

Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju

Rudi Čop

Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje
E-pošta: rudi@artal.si

Povzetek. Meritve spremembe zemeljskega magnetnega polja v Sloveniji kažejo večjo prisotnost šuma v magnetogramih kot na ozemljih okoli nje. Magnetni šum je lahko naravnega izvora, lahko pa ga ustvarja človek s svojimi aktivnostmi. Slovenija leži na potresno aktivnem območju. Zato sta v tem članku predstavljeni analizi relativne spremembe gostote energije v lokalnem zemeljskem magnetnem polju in primerjava te spremembe s povečano tektonsko napetostjo na tem območju. Tudi povečana tektonska napetost je lahko naraven izvor šuma v lokalnem zemeljskem magnetnem polju.

Ključne besede: geomagnetno polje, sprememba gostote energije, napetosti v zemeljski skorji, Slovenija

Change in the energy density in the Earth magnetic field

The local magnetic field in Slovenia contains more noise than in its neighboring countries. The sources of the magnetic noise can be natural or artificial. Slovenia is seismologically an active region. In this paper, the relative changes in the local geomagnetic field energy density are analyzed, and a comparison is given of these changes with seismological activity. Changes in the tectonic tensions evidently affect the local geomagnetic field.

Keywords: geomagnetic field, change in the energy density, tension in the Earth crust, Slovenia

1 UVOD

Pri geomagnetnem premeru Slovenije [1], kot tudi pri poznejših poskusih postavitve geomagnetnih observatorijev na tem ozemlju [2, 3], je bila ugotovljena večja prisotnost šuma v izmerjenih magnetogramih [4]. Zaradi velikega letnega števila atmosferskih razelektritev predvsem v JZ delu Slovenije, ki je med največjimi v Evropi, je bilo treba za varno delovanje merilnih instrumentov in drugih naprav na geomagnetnem observatoriju najprej izdelati uspešno zaščito pred udari strel [5]. Ob tem je bil kot prvi naravni izvor šuma zemeljskega magnetnega polja odkrit prehod vremenskih front čez ozemlje Slovenije [6]. To ozemlje je tudi na seizmološko aktivnem območju Evrope [7]. Zato je lahko povečana tektonska napetost v zemeljski skorji naslednji pomemben naravni izvor šuma v lokalnem magnetnem polju Zemlje, izmerjenem na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia).

2 MAGNETNO POLJE ZEMLJE

Živimo v stalno prisotnem statičnem magnetnem polju Zemlje. Ta se razprostira zunaj atmosfere našega planeta, v bližnje vesolje. Že pred več kot tisoč leti so zemeljsko magnetno polje začeli izkoriščati tudi v zahodni civilizaciji za navigacijo na morju. Že v 13. stoletju je bilo znano, da kompasna igla ne kaže točno proti zemeljskemu geografskemu polu. To odstopanje, magnetna deklinacija, se spreminja tako z zemljepisno širino kot tudi z zemljepisno dolžino.

Leta 1269 je pater Petrus Peregrinus de Mericord spisal svoja Pisma o magnetih, ki so najstarejše znane razprave iz eksperimentalne fizike [8, 9]. V njih objavlja osnovne zakone s področja magnetizma. William Gilbert (1514–1603), prvi raziskovalec zemeljskega magnetizma, je na podlagi meritev na modelu ugotovil, da je Zemlja sama zase en velik magnet in da se zaradi tega spreminja njena magnetna deklinacija. Izsledke svojih raziskav je objavil v knjigi 'De Magnete' izdani leta 1600 [10, 11].

V 18. stoletju je bilo že znano, da se zemeljsko magnetno polje ne spreminja le po kraju, temveč tudi s časom po smeri in tudi po amplitudi. Sistematične meritve sprememb zemeljskega magnetnega polja so se začele okoli leta 1840. V istem času je Friedrich Gauss (1777–1855) objavil prvi realistični model tega polja [12, 13]. Odkritje, da se pogostnost geomagnetnih neviht spreminja v skladu s cikli sončnih peg [14], je Edvard Sabine (1788–1883) objavil leta 1852 [15]. Nenadne spremembe zemeljskega magnetnega polja torej povzročajo povečano aktivnost Sonca, kar je bilo konec 19. stoletja tudi potrjeno. Proučevanje geomagnetnega polja se je tako razširilo na prostor med središčem Sonca in središčem Zemlje. Šele z razvojem vesoljskih tehnologij v drugi polovici 20. stoletja pa so

bili odkriti tudi vsi tisti izvori na Soncu, ki povzročajo geomagnetne nevihte na Zemlji [16, 17].

