

SPREMEMBE V GOSTOTI ENERGIJE MAGNETNEGA POLJA ZEMLJE MED GEOMAGNETNO NEVIHTO G5 11. MAJA 2024

CHANGES IN THE ENERGY DENSITY OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD DURING THE G5 GEOMAGNETIC STORM ON MAY 11, 2024

Rudi Čop

UDK: 523.9:550.38(497.4)
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.03
Prispelo: 4. 7. 2024
Sprejeto: 7. 8. 2024

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2024.03.360-369
PRELIMINARY RESEARCH ARTICLE
Received: 4. 7. 2024
Accepted: 7. 8. 2024

IZVLEČEK

Geomagnetne nevihte so največja motnja v Zemljinem magnetnem polju. Dne 11. maja 2024, v maksimumu 25. sončevega cikla, je nastala geomagnetna nevihta, ki je na planetarni ravni dosegla najvišjo stopnjo G5. Tudi na geomagnetnem observatoriju PLA (Piran, Slovenija) je bila tisti dan izmerjena geomagnetna nevihta, ki je dosegla največjo možno vrednost geomagnetnega indeksa $K = 9$. Tako močne geomagnetne nevihte se v povprečju pojavljajo na vsakih štirideset do šestdeset let.

Geomagnetna nevihta z indeksom $K = 9$ je pomembna referenca za vse motnje v lokalnem magnetnem polju iz različnih virov in različnih jakosti. Zato je bila narejena analiza pospeškov v gostoti energije lokalnega magnetnega polja v prvih 150 dneh v letu 2024. Ugotovljeni učinki geomagnetnih neviht z različnimi indeksi K bodo podlaga za boljšo analizo motenj v lokalnem magnetnem polju, ki so se zgodile v preteklih letih ali se bodo zgodile v prihodnje.

KLJUČNE BESEDE

sončevi cikli, močna geomagnetna nevihta, gostota energije v lokalnem magnetnem polju, pospeški v gostoti energije, geomagnetni indeksi

ABSTRACT

Geomagnetic storms are the largest disturbance in the Earth's magnetic field. On May 11, 2024, a geomagnetic storm occurred at the peak of the 25th solar cycle, reaching the highest level (G5) on the planetary scale. On that day, a geomagnetic storm was also measured at the PLA geomagnetic observatory (Piran, Slovenia), reaching the maximum possible value of the geomagnetic index $K = 9$. Such strong geomagnetic storms occur on average every 40 to 60 years.

A geomagnetic storm with an index of $K = 9$ represents an important reference for all disturbances in the local magnetic field from different sources and different intensities. Therefore, an analysis of accelerations in the energy density of the local magnetic field during the first 150 days in 2024 was made. The identified effects of geomagnetic storms with different K indices will serve to better analyse disturbances in the local magnetic field that have occurred in the past years and will happen in the future.

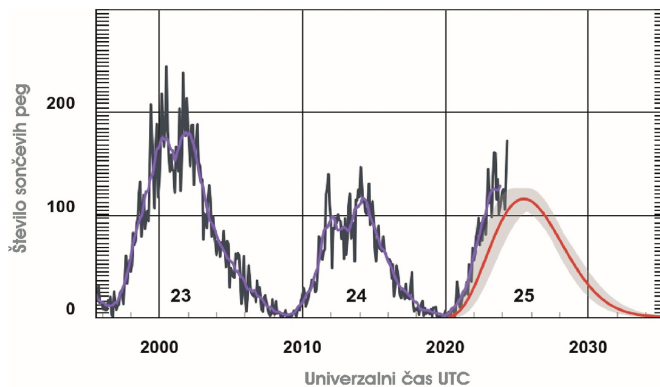
KEY WORDS

solar cycles, severe geomagnetic storm, energy density in the local magnetic field, accelerations in the energy density, geomagnetic indices

