

# Elektromagnetni valovi daljši od premera Zemlje

Rudi Čop<sup>1</sup>

## Povzetek

V prispevki so obravnavane meritve elektromagnetnih valov na observatoriju PIA (Piran, Slovenia) s sprejemnikom ELF (Extremely Low Frequency) v frekvenčnem območju od 50 Hz do 1 mHz. Antena tega sprejemnika je usmerjena proti središču Zemlje. Frekvenčno območje meritev je na prehodu iz meritev električnega polja pojavov, ki se odvijajo predvsem v atmosferi, v meritve zemeljskega magnetnega polja, ki nastaja v notranjosti planeta. Obsega valovne dolžine Mm ( $\lambda \sim 10^6$  m), ki so valovi naravnih resonanc Zemlje, in valovne dolžine Gm ( $\lambda \sim 10^9$  m), ki so valovi magnetnih impulzov. Geomagnetni impulzi, ki izvirajo iz vesolja in magnetosfere, se proučujejo že dvesto let. Naravne resonančne frekvence, ki izvirajo iz električnih resonatorjev Zemlje, se raziskujejo od sredine prejšnjega stoletja in jih relativno slabo poznamo. Vzbujuje jih strele v troposferi in razelektritve v ionosferi. Za popolnejši pregled električnih lastnosti Zemlje so opisani še telurski električni toki, ki tečejo v zemeljski skorji, in so prav tako odraz razmer v bližnjem vesolju in razelektritev v atmosferi. Tudi ob njihovi spremembi nastanejo elektromagnetni valovi zelo nizkih frekvenc.

**Ključne besede:** sprejemnik ELF, magnetni impulzi, motnje, telurski toki.

**Key words:** Earth's receiver, magnetic pulsations, artificial noise, telluric currents.

## Gostota energije elektromagnetnega polja na površini Zemlje

Gostota energije elektromagnetnega polja (v nadaljevanju besedila: EM polje) merjenega na površini Zemlje v območju od  $10^{-9}$  Hz do  $10^7$  Hz je porazdeljeno enakomerno padajoče (Füllekrug & Fraser-Smith, 2011). V več kot 16 eksponentnih stopnjah se ta gostota energije da opisati z enačbo (1), kjer je  $f$  [Hz] frekvenca EM polja merjenega na zemeljski površini.

$$u(f) = u_0 \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \quad (1)$$

$$u_0 = 10^{-16} \text{ Jm}^{-3}\text{Hz}^{-1}$$

$$f_0 = 1 \text{ Hz}$$

Merjena gostota EM polja na površini Zemlje ne odstopa od enačbe (1) za več kot  $\pm 2$  eksponentni stopnji po celotnem frekvenčnem območju od  $10^{-9}$  Hz do  $10^7$  Hz. Frekvenčna spremenljivost tega EM polja se torej da opisati z razmerjem  $1/f^2$ . To polje povzročajo različni prehodni pojavi, ki se med seboj sestavljajo (superponiranje). Ugotovljena porazdelitev in lastnost EM polja Zemlje, merjenega na njeni površini, ni primerljiva z nobenimi podobnimi primeri porazdelitve v fiziki. Ugotovitev, da je gostota energije EM valov naravnega izvora porazdeljena po enačbi (1) v frekvenčnem območju od  $10^{-9}$  Hz do  $10^7$  Hz, ni uporabna le v teoretični geofiziki temveč tudi pri konstruiranju novih širokopasovnih merilnih instrumentov.

Gostota energije EM polja Zemlje merjena na njeni površini se lahko na grobo deli v dva dela: geomagnetno polje, ki obsega področje pod 1 Hz, in atmosfersko električno polje, ki obsega področje nad 1 Hz. Izvori energije EM polja Zemlje frekvence manjših od  $10^{-8}$  Hz so v notranjosti Zemlje. Spremembo geomagnetnega polja frekvenc od  $10^{-8}$  Hz do