Razvoj merilne tehnike na področju geomagnetizma ter vključitev informatike in telekomunikacij [18, 19] sta omogočila, da je to danes eno najhitreje razvijajočih se področij znanosti. Po svoji naravi je geomagnetno polje konservativno polje sile s svojimi posebnostmi. Je elastično in je zato v njem prisotno zvonjenje Pc (pulsation continuous) ekstremno nizkih frekvenc [20, 21] in monotono vračanje tega polja v svojo izhodiščno lego potem, ko se premakne pod sunki sončnega vetra. Prav interakcije med sončnim vetrom in geomagnetnim poljem ter izmenjava energije med njima so v zadnjem desetletju v ospredju raziskav [22, 23].

3 MODELI IZVOROV ELEKTRIČNIH, MAGNETNIH IN ELEKTROMAGNETNIH SIGNALOV

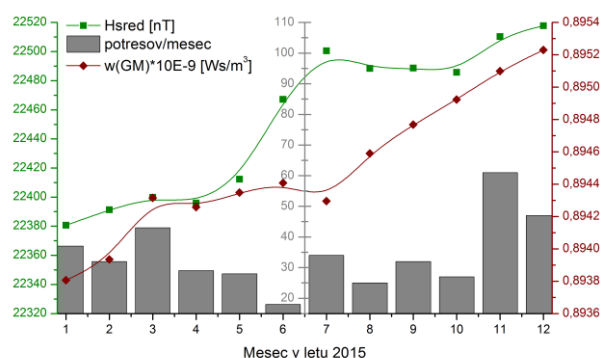
Zaradi povečane napetosti zemeljske skorje pride do ločitve električnih nabojev. Nastane električno polje in zaradi gibanja nabojev še magnetno polje. Zaradi ločitve in nato ponovnega združevanja električnih nabojev nastajajo na takem območju poleg električnih in magnetnih pojavov še elektromagnetni pojavi [24]. Večina zemeljskih plasti v območju s povečano tektonsko napetostjo ne vsebuje veliko piezoelektričnih kristalov, pa še ti niso urejeni v eno samo smer. Poleg tega je električna upornost kamenin tako nizka, da ne more zadržati ločenega električnega naboja. Zato je na območjih s povečano tektonsko napetostjo malo verjetna možnost nastanka električnega polja zaradi piezoelektričnega efekta. Piezomagnetni efekt, ki je lahko vzrok spremembe magnetizacije ΔH zemeljskega magnetnega polja, je določen na podlagi empiričnih enačb. Po teh enačbah izračunane spremembe magnetizacije ΔH so precej manjše od neposredno izmerjenih v naravi.

Najbolj razširjena metoda za merjenje notranjih napetosti zemeljskih skladov je merjenje njihove električne upornosti. Električna upornost kamenin se namreč spreminja s spremembo njihove strukture, vsebine vode v njih in stopnje mineralizacije. Ko se geološka struktura kamnin spremeni pod vplivom zunanjih sil, se spremenijo velikosti por v njih, začenja se kapilarno pretakanje vode v njih ter s tem tudi gibanje in ločevanje električnih nabojev med seboj [25].

Za uspešno razlago pojava elektromagnetnih signalov, nastalih zaradi sprememb tektonskih napetosti v zemeljski skorji, je bilo postavljenih še kar nekaj modelov, pri čemer pa nobeden ne opiše popolnoma vseh nastalih oblik električnih, magnetnih in elektromagnetnih signalov [26, 27, 28, 29]. Zaradi nepoznavanja absorpcije teh signalov na poti od izvora do merilnih instrumentov skozi različne sklade kamenin pa je nemogoče vnaprej določiti velikosti amplitud na sprejemni strani. Tako dielektrične kot tudi magnetne

konstante se namreč spreminjajo z geološko strukturo posameznih plasti in tudi z njihovo temperaturo.

Neposredno v sam izvor pa so postavljeni sprejemniki elektromagnetnih valov ekstremno nizkih frekvenc ELF (Extremely Low Frequency). Te frekvence nastajajo v votlih resonatorjih med Zemljo in njeno ionosfero. Okoli 2000 nevihtnih celic, razporejenih po zemeljski obli, povzročajo vsako sekundo okoli 50 atmosferskih razelektritev, ki vzdržujejo to naravno resonanco [24]. Njen frekvenčni spekter je zelo stabilen. Nad območjem s povečano tektonsko napetostjo nastane sprememba koncentracije ionov, ki spremeni robne pogoje votlim resonatorjem in s tem tudi velikost resonančnih frekvenc [30]. Ta razlaga pa ne pojasni tudi sočasne spremembe njihovih amplitud.



