucksdorff, C. (1995). Computer production of K indices: review and comparison of methods. *Geophysical Journal International*, 123, 866–886.
DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb06895.x
- MICA, The Multiyear Interactive Computer Almanac 1800–2050 (2012). U.S. Naval Observatory, ZDA. https://www.willbell.com/almanacs/almanac_mica.htm, pridobljeno: 26. 12. 2019.
- Obiekezie, T. N., Obiadazie, S. C., Agbo, G. A. (2013). Day-to-Day Variability of H and Z Components of the Geomagnetic Field at the African Longitudes. *ISRN Geophysics*. DOI: https://doi.org/10.1155/2013/909258
- Paliska, D., Čop, R., Fabjan, D. (2010). The use of GIS-based spatial multi-criteria evaluation in the selection process for the new Slovenian geomagnetic observatory site. *Annales. Series historia naturalis*, 2010, 20 (1), 67–74. <https://zjdp.si/wp-content/uploads/2015/12/paliska.pdf>, pridobljeno: 26. 12. 2019.
- Pavlovčič-Prešeren, P., Čop, R., Kuhar, M. (2020). The Use of Geomagnetic Measurements to Study Local Tectonics: Case for the NE Part of the Adria-Eurasia Collisional Zone. *Open Journal of Earthquake Research*, 9, 83–99. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=98805>, pridobljeno: 26. 12. 2019.
- qrznw.com (2020). <https://qrznw.com/wp-content/uploads/2020/01/Sunspot-activity-observation-dec6-e1544118001987.jpeg>, pridobljeno 25. 4. 2020.
- Rostoker, G. (1972). Geomagnetic indices. *Reviews of Geophysics*, 10 (4), 935–950. DOI: https://doi.org/10.1029/RG10i004p00935
- Russel, C. T., McPherron, R. L. (1973). Semiannual variation of geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, 78 (1), 92–108. DOI: https://doi.org/10.1029/JA078i001p00092
- Schuster, A. (1908 (1997)). IV. The diurnal variation of terrestrial magnetism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 208, 163–204. DOI: https://doi.org/10.1098/rsta.1908.0017
- Serpelloni, E., Faccenna, C., Spada, G., Dong, D., Williams, S. D. (2013). Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 6003–6024. DOI: https://doi.org/10.1002/2013JB010102
- Smith, W. S. (1999). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego (California, USA): California Technical. <http://www.dspguide.com/pdfbook.htm>, pridobljeno: 26. 12. 2019.
- Soddoqui, A. T. (2017). Long-term investigation of the lunar tide in the equatorialelectrojet during Stratospheric Sudden Warmings. *Doktorska disertacija*. Potsdam: Univerza v Potsdamu. https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/40638/file/siddiqui_diss.pdf, pridobljeno: 26. 12. 2019.
- Sterle, O., Stopar, B., Pavlovčič-Prešeren, P. (2013). Modeliranje ionosferske refrakcije za izboljšavo absolutnega GPS-položaja s kodnimi instrumenti: priprava na 24. Sončev cikel. *Geodetski vestnik*, 57 (1), 9–24. DOI: https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.01.009-024
- Yamazaki, Y., Richmond, A. D., Yumoto, K. (2012). Stratospheric warmings and the geomagnetic lunar tide: 1958–2007. *Journal of Geophysical Research*, 117, A04301. DOI: https://doi.org/10.1029/2012JA017514
- Yamazaki, Y., Kosch, M. J. (2014). Geomagnetic lunar and solar daily variations during the last 100 years. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, 119, 6732–6744. DOI: https://doi.org/10.1002/2014JA020203
- Yizengaw, E., Carter, A. B. (2017). Longitudinal, seasonal and solar cycle variation in lunar tide influence on the equatorial electrojet. *Annales Geophysicae*, 35, 525–533. DOI: https://doi.org/10.5194/angeo-35-525-2017
- Volland, H. (1988). *Atmospheric Tidal and Planetary Waves*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Dordrecht (Nizozemska): Springer Netherlands, 1988.
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčič-Prešeren, P., Dixon, T., Jiannh, Y., Stopar, B. (2010). GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 2010, 483, 214–222. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.001



Kuhar M., Čop R., Pavlovčič Prešeren P. (2020). Določitev vpliva Lune na geomagnetni šum. Geodetski vestnik, 64 (3), 303-319.
DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.03.303-319>

doc. dr. Miran Kuhar, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: miran.kuhar@fgg.uni-lj.si

doc. dr. Polona Pavlovčič Prešeren, univ. dipl. inž. geod.
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: polona.pavlovcic@fgg.uni-lj.si

ddr. Rudi Čop, univ. dipl. inž. elek.
Zavod Terra Viva
Sv. Peter 115, SI-6333 Sečovelje
e-naslov: rudi@artal.si