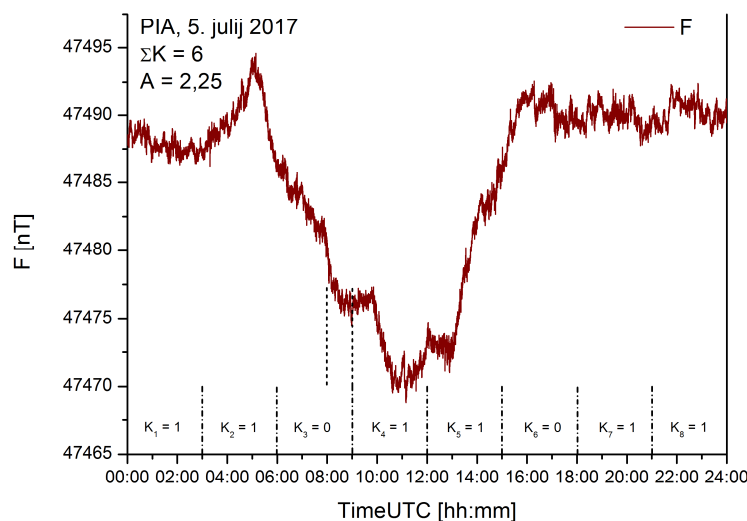
<sup>1</sup> Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovelje

$10^{-3}$  Hz povzročajo geomagnetne nevihte in ionosferski električni toki. Geomagnetni impulzi so izvor njegove hitre spremembe frekvenc od 1 mHz do 1 Hz. Spremembe frekvenc od 1 Hz do 10 MHz povzročajo razelektritve v atmosferi skupaj s sevanjem iz višjih plasti atmosfere in bližnjega vesolja (Čop, 2017a).

Vsi izvori EM valovanj, ki se nalagajo k osnovnemu geomagnetnemu polju, so prehodne narave. Zanje je značilno tudi, da so šibkejši pojavi pogostejši od energijsko močnejših. Vplivi teh izvorov se nalagajo eden na drugega, ter se spreminjajo v velikem območju časa in mesta nastanka. Zato je zelo nenavadno, da taki izvori, s povečevanjem njihove frekvence, povzročajo zelo enakomerno padajočo porazdelitev gostote energije EM polja merjenega na površini Zemlje.

## Elektromagnetni valovi frekvenc pod 50 Hz

Leta 1883 je irski fizik George Francis FitzGerald (1851–1901) predvidel nastanek EM valovanja pri naglih spremembah električnega toka. Na osnovi poznavanja lastnosti EM valovanja je leta 1889 predvidel krčenje v smeri gibanja proporcionalno razmerju  $v^2/c^2$  (FitzGerald–Lorentzovo krčenje) (Rahaman, 2014). Ta njegova ugotovitev je danes del posebne relativnostne teorije, ki jo je leta 1905 objavil Albert Einstein (Jackson, 2007).

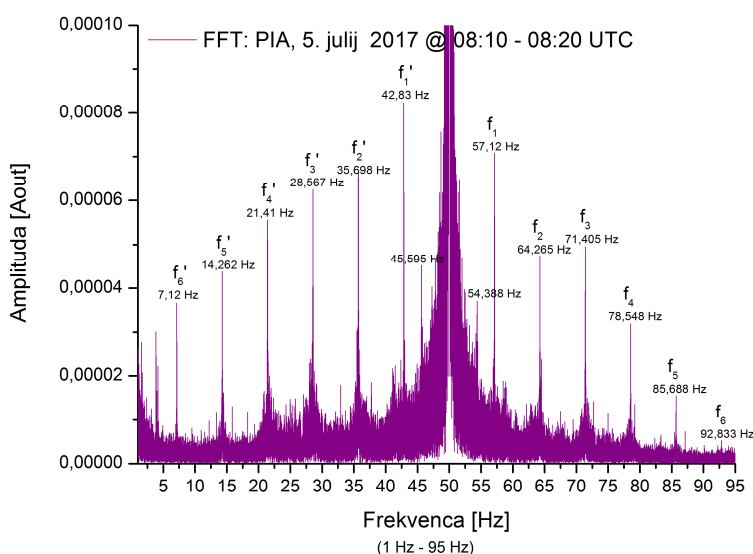


Slika 1 – Absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja izmerjena na observatoriju 5. julija 2017 ter vrednosti geomagnetnih indeksov  $K$  in ekvivalenta dnevne amplitude  $A$  za ta dan.