1 SONČEVI CIKLI

Število sončevih peg se je napovedovalo od samega odkritja sončevih ciklov (Maunder, 1904; Čop in Jere Jakulin, 2020). Še posebno pomembna pa je ta napoved za sodobno civilizacijo in njene tehnologije, občutljive na vreme v bližnjem vesolju (angl. *space weather storms*): prekinitvev radijskih zvez, geomagnetne nevihte in protonske nevihte SPE (angl. *solar proton event, solar radiation storms*). Vreme v bližnjem vesolju je posledica izbruhov na Soncu CME (angl. *coronal mass ejection*) ali emisije povečane količine plazme iz luknje v koroni Sonca CIR (angl. *co-rotating interaction region*) (Čop, 2017). Povzročajo jih trenutne spremembe v magnetnem polju nam najbližje zvezde (Hesse in Cassak, 2020). Aktivnost obeh izvorov je neposredno povezana s cikli sončevih peg. Dva od teh ciklov si nista popolnoma enaka, cikli se med seboj razlikujejo tako po periodi kot po amplitudi. Trajajo približno po enajst let in se delijo v štiri zaporedne faze: čas naraščanja, maksimum, čas upadanja in minimum (Reyes, Pinto in Moya, 2021). Tako v ciklu sončnih peg kot v ciklu geomagnetnih neviht je zaznaven 27-dnevni efektivni obrat Sonca (Čop, 2020). Geomagnetne nevihte so torej zelo predvidljive. Na podlagi meritev, opravljenih s posebnimi umetnimi sateliti, je mogoče te pojave napovedati vsaj dva dni vnaprej.

Za napovedovanje števila sončevih peg se uporablja več vrst različnih merilnih podatkov, ki se nanašajo na aktivnost Sonca ter modele solarne dinamike, avtoregresijske modele in teorijo kaosa. Izhodišče teh napovedi je vsakodnevno opazovanje površine sončevega diska in sistematično zapisovanje števila peg na njem. V zahodni civilizaciji obstajajo take dnevne datoteke za zadnjih štiristo let (Clette et al., 2023).



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

Od avgusta 1996 do decembra 2008 je trajal 23. cikel v zaporedju sončevih ciklov (slika 1), ki jih štejemo od leta 1755. V tem ciklu je 29. oktobra 2003 nastopila geomagnetna nevihta najvišje stopnje, ki je trajala še naslednji dan in povzročila polarni sij, viden tudi na zelo nizkih geografskih širinah. Nekaj dni kasneje, 4. novembra 2003, je na Soncu nastal izjemno močan izbruh, zaradi katerega so morali razširiti lestvico, po kateri se meri jakost sevanja žarkov X iz Sonca. Ker ta izbruh ni bil ustrezno magnetno orientiran glede na magnetno polje Zemlje, je povzročil le polarni sij na višjih geografskih širinah (Mihajlović, Čop in Palangio, 2010).

24. sončev cikel, ki je trajal od decembra 2008 do decembra 2019, je bil povprečno dolg in četrti najnižji po svoji amplitudi od leta 1755. Sedanji 25. sončev cikel se je začel v decembru 2019 in bo predvidoma dosegel

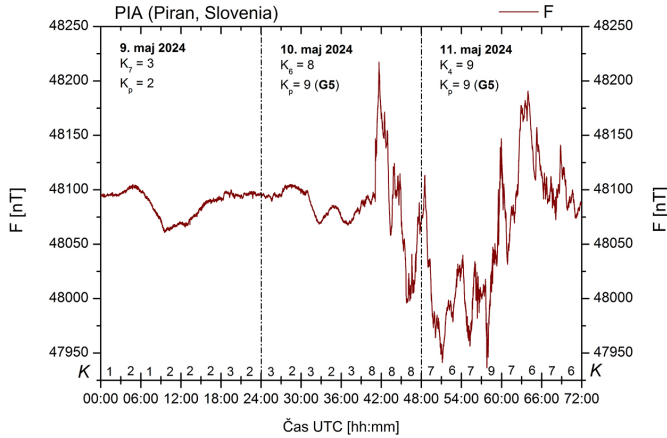
vrh v juliju 2025. S tem ciklom se je prekinilo zmanjševanje amplitud iz preteklih štirih ciklov. Sedanji sončev cikel torej ni sledil napovedi, da bo daleč najšibkejši v zadnjih stot letih (Pesnell, 2013; Miesch, 2024).

2 GEOMAGNETNE NEVIHTE

Geomagnetne nevihte so največje motnje magnetnega polja Zemlje, ki nastajajo zaradi medsebojnega delovanja magnetosfere in povečane količine plazme, ki jo sončev veter velike hitrosti prinese s Sonca do Zemlje. Pri tem se v magnetosfero vnese velika količina energije. Čeprav je vsaka geomagnetna nevihta dogodek zase, pa vse povzročijo stiskanje magnetosfere na prisojni strani Zemlje in povečanje električnih tokov v njej, spreminjajo količino hladne plazme v sevalnih pasovih, povzročajo polarni sij ter spreminjajo dinamiko električnih tokov v ionosferi in telurskih tokov v zemeljski skorji in oceanih. Umirijo se najpozneje v 72 urah. Geomagnetne nevihte, ki jih povzročajo izbruhi na Soncu CME, so pogostejše v maksimumu, tiste, ki so povzročene zaradi CIR, pa so najpogostejše v času upadanja sončevega cikla. Izjemno močne geomagnetne nevihte so najpogostejše povezane z izbruhi CME (Nagatsuma, 2002; Echer et al, 2008). Po obliki njihovega magnetograma se geomagnetne nevihte delijo v dve skupini: na tiste z nenadnim začetkom (angl. *sudden commencement*) in preostale s postopnim začetkom (angl. *gradual commencement*) (Perreault in Akasofu, 1978; Kamide et al, 1998).

Jakost geomagnetnih neviht se določa z meritvami na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje na različnih geografskih širinah. Iz teh meritev izhaja indeks geomagnetne aktivnosti K (nem. *Kennziffer*, v logaritmu številka vrednost pred decimalno vejico), s katerim se opisuje geomagnetne razmere v horizontalni ravnini H [nT]. Primeren je za opis magnetnih razmer na posameznem geomagnetnem observatoriju na srednjih geografskih širinah. Za izračunavanje tega indeksa je izbran triurni interval v času UTC (angl. *Coordinated Universal Time*). Ta interval je dovolj kratek, da se z njim ločita dva zaporedna dogodka, nastala med dnevom. Z desetimi indeksi K se opiše geomagnetno dogajanje preko celega dneva. Indeks K je neimenovano število: 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 območjema polarnih sijev. Zato ima vsak observatorij svojo skalo indeksa K . Ta skala je logaritmične oblike, zato zadostuje, da ima posamezni observatorij določeno najmanjšo vrednost geomagnetne motnje pri največjem indeksu $K = 9$ (ISGI, 2023). Tako je skala posameznega geomagnetnega observatorija primerljiva s skalo referenčnega geomagnetnega observatorija NGK (Niemegk, Germany). Iz indeksov K se izračuna geomagnetna aktivnost posameznega dne, indeks A , ki je linearen in z vrednostmi od 0 do 400 (Mayaud, 1980; Čop, Deželjin in De Reggi, 2015).

Planetarni geomagnetni indeks K_p je srednja vrednost standardiziranih indeksov K trinajstih izbranih geomagnetnih observatorijev med 44° in 60° severne ali južne geografske širine. Vrednost tega indeksa se najprej napoveduje (angl. *estimated*) in nato naknadno obdeluje (angl. *postprocessing*) (Geomagnetic K_p , 2023). Po lestvici, določeni na podlagi planetarnega geomagnetnega indeksa K_p , se geomagnetne nevihte razvrščajo v pet razredov: G1 (minor, $K_p = 5$), G2 (moderate, $K_p = 6$), G3 (strong, $K_p = 7$), G4 (severe, $K_p = 8$) in G5 (extreme, $K_p = 9$) (NOAA, 2023).



Slika 2: Začetek močne geomagnetne nevihte, izmerjene na observatoriju PIA, ki je 11. maja 2024 dosegla geomagnetni indeks $K = 9$.

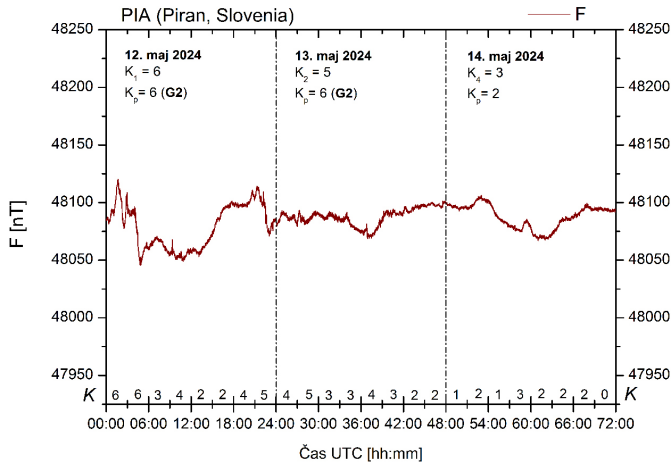
Za točnejše opredeljevanje geomagnetnih neviht se uporablja indeks Dst (angl. *disturbance storm time*, *Kyoto Dst*). Je asimetrična komponenta motenega magnetnega polja glede na geomagnetni dipol, določen na podlagi meritev na izbranih geomagnetnih observatorijih na nizkih geografskih širinah: HER (Hermanus, South Africa), KAK (Kakioka, Japan), HON (Honolulu, Hawaii) in SJG (San Juan, Puerto Rico) (Cid et al, 2014). Indeks Dst podaja približno jakost električnega toka, ki teče nad ionosfero v ekvatorialni ravnini Zemlje (angl. *ring current*). Ta tok, ki ga povzročajo protoni in elektroni iz sončevega vetra, oslabi geomagnetno polje na nižjih geografskih širinah. Na podlagi indeksa Dst so geomagnetne nevihte razdeljene v štiri kategorije: manjša (*minor*, $-50 \text{ nT} < Dst \leq -30 \text{ nT}$), zmerna (*moderate*, $-100 \text{ nT} < Dst \leq -50 \text{ nT}$), močna (*intense*, $-200 \text{ nT} < Dst \leq -100 \text{ nT}$) in zelo močna (*extra storm*, $Dst \leq -200 \text{ nT}$). Bolj ko je indeks Dst po svoji vrednosti negativen, močnejša je geomagnetna nevihta (Sugiura in Kamei, 1991; Gonzalez, Tsurutani in Clúa De Gonzalez, 1999).

