

Vpliv telurskih tokov na meritve lokalnega magnetnega polja

Rudi Čop¹

Povzetek

Stalne meritve spremembe geomagnetnega polja se opravljajo na geomagnetnih observatorijih. Za njihovo uspešno delovanje je potrebno upoštevati posebnosti mesta njihove postavitve in posebnosti okolice. Pri postavitvi geomagnetnega observatorija v Slovenski Istri je bilo med drugim potrebno upoštevati, da je to območje močno obremenjeno z atmosferskimi razelektritvami. Na magnetometre strele nimajo le električnega vpliva temveč tudi posredno termičnega in mehanskega. Strele vplivajo na delovanje magnetometrov tudi posredno preko podzemnih električnih tokov, telurskih tokov. Ti lokalni toki so del globalnega električnega tokokroga GEC (angl. global electric circuit), katerega osnovni generatorji so električne strele. Električni tok v tem tokokrogu pogojujejo tudi geomagnetne razmere v polarnem krogu, ki jih narekuje vreme v vesolju (angl. space weather).

Ključne besede: magnetometri, telurski toki, razelektritve v atmosferi, magnetni tornadi v polarnem območju

Abstract

The influence of telluric currents on the measurement of the local magnetic field

Continuous measurements of changes in the geomagnetic field are carried out at geomagnetic observatories. For their successful operation, it is necessary to take into account the specifics of the installation site and the surrounding area. When setting up a geomagnetic observatory in Slovenian Istria, it was necessary to take into account, among other things, that this area is heavily overloaded by atmospheric discharges. Lightning has not only an electrical effect on magnetometers, but also an indirect thermal and mechanical effect. Lightning also affects the operation of magnetometers indirectly through underground electric currents, telluric currents. These local currents are part of the global electric circuit (GEC), the basic generators of which are electric lightning. The electric current in this circuit is also conditioned by geomagnetic conditions in the polar circle, which are dictated by space weather.

Keywords: magnetometers, telluric currents, atmospheric discharges, magnetic tornadoes in the polar caps

Magnetno polje

Magnetno poje je prostor, v katerem deluje magnetna sila F_m . V merskem sistemu SI (fr. *Système international d'unités*, angl. *International System of Units*) je ta sila merjena v enotah newton [$N = kg \cdot m/s^2$]. Magnetna sila deluje v magnetnem polju brez posrednika in takoj, ko je v njem vzpostavljen njen izvor (Morrish, 2001). Ustreza Coulombovemu zakonu, ki ga v simbolični obliki lahko zapišemo z enačbo (1). Enačba je postavljena na osnovi posameznega elektrostaticnega poizkusa in idealizirana. V izhodišču opisuje medsebojno delovanje dveh točkastih električnih nabojev, ki sta na natančno določeni medsebojni razdalji. Enačba (1) torej velja za vse poenostavljene primere in ob sprejetih predpostavkah (Spavieri et al, 2004).

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovelje. Email: rudi@artal.si

$$F_m \propto \frac{1}{r^{2 \pm \epsilon}} \quad (1)$$

V enačbi (1) je r razdalja od izvora polja sile in ϵ odstopanje od vrednosti 2. S to enačbo se opisujejo tudi sile v gravitacijskem in v magnetnem polju. Kot izvora gravitacijskega in elektrostaticnega polja sta prepoznana masa in električni naboj v monopolni obliki. Magnetno polje pa se oblikuje le ob premikanju električnega naboja oziroma ob prisotnosti magnetnega dipola. Primer magnetnega dipola je paličasti permanentni magnet. V poenostavljenih primerih in ob magnetnem dipolu kot izvoru magnetne sile F_m je ta obratno proporcionalna vrednosti r^3 .