Slika 1: V letu 2015 na geomagnetnem observatoriju PIA izmerjene mesečne spremembe horizontalne komponente zemeljskega magnetnega polja H [nT] ter mesečno število potresov z magnitudo $M \geq 1$ [31, 32] in sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju w_{GM} [Ws/m³] na ozemlju Slovenije

Na potresnih območjih se seizmična aktivnost spreminja tako, kot se odvijajo dolgoročne spremembe zemeljskega magnetnega polja (angl. secular variations), spremembe v krajših časovnih obdobjih (angl. seasonal variations) (slika 1) ali kot povprečne spremembe horizontalne komponente geomagnetnega polja v geomagnetno mirnih dneh S_q (angl. solar quiet) [33]. Vse te spremembe so posledica sprememb v zemeljski notranjosti (zemeljski magnetni dinamo) in v ionosferi (ionosferski magnetni dinamo). Relativno tanek zunanji plašč Zemlje in še tanjša vrhnja litosfera nimata večjega vpliva na te magnetne spremembe.

Na spremembe zemeljskega magnetnega polja neposredno vplivajo razmere v vesolju v neposredni bližini našega planeta. Udarni valovi v sončnem vetru in skokovite spremembe hitrosti v njem povzročajo geomagnetne nevihte. Zato je treba pri ocenjevanju vpliva sprememb tektonskih napetosti na meritve geomagnetnega polja upoštevati tudi vplive Sonca na magnetno polje Zemlje [34].

4 SPREMEMBA GOSTOTE ENERGIJE V MAGNETNEM POLJU ZEMLJE

Magnetno polje se v prostor ne širi radialno, tako kot pri elektrostatičnem in gravitacijskem polju. V vsaki točki magnetnega polja je usmeritev sile drugačna. Že pri najpreprostejšem primeru jakost magnetnega polja upada hitreje kot jakost v elektrostatičnem ali v gravitacijskem polju [35].

Zunanji vir električne energije vzdržuje električni tok i v tuljavi [36, 37]. V magnetnem polju B te tuljave se nakopiči energija W (1).

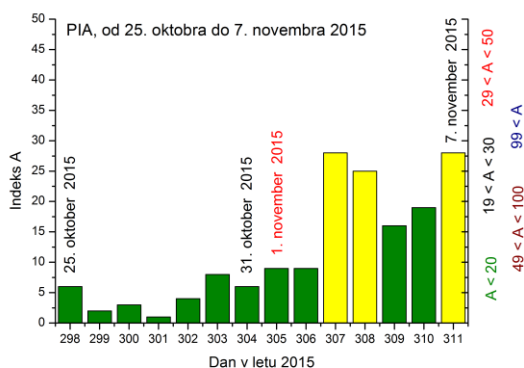
$$W = \int_0^i uidt = \int_0^i L \frac{di}{dt} idt = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2\mu_0} B^2 Sl \quad (1)$$

Za tuljavo z N ovoji, presekom S in dolžino magnetne silnice l so v enačbi (1): - gostota magnetnega polja $B = \mu_0 Ni$; - induktivnost tuljave $L = \mu_0 N^2 S/l$ in; - volumen $V = Sl$.

Gostota energije v magnetnem polju W/V je določena z enačbo (2), ki velja tudi za gostoto energije w v geomagnetnem polju w_{GM} .

$$w_{GM} = \frac{W}{V} = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (2)$$

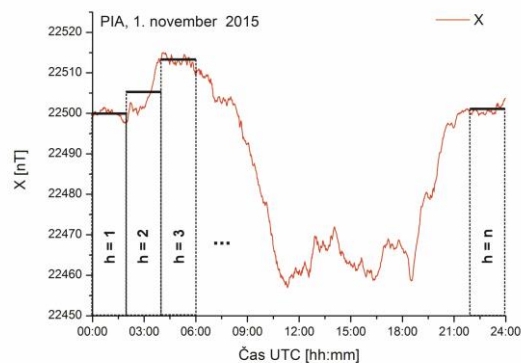
Morebitne relativne spremembe gostote energije v zemeljskem magnetnem polju zaradi sprememb tektonskih napetosti so zelo majhne, so deli šuma. Lahko jih ocenimo na podlagi meritev sprememb zemeljskega magnetnega polja. Kvadriranje zelo majhnih vrednosti pa lahko privede do nestabilnosti računalniških algoritmov. Za oceno relativne spremembe gostote energije zemeljskega magnetnega polja zadošča že izračun relativne spremembe gostote zemeljskega magnetnega polja, ki izhaja iz absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja F (B) = $(X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$ [nT].



Slika 2: Geomagnetni indeks A za štirinajstdnevno obdobje okoli 1. novembra 2015

Absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja F (B) [nT] se v geomagnetnih observatorijih meri s protonskim magnetometrom. Pri variometričnih meritvah se s triosnim magnetometrom

fluxgate po navadi merijo spremembe vseh treh komponent zemeljskega magnetnega polja XYZ (sever, vzhod, nadir) ali DIF (deklinacija, inklinacija, absolutna vrednost). Po mednarodnih priporočilih izmerjene enosekundne vrednosti filtrirajo z Gaussovimi digitalnimi filtri [38]. Končni rezultat obdelave merilnih rezultatov so enominutne srednje vrednosti spremembe zemeljskega magnetnega polja v posameznem dnevu, podanega v času UTC [39]. Meritev vseh treh komponent omogoča izračun horizontalne komponente zemeljskega magnetnega polja H [nT] in izračun geomagnetnega indeksa K . Geomagnetni indeks K je med vsemi geomagnetnimi indeksi uporabljen za opis stanja v geomagnetnih observatorijih s srednjimi zemljepisnimi širinami. Geomagnetni indeksi so bili vpeljani zaradi boljše preglednosti nad veliko količino merilnih podatkov in zaradi lažje primerjave stanja zemeljskega magnetnega polja na različnih mestih zemeljske oble.