Prvi, ki je dejansko raziskoval EM valove ekstremno nizkih frekvenc je bil Nikola Tesla (1856–1943). Na začetku 20. stoletja je opravil pionirsko delo na tem področju. Valovanje s približno frekvenco 8 Hz, ki je stojno valovanje med zemeljsko površino in ionosfero, je nameraval izkoriščati za brezžični prenos energije. Leta 1952 je nemški fizik Winfried Otto Schumann (1888 –1974) objavil svoje teoretične izsledke o resonančnem pojavu našega planeta. Dve leti kasneje je skupaj s svojim sodelavcem objavil tudi rezultate meritev teh resonančnih frekvenc EM valov v področju ELF (Extremely Low Frequency). Po njem se ta pojav imenuje tudi Schumannove resonance (Rycroft, 1965; Besser, 2007; Schlegel & Füllekrug, 2002). Osnovna harmonska frekvenca je 7,8 Hz, višje harmonske

frekvence pa: 14,2 Hz, 19,6 Hz, 25,9 Hz in 32 Hz. Te frekvence so zelo stabilne, njihove amplitude pa znašajo okoli 1,0 pT ( $10^{-12}$  T). Nastajajo v votlih resonatorjih med Zemljo in njeno ionosfero. Preko 2000 nevihtnih celic, razporejenih po zemeljski obli, povzročajo vsako sekundo okoli 50 atmosferskih razelektritev, ki vzdržujejo to naravno resonanco (Barr et al., 2000).

Po označbah mednarodne zveze za telekomunikacije spadajo elektromagnetni valovi od 30 mHz do 300 Hz v področje ELF (Recommendation, 2015). Za izhodiščno meritev EM valov ELF na observatoriju PIA (Piran, Slovenija) (v nadaljevanju besedila: observatorij) od 1 mHz do 50 Hz je bil izbran geomagnetno miren dan, ker je takrat vpliv Sonca najmanjši. V času enega efektivnega obrata Sonca od 1. julija do 27. julija 2017 je bil najbolj miren geomagnetni dan 5. julij 2017. Tega dne je geomagnetni indeks  $A$ , ekvivalent dnevne amplitude, dosegel vrednost  $A = 2,25$ . Ta linearni indeks je primeren za opisovanje geomagnetnih razmer v preteklosti in doseže največjo vrednost  $A_{\max} = 400$ . Najbolj mirno obdobje v dopoldanskih urah tega dne je bilo med 06:00 in 09:00 uro UTC. V tem času je bila vrednost geomagnetnega indeksa  $K = 0$ . Ta logaritmični indeks, primeren za opisovanje trenutnih razmer v zemeljskem magnetnem polju, lahko doseže največjo vrednost  $K_{\max} = 9$  (Čop et al., 2015). Za analizo merilnih podatkov sprejemnika ELF je bila izbrana zadnja ura v tem triurnem obdobju od 08:00 do 09:00 UTC. V tem enournem intervalu je bil geomagnetni indeks  $K = 0$ , vendar se je na začetku te ure upočasnilo pojanje absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja  $F$  [nT] (Slika 1).



Slika 2 – Spektralna analiza od 1 Hz do 95 Hz rezultatov meritev s sprejemnikom ELF na observatoriju 5. julija 2017 od 08:10 do 08:20 UTC.

Podrobnejša frekvenčna analiza od 1 Hz do 95 Hz pokaže spodnji in zgornji bočni pas (Slika 2). Ta dva bočna pasa sta rezultat frekvenčne modulacije (Spectrum, 2001; Der, 2001) za regulacijo vrtljajev asinhronnega motorja (Luo et al., 2005; Pande & Singh, 2017). Stopnja modulacije obravnavanega primera meritev je enaka  $\beta = 1$ , v vseh naslednjih primerih istega dne pa  $\beta > 1$ . Simetrija po amplitudah ni popolna zaradi velike širine izbranega časovnega okna v katerem je bila narejena frekvenčna analiza. Naravne resonančne frekvence Zemlje frekvenc od 5 Hz do 46 Hz so sicer prisotne, vendar so pri tako močnih motnjah nenaravnega izvora del EM šuma.