Kot vse planete našega osončja, ki imajo tekočo sredico, tudi Zemljo ovija magnetno polje. Obstoj tega polja lahko ugotavljamo s kompasno iglo, ki se monotono obrača proti severnemu magnetnemu polu Zemlje. Podrobneje pa se s tem poljem ukvarja geofizika, področje znanosti, ki planet Zemlja proučuje s pomočjo fizikalnih principov. Geomagnetno polje je rezultat medsebojnega delovanja različnih izvorov:

- glavno magnetno polje, ki izvira iz sredine Zemlje;
- magnetno polje skorje Zemlje, ki ga ustvarjajo namagnetene kamnine v njej;
- zunanje magnetno polje, ki ga ustvarjajo električni tokovi v ionosferi kot rezultat medsebojnega delovanja sončevega vetra in magnetosfere;
- magnetno polje, ki ga ustvarjajo električni toki v skorji Zemlje in v zgornji plasti njenega plašča.

Magnetno polje Zemlje se spreminja tako po kraju kot tudi po času (Lanza & Meloni, 2006). Okoli 95% tega polja, izmerjenega na površini Zemlje, izhaja iz njene notranjosti. Na globini 2890 km se začne zunanje jedro našega planeta. Njegova gostota je tolikšna, da je najverjetneje njegova glavna sestavina železo. Pri pritisku, ki vlada v zunanjem delu jedra, ima kovinska zlitina viskoznost vode. Njeno konvekcijsko pretakanje povzroča toplota iz trdega notranjega jedra. To pretakanje je pod vplivom nehomogene strukture tako notranjega jedra kot tudi plašča nad zunanjim jedrom. Skupaj z rotacijo celotnega planeta in z diferencialno rotacijo notranjega jedra so podani vsi pogoji za nastanek in vzdrževanje geomagnetnega polja. Teorija o magnetnem polju Zemlje izhaja iz razlage nastanka magnetnega polja Sonca (Larmor, 1919). Izhodišče je enopolni električni dinamo, ki se z ustreznimi dopolnitvami uporablja tudi za teoretično razlago delovanja in za modeliranje geomagnetnega dinamika (Jones, 2011).

Gostota energije v elektromagnetnem polju merjena na površini Zemlje w [J/m^3] je približno obratno proporcionalna frekvenci f [Hz] tega polja, kar opisuje tudi enačba (2) (Füllekrug & Fraser-Smith, 2011). V frekvenčnem območju od 10^{-9} Hz do 10^7 Hz odstopa zakon $w = k/f^2$ od dejanskih merilnih vrednosti pri posamezni frekvenci za največ ± 2 eksponentni stopnji.

$$w(f) \propto \frac{1}{f^{2 \pm \epsilon}} \quad (2)$$

Glavni izvor gostote energije elektromagnetnega polja pri frekvencah pod $f < 1$ Hz je magnetno polje z izvorom v središču Zemlje, pri katerem prevladuje magnetna komponenta tega polja. Pri frekvencah $f > 1$ Hz so glavni izvori različne oblike razelektritev v atmosferi, pri katerih prevladuje električna komponenta. Izvori v razponu preko 16 eksponentnih stopenj glede na njihovo frekvenco so naključni in se s časom stalno spreminjajo. Pojav je sicer podoben Brownovemu gibanju, vendar v naravi ni poznan podoben pojav, ki bi imel enake lastnosti, kot jih ima razporeditev gostote energije

elektromagnetnega polja, merjene na površini Zemlje glede na frekvenco in v odvisnosti od časa, kraja in izvora.