Slika 3: Določitev širine časovnih oken na magnetogramu spremembe komponente X zemeljskega magnetnega polja izmerjenega 1. novembra 2015

Geomagnetni indeks K (karakter; nemško: Kennziffer) je neimenovano število: od 0 za najbolj miren dan do 5, ko nastopa najmilejša oblika geomagnetne nevihte, pa vse do 9 za opis razmer, ko je zemeljsko magnetno polje najbolj razburkano. Jakost geomagnetnih neviht narašča od geomagnetnega ekvatorja proti območju polarnih sijev. Zato ima vsak observatorij svojo skalo indeksa K . Skala geomagnetnega indeksa K je logaritične oblike in je določena na podlagi meritev komponent zemeljskega magnetnega polja v triurnih časovnih intervalih. Iz meritev so izločene dnevne variacije geomagnetno mirnega dne, vpliv lune in efekt umirjanja po izteku geomagnetnih neviht.

Geomagnetno miren dan Sq je določen s spremembo zemeljskega magnetnega polja v dneh brez izrednih sončnih motenj. Kot referenca je izbranih pet ali osem najbolj mirnih dni v mesecu, ko je bil indeks K pod izbrano nizko vrednostjo [40]. Vsota vseh osmih geomagnetnih indeksov K posameznega dne da geometrijsko srednjo vrednost. Po ustrezni tabeli [41] se indeks K pretvori v indeks a (angl. average), ki ima

linearno skalo. Aritmetična srednja vrednost vseh osmih linearnih geomagnetnih indeksov a posameznega dne je geomagnetni indeks A ali ekvivalentna dnevna amplituda (angl. equivalent daily amplitude). V štirinajstdnevem obdobju okoli 1. novembra 2015 (slika 2) ni bilo večjih geomagnetnih motenj. Geomagnetno polje je postalo rahlo razburkano po 2. novembru, ko je indeks A dosegel vrednost $A = 30$. Šele z nastopom najmilejše oblike geomagnetne nevihte pa doseže ekvivalentna dnevna amplituda vrednost $A = 48$.

Pri obdelavi digitalnih podatkov je pomembna širina uporabljenih časovnih oken [42, 43]. Pri enominutnih srednjih vrednostih spremembe zemeljskega magnetnega polja se pri povprečju vseh razpoložljivih podatkov posameznega dne v rezultat zajamejo tudi dnevne variacije, nastale zaradi Sonca. Te variacije so prisotne tudi v magnetogramu geomagnetno mirnega dne. Da se ta dnevni vpliv Sonca odstrani, mora biti širina uporabljenih časovnih oken manjša od 24 ur (slika 3). Za izračun srednje vrednosti pa mora biti zagotovljeno potrebno število vzorcev, zato mora biti širina časovnega okna v obravnavanem primeru najmanj 0,5 ure. Pri tako ozkem časovnem oknu je število uporabljenih vzorcev 30.

5 INDEKSI GEOMAGNETNE AKTIVNOSTI OB POVEČANI NAPETOSTI V ZEMELJSKI SKORJI

Spremenljivost zaporedja merilnih podatkov x_i , pri čemer je $i = 1, \dots, N$, se opiše s pomočjo standardne deviacije δ [43, 44]. Ta je podana kot moč glede na srednjo vrednost μ (3), pri čemer je posamezni člen standardne deviacije izražen z $(\mu - x_i)^2$. Povprečno odstopanje je prav tako podano glede na srednjo vrednost μ , vendar kot odstopanje amplitude $(\mu - x_i)$. Če se standardna deviacija δ (4) izračuna relativno glede na srednjo vrednost μ , je le-ta podana kot število brez dimenzij (5).

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\mu - x_i)^2} \quad (4)$$

$$\frac{\delta}{\mu} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{x_i}{\mu}\right)^2} \quad (5)$$

Pri končnem številu merilnih podatkov je standardna deviacija pravzaprav ocenitev te skupine merilnih podatkov in bi zato v enačbi (5) moral biti namesto $1/N$ prvi člen $1/(N-1)$. Pri velikem številu zaporedja merilnih podatkov ta podrobnost ne vpliva na končno vrednost. Večja vrednost standardne deviacije pomeni večjo spremenljivost zaporedja merilnih podatkov x_i glede na njihovo srednjo vrednost μ , pri čemer je $i = 1, \dots, N$.