## Magnetni impulzi v zemeljskem magnetnem polju

O spremembah geomagnetnega polja v frekvenčnem območju od 1 mHz do 1 Hz je prvi poročal 1741 švedski fizik, astronom in matematik Anders Celsius (1701–1744). Primerjal je kratkotrajne in majhne spremembe smeri kompasne igle s spremembami v polarnem siju (Kangas et al., 1998). V začetku raziskovanja so premike konice dolge kompasne igle opazovali z mikroskopom in jih zato imenovali magnetni mikroimpulzi. Z razvojem merilne opreme so se ti pojavi v geofiziki preimenovali najprej v magnetne impulze (ang. magnetic pulsation) in nato v EM valove ULF (ultra low frequency). Frekvenca teh valov je namreč nižja od naravna frekvenca plazme, ionske žiro–magnetne frekvence hladne plazme. 1963 so bili ti valovi v okviru mednarodne organizacije IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) razdeljeni glede na njihovo valovno dolžino in čas trajanja (Tabela 1). Oscilacije s približno sinusno obliko so ciklični magnetni impulzi Pc (pulsation continuous), tisti s težje določljivo obliko pa neciklični magnetni impulzi Pi (pulsation irregular) (McPherron, 2005).

Tabela 1 – Klasifikacija geomagnetnih impulzov

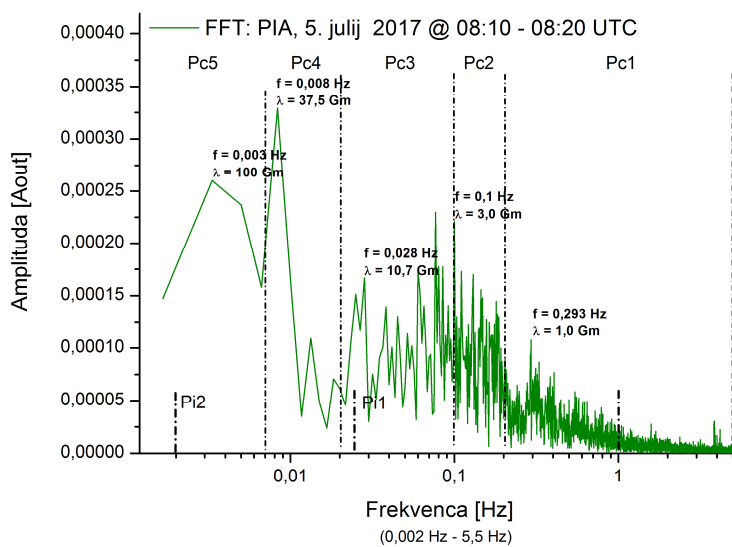
Vrsta	Oznaka	Čas trajanja [sekund]	Frekvenčno območje [Hz]
Ciklični impulzi:	Pc1	0,2 – 5	0,2 – 5 Hz
	Pc2	5 – 10	0,1 – 0,2 Hz
	Pc3	10 – 45	22 – 100 mHz
	Pc4	45 – 150	7 – 22 mHz
	Pc5	150 – 600	2 – 7 mHz
Neciklični impulzi:	Pi1	1 – 40	0,025 – 1 Hz
	Pi2	40 – 150	2 – 25 mHz

Sodobni merilni instrumenti na geofizikalnih observatorijih na zemeljski površini in meritve v vesolju s pomočjo satelitov omogočajo zelo obsežne raziskave EM valov ULF. Izvori teh valov so procesi v sončnem vetru in v posameznih delih magnetosfere, ki pa so različni za posamezno frekvenčno območje. Magnetosfera je pri tem tako valovod kot tudi votli resonator. Električni toki, ki tečejo vzdolž silnic geomagnetnega polja, izsevajo energijo v obliki EM valov proti Zemlji. Votle resonatorje magnetosfere vzbujajo izvori, ki delujejo v širokem frekvenčnem spektru. Ti resonatorji nato zanihajo v diskretnih resonančnih frekvencah. Na te frekvence vplivajo predvsem spremembe usmerjenosti medplanetarnega magnetnega polja in spremembe hitrosti širjenja sončnega vetra v tem prostoru. Zaradi interferenc se vsi ti valovi, ki dosežejo zemeljsko površino, pojavljajo kot nagle spremembe magnetnega polja različnih frekvenc, amplitud, faz in polarizacij. Zato so dober pokazatelj razmer v sončnem vetru in v magnetosferi. Ker so odvisni tudi od geoloških razmer na mestu meritve, se uporabljajo tudi kot detektor za notranjo strukturo Zemlje (McPherron, 2005; Woodroffe, 2010).