Geomagnetni observatorij

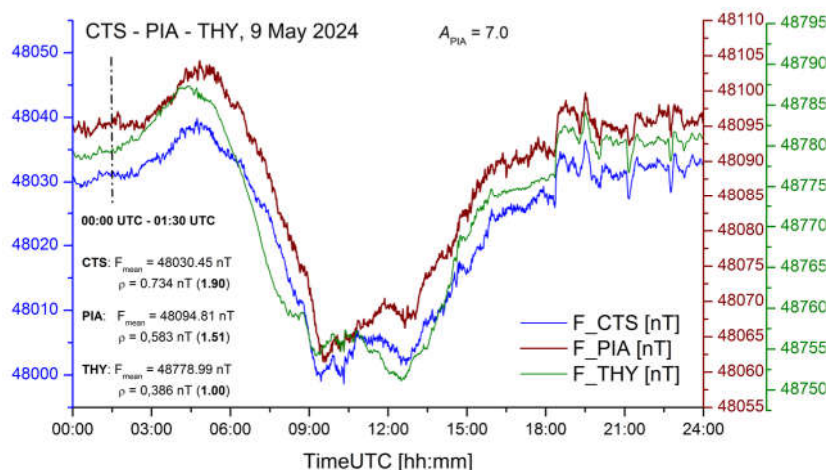
Slovenija v celoti leži na severozahodnem delu Jadranske tektonske mikroplošče, ki je v središču jugovzhodne Evrope (Slika 1). Na njenem ozemlju obstaja preko sto tektonskih prelomov, narivov in večjih razpok (Placer, 2008; Gosar, 2020). Glede na sosednjo Evrazijo je na ozemlju Slovenije povečan šum v lokalnem magnetnem polju. V zadnjih desetih letih na jugozahodnem delu Slovenije redno obratuje geomagnetni observatorij PIA (Piran, Slovenia). Ta observatorij je vključen v INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network), mednarodno informacijsko mrežo za izmenjavo merilnih podatkov o stanju lokalnih magnetnih polj v skoraj realnem času. Zato smo lahko magnetograme iz observatorija PIA primerjali z magnetogrami vseh tistih observatorijev iz vsega sveta, ki so vključeni v to informacijsko mrežo (BGS, 2025). Ker nismo našli nobenega primerljivega, smo primerjavo nadaljevali z magnetogrami geomagnetnih observatorijev nacionalnega pomena v neposredni sosesčini Slovenije.



Slika 1: Osrednji del Jadranske tektonske mikroplošče z vrisanim ozemljem Slovenije in z okoliškimi geomagnetnimi observatoriji vključenimi v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET: LON (Lonjsko polje, Croatia), THY (Tihany, Hungary), HRB (Hurbanovo, Slovakia), NCK (Nagycenk, Hungary), WIC (Conrad Observatory, Austria), FUR (Furstenfeldbruck, Germany), BFO (Black Forest, Germany), AQU (L'Aquila, Italiy), DUR (Duronio, Italy) (INTERMAGNET, 2025).

Po nivoju šuma so rezultati meritev na observatoriju PIA primerljivi z meritvami na observatoriju CTS (Castello Tisino, Italy), ki je geomagnetni observatorij nacionalnega pomena (Real-Time, 2025). Kot izhodišče za primerjavo smo izbrali observatorij THY (Tihany, Hungary), ker je ta najbližji mejam Slovenije in tudi najstarejši v njeni bližnji okolici (Csontos et al., 2007). V mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET je observatorij THY vključen v skupino IMO (INTERMAGNET Magnetic Observatory).

Šum v lokalnem magnetnem polju na ozemlju Slovenije se povečuje od vzhoda proti zahodu, od meje z Madžarsko proti observatoriju CTS. Od vzhodne meje tega ozemlja pa do njegove sredine se poveča za 51% in do geomagnetnega observatorija CTS še za nadaljnjih 39% (Slika 2). Prav tako ta šum narašča od obal Jadranskega morja proti severu. Od observatorija PIA do observatorija SNV (Sinji vrh, Slovenia) se poveča za 20% (Čop et al., 2021). Povečan šum v lokalnem magnetnem polju na Jadranski tektonski mikroplošči ima svoje izvore. Do sedaj smo odkrili naslednje izvore tega šuma: prehod nevihtnih front MCS (Mesoscale Convective System) (Čop, 2015), Luna (Kuhar et al, 2020) in napetost v Jadranski tektonski mikroplošči (Pavlovčič-Prešeren et al, 2020). Geomagnetno polje prodira skozi vse plasti plašča in skorje Zemlje in s seboj prinaša informacije o spremembah v gibanju konvekcijskih tokov v notranjosti našega planeta ter s tem tudi o spremembah napetosti tektonskih plošč. Je izrazit geofluid, kot so tudi podzemne in geotermalne vode, slanice (angl. basinal brines) in nafta.

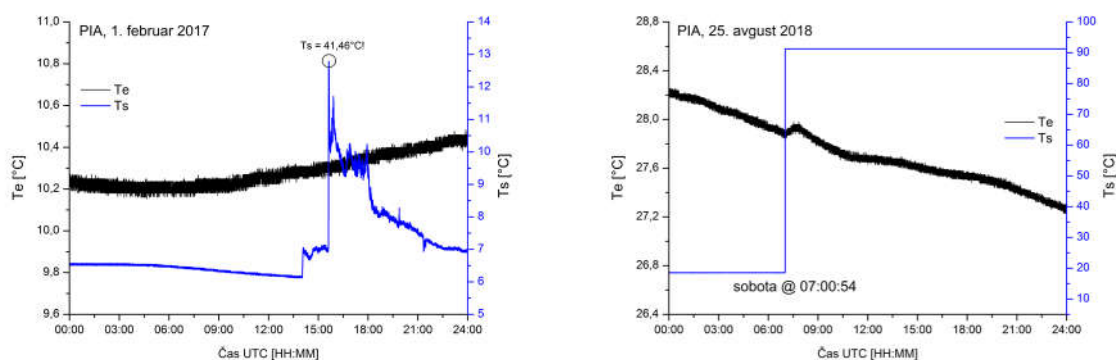


Slika 2: Na ozemlju Slovenije se nivo šuma v lokalnem magnetnem polju povečuje od vzhoda proti zahodu.

Gradnja observatorija PIA je bila prilagojena razmeram na jugozahodnem delu Slovenije kjer ta observatorij tudi stoji. To področje spada med tiste dele Evrope, kjer je letna gostota strel na kvadratni kilometer med najvišjimi. Zato je bila zelo pozorno urejena zaščita merilne opreme pred prenapetostmi (Čop et al, 2014). Zaradi temperaturne stabilizacije in večje zaščite pred gozdnimi požari, poplavami površinskih vod in vandalizmom so magnetometri za zvezne meritve sprememb lokalnega magnetnega polja nameščeni v podzemne jaške. Zaradi lokacije observatorija na robu kmetijskih zemljišč in precej stran od naselij je bilo potrebno uspešno rešiti tudi prenos merilnih podatkov preko omrežja mobilne telefonije (Čop, 2016). To omrežje omogoča tako dostop do interneta kot tudi galvansko ločitev observatorija od celotnega komunikacijskega sistema.

Za zvezno merjenje sprememb magnetnega polja na geomagnetnih observatorijih se uporabljajo protonski magnetometri in magnetometri, ki merijo spremembe treh med seboj neodvisnih komponent lokalnega magnetnega polja. Protonske magnetometre, ki merijo skalarno vrednost vektorja gostote magnetnega polja S [nT], smo uporabili tudi pri začetnih meritvah lastnosti magnetnega polja na ozemlju Slovenije (Čop & Kosovac, 2010). Triosni magnetometri fluxgate so na observatoriju najobčutljivejši instrumenti.

Zanje je potrebno zagotoviti zelo majhno nihanje temperature, ki preko celega dneva ne sme preseči 1°C. Zahtevajo tudi redno spremljanje delovanja in redno vzdrževanje. Z njimi se zvezno merijo spremembe magnetnega polja, so variometri. Prav zaradi njih je vzdrževanje geomagnetnega observatorija v Slovenski Istri zelo zahtevno. Zaradi potresno aktivnega področja je uporabna le konstrukcija variometrov pri katerih senzor ni obešen (Čop et al., 2021). Udari strel variometre ogrožajo zaradi prenapetosti in posredno zaradi termičnih in mehanskih vplivov. Najmanjša škoda nastane v primeru, ko je poškodovan samo senzor za temperaturo T_s [°C] triosnega senzorja. V primeru, ko pride do popolnega uničenja senzorja za temperaturo T_s pa je običajno prizadeta tudi celotna konstrukcija senzorja. Zato mora biti triosni magnetometer fluxgate ustrezne mehanske konstrukcije za pogoje v katerih deluje observatorij PIA. Na njegovo delovanje v veliki meri vplivajo lokalni podzemni električni toki (telurski toki) (Slika 3), ki so del globalnega električnega tokokroga GEC (Global electric circuit).



Slika 3: Vplivi telurskih tokov na meritev temperature elektronike T_e [°C] in na meritev temperature T_s [°C] senzorja neodvisnih komponent magnetnega polja: nepravilna meritev T_s , ki se je po 14 dneh ponovno popravila (levo) in popolno uničenje tipala za T_s (desno).

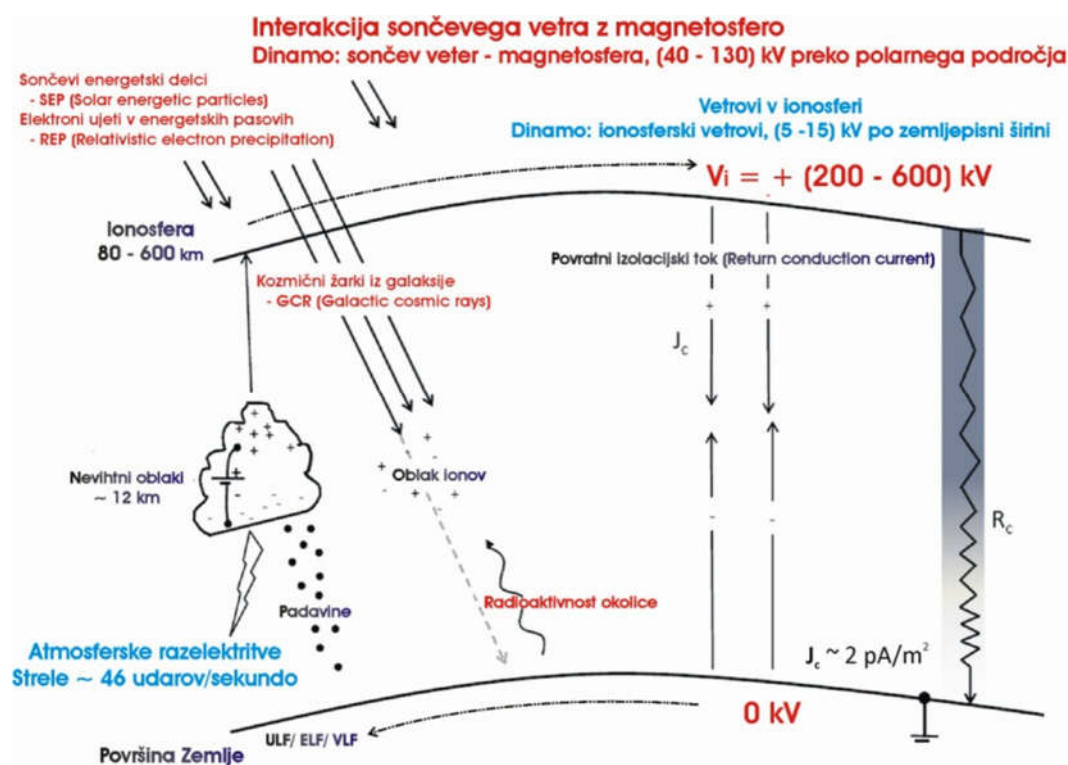
Globalni električni tokokrog

Globalni električni tokokrog GEC (Global Electric Circuit) poteka skozi atmosfero do površine Zemlje. Ta tokokrog se nadaljuje skozi skorjo in zgornje plasti plašča Zemlje ter se zaključuje skozi spodnje plasti njene ionosfere. V začetku preteklega stoletja je že bilo znano, da v atmosferi obstaja pozitivna naelektrenost, da je zrak ioniziran in da slabo prevaja električni tok. Ker sta tako površina Zemlje kot tudi ionosfera dobra električna prevodnika, o velikosti električnega toka v globalnem električnem tokokrogu odloča električna prevodnost atmosfere. Ta se povečuje od površine Zemlje do višine okoli 50 km, kjer se začneja ionosfera. Glavni izvor ionov v atmosferi nad oceani so kozmični žarki (Shao et al., 2025; Tacza et al., 2024), nad kontinenti pa tudi naravna radioaktivnost tal, ki se zaznavno poveča v območju aktivnih tektonski prelomnic (Pulinets, 2009). V atmosferi ustvarjeni ioni predstavljajo njeno naelektrenost in omogočajo vertikalne električne toke. Na osnovi električnih meritev atmosfere, ki so bile narejene v zadnjih dveh stoletjih, se spremembe v globalnem električnem tokokrogu odražajo na več različnih sicer neodvisno obravnavanih geofizikalnih področjih.

Med letom 1905 in 1908 so bile na Tihem oceanu narejene začetne raziskave z leseno jadrnico Galilee, ki je bila predelana v geomagnetni observatorij. Merili so tudi

naelektrenost atmosfere v času lepega vremena (angl. Carnegie curve) (Harrison, 2004; Aplin et al, 2008). Večino Zemlje prekrivajo oceani, zato je bilo najprej prevzeto, da je električna prevodnost njene površine enaka prevodnosti slane vode. Pri raziskavah geomagnetizma v začetku preteklega stoletja pa je bilo ugotovljeno, da je električna prevodnost vlažne zemlje dober približek električni prevodnosti celotnega planeta (Chapman, 1919).

Naelektrenost atmosfere v času lepega vremena je raziskoval tudi C.T.R. Wilson. Izvor električnega polja v atmosferi je videl v pretoku vertikalnih električnih tokov skozi električno slabo prevodno atmosfero. Opisal je senzor za merjenje teh tokov in s tem povezanim električnim poljem. V dvajsetih letih preteklega stoletja je v svojih člankih predstavil svojo teorijo o globalnem električnem tokokrogu (Wilson, 1921). Nastanek električnega polja je pripisal strelam v troposferi, najnižji plasti atmosfere. Te strele, ki nastajajo predvsem v ekvatorialnem pa tudi v srednjem širinskem pasu, dovajajo ionosferi pozitivne naboje, površini Zemlje pa negativne naboje (Slika 4). Ob lepem vremenu je v tem tokokrogu napetost med površino Zemlje in ionosfero okoli 250 kV in vertikalni električni tok okoli 2 pA/m² (Liu et al., 2010; Mach et al., 2011).



Slika 4: Globalni električni tokokrog GEC (Global Electric Circuit) (Aplin et al., 2008).

Prevodnost ionosfere je odvisna od fizikalnih procesov v njej, ki so odvisni od lokalnega časa, geografske širine, letnega časa, od sončevega cikla in od stoletnega cikla (RTO, 2009). Ta prevodnost je odvisna od opazovane smeri v ionosferi (anizotropija). Gibanje elektronov je namreč vezano na magnetne silnice, gibanje pozitivnih ionov pa na premikanje električno nevtralnega plina v ionosferi. Električni toki v ionosferi v polarnem krogu, ki tečejo vzdolž magnetnih silnic, so Birkelandovi toki (angl. Birkeland current). Ti toki, imenovani tudi toki FAC (field-aligned currents), povezujejo magnetosfero z ionosfero v območju magnetnih polov Zemlje. Elektroni, ki vletavajo v ionosfero, povzročajo električne toke FAC, ki tečejo iz ionosfere v magnetosfero. Ob povečani

aktivnosti v magnetosferi se povečajo tudi ti toki, ki pri tem povzročajo polarni sij. Poleg Birkelandovih tokov v ionosferi okoli magnetnih polov Zemlje tečejo vzporedno z električnim poljem Pedersenovi toki (angl. Pedersen currents), ki dodatno segrevajo ionosfero. Hallovi toki (angl. Hall currents) pa tečejo pravokotno na električno polje in so odvisni od jakosti geomagnetnega polja.