Standardna deviacija enominutnih srednjih vrednosti [34, 45] komponente vektorja X zemeljskega magnetnega polja ΔX_w (6) je podana glede na srednjo vrednost X_{avg} (7) izračunane v časovnem oknu izbrane širine (slika 3).

$$\Delta X_w = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - X_{avg}}{X_{avg}}\right)^2} \quad (6)$$

$$X_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (7)$$

i = število vzorcev v časovnem oknu izbrane širine.

Iz standardne deviacije vseh treh komponent vektorja zemeljskega magnetnega pola X , Y in Z je podan indeks geomagnetne aktivnosti $Aktivnost(w)$ v časovnih oknih izbrane širine v posameznem obravnavanem dnevu (8) in indeks dnevne geomagnetne aktivnosti v tem dnevu $Aktivnost(dan)$ (9).

$$Aktivnost(w) = \sqrt{\Delta X_w^2 + \Delta Y_w^2 + \Delta Z_w^2} \quad (8)$$

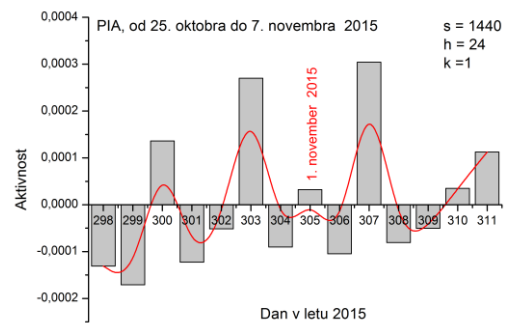
$$Aktivnost(dan) = \frac{1}{w} \sum_{n=1}^w Aktivnost(w)_n \quad (9)$$

w = število časovnih oken v posameznem dnevu.

$$Aktivnost = f[Aktivnost(dan) - Aktivnost(dan - 1), A * k] \quad (10)$$

A = ekvivalentna dnevna amplituda;

k = koeficient vpliva geomagnetnih neviht.



Slika 4: Relativna sprememba gostote zemeljskega magnetnega polja v štirinajstdnevem obdobju okoli 1. novembra 2015

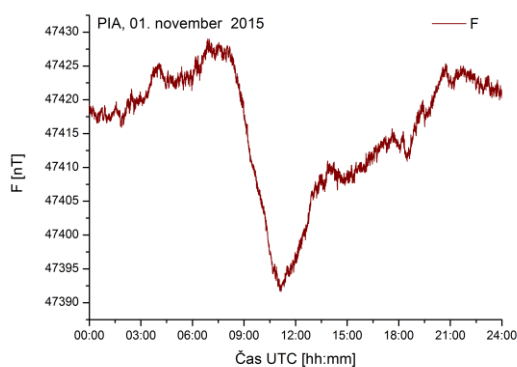
Prava primerjalna vrednost indeksa dnevne geomagnetne aktivnosti $Aktivnost(dan)$ se opazi šele po primerjavi z indeksom geomagnetne aktivnosti prejšnjega dne $Aktivnost(dan-1)$. Primerjava s prejšnjim dnevom da indeks geomagnetne aktivnosti $Aktivnost$, po katerem se šele ugotovi, ali se geomagnetna aktivnost

zaradi napetosti v zemeljski skorji povečuje ali zmanjšuje.

Indeks *Aktivnost* (10) je razmerje med razliko geomagnetne aktivnosti opazovanega in prejšnjega dne ter aritmetične srednje vrednosti geomagnetnih indeksov *A* opazovanega in prejšnjega dne (slika 4).

6 POTRES V SLOVENIJI 1. NOVEMBRA 2015

Ozemlje Slovenije obsega hitro dvigajoče se pogorje Alp in obrobje Panonske nižine, ki se relativno počasneje spušča. Tako dviganje Alp ni gravimetrično kompenzirano [46]. Na tem ozemlju so registrirane tri različne smeri tektonskega premikanja tal, in to z različno hitrostjo [47]. Pri teh premikih je nastalo več kot sto tektonskih prelomnic, prekinitev in razpok [48]. V letu 2015 je avtomatska mreža seizmografov Republike Slovenije registrirala 1944 potresov ali povprečno 5,3 na dan. Med njimi jih je bilo 378 ali 19,4 % z magnitudo večjo od $M_L = 1,0$ [49]. V letu 2015 je bil seizmološko najaktivnejši mesec november z 291 registriranimi potresi in najmanj aktiven mesec junij s 110 registriranimi potresi.