Rezultati meritev EM valov ULF na površini Zemlje se standardno obdelujejo z valovno analizo (ang. wavelet analysis) (Xu et al., 2013). Ta analiza se uporablja kot filter za eno–sekundne merilne podatke izmerjene z magnetometrom na geomagnetnih observatorijih (Kumar & Fofoula–Georgiou, 1997; Torrence & Compo, 1998). Globalni indeks moči EM valov ULF se izračunava iz merilnih podatkov magnetometrov na zemeljski površini ter na geostacionarnih in medplanetarnih satelitih. Je v neposredni korelaciji s hitrostjo sončnega vetra in zato zelo primeren za prikaz razmer v vesolju v neposredni bližini Zemlje (Pilipenko et al., 2017; Singh et al., 2013). Je v slabi korelaciji z

geomagnetnimi indeksi in bi ga bilo potrebno ustrezno prirediti za spremljanje pojavov v zemeljski skorji (Currie & Waters, 2014).

Na observatoriju 5. julija 2017 od 08:10 do 08:20 UTC izmerjeni EM valovi ULF so predstavljeni v frekvenčnem prostoru od 2,0 mHz do 5,5 Hz po amplitudi (Slika 2). Po mednarodnih priporočilih (Tabela 1) je ta frekvenčni prostor razdeljen na posamezne skupine. Po amplitudi so v frekvenčnem prostoru dobro predstavljeni ciklični impulzi Pc. Predstavitev necikličnih impulzov Pi je mogoča v časovnem prostoru ali v močnostnem spektru v frekvenčnem prostoru.



Slika 3 – EM valovi ULF izmerjeni na observatoriju 5. julija 2017 od 08:10 do 08:20 ure UTC in njihova razdelitev po skupinah cikličnih in necikličnih magnetnih impulzov.

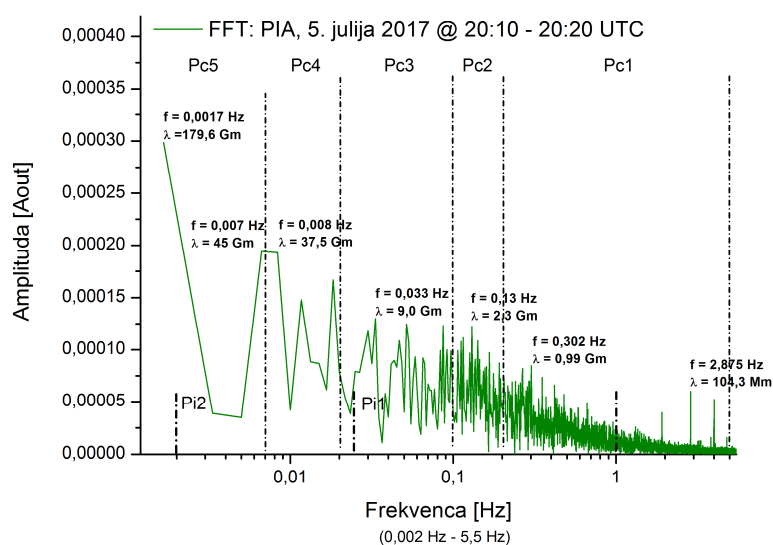
Za primerjavo so v frekvenčnem prostoru predstavljeni tudi rezultati meritev v času od 20:10 do 20:20 UTC, ko je bil observatorij v osojni legi (Slika 4). Opazno je zmanjšanje amplitud magnetnih impulzov v skupinah od Pc3 do Pc5.

