

Oddaljenost izvorov pospeškov v lokalnem magnetnem polju

Rudi Čop¹, Simon Pavlin², Vlado Rosa¹

Povzetek

Slovenija v celoti leži na Jadranski tektonski mikroplošči. Sproščanje velikih napetosti v tej plošči povzroča spremembo gostote energije v lokalnem magnetnem polju merjenem na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia) (v nadaljevanju: observatorij). Primerjava rezultatov teh meritev v letu 2021 s seizmološkimi in vulkanološkimi meritvami kažejo, da je vzrok za pospeške v geomagnetnem polju, določenih na osnovi srednjih dnevni vrednosti, povečana aktivnost vulkanov na koncu Apeninskega polotoka.

Ključne besede: lokalno magnetno polje, pospeški, delovanje vulkanov

Keywords: local magnetic field, accelerations, activity of volcanoes

Magnetno polje Zemlje

Notranjost Zemlje je praktično nemogoče neposredno raziskovati in meriti. S pomočjo akustičnih valov, ki nastajajo ob močnih potresih, so seizmologi posredno določili sestavo našega planeta. V grobem ga sestavljajo notranje in zunanje jedro, plašči in skorja. Te plasti imajo med seboj zelo različne kemične in fizikalne lastnosti. Debelina zunanje skorje je 6 kilometrov pod oceani pa do 30–50 kilometrov pod kontinenti. Skorja skupaj s hladno plastjo na vrhu zunanjega plašča tvori litosfero. Litosfera je razlomljena na tektonske plošče, ki drsijo neodvisno ena od druge (Constable, 2007; Olsen et al, 2015).

Iz notranjosti Zemlje izhaja 99% vsega magnetnega polja merjenega na njeni površini. Nastanek tega polja pripisujemo električnim tokom, ki tečejo v zelo prevodni železovi zlitini zunanjega jedra z ekstremno majhno viskoznostjo. V tem delu jedra se oblikujejo konvekcijski tokovi zaradi toplote, ki nastaja v trdnem notranjem jedru. To pretakanje je pod vplivom nehomogene strukture tako notranjega jedra kot tudi plašča nad zunanjim jedrom. Skupaj z rotacijo celotnega planeta in diferencialno rotacijo notranjega jedra so podani vsi pogoji za nastanek in vzdrževanje geomagnetnega polja (Lay, 2002).

Za teoretično razlago nastanka magnetnega polja Zemlje se je uveljavila ustrezno dopolnjena teorija, ki razlaga nastanek magnetnega polja Sonca (Roberts & King, 2013; Hulot et al, 2010). Razlago, da je lahko vzrok za nastanek magnetnega polja na Soncu proces enak samovzbudnemu unipolarnemu dinamju, ja 1919 podal Joseph Larmor (Larmor, 1919). Izhodišče je vektorska enačba za magnetno silo F_{mag} (Lorentz-ova sila, angl. Ampère's force law), ki deluje na vodnik dolžine l v magnetnem polju B , po katerem teče električni tok I_{el} (1).

$$\vec{F}_{mag} = l \cdot \vec{I}_{el} \times \vec{B} \quad (1)$$

Osnova teorije geomagnetnega dinamja je gibanje električno prevodne tekočine zaradi konvekcijskih tokov, ki so zaradi vrtenja nesimetrični. Njihovo gibanje ustvarja električne toke, ki vzdržujejo magnetno polje. Ta model se je postopoma dopolnjeval in se razvil v

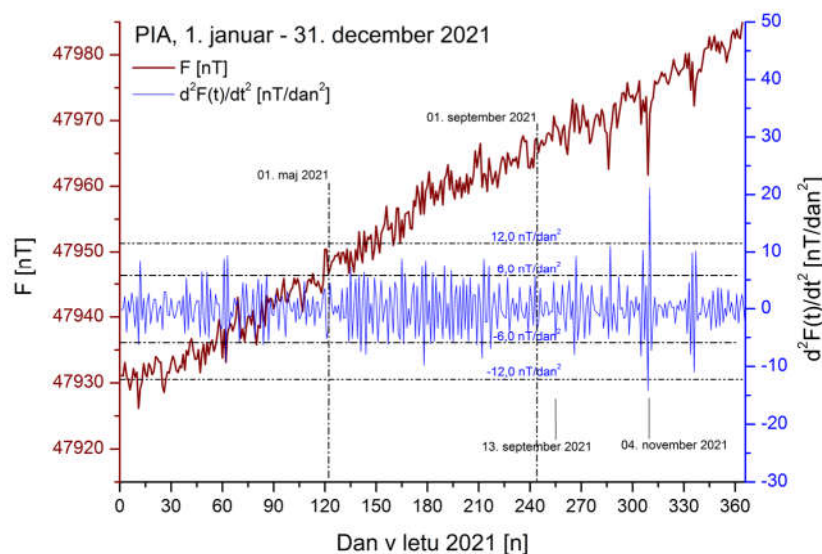
¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje

² Iskratel, d.o.o. Ljubljanska cesta 24a. 4000 Kranj

magneto–hidrodinamični model magnetnega polja Zemlje (MHD model), ki pa se še vedno dopolnjuje (Tobias, 2002).

Geomagnetni impulzi

Matematični modeli spremembe magnetnega polja Zemlje na njeni površini se naslanjajo na sekularne spremembe magnetnega polja. To so spremembe komponent geomagnetnega polja v daljših časovnih obdobjih, ki so precej konstantne in zato napovedljive. Obdobja sekularnih sprememb med seboj povezujejo geomagnetni impulzi, ki pa se jih ne da napovedati. V grafu sekularne spremembe geomagnetnega polja, podanih v mesečnih ali letnih srednjih vrednostih, te impulze prepoznamo kot nenadne spremembe v obliki črke V (angl. geomagnetic jerks) (Pinheiro & Travassos, 2010). Prvič so bili opisani v sedemdesetih letih preteklega stoletja (Courtilot & Le Mouél, 1976). Nekateri od teh impulzov se pojavljajo le na omejeni površini zemeljske skorje, kot so na primer posamezni kontinenti ali le njihovi deli, in se pojavljajo na vsakih toliko mesecev ali let. So pa tudi taki, ki se jih zazna vsepovsod na zemeljski obli in se dogajajo v povprečju na vsakih deset let.



Slika 1 – Dnevne spremembe gostote magnetnega polja F [nT] v letu 2021, merjene na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenija), in pospeški v tem polju d^2F/dt^2 [nT/dan²].

Za geomagnetne impulze je kot mesto njihovih izvorov prepoznana notranjost Zemlje (De Michelis et al, 2005). Zadnje teoretične raziskave kažejo, da so posledica nepravilnosti v pretakanju tekoče sredice Zemlje (Le Huy et al, 2000; Ballani et al, 2010). V njenem zunanem jedru nastajajo hidrodinamični valovi v obliki torzijskih oscilacij. Povzročajo jih mehurji, ki počasi potujejo proti zunanemu robu področja s konvekcijskimi tokovi in pri tem motijo njihov normalni pretok (Aubert & Finlay, 2019). Posledice tega neenakomernega pretakanja v zunanem jedru so različni geofizikalni pojavi: a) majhna odstopanja rotacijske osi Zemlje glede na njeno kopno površino (premik zemljepisne širine, Chandlerjevo kolebanje, angl. Chandler wobble) in b) sprememba njene hitrosti vrtenja in s tem povezana sprememba dolžine dneva in klime (Meloni et al, 2007).

Geomagnetni impulzi so nenadne spremembe, ki se prepoznajo v vrednosti najmanj prvega odvoda po času v spremembi magnetnega polja Zemlje (Gavoret et al, 1986). Vsako od komponent magnetnega polja Zemlje se namreč lahko opiše s polinomom druge stopnje (2). Geomagnetni impulz se v tem polinomu prepozna kot sprememba njegovih koeficientov. Bolj ko se te spremembe približujejo obliki črke V, bolj je prvi odvod enak stopnici in drugi odvod enak impulzu.

$$y(x) = A + Bx + Cx^2 \quad (2)$$

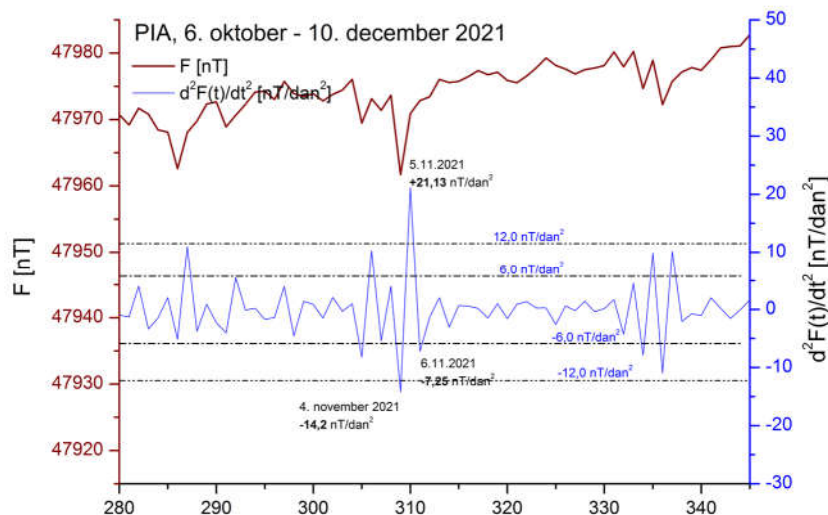
$$dy/dx = B + 2Cx$$

$$d^2y/dx^2 = 2C$$

S polinomom (2) lahko izrazimo jakost magnetnega polja in ob upoštevanju magnetne permeabilnosti μ tudi gostoto magnetnega polja B. Če tako opisano gostoto magnetnega polja vstavimo v enačbo za gostoto energije magnetnega polja Zemlje w_{GM} (3), ugotovimo, da k tej energiji največ prispevajo koeficienti večjih vrednosti.

$$w_{GM} = \frac{W}{V} = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (3)$$

Pospeški v lokalnem magnetnem polju v letu 2021



Slika 2 – Dnevne spremembe gostote magnetnega polja F [nT], merjene na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenija) od 6.10.2021 (280. dan) do 20.12.2021 (354. dan), in pospeški v tem polju d^2F/dt^2 [nT/dan²] v tem obdobju.

V drugi tretjini leta 2021, od 121 do 244 dne v tem letu (od 1.5.2021 do 1.9.2021), se je izrazito povečalo število in intenziteta pospeškov v lokalnem magnetnem polju, merjenem na observatoriju in podanem v dnevni srednji vrednosti (Slika 1). V tem obdobju so pospeški presegli enajstkrat vrednost 6 nT/dan². V zadnji tretjini istega leta se je sicer gostota teh pospeškov zmanjšala, je pa eden od njih dosegel izjemno veliko vrednost. Dne

4. novembra 2021 je nastal najprej negativni pospešek $-14,2 \text{ nT/dan}^2$, ki mu je naslednji dan (309 dan v letu 2021) sledil pozitiven v velikosti $+21,13 \text{ nT/dan}^2$. Tretji dan je ponovno nastal negativni pospešek $-7,25 \text{ nT/dan}^2$ s katerim se je zaključil ta izjemen signal v lokalnem magnetnem polju v letu 2021 (Slika 2).

Izjemno močnemu pospešku $+21,13 \text{ nT/dan}^2$ v lokalnem magnetnem polju, merjenem na observatoriju 4. in 5. novembra 2021, ni sledil noben izjemno močen potres na ozemlju Slovenije ali njeni neposredni okolici (Potresi, 2021), kot se je to zgodilo v letu 2020 (Čop et al, 2021). Slovenija v celoti leži na severnem delu Jadranske tektonske mikroplošče, zato smo razširili pregled nad izjemnimi seizmološkimi in vulkanološkimi dogodki v letu 2021 na celotno tektonsko mikroploščo in njeno bližnjo okolico. V tem letu je ponovno postal aktiven ognjenik (la Fossa) na otoku Vulcano, ki je najbolj južni otok od Eolskih otokov severno od Sicilije. Na otoku so vulkanologi registrirali drhtenje (mikro potresni sunki) s zelo povečano emisijo plinov in deformacijo tal (Vulcano, 2021). Ta otok je od observatorija oddaljen 791 km (azimut $172,7^\circ$).

V letu 2021 se je, poleg ponovne aktivnosti ognjenika na otoku Vulcano, povečala aktivnost stalno delujočega ognjenika na otoku Stromboli. Zbudila sta se tudi še ostala dva občasno delujoča ognjenika v Italiji: Etna na otoku Sicilija in Vezuv pri mestu Napoli v Italiji (Vulcano volcano, 2021).

Jadranska tektonska mikroplošča

Jadransko tektonsko mikroploščo v večjem delu preliva Jadransko morje. Evrazijska tektonska plošča jo obdaja na njenih vseh treh kopnih robovih, na katerih se oblikujejo mlada gorovja: Dinarsko gorovje, Alpe in Apenini. Afriška tektonska plošča se giblje skupaj z Evrazijo, vendar glede na njo malo počasneje in se vrti v naprotni smeri urinega kazalca. Po tem modelu Afriška tektonska plošča zariva Jadransko tektonsko mikroploščo pod Evrazijo (Handy et al, 2010; Van Hinsbergen et al, 2020).

Epicentri potresov, registriranih na območju Jadranske tektonske mikroplošče, so skoncentrirani na priobalni pas Jadranskega morja. Hipoteza o vrtenju Jadranske plošče nasproti gibanju urinega kazalca glede na Evrazijo se dobro ujema s tektonskim dogajanjem vzdolž vseh treh gorskih verig in vzdolž njenih treh robov. V Mediteranu je to seizmološko najbolj aktivno področje. O tej aktivnosti pričajo tako geološke raziskave (Grützner et al, 2021) kot tudi pisni viri iz antike. Jadranska mikroplošča se glede potresne aktivnosti tako deli na več con določenih na osnovi pogostnosti potresov in pri tem sproščene energije (Mučo, 2004).

Povečano seizmološko aktivnost izkazuje tudi področje pod Jadranskim morjem med polotokom Gargano v Italiji in osrednjimi Dinaridi na Hrvaškem (Miccolis et al, 2021). Ta aktivni prelom pa deli Jadransko mikroploščo na severni in južni del. Severni del sega od Padske nižine do Apulije in je zelo majhen glede na okoliške tektonske formacije. Zato ima tudi relativno zelo majhno vztrajnost.

Zaključek

Observatorij je vključen v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET za izmenjavo merilnih rezultatov o stanju magnetnega polja v skoraj realnem času. Glede na ostale observatorije po svetu, ki so tudi vključeni v to informacijsko mrežo, se observatorij v Sloveniji odlikuje z nadpovprečnim nivojem naravnega šuma. Nekatere izvore tega šuma smo že odkrili: prehod vremenskih front (Čop, 2015), gravitacijski vpliv Lune na

ionosfersko dinamo (Kuhar et al, 2020) ter stalne vibracije Jadranske tektonske mikroplošče (Čop, 2017). Na tej tektonski formaciji leži celotno ozemlje Slovenije.

Magnetno polje Zemlje gre skozi geološke plasti njene skorje (angl. geofluid) (Martinelli, 2020). Prenaša torej tudi informacijo o spremembi notranje napetosti kamenin. Te spremembe se kažejo v spremembi gostote energije v lokalnem magnetnem polju merjenim na observatoriju. Po tej predpostavki in na osnovi rezultatov meritev v letu 2021 smo zaključili, da se na observatoriju zaznajo spremembe napetosti Jadranske tektonske mikroplošče na razdalji okoli 800 kilometrov, kar pa je odvisna tudi od oblike te tektonske plošče.

Literatura

Aubert, J. Finlay, C. C. (2019). Geomagnetic jerks and rapid hydromagnetic waves focusing at Earth's core surface. *Nature Geoscience*, 12, 393–398.

Ballani, L. Hagedoorn, J. Wardinski, I. Stromeyer, D. Greiner-Mai, H. (2010). The 1991 geomagnetic jerk as seen at the Earth's surface and the core-mantle boundary. *Geophysical Journal International*, 183 (2), 659–680.

Constable, S. (2007). *Geomagnetism. Treatise of geophysics; Volume 5. 1st edition.* Masaru Kono, editor. Elsevier, 237–336.

Courtillot, V. Le Mouél, J.-L. (1976). On the long-period variations of the Earth's magnetic field from 2 months to 20 years. *Journal of Geophysical Research*, 81 (17).

Čop, R. (2015). Snowstorm at the geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation Methodes and Data Systems*, 4, 155–159.

Čop, R. (2017). Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju. *Elektrotehniški vestnik*, 84 (4), 148–154.

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.

De Michelis, P. Tozzi, R. Meloni, A. (2005). Geomagnetic jerks: observation and theoretical modeling. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 76, 957–960.

Gavoret, J. Gibert, D. Menvielle, M. Le Mouel, J. L. (1986). Long-Term Variations of the External and Internal Components of the Earth's Magnetic Field. *Journal of Geophysical Research; Solit Erath*, 91 (B5), 4787–4796.

Grützner, C. Aschenbrenner, S. Jamšek Rupnik, P. Reicherter, K. Saifelislam, N. Vičič, B. Vrabec, M. Welte, J. Ustaszewski, K. (2021). Holocene surface rupturing earthquakes on the Dinaric Fault System, western Slovenia. *Solid Earth*, 12, 2211–2234.

Handy, R. M. Schmid, M. S. Bousquet, R. Kissling, E. Bernoulli, D. (2010). Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological–geophysical record of spreading and subduction in the Alps. *Earth-Science Reviews*, 102, 121–158.

Hulot, G. Finlay, C. C. Constable, C. G. Olsen, N. Manda, M. (2010). The Magnetic Field of Planet Earth. *Space Science Reviews*, 152, 159–222.

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.

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.

Lay, T. (2002). The Earth's Interior. *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, Part A, Volume 81A.* Editors: William Lee Paul Jennings, Carl Kisslinger, Hiroo Kanamori. Cambridge (MA, US): Academic Press, 829–860.

Le Huy, M. Manda, M. Le Mouel, J.-L. Pais, A. (2000). Time evolution of the fluid flow at the top of the core. Geomagnetic jerks. *Earth Planets Space*, 52, 163–173.

Martinelli, G. (2020). Previous, Current, and Future Trends in Research into Earthquake Precursors in Geofluids. *Geosciences*, 10 (5), 189.

- Meloni, A. Cafarella, L. De Michelis, P. Tozzi, R. (2007). The contribution of geomagnetic observatories and magnetic models to the study of secular variation and jerks in Antarctica. U.S. Geological Survey and The National Academies; USGS OF-2007-1047, Short Research Paper 071.
- Miccolis, S. Filippucci, M. De Lorenzo, S. Frepoli, A. Pierri, P. Tallarico, A. (2021). Seismogenic Structure Orientation and Stress Field of the Gargano Promontory (Southern Italy) From Microseismicity Analysis. *Frontiers in Earth Science*, 9, 589332.
- Muço, B. (2004). Seismicity of the Adriatic microplate and a possible triggering: geodynamic implication. *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics and Hazards*. NATO Science Series; Series IV: Earth and Environmental Sciences – Vol. 61. Edited by Nicholas Pinter, Grenerczy Gyula, John Weber, Seth Stein and Damir Medak. Dordrecht: Springer, 351–367.
- Olsen, N. Hulot, G. Sabaka, J. T. (2015). Sources of the Geomagnetic Field and the Modern Data That Enable Their Investigation. *Handbook of Geomathematics*. Editors: Willi Freeden, M. Zuhair Nashed, Thomas Sonar. Berlin; Heidelberg: Springer, 227–249.
- Pinheiro, J. K. Travassos, M. J. (2010). Impulses of the geomagnetic secular variation (jerks) at vassouras magnetic observatory detected by wavelet analysis. *RBGf - Revista Brasileira de Geofísica*, 28 (1), 37-46.
- Potresi v Sloveniji: januar 2021 – december 2021. (2021). Ljubljana: ARSO – Agencija Republike Slovenije za okolje.
- Roberts, H. P. King, M. E. (2013). On the genesis of the Earth's magnetism. *Reports on Progress in Physics*, 76, 096801.
- Tobias, S. M. (2002). The solar dynamo. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 360 (1801), 2741-2756.
- Van Hinsbergen, J. J. D. Torsvik, H. T. Schmid, M. S. Matenco, C. L. Maffione, M. Vissers, L. M. R. Gürer, D. Spakman, W. (2020). Orogenic architecture of the Mediterranean region and kinematic reconstruction of its tectonic evolution since the Triassic. *Gondwana Research*, 81, 79–229.
- Vulcano. Bollettino settimanale. Settimana di riferimento 20/12/2021 - 26/12/2021 (data emissione 28/12/2021). Rep. N. 52/2021 VULCANO. INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia); Sezione di Catania e Palermo.
- Vulcano vulcano. (2021). St. Wendel (Germany): VolcanoDiscovery GmbH. <https://www.volcanodiscovery.com/vulcano.html> (4.1.2022).