Slika 5: Dnevna sprememba absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja F (B) izmerjena 1. novembra 2015

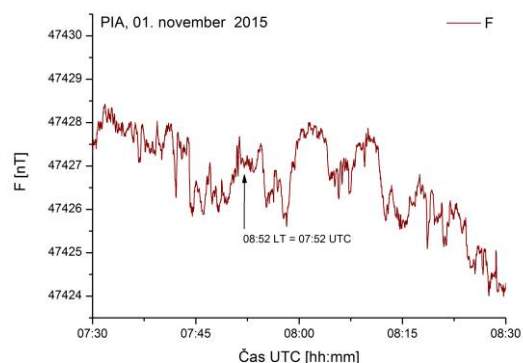
Po navedbah Urada za seizmologijo in geologijo pri Agenciji Republike Slovenije za okolje so seizmografi državne mreže potresnih opazovalnic v nedeljo, 1. novembra 2015, ob 8,52 LT (7,52 UTC) zabeležili zmerni potresni sunek. Potres so čutili prebivalci celotne Slovenije, zahodne Hrvaške, Istre in Trsta v Italiji. Preliminarna ocena magnitude potresa je bila 4,2. Glavnemu potresu je sledilo več deset potresnih sunkov [50]. Žarišče potresa je bilo v bližini Cerklj ob Krki, njegova intenziteta (učinki) pa ni presegla V.–VI. stopnje po evropski potresni lestvici (EMS-98). Pozneje so bile zanj določene še geodetske koordinate in globina njegovega epicentra [49].

V geomagnetnem observatoriju PIA (Piran) so merjene variacije geomagnetnega polja s triosnim magnetometrom fluxgate. Razdalja do epicentrom potresa z magnitudo 4,2, ki se je zgodil 1. novembra 2015 ob 7,52 UTC, je bila okoli 150 km (azimut:

69,8°). Potres se je v območju observatorija čutil z zakasnitvijo najprej po 18,8 sekunde ($\alpha \leq 8,0$ km/s) in najpozneje po 1 minuti in 2,9 sekunde ($\beta \geq 2,4$ km/s) [35, 51]. Registracija spremembe absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja (slika 5) pokaže, da je bil 1. november 2015 geomagnetno miren dan z ekvivalentom dnevne amplitude $A = 8,6$ (slika 2). Tudi podrobnejša analiza magnetograma za absolutno vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja v časovnem prostoru (slika 6) ne kaže kakšnih dodatnih sprememb, ki bi nastale zaradi teh potresnih sunkov.

7 SKLEP

Lokalni indeks spremembe gostote geomagnetnega polja (slika 4), izračunanega iz merilnih podatkov v štirinajstdnevem obdobju okoli 1. novembra 2015, kaže, da so vzrok povečanega šuma tudi tektonske napetosti v zemeljski skorji. Ta indeks bi bil uporaben tudi za kratkoročno napovedovanje zemeljskih potresov. Toda povišan indeks, ki kaže na povečano tektonsko napetost, še ni resen kazalec potresa [52, 53]. Ko potres resnično nastane, je pred tem sicer povečana gostota zemeljskega magnetnega polja, toda ob povečani gostoti še ni nujno, da nastane tudi potres.



Slika 6: Sprememba absolutne vrednosti zemeljskega magnetnega polja F (B) 1. novembra 2015 v času od 7,30 UTC do 8,30 UTC, ko je v bližini Cerklj ob Krki nastal potres z magnitudo 4,2

Sedanje meritve spremembe zemeljskega magnetnega polja so usmerjene predvsem na ugotavljanje razmer v zemeljski notranjosti in v sončnem vetru. Zato sta pomembna nadaljnji razvoj primernih merilnih instrumentov [54], merilnih metod in postopkov za obdelavo merilnih podatkov in razlaga rezultatov tudi za spremembe zemeljskega magnetnega polja lokalne narave.

Za potrditev povečane tektonske napetosti bi bile potrebne vzporedne meritve še drugih geofizikalnih kazalcev, kot sta sprememba električne upornosti zemeljskih skladov in sprememba resonančnih pojavov na ekstremno dolgih elektromagnetnih valovih ELF (Extremely Low Frequency) z valovnimi dolžinami od 10.000 do 100.000 kilometrov.

LITERATURA

- [1] Čop Rudi, Kocen Jernej "Geomagnetne meritve na geomagnetni referenčni točki na Predmeji", Raziskave s področja geodezije in geofizike 2008. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 9–76, 2009.
- [2] Čop Rudi "Gradnja geomagnetnega observatorija na Sinjem vrhu", Raziskave s področja geodezije in geofizike 2010. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 59–64, 2011.
- [3] Čop Rudi, Deželjin Damir "Prvo leto delovanja geomagnetnega observatorija Sinji vrh", Raziskave s področja geodezije in geofizike 2011. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 57–62, 2012.
- [4] Čop Rudi, Deželjin Damir, Mihajlovič J. Spomenko, Kosovac Pavel "Preliminary Measurements of Geomagnetic-field Variations in Slovenia", Elektrotehniški vestnik; English edition, 78 (3), 96–101, 2011.
- [5] Čop R., Milev G., Deželjin D., Kosmač J. "Protection against lightning at a geomagnetic observatory", Geoscience Instrumentation, Methodes and Data Systems, 3, 135–141, 2014.
- [6] Čop Rudi "Snowstorm at the geomagnetic observatory", Geoscience Instrumentation, Methodes and Data Systems, 4, 155–159, 2015.
- [7] Čop Rudi "Determination of the Earth crust's tectonic stress on the basis of one-minute average data of variation of the geomagnetic field", XVIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data acquisition and Processing. Abstracts. Dourbes (Belgium): Royal Meteorologic Institut – RMI, September 5–10, 2016.
- [8] The letter of Petrus Peregrinus on the magnet, A.D. 1269. New York (US): Mc Graw, 1904.
- [9] Sparavigna C. Amelia "Petrus Peregrinus of Maricourt and the Medieval Magnetism", Mechanics, Materials Science & Engineering Journal, 2, 90–97, 2016.
- [10] Gilbert William "Loadstone and Magnetic Bodies, and on the Great Magnet the Earth", London: Bernard Quaritch, 1893.
- [11] Malin Stuart, Barraclough David "Gilbert's De Magnete: An Early Study of Magnetism and Electricity", EOS, Transactions American Geophysical Union, 81 (21), 2011.
- [12] Gauss F. Carl "The intensity of the earth's magnetic force reduced to absolute measurement; Intensitas vis magneticae terrestri ad mensuram absolutam revocata", Washington (DC, US): 21th Century Science & Technology, 2008.
- [13] Gerland G. D. "The contributions of Carl Friedrich Gauss to geomagnetism", Historia Mathematica, 6, 5–29, 1979.
- [14] Maunder E. Walter "Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874–1902", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 64, 747–761, 1904.
- [15] Sabine Edward "On Periodical Laws Discoverable in the Mean Effects of the Larger Magnetic Disturbances. No. II.", Phil. Trans. R. Soc. Lond., 142, 103–124, 1852.
- [16] Cliver W. E. "Solar Activity and Geomagnetic Storms: The First 40 Years", EOS, Transactions, American Geophysical Union, 75 (49), 569, 574–575, 1994.
- [17] Stern P. David "A Millennium of Geomagnetism", Reviews of Geophysics, 40 (3), B1–B30, 2002.
- [18] Tittmann O. H. "Principal facts of the Earth's magnetism and methods of determining the true meridian and the magnetic declination", Washington (DC, US): Government Printong Office, 1909.
- [19] "Geomagnetic Observations and Models", Dordrecht (NL): Springer, 2011.
- [20] McPherron L. Robert "Magnetic Pulsations: Their Sources and Relation to Solar Wind and Geomagnetic Activity", 16th EM Induction Workshop, Santa Fe (New Mexico, US): College of Santa Fe, June 16–22, 2002.
- [21] Yagova N., Heilig B., Fedorov E. "Pc2-3 geomagnetic pulsations on the ground, in the ionosphere, and in the magnetosphere: MM100, CHAMP, and THEMIS observations", Annales Geophysicae, 33, 117–128, 2015.
- [22] Blagau Adrian "Characteristics of Earth's magnetopause from Cluster measurements. Dissertation", München (D): Ludwig-Maximilians-Universität München; Faculty of Geosciences, 2007.
- [23] "MMS and Cluster observations of magnetic reconnection", ISSI international research team proposal; Bern (CH): International Space Science Institute, 2016.
- [24] Fidani Cristiano "On Electromagnetic Precursors of Earth-quakes: Models and Instruments", Medicina (Italy): IPHW – International project Hessdalen Workshop, 17 June 2006.
- [25] Zohdy A. R., Eaton G. P., Mabey D. R. "Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey; Application of surface geophysics to ground-water investigations", Denver (CO, US): U.S. Geological Survey; Department of the Interior, 1974.
- [26] Scheidegger A. E., "Recent Research on the Physical Aspects of Earthquakes" Earth- Science Reviews, 22, 173–229, 1985.
- [27] Park K. Stephen "Precursors to Earthquakes: Seismoelectromagnetic Signals", Surveys in Geophysics, 17, 493–516, 1996.
- [28] Johnston M. J. S. "Review of Electric and Magnetic Fields Accompanying Seismic and Volcanic Activity", Surveys in Geophysics, 18, 441–475, 1997.
- [29] Tzanis A., Vallianatos F. "A critical review of Electric Earthquake Precursors", Annals of Geophysics, 44 (2), 429–460, 2001.
- [30] Sorokin V. M., Ruzhin Yu. Ya "Electrodynamic Model of Atmospheric and Ionospheric Processes on the Eve of an Earthquake" Geomagnetism and Aeronomy, 55 (5), 626–642, 2015.
- [31] Potresi, Arhiv obvestil o zadnjih potresih, na spletu : http://www.arso.gov.si/potresi/obvestila%20o%20potresih/potresi_arhiv.html (29. 8. 2016).
- [32] Jesenko Tamara, Šket Motnikar Barbara, Cecič Ina, Godec Matjaž, Prosen Tatjana, Živčič Mladen "Potresi v Sloveniji leta 2015", UJMA, 30, 52–60, 2016.
- [33] Duma G., Ruzhin Y. "Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations", Natural Hazards and Earth System Sciences, 3, 171–177, 2003.
- [34] Mavrodiev C. Strachimir, Pekevski Lazo "On the FP7 BlackSeaHazNet Project and Its Possible Application for Harmonic Existence of the Regions", Black Sea Energy Resource Development and Hydrogen Energy Problems; NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 2013.
- [35] Lowrie William "Fundamentals of Geophysics", Cambridge (UK): Cambridge University, 2007.
- [36] Halliday David, Resnick Robert, Walker Jearl "Fundamentals of Physics", Hoboken (NJ, US): John Wiley & Sons, 2003.
- [37] Bradford H. Hager, Lawrence Shawn "Essentials of Geophysics", Cambridge (MA, US): Massachusetts Institute of Technology - MIT; Department of Earth, Atmospheric and Planetary Science; Geodesy and Geodynamics, 2002.
- [38] "INTERMAGNET Technical Reference Manual", Edinburgh (UK): British Geological Survey, 2012.
- [39] Čop Rudi "Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije", Geodetski vestnik, 60 (2), 197–211, 2016.
- [40] Čop Rudi, Deželjin Damir, De Reggi Robert "Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K", Geodetski vestnik, 59 (4), 697–708, 2015.
- [41] Rangarajan G. K. "Indices of Geomagnetic Activity", Geomagnetism; Volume 3, London: Academic Press, 323–384, 1989.
- [42] Lyons G. Richard "Understanding Digital Signal Processing", Reading (MA, US): Addison Wesley Longman, 1997.
- [43] Smith W. Steven "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing", SanDiego (CA, US): California Technical, 1999.
- [44] Walpole E. Ronald, Myers H. Raymond, Myers L. Sharon, Ye Keying "Probability & Statistics for Engineers & Scientists", Boston (MA, US): Pearson Education; Prentice Hall, 2012.

- [45] Mavrodiev C. Strachimir, Pekevski Lazo, Kikuashvili Giorgi, Botev Emil, Getsov Petar, Mardirossian Garo, Sotirov Georgi, Teodossiev Dimitar "On the Imminent Regional Seismic Activity Forecasting Using INTERMAGNET and Sun-Moon Tide", *Open Journal of Earthquake Research*, 4, 102–113, 2015.
- [46] Serpelloni Enrico, Faccenna Claudio, Spada Giorgio, Dong Danan, Williams D. P. Simon "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, 2013.
- [47] Sterle Oskar, Stopar Bojan "Stanje horizontalne komponente državnega koordinatnega sistema", *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2015*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 123–134, 2016.
- [48] Placer Ladislav "Principles of tectonic subdivision of Slovenia", *Geologija*, 51 (2), 205–217, 2008.
- [49] "Potresi v Sloveniji – januar 2015; Potresi v Sloveniji – december 2015". Seznam potresov. Ministrstvo za okolje in prostor Republike Slovenije; Agencija Republike Slovenije za okolje, 2015.
- [50] "Potres 1. novembra 2015; Potres magnitude 4,2 pri Cerkljah ob Krki", na spletu: http://www.arso.gov.si/potresi/obvestila%20o%20potresih/potresi_arhiv.html (2. 11. 2015).
- [51] Shearer M. Peter "Introduction to Seismology", Cambridge (UK): Cambridge University, 2009.
- [52] Vidrih Renato "Geohazard: Potresna Slovenija; Napovedovanje potresov: da ali ne?", *Evolucija Zemlje in geološke zančilnosti Slovenije*, Ljubljana: Prirodoslovni muzej Slovenije, 2009.
- [53] Freund Friedemann, Stolz Viktor "Nature of Pre-Earthquake Phenomena and their Effects on Living Organisms", *Animals*, 3, 513–53, 2013.
- [54] Ustundag Berk, Kalenderli Ozcan, Eyidogan Haluk "Multilayer Capacitor Model of the Earth's Upper Crust", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 13 (1), 163–173, 2005.

Rudi Čop je doktoriral leta 2003 na Fakulteti za pomorstvo in promet v Portorožu in naslednje leto še na fakulteti za elektrotehniko in računalništvo v Zagrebu. Področje njegovega dela so merilni instrumenti, meritve in obdelava signalov. Leta 2014 je začel s projektiranjem in pripravo gradnje observatorija PIA (Piran, Slovenia). Zdaj upravlja ta observatorij, ki od 1. januarja 2015 redno obratuje, pošilja merilne podatke v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET in se stalno dopolnjuje tako z merilno kot tudi s ustrezno programsko opremo.