3 MOČNA GEOMAGNETNA NEVIHTA V 25. SONČEVEM CIKLU

Na Soncu je 8. maja 2024 v skupini sončevih pegi AR3664 nastalo zaporedje izbruhov CME. Naslednjega dne je v isti pegi nastal še dodaten močan izbruh. Tako je v sončevem vetru proti Zemlji potovalo večje število zaporednih oblakov plazme s povečano hitrostjo. Ker se je predvidevala združitev dveh ali treh od njih v enega samega, naj bi po napovedi v zgodnjih jutranjih urah 11. maja 2024 nastala geomagnetna nevihta stopnje od G3 do G4 (Severe, 2024). 10. maja 2024, v maksimumu 25. sončevega cikla, je bila na observatoriju PIA izmerjena močna geomagnetna nevihta $K = 8$ in naslednji dan močna geomagnetna nevihta $K = 9$ (slika 2). Geomagnetna nevihta z nenadnim začetkom, prikazana na sliki 2, se je v naslednjih dveh dneh umirila (slika 3).

V sedemindvajsetih dneh, v enem efektivnem obratu Sonca (sinodična perioda za opazovalca na Zemlji je 27,275 dneva (Finley in Brun, 2023)), od 18. aprila do 14. maja 2024 je bila v 132. dnevnu na observatoriju PIA izmerjena močna geomagnetna nevihta z geomagnetnim indeksom $K = 9$. Geomagnetni ekvivalent za ta dan je dosegel vrednost $A = 150$ (slika 4). Velikosti tega indeksa v dneh z močnimi geomagnetnimi

nevihtami ($8 \leq K \leq 9$) izstopajo. Indeksi A v dneh z manjšimi ($K = 5$) ali večjimi geomagnetnimi nevihtami ($K = 6$) so namreč pod vrednostjo $A \leq 36,4$ (24,3 % od 150).



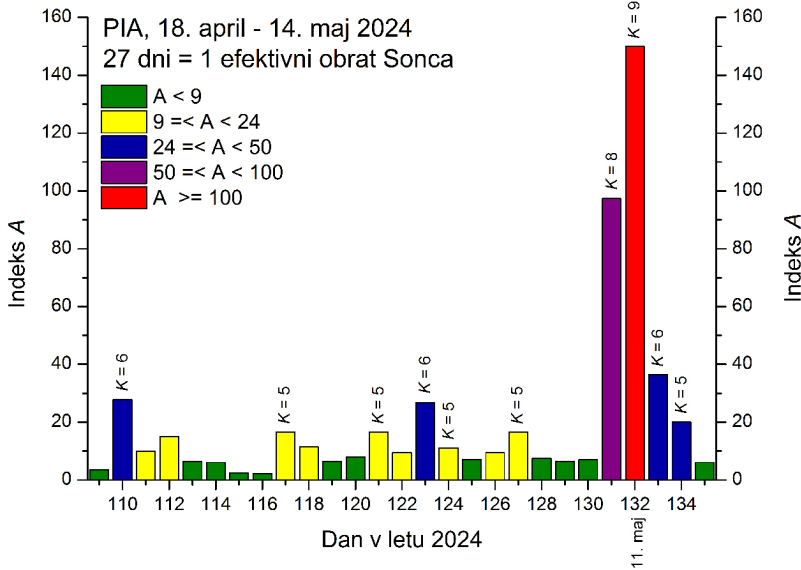
Slika 3: Umiranje močne geomagnetne nevihte, ki je 11. maja 2024 dosegla geomagnetni indeks $K = 9$ ter se 12. in 13. maja 2024 postopoma umirila; podatki izmerjeