

# Vpliv geomagnetnih neviht v maksimumu 25. sončevega cikla

Rudi Čop<sup>1</sup>

## Povzetek

Največje spremembe magnetnega polja Zemlje povzročajo geomagnetne nevihte. Te nastajajo zaradi vpliva iz vesolja, iz vzhodne smeri. Povzročajo jih Sonce ob njegovih izbruhih ali ob pojavu lukenj v njegovi koroni. Višek te sončeve aktivnosti je v času maksimuma cikla sončevih peg, ki v povprečju traja nekaj več kot enajst let. Temu ciklu sledi z zamikom do dveh let tudi cikel geomagnetnih neviht. Za srednje geografske širine se vpliv geomagnetnih neviht ocenjuje s pomočjo geomagnetnega indeksa  $K$ , ki se določa na osnovi spremembe horizontalnih komponent lokalnega magnetnega polja. V članku je predstavljen poizkus določanja tega vpliva na osnovi spremembe celotnega vektorja magnetnega polja Zemlje. Obdelani in ocenjeni so bili rezultati meritev prvih 190 dni v letu 2024. Kot izhodišče za tako ocenjevanje so bile prevzete lastnosti ekstremne geomagnetne nevihte, ki se je dogodila v 11. maja 2024, v maksimumu 25. sončevega cikla.

**Ključne besede:** geomagnetne nevihte, geomagnetni indeksi, pospeški v gostoti energije

**Key words:** geomagnetic storms, geomagnetic indices, accelerations in energy density

## Sončev veter

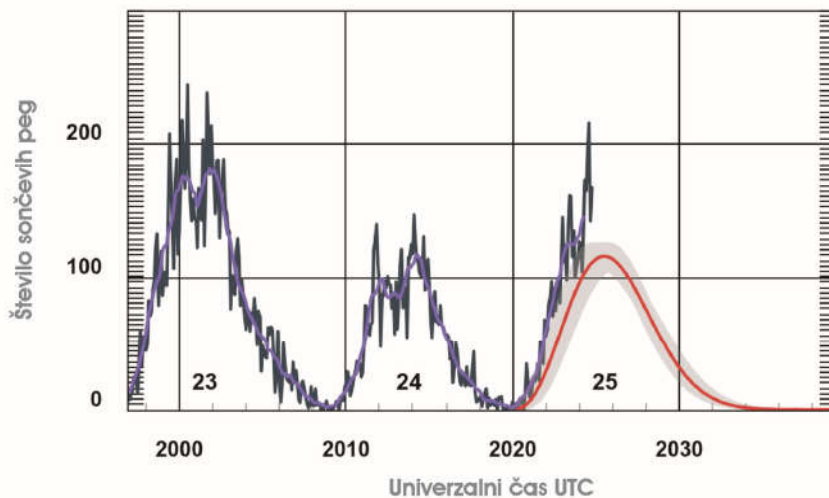
Sonce v vesolje stalno seva elektromagnetne valove različnih valovnih dolžin in tok plazme. Ta tok plazme je tok naelektrenih elementarnih delcev, ki sestavlja sončev veter. Izsevane energija in sončev veter oblikujejo vreme v vesolju (angl. space weather), ki vpliva na Zemljo. Večino izsevane energije vpijejo zgornje plasti atmosfere našega planeta, večino vpliva sončevega vetra pa odvrne magnetosfera, geomagnetno polje, ki ovija naš planet. Sončev veter v medplanetarnem prostoru doseže hitrost med 250 do 750 km/s, izjemoma pa lahko preseže tudi 2000 km/s. Sončev veter tako lahko doseže Zemljo v malo manj kot v dveh dneh, lahko pa šele po štirih dneh. Vpliva na dotok kozmičnih žarkov na naš planet (COST 724, 2007; Čop, 2022). Geomagnetna nevihta nastane takrat, ko se medplanetarno magnetno polje, ki ga sončev veter prinaša s seboj, poveže z magnetnim poljem Zemlje tako, da zmanjša njegovo gostoto v posameznem predelu planeta.

Geomagnetne nevihte nastajajo zaradi udarnih valov, nastalih v sončnem vetru ob izbruhih v koroni Sonca CME (angl. coronal mass ejections) ali zaradi prehodov Zemlje preko tokovnic sončnega vetra s povečano hitrostjo CIR (angl. corotating interaction regions), ki izhajajo iz lukenj v koroni Sonca. Pogostnost geomagnetnih neviht je vezana na cikel sončnih peg, največja je v času njegovega maksimuma ter v času njegovega pojemanja (Slika 1). Tudi oba izvora geomagnetnih neviht sledita temu ciklu. Maksimum izbruhov v koroni Sonca sovpada z maksimumom sončnega cikla, maksimum števila lukenj v koroni Sonca pa zaostaja za dva do tri leta za njim. Geomagnetne nevihte se delijo na dve skupini: na geomagnetne nevihte z nenadnim začetkom (angl. sudden commencement storms) in geomagnetne nevihte s postopnim začetkom (angl. gradual commencement storms). Okoli 24 % vseh neviht je takih z nenadnim začetkom, zmernih in močnih neviht pa je obeh oblik enako število. Prav tako je pogostnost geomagnetnih neviht različna v različnih letnih časih. Najpogostejše so ob pomladnem in jesenskem enakonočju. Tako v ciklu sončnih peg kot v ciklu geomagnetnih neviht je zaznaven 27 dnevni efektivni obrat Sonca. Velik del

---

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

geomagnetnih neviht se namreč ponavlja v ritmu efektivnega obrata Sonca. Zaradi tega so geomagnetne nevihte napovedljive, predvsem tiste manjše, ki jih je preko 80 % vseh (Lakhina & Tsurutani, 2016; Čop, 2017).

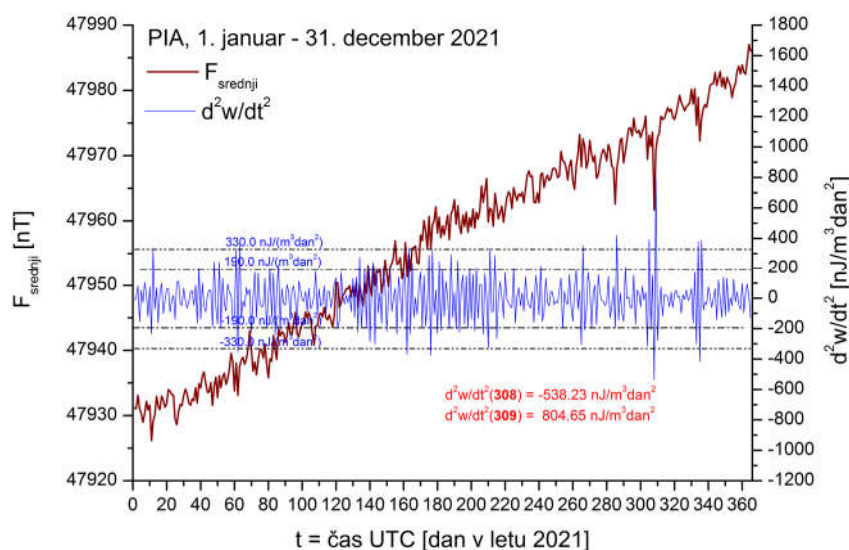


Slika 1: Število sončevih peg v zadnjih treh ciklih: mesečne srednje vrednosti (črno), zglajene mesečne srednje vrednosti (viola) in napovedane vrednosti v sedanjem 25. ciklu (rdeče) (Solar, 2024).

### Meritev lokalnega magnetnega polja

Preko 99 % magnetnega polja Zemlje izhaja iz njene notranjosti in se širi v bližnje vesolje, kjer nanj deluje sončev veter. Po svoji naravi je geomagnetno polje konservativno polje sil, kot sta tudi Zemljino gravitacijsko in elektrostatično polje. Meritve magnetnega polja Zemlje (angl. geomagnetism, terrestrial magnetism) izhajajo iz merjenja smeri z magnetnim kompasom. V zahodni civilizaciji so se te meritve postopoma razvijale več kot pol tisočletja skupaj z razumevanjem lastnosti geomagnetnega polja (Jackson et al, 2000; Stern, 2002).

Meritve magnetnega polja v posamezni točki na površini Zemlje so enkratne meritve z rezultati, ki so značilni le za to posamezno merilno mesto. Za današnje meritve magnetnega polja Zemlje je značilna tudi zelo velika količina merilnih podatkov, ki so slabo pregledni. Zato se merilni rezultati v končni obliki podajajo kot geomagnetni indeksi. Ti indeksi omogočajo primerljivost rezultatov med seboj, sicer dobljenih na različnih merilnih mestih. Z indeksom  $K$  (nem. Kennziffer, v logaritmu številka vrednost pred decimalno vejico) se opisuje geomagnetno dogajanje preko celega dneva na srednjih zemljepisnih širinah. Ker se ta indeks določa v triurnem intervalu, jih osem opisuje celotno geomagnetno dogajanje v posameznem dnevu. Indeks  $K$  je približno logaritmične oblike in podaja razmerje do geomagnetno mirnih dni (angl. solar quiet days). Vsebuje deset neimenovanih števil: od 0 za najbolj miren dan do 5, ko nastopa najmilejša oblika geomagnetne nevihte pa vse do 9 za prikaz razmer, ko je zemeljsko magnetno polje najbolj razburkano. Geomagnetna nevihta je lahko: manjša ( $K = 5$ , angl. minor storm), zmerna ( $6 \leq K \leq 7$ , angl. major storm) ali močna ( $8 \leq K \leq 9$ , angl. severe storm). Jakost geomagnetnih neviht narašča od geomagnetnega ekvatorja proti področjema polarnih sijev. Zato ima vsak observatorij svojo skalo indeksa  $K$ . Ker je ta skala logaritmične oblike, zadostuje, da ima posamezni observatorij določeno najmanjšo vrednost geomagnetne motnje pri največjem indeksu  $K = 9$  (Mayaud, 1980; The Space, 2023).



**Slika 2:** Dnevne srednje vrednosti  $F$  [nT], pospeški v gostoti energije v lokalnem magnetnem polju v letu 2021 ter zgornja meja šuma in spodnja meja najvplivnejših dogodkov.

Meritev spremembe lokalnega magnetnega polja na ozemlju Slovenije se od 1. januarja 2015 redno opravlja na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenija) (v nadaljevanju: Observatorij). Je edinstveno merilno mesto, postavljeno na Jadranski tektonski mikroplošči (angl. Adrian tectonic micro plate), ki je prepoznana kot idealni naravni laboratorij (Weber et al, 2010; Kissling, 2024). Ta tektonska mikroplošča je dobro proučena, zato je možno analizirati vse oblike tektonskih dinamičnih procesov in njihovih kombiniranih efektov (Zadro, 1971; Tenze et al, 2012). Za celotno ozemlje Slovenije je značilen visok nivo šuma v lokalnem magnetnem polju (Čop et al, 2011), ki presega šum na geomagnetnih observatorijih v sosednjih državah tudi za faktor 2,64. Ta šum se povečuje od obal v Tržaškem zalivu proti gorskim verigam Julijskih Alp in Karavank. Izvor tega šuma je sprememba napetosti Jadranske tektonske mikroplošče (Čop et al, 2021).

### Sprememba gostote energije v magnetnem polju Zemlje

Magnetno polje je fizikalno polje sile, s katerim se opisuje magnetni vpliv na magnetne materiale, električne toke in premikajoče se električne naboje. Gostota magnetnega polja je sila na enoto elementa občutljivega na magnetno polje, merjena v enotah Tesla [ $T = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1} = \text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ ]. Je vektorska količina določena s smerjo in svojo velikostjo (Jackson, 1998; Lowrie, 2007).

Magnetno polje se v prostor ne širi radialno in njegova jakost upada hitreje kot jakost elektrostatičnega ali gravitacijskega polja. Magnetno polje  $B$  [ $T = \text{N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ] v tuljavi in okoli nje povzroča električni tok  $i$  [A], ki teče skozi ovoje te tuljave in ga poganja električna napetost  $u$  [V]. V tako ustvarjenem magnetnem polju se nakopiči energija  $W$  [ $\text{Ws} = \text{J}$ ]. Energija nakopičena v magnetnem polju, opisana v enačbi (1), je torej energija potrebna za oblikovanje tega polja v prostoru z volumnom  $v$  [ $\text{m}^3$ ].

$$W = \int_0^i u i dt = \frac{1}{2\mu_0} B^2 v \quad (1)$$

Gostota energije v magnetnem polju  $w = W/v$  je določena z enačbo (2). Ta velja za primer, ko se to polje širi v prostoru brez materije.

$$w = \frac{W}{v} = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \left[ \frac{\text{Ws}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right] \quad (2)$$

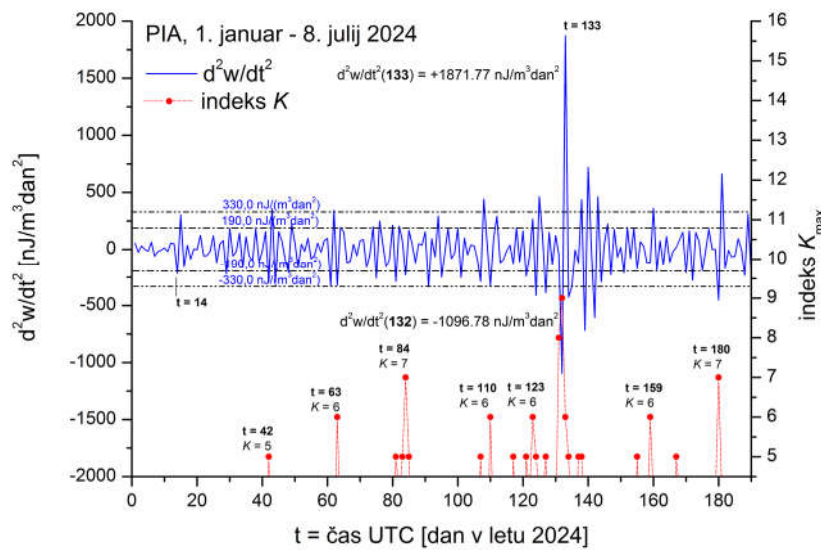
Absolutna vrednost vektorja gostote magnetnega polja Zemlje je velikost gostote magnetnega polja  $F$  [ $\text{nT} = 10^{-9} \text{ T}$ ] (angl. total intensity). Izračuna se iz treh med seboj neodvisnih komponent geomagnetnega polja. Najpogostejše so to HDZ ali XYZ, ki so: velikost vodoravne komponente  $H$  (angl. horizontal intensity), deklinacija  $D$ , komponenta sever-jug  $X$ , komponenta vzhod-zahod  $Y$  in velikost navpične komponente  $Z$  (angl. vertikal intensity). Podane so v desetinkah  $\text{nT}$ , razen  $D$ , ki je podana v stotinkah kotnih minut (Lowrie, 2007; INTERMAGNET, 2020).

Izračun velikosti gostote geomagnetnega polja  $F$  na Observatoriju sem naredil iz neskončnega zaporedja podatkov digitalnih meritev komponent  $X$ ,  $Y$  in  $Z$ . Za enosekundne merilne podatke sem določil okno s širino enega dneva kot končni časovni interval (angl. windowing). Z njim sem dosegel zanesljivo interpretacijo dogodkov, ki trajajo najmanj dva dni. Z ožjim časovnim oknom bi zajemal tudi krajše dogodke, ki sicer niso geomagnetne nevihte. S širšim časovnim oknom bi že lahko prišel na področje sekularnih sprememb v geomagnetnem polju. Za obdelavo nad končnim časovnim intervalom merilnih podatkov sem nato določili statistični filter: enostavno povprečno vrednost. Iz povprečnih vrednosti komponent  $X$ ,  $Y$  in  $Z$  sem izračunal povprečne vrednosti horizontalnih komponent  $H$  in povprečno vrednost gostot geomagnetnega polja  $F$ . Velikost gostote geomagnetnega polja  $F$  sem pretvoril v gostoto energije lokalnega magnetnega polja  $w$  (angl. transformation) (Smith, 1999). Iz nje sem nato izračunal njeno hitrost spremembe  $dw/dt$  in pospešek te spremembe  $d^2w/dt^2$ .

### Geomagnetne nevihte v prvi polovici leta 2024

V maksimumu 25. sončevega cikla je geomagnetna nevihta 11. maja 2024 povzročila polarni sij pod  $30^\circ$  magnetne širine tako na severni kot na južni polobli: v Novi Kaledoniji ( $-26,4^\circ$  magnetne širine) in v Portoriku ( $27,2^\circ$  magnetne širine). Po tem parametru je med dvajsetimi največjimi geomagnetnimi nevihtami v zadnjih 500 letih (Hayakawa et al, 2024). Geomagnetna nevihta 11. maja 2024 je tudi dodatno naelektrila naš celoten planet za več kot štiri dni (Nicoll, 2014; Tacza et al, 2024).

Pospeški gostote energije lokalnega magnetnega polja  $d^2w/dt^2$ , izračunani iz meritev na Observatoriju v prvih 190 dneh leta 2024, so glede na njihovo amplitudo omejeni na tri območja (Slika 3). Z vrednostjo  $190 \text{ nJ/m}^3\text{dan}^2$  so razdeljeni približno v razmerju 20/80. Nad zgornjo mejo  $330 \text{ nJ/m}^3\text{dan}^2$  je okoli 5 % rezultatov teh pospeškov. Vplivni pospeški so med obema mejnima vrednostma, najvplivnejši pospeški pa nad zgornjo mejo  $330 \text{ nJ/m}^3\text{dan}^2$ . Ti dve mejni vrednosti sem določil na osnovi meritev sprememb magnetnega polja na Observatoriju v letu 2021 (Slika 2). V tem letu je bil sedanji 25. sončev cikel v začetnem minimumu in zato so bile geomagnetne nevihte redke. Največ so dosegle stopnjo zmerne geomagnetne nevihte  $K = 6$ . Poleg tega pa v letu 2021 ni bilo večjih potresov na ozemlju Slovenije kot tudi ne v njeni bližnji okolici. Za najvplivnejši dogodek tega leta v njegovem 308. in 309-tem dnevu se je izkazalo, da je rezultat ponovnega delovanja vulkana na otoku Vulcano na jugozahodnem robu Jadranske tektonske mikroplošče. Ta vulkan se je v letu 2021 prebudil po več kot 130 letih mirovanja (Di Traglia et al, 2024).



**Slika 3:** Pospeški v gostoti energije v lokalnem magnetnem polju in kategorije geomagnetnih neviht v prvih 190-tih dneh v letu 2024.

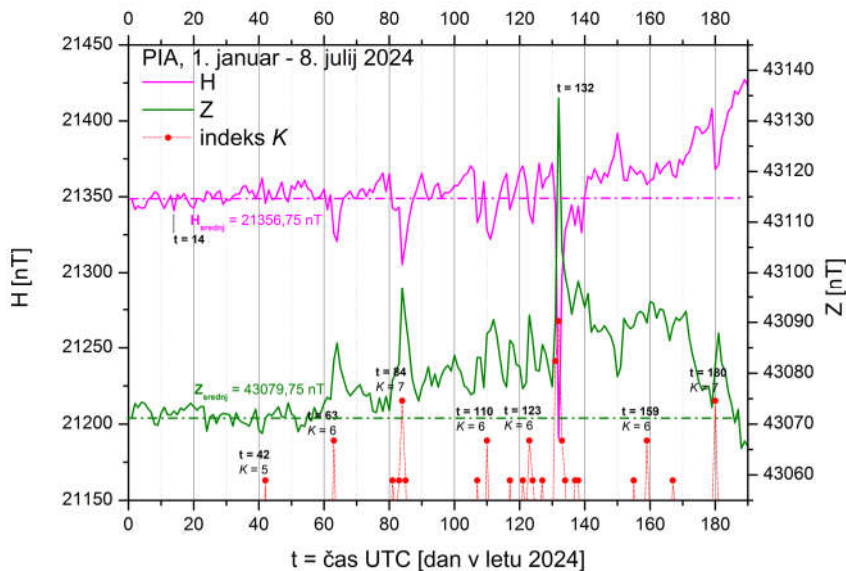
Med pospeški v lokalnem magnetnem polju v letu 2024 (Slika 3) močno izstopata pospeška, nastala v začetku močne geomagnetne nevihte, ki je v 133. dnevu tega leta (12.5.2024) dosegla vrednost geomagnetnega indeksa  $K = 9$ . V 132. dnevu je bil ta pospešek gostote energije lokalnega magnetnega polja  $d^2w/dt^2 = -1096,78 \text{ nJ/m}^3 \text{ dan}^2$ , naslednji dan pa  $d^2w/dt^2 = +1871,77 \text{ nJ/m}^3 \text{ dan}^2$ . Ta dva pospeška, ki sta nastala zaradi vpliva iz vesolja, presegata po svoji absolutni vrednosti vse pospeške nastale v obdobju od začetka leta 2020. Vsi predhodni najvplivnejši dogodki so imeli svoj izvor v notranjosti Zemlje. Zaradi močne geomagnetne nevihte, ki se je začela 132-tega dne v letu 2024 (11.5.2024), se je gostota energije lokalnega magnetnega polja zelo močno pospeševala še naslednjih 12 dni vse do 144 dneva (13.5.2024). Vpliv te močne nevihte na lokalno magnetno polje je trajal dlje kot pa so to pokazali geomagnetni indeksi  $K$ .

Pospeševanje (Slika 3), ki se je začelo 14. dan v letu 2024 (14.1.2024), očitno ni bilo zaradi vplivov geomagnetnih neviht, temveč je bilo posledica vpliva iz notranjosti Zemlje. Glede na obliko signala je bil izvor nekje na robu Jadranske tektonske mikroplošče daleč stran od merilnega mesta. Vse ostale pospeške v gostoti lokalnega magnetnega polja v opazovanem obdobju, ki so nastali zaradi vpliva iz vesolja, ni mogoče enostavno razložiti. O velikosti pospeškov za manjše ( $K = 5$ ) kot tudi za zmerne geomagnetne nevihte ( $6 \leq K \leq 7$ ) odloča razmerje velikosti komponent geomagnetnega polja  $H/Z$ . Sprememba velikosti horizontalne komponente geomagnetnega polja  $H$  nastaja zaradi vpliva iz vesolja. Ta komponenta je tudi osnova za določanje geomagnetnega indeksa  $K$ . Vplivi iz notranjosti Zemlje spreminjajo velikost vertikalne komponente  $Z$ . Graf (Slika 4) prikazuje dnevno srednjo vrednost horizontalne komponente  $H$  in vertikalne komponente  $Z$  v prvih 190 dneh leta 2024. Pospeški pri manjših in zmernih geomagnetnih nevihtah so veliki v primeru, da vertikalna komponenta ne kompenzira vpliva iz vesolja. Primera: geomagnetni nevihti z indeksom  $K = 7$  v 84. dnevu in 180. dnevu (Slika 4) in odgovarjajoči pospeški (Slika 3). Zmerna geomagnetna nevihta v 84. dnevu leta 2024 je v glavnem povzročila le spremembo nagnjenosti vektorja geomagnetnega polja - spremembo inklinacijskega kota  $I$  merjenega v stotinkah kotnih minut.

## Obravnava

Slovenija leži na skrajnem severovzhodnem robu jadranske tektonske mikroplošče. Ta meji na afriško in evrazijsko tektonsko ploščo in se od njiju obnaša povsem drugače (Mučo, 2004; Weber et al, 2010). Ozemlje Slovenije je potresno aktivno območje (Kastelic et al, 2009). Od 1. januarja do 8. julija 2024 oziroma prvih 190 dni v letu 2024 je bilo 265 lokalnih potresov ali v povprečju 1,4 na dan z lokalno magnitudo  $M_{LV} \geq 0,7$  stopnje po Richterjevi potresni lestvici. Najmočnejši lokalni potres se je zgodil 7. januarja 2024 na vzhodu Ptujskega polja z lokalno magnitudo  $M_{LV} = 2,8$ . Za lokalni potres štejemo potres, ki ima žarišče na ozemlju Slovenije ( $20.271 \text{ km}^2$ ) ali v njeni neposredni bližini. Potres se šteje za bližnjega, če je njegovo žarišče od najbližjega kraja v Sloveniji oddaljeno največ 50 km (Potresi, 2024). Potresna aktivnost v Sloveniji je bila v prvih 190 dneh leta 2024 tako nizka, da ni mogla bistveno spremeniti običajne gostote energije v lokalnem magnetnem polju (Čop, 2017).

Na velikost pospeškov gostote lokalnega geomagnetnega polja  $d^2w/dt^2 [\text{nJ/m}^3 \text{ dan}^2]$  vpliva velikost odziva vertikalne komponente Z na spremembo horizontalne komponente H, ki jo je povzročil nenadni pospešek v hitrosti sončevega vetra. Je torej posledica medsebojnega delovanja naravnih sistemov, ki jih sicer proučujemo ločeno: Sonca, sončevega vetra, magnetosfere, ionosfere in magnetnega polja, ki ga ustvarja notranjost Zemlje (Amory-Mazaudier, 2022). Te povezave temeljijo na različnih sistemih plazme, na njihovi dinamiki in na različnih oblikah magnetnih polj, ki ustvarjajo različne električne toke. Med dvaintridesetimi različnimi viri električnih tokov, ki tečejo skozi zemeljsko skorjo in njene oceane, je med najmočnejšimi izvori prav vreme v bližnjem vesolju (Helman, 2013). Zato je pomemben nadaljnji razvoj postopkov za obdelavo meritev sprememb magnetnega polja Zemlje in razlage teh rezultatov (Pavlovčič-Prešeren et al., 2020; Čop, 2024).



**Slika 4:** Spremembe dnevni srednjih vrednosti komponent H in Z v lokalnem magnetnem polju ter geomagnetne nevihte različnih kategorij v prvih 190 dneh leta 2024.

## Zaključek

Rezultati meritev sprememb gostote lokalnega magnetnega polja  $F [\text{nT}]$  na Observatoriju, izmerjeni 11. maja 2024, so bili v desetletni zgodovini meritev na tem observatoriju res



izjemni. Zato bodo rezultati obdelave meritev te močne geomagnetne nevihte z geomagnetnim indeksom  $K = 9$  služile kot izhodišče za analizo rezultatov meritev predvsem v letih 2020 in 2021. V letu 2020 so bili na območju Slovenije in njeni bližnji okolici zabeleženi uničujoči potresi, naslednje leto pa vulkanski izbruhi na jugu Italije. Velikost pospeškov gostote energije lokalnega magnetnega polja, ki so se zgodili v prvih 190 dneh leta 2024, bo pomembna pomoč pri analizi rezultatov meritev na Observatoriju tudi v prihodnje.

Geomagnetni indeks  $K$  je uporaben za ocenjevanje vpliva sprememb magnetnega polja Zemlje na magnetne navigacijske sisteme in za primerjavo rezultatov meritev različnih geomagnetnih observatorijev med seboj. Ne da pa prave ocene glede vplivov na našo civilizacijo ter vplivi na biosfero in s tem tudi na nas. Taka obdelave merilnih podatkov, da so končni rezultati pospeški v gostoti lokalnega magnetnega polja, je uporabna le za lokalne razmere. Ob uporabi merilnih podatkov iz Observatorija in z upoštevanjem spremembe gostote energije v lokalnem magnetnem polju pa je mogoče spremljati tudi napetost celotne Jadranske tektonske mikroplošče.

## Literatura

- Amory- Mazaudier, C. (2022). Magnetic Signatures of Large-Scale Electric Currents in the Earth's Environment at Middle and Low Latitudes. *Atmosphere*, 13 (10), 1699.
- COST 724 final report (2007). Developing the scientific basis for monitoring, modelling and predicting Space Weather. Brussels (Belgium): COST Association.
- Čop, R. (2017). Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2016. Zbornik del. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 69–80.
- Čop, R. (2017). Sprememba gostote energije v zemeljskem magnetnem polju. *Elektrotehniški vestnik*, 84 (4), 148–154.
- Čop, R. (2019). Spremembe števila geomagnetnih neviht in števila sončnih peg: mesečni, desetletni in stoletni naravni cikli. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2019. Zbornik del. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, 107–116.
- Čop, R. (2024). Spremembe v gostoti energije magnetnega polja Zemlje na observatoriju PIA, Slovenija, med geomagnetno nevihto G5 11. maja 2024. *Geodetski vestnik*, 68 (3), 360-369.
- Čop, R. Deželjin, D. Mihajlović, J. S. Kosovac, P. (2011). Preliminary Measurements of Geomagnetic-field Variations in Slovenia. *Elektrotehniški vestnik (English Edition)*, 78 (3), 96-101.
- Čop, R. Rason, L. J. Bilc, A. (2021). Accelerations in the Local Magnetic Field on the Adriatic Tectonic Microplate. *Open Journal of Earthquake Research*, 10, 95–104.
- Di Traglia, F. Pistolesi, M. Bonadonna, C. Rosi, M. (2024). The last 1100 years of activity of La Fossa caldera, Vulcano Island (Italy): new insights into stratigraphy, chronology, and landscape evolution. *Bulletin of Volcanology*, 86, 47.
- Halliday, D. Resnick, R. Walker. J. (2003). *Fundamentals of Physics*. 9th edition- Extended. Parts 3 and 4. Hoboken (NJ, US): John Wiley & Sons.
- Hayakawa, H. Ebihara, Y. Pevtsov, A. A. (2024). Analyses of Equatorward Auroral Extensions during the Extreme Geomagnetic Storm on 15 July 1959. *Monthly Notices of Royal Astronomical Society – MNRAS*, 527, 7298–7305.
- Helman, S. D. (2013). Earth electricity: a review of mechanisms which cause telluric currents in the lithosphere. *Annals of Geophysics*, 56 (5), G0564.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual. (2020). Version 5.0.0. Edited by St-Louis, B. Potsdam: GFZ Data Services.
- Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*. Third edition. New York: Wiley. 1998. 212–215.
- Jackson, A. Jonkers, R. T. A. Walker, R. M. (2000). Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 358, 957–990.

- Kastelic, V. Vannoli, P. Burrato, P. Fracassi, U. Tiberti, M. M. Valensise, G. (2009). Seismogenic Sources In The Adriatic Domain: an overview from the Database of Individual Seismogenic Sources (DISS 3.1.0). *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 9, 97–99.
- Kissling, E. (2024). Adria microplate: a puzzling key stone in west-central Mediterranean geodynamics. *Annals of geophysics*, 67 (4), S431.
- Lakhina, S. G. Tsurutani, T. B. (2016). Geomagnetic storms: historical perspective to modern view. *Geoscience Letters*, 3 (5).
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Second edition. Cambridge (UK): Cambridge University.
- Mayaud, P. N. (1980). *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices*. Geophysical monograph 22. Washington (DC, US): American Geophysical Union.
- 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. Dordrecht (The Netherlands): Springer, 351–367.
- Nicoll, K. A. (2014). Space weather influences on atmospheric electricity. *Weather*, 69 (9). 238–241.
- 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).
- Potresi v Sloveniji. Arhiv mesečnih poročil. (2022–2024). Ljubljana: Ministrstvo za okolje, podnebje in energijo; Agencija RS za okolje – ARSO.
- Smith, W. S. (1999). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. Second Edition. San Diego (California,US): California Technical.
- Solar cycle progression. (2024). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA; Space Weather Prediction Center. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (22.11.2024)
- Stern, P. D. (2002). A Millennium of Geomagnetism. *Reviews of Geophysics*, 40 (3), B1-B30.
- Tacza, J. Li, G. Raulin, J.-P. (2024). Effects of Forbush Decreases on the global electric circuit. *Space Weather*, 22, e2023SW003852.
- The Space Weather Forecast Explained. (2023). Nottingham (UK): British Geological Survey – BGS. <https://geomag.bgs.ac.uk/education/activitylevels.html> (03.12.2023)
- Tenze, D. Braitenberg, C. Nagy, I. (2012). Karst deformations due to environmental factors: evidences from the horizontal pendulums of Grotta Gigante, Italy. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 53 (3), 331–345.
- Zadro, M. B. (1971). Non-linear effects in the oscillations of the Earth. *Bollettino di Geofisica Teoretica ed Applicata*, 13 (51–52), 187–195.
- Weber, J. Vrabec, M. Pavlovčič-Prešeren, P. Dixon, T. Jiang, Y. Stopar, B. (2010). GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 483, 214–222.