Enaka analiza EM valov ULF kot na merilnih podatkih sprejemnika ELF je mogoča tudi na enosekundnih merilnih podatkih iz triosnega magnetometra fluxgate (Luo et al., 2005). Rezultate frekvenčnih analiz obeh merilnih instrumentov je mogoče med seboj primerjati le če sta oba instrumenta med seboj dobro časovno sinhronizirana (Linthe et al., 2012; White et al., 2014).

## Električni toki v notranjosti Zemlje

Spreminjajoče se geomagnetno polje inducira električne toke, ki pod površjem Zemlje tečejo v horizontalni smeri. Ti električni toki so telurski toki, ki jih merimo s pomočjo dveh nepolariziranih elektrod zakopanih v tla na stalni razdalji med 10 in 100 metri. Ker smer teh tokov ni poznana, se za njihovo meritev uporablja dodaten par nepolariziranih elektrod postavljenih pravokotno na izhodiščni dve elektrodi (Lowrie, 2007). Pomembno vlogo pri pretoku telurskih tokov imajo podzemne vode in geološka sestava tal. V literaturi je razloženih 32 različnih mehanizmov, ki povzročajo te toke (Amory–Mazaudier, 1995; Helman, 2013). Najvplivnejše so spremembe razmer v sončnem vetru v bližini Zemlje in v ionosferi ter razelektritve v atmosferi.

Električne toke, ki tečejo v notranjosti Zemlje, poznamo na osnovi teorije, ki razlaga nastanek magnetnega polja našega planeta. Irski fizik in matematik Joseph Larmor (1857–1942) je 1919 razložil nastanek magnetnega polja Sonca s principom uni–polarnega enosmernega električnega dinamika. Ta razlaga nastanka magnetizma zvezd se je iz astrofizike prenesla tudi v geofiziko za razlago magnetizma planetov. Zemlja ima lastno magnetno polje, ki se zaključuje le v njej bližnjemu vesolju zaradi vpliva sončnega vetra nanj. V tekoči sredici Zemlje se radialno širijo vzgonski toki plazme, električni toki, ki povzročajo magnetno polje. Zaradi vrtenja planeta nastajajo Coriolisovi pospeški, ki te toke plazme nesimetrično vrtinčijo. Zato se magnetno polje Zemlje ne zaključuje samo vase, temveč se širi tudi v njeno okolico. Začetni model, postavljen na osnovi teorije magnetnega dinamika, dopolnjen z nestabilnim obnašanjem zemeljskega magnetnega polja je magneto–hidrodinamični model magnetnega polja Zemlje (Dormy, 2006).



Slika 4 – EM valovi ULF izmerjeni na observatoriju 5. julija 2017 od 20:10 do 20:20 ure UTC in njihova razdelitev po skupinah cikličnih in necikličnih magnetnih impulzov.

## Zaključki

Način širjenja EM valov ULF je odvisno od stanja ionosfere in magnetosfere. Ta stanja pa so rezultat aktivnosti Sonca, usmerjenosti magnetnega polja v medplanetarnem prostoru in hitrosti ter sestave sončnega vetra v njem. Podrobnejša analiza EM valov ULF nam omogoča spremljanje vremena v vesolju (angl. space weather). Od samega stanja v ionosferi pa je odvisen način širjenja celotnega spektra radijskih valov in mikrovalov (Čop, 2016b).

Po teoriji o resonančnem pojavu Zemlje, ki jo je Winfried Schumann objavil leta 1952, lahko naš planet in njeno atmosfero obravnavamo kot radialno oblikovano školjko sestavljeno iz treh plasti: električno prevodno ionosfero in zemeljsko površje ter vmesno troposfero, najnižjo plast atmosfere, ki je električni izolator. Te tri plasti tvorijo zaključen valovod kroglaste oblike, ki sicer ni idealen zaradi nepopolne simetrije. Ta votli resonator vzbujajo atmosferske razelektritve. Po tej teoriji se sicer da razložiti sprememba resonančne frekvence s spremembo dimenzij in lastnosti votlega resonatorja, nikakor pa ne spremembe njihovih amplitud (Silber, 2015). Na osnovi meritev s sateliti je bilo

ugotovljeno, da so Schumannove resonance v povezavi s temperaturami hladne plazme v zunanjih delih magnetosfere (Nosikova et al., 2016). Izvor energije za naravne resonančne frekvence Zemlje torej niso le strele v troposferi in razelektritve v ionosferi TLE (transient luminous event), temveč tudi spremembe v zunanjih plasteh magnetosfere. Z meritvami v področju EM valov naravnega izvora frekvenc od 5 Hz do 50 Hz lahko izboljšamo razumevanje notranje zgradbe planeta na katerem živimo. Predvsem pa je to lahko vzporedna meritev za spremljanje klimatskih sprememb na Zemlji (Kruger, 2013) in vzporedna meritev povečane napetosti tektonskih plošč (Čop, 2016a; Čop, 2017b).