V zadnjih desetih letih potekajo pospešene raziskave razmer v polarnem krogu. V ta namen se uporabljajo permanentne postaje GNSS (Global Navigation Satellite System) na Grenlandiji za merjenje scintilacije v ionosferi, flota telekomunikacijskih satelitov Iridium, ki so opremljeni tudi z magnetometri, in flota treh raziskovalnih satelitov Swarm, ki so opremljeni tako z magnetometri kot tudi z merilci električnega polja. Ob povečani geomagnetni aktivnosti nastajajo v polarnem področju magnetni tornadi, ob katerih Birkelandovi toki vnašajo v zgornje plasti atmosfere električno moč ocenjeno na ~ 1 TW (Lu et al., 2025; ESA, 2025).

Zaključek

Osnovni zakon o lastnostih gravitacijskega, elektrostatičnega in magnetnega polja je bil postavljen koncem 18. stoletja, zakon o gostoti energije elektromagnetnega polja na površini Zemlje pa je bil postavljen na osnovi meritev, ki so bile opravljene v drugi polovici 20. stoletja. Oba zakona veljata z ustreznimi omejitvami za vse z zakonom obravnavane primere. Postavljena sta bila na induktivni način na osnovi velikega števila meritev. Ostaja pa nepojasnen mehanizem, ki omejuje gostoto energije elektromagnetnega polja na površini Zemlje na ugotovljenem nivoju $w(f) = k/f^2$. Prav tako še niso dokazane vse trditve glede vpliva telurskih tokov na stabilizacijo tektonskih plošč tako v lokalnih razmerah kot na globalni ravni. Telurski toki so namreč del globalnega električnega tokokroga. Tako sprememba gostote energije kot tudi spremembe v jakosti telurskih tokov vplivajo na biosfero in s tem tudi na nas in na našo civilizacijo. Njihove spremembe pa se odražajo tudi v spremembi lokalnega magnetnega polja.

Slovenija v celoti leži na Jadranski tektonski mikroplošči, ki je izjemni naravni geofizikalni laboratorij. Z meritvijo sprememb lokalnega magnetnega polja na njenem ozemlju in z vključitvijo geomagnetnega observatorija PIA v mednarodni informacijski sistem je omogočeno dolgoročno zbiranje merilnih podatkov. Na geomagnetnem observatoriju merimo elektromagnetno polje s frekvenco $f \leq 1$ Hz pri katerem je električna komponenta zanemarljivo majhna. Z analizo merilnih podatkov iz takega observatorija se pridobivajo nova spoznanja, ki so tudi praktično uporabna za razumevanje našega obstoja in boljšo organizacijo našega življenja.

Literatura

- Aplin, K. L. Harrison, R. G. Rycroft, M. J. (2008). Investigating Earth's atmospheric electricity: a role model for planetary studies. *Space Science Reviews*, 137, 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9372-x>.
- BGS. (2025). INTERMAGNET - British Geological Survey. INTERMAGNET Data Viewer. Edinburgh (United Kingdom): Geomagnetism. https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2 (21.10.2025)
- Chapman, S. (1919). 1. The Solar and Lunar Diurnal Variation of the Earth's Magnetism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A*, 218, 1–118.

- Csontos, A. Hegymegi, L. Heilig, B. Kovács, P. Merényi, L. Szabó, Z. (2007). 50 Years of History of the Tihany Geophysical Observatory. Publication of the Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences, C-99 (398), 32–37.
- Čop, R. (2015). Snowstorm at the geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 4, 1–5.
- Čop, R. (2016). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (2), 197–211.
- Čop, R. Kosovac, P. (2010). Primerjalne meritve Overhouserjevega protonskega gradiometra. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2009. Urednik Miran Kuhar. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 23–30.
- Čop, R. Milev, G. Deželjin, D. Kosmac, J. (2014). Protection against lightning at a geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation Methodes and Data Systems*, 3, 135–141.
- Čop, R. Rasson, L. J. Bilc, A. (2021). Accelerations in the Local Magnetic Field on the Adriatic Tectonic Microplate. *Open Journal of Earthquake Research*, 10, 95–104.
- ESA. (2025). Birkeland currents. European Space Agency – ESA, 23/03/2017. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/03/Birkeland_currents (28.11.2025)
- Gosar, A. (2020). Measurements of tectonic micro-displacements within the Idrija fault zone in the Učja valley (W Slovenia). *Acta geographica Slovenica*, 60 (1), 79–94.
- Füllekrug, M. Fraser-Smith, C. A. (2011). The Earth's electromagnetic environment. *Geophysical Research Letters*, 38, L21807.
- Harrison, R. G. (2004). The global atmospheric electrical circuit and climate. *Surveys in Geophysics*, 25 (5-6), 441–484.
- INTERMAGNET. (2025). Map of Observatories. World-wide consortium of institutes operating ground-based magnetometers. <https://intermagnet.org/metadata/#/map> .(19.8. 2025)
- Jones, A. C. (2011). Planetary Magnetic Fields and Fluid Dynamos. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 43, 583–614.
- Kuhar, M. Čop, R. Pavlovčič Prešeren, P. (2020). Določitev vpliva Lune na geomagnetni šum. The influence of the Moon on geomagnetic noise. In Slovenian. *Geodetski vestnik*, 64 (2), 303–319.
- Lanza, R. Meloni, A. (2006). *The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists*. Berlin (Germany): Springer.
- Larmor, J. (1919). How could a Rotating Body such as the Sun become a Magnet? Report of the British Association for the Advancement of Science, 159–160.
- Liu, C. Williams, R. E. Zipser, J. E. Burns, G. (2010). Diurnal Variations of Global Thunderstorms and Electrified Shower Clouds and Their Contribution to the Global Electrical Circuit. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 309–323.
- Lu, S. Xing, Z-Y. Zhang, Q-H. Zhang, Y-L. Yang, H-G. Oksavik, K. Lyons, L. R. Shiokawa, K. Wang, Y. Ma, Y-Z. Wang, X-Y. Xu, T. Zhang, S-J. zhang, D. (2025). Ionospheric Scintillation and Geomagnetic Disturbance Caused by Space Hurricanes. *Space Weather*, 23 (7), e2025SW004435.
- Mach, D. M. W. Blakeslee, J. R. Bateman, G. M. (2011). Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics. *Journal of Geophysical Research*, 116, D05201.
- Morrish, H. A. (2001). *The Physical Principles of Magnetism*. New York (YN, US): Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, 2001.
- 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 – OJER*, 9 (2).
- Placer, L. (2008). Principles of tectonic subdivision of Slovenia. *Geologija*, 51 (2), 205-217.
- Pulinets, S. A. (2009). Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults. *Advances in Space Research*, 44, 767–773.
- Real-Time Data Environment. (2025). Geomagnetic observations. Castello Tesino. Rome (Italy): Istituto nazionale di Geofisica e Vulcanologia – INGV. <https://www.ingv.it/en/ambiente-in-tempo-reale> (20.10. 2025)

- RTO. (2009). Characterising the Ionosphere. RTO Technical Report: TR-IST-051. North Atlantic Treaty Organisation – NATO; Research And Technology Organisation – RTO.
- Shao, X-M. Jensen, P. D. Ho, C. Caffrey, P. M. Raby, Y. E. Graham, S. P. Brian, W. Blaine, G. W. (2025). 3D radio frequency mapping and polarization observations show lightning flashes were ignited by cosmic-ray showers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130, e2024JD042549.
- Spavieri, G. Gillies, G. T. Rodriguez, M. (2004). Physical implications of Coulomb's Law. *Metrologia*, 41 (5), S159–S170.
- Tacza, J. Li, G. Raulin, J.-P. (2024). Effects of Forbush Decreases on the global electric circuit. *Space Weather*, 22, e2023SW003852.
- Wilson, C. T. R. (1921). III. Investigations on lightning discharges and on the electric field of the earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, A221 (582-593), 73-115.