Opravičilo za nadaljnje raziskovalno delo na področju EM valov ELF v frekvenčnem območju od 1 mHz do 100 Hz je predvsem v nadzoru okolice v kateri živimo. Spremembe v tej okolici lahko nastajajo zaradi naravnih procesov ali pa jih povzroča civilizacija. Vpliv na človeka se je začel raziskovati v tem stoletju (Palmer et al., 2006; Deželjin & Čop, 2013) in se še nadaljuje (Belova & Acosta-Avalos, 2015; Kleimenova et al., 2008). V področju EM valov ULF in resonančnih frekvenc Zemlje so namreč tudi frekvence živčnih impulzov našega srca in možganov.

## Literatura

- Amory–Mazaudier, C. (1995). On the electric current systems in the Earth's environment some historical aspects Part I : external part / ionosphere / quiet variation. *GEOACTA*, 1–15.
- Barr, R. D. Jones, L. Rodger, C. J. (2000). ELF and VLF radio waves. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 62, 1689–1718.
- Belova, A. N. Acosta–Avalos, D. (2015). The Effect of Extremely Low Frequency Alternating Magnetic Field on the Behaviour of Animals in the Presence of the Geomagnetic Field. *Journal of Biophysics*.
- Besser, B. P. (2007). Synopsis of the historical development of Schumann resonances. *Radio Science*, 42, RS2S02.
- Currie, J. L. Waters, C. L. (2014). On the use of geomagnetic indices and ULF waves for earthquake precursor signatures. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 992–1003.
- Čop, R. (2016a). Determination of the Earth crust's tectonic stress on the basis of one–minute average data of variation of the geomagnetic field. XVII<sup>th</sup> IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data acquisition and Processing. Abstracts. Dourbes (Belgium): Royal Meteorologic Institut – RMI, September 5–10.
- Čop, R. (2016b). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (4), 197–211.
- Čop, R. (2017a). Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016. Zbornik del. 22. Srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko; Ljubljana, 26. Januarja 2017. Ljubljana: Univerza v Ljubljani; Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 69–79.
- Čop, R. (2017b). Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju. *Elektrotehniški vestnik*, 84 (4), 148–154.
- Čop, R. Deželjin, D. DeReggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K. Determination of lokal geomagnetic K–index. In Slovenian. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697–708.
- Der, L. (2001). Frequency Modulation (FM) Tutorial. Austin (TX, US): Silicon Laboratories.
- Deželjin, D. Čop, R. (2013). IT System for Alarming of Possible Health Risks Caused by Geomagnetic Storms. *Global Telemedicine and eHealth Updates: Knowledge Resorces*, 6, 512–515.
- Dormy, E. (2006). The origin of the Earth's magnetic field: fundamental or environmental research? *Europhysics News*, 2 (37), 22–25.
- Füllekrug, M. Fraser–Smith, C. A. (2011). The Earth's electromagnetic environment. *Geophysical Research Letters*, 38, L21807.



- Helman, S. D. (2013). Earth electricity: a review of mechanisms which cause telluric currents in the lithosphere. *Annals of Geophysics*, 56 (5), G0564.
- Jackson, J. D. (2007). Examples of the Zeroth Theorem of the History of Science. LBNL-63374. Berkeley (CA, US): University of California, Physics Department.
- Kangas, J. Guglielmi, A. Pokhotelov, O. (1998). Morphology and physics of shortperiod magnetic pulsations (A Review). *Space Science Reviews*, 83: 435–512.
- Kleimenova, N. G. Kozyreva, O. V. Breus, T. K. Rapoport, S. I. (2008). Seasonal Variation of Magnetic Storm Influence on Myocardial Infarctions. Apatity (Russia): Russian Academy of Science; Polar Geophysical Institute; Kola Science Centre; Physics of Auroral Phenomena, Proceedings of XXXI Annual Seminar, 203–205.
- Kruger, A. (2013). Construction and Deployment of an ULF Receiver for the Study of Schumann Resonance in Iowa. Ames (IA, US): Iowa State University; Iowa Space Grant Consortium.
- Kumar, P. Fofoula-Georgiou, E. (1997). Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics*, 35 (4), 385–412.
- Linthe, H. J. Reda, J. Isac, A. Matzka, J. Turbitt, C. (2012). Observatory Data Quality Control – The Instrument to Ensure Valuable Research. XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments and Data Processing, Cadiz, Spain, 4–14 June. Proceedings, 173–177.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Second edition. Cambridge: Cambridge University.
- Luo, F. L. Ye, H. Rashid, M. (2005). *Digital Power Electronics and Applications*. London (UK): Elsevier.
- McPherron, L. R. (2005). Magnetic Pulsations: Their Sources and Relation to Solar Wind and Geomagnetic Activity. *Surveys in Geophysics*, 26, 545–592.
- Nosikova, N. S., Yagova, N. V. Pilipenko, V. A., Heilig, B. Schekotov, A. Y. (2016). Electromagnetic Disturbances in the Frequency Range 5–20 Hz in the Upper Ionosphere and on the Ground. Atmosphere, ionosphere, safety. Editor I. V. Karpov. Proceedings of V International conference, Kaliningrad 2016. Kaliningrad (Russia): Immanuel Kant Baltic Federal University.
- Palmer, S. Rycroft, M. Cermack, M. (2006). Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. *Surveys in Geophysics*, 27 (5), 557–595.
- Pande, S. Singh, S. (2017). Operation of Induction Motor with Different Modulation Index. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4 (4), 2002–2006.
- Pilipenko, V. A. Kozyreva, O. V. Engebretson, M. J. Soloviev, A. A. (2017). ULF wave power index for space weather and geophysical applications: A review. *Russian Journal of Earth Sciences*, 17, ES2002.
- Rahaman, F. (2014). *The Special Theory of Relativity; A Mathematical Approach*. Chapter 2: Michelson–Morley Experiment and Velocity of Light. Springer India.
- Recommendation ITU-R V.431-7 (08/20145); Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications. (2015). *Geneva (CH)*: International Telecommunication Union; Radio–communication Sector.
- Rycroft, M. J. (1965). Resonances of the Earth–Ionosphere Cavity Observed at Cambridge, England. *Radio Science Journal of Research*, 69D (8).
- Schlegel, K. Füllekrug, M. (2002). 50 Years of Schumann Resonance. Translation: Catarina Goghan, 2007. *Physik in unserer Zeit*, 33 (6), 256–26.
- Spectrum Analysis Amplitude and Frequency Modulation. (2001). Application Note 150–1. Santa Clara (CA, US): Agilent Technologies.
- Silber, I. Price, C. Galanti, E. Shuval, A. (2015). Anomalously strong vertical magnetic fields from distant ELF/VLF sources. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120.
- Singh, K. A. Mishra, S. Singh, R. (2013). ULF wave index as magnetospheric and space–weather parameters. *Advances in Space Research*, 52 (8), 1427–1436.
- Torrence, C. Compo, P. G. (1998). A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79 (1), 61–78.
- Woodroffe, J. R. (2010). Ultra–low frequency waves, magnetic pulsations, and the ionospheric Alfvén resonator. Dissertation. University of Minnesota; Faculty of the Graduate School.



- White, C. T. Sauter, A. E. Stewart, C. D. (2014). Discovery and Analysis of Time Delay Sources in the USGS Personal Computer Data Collection Platform (PCDCP) System. Scientific Investigations Report 2014-5045. Reston (VA, US): U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey.
- Xu, Z. Gannon, J.L. Rigler, E.J. (2013). Report of Geomagnetic Pulsation Indices for Space Weather Applications. Open-File Report 2013-1166. Reston (Virginia, US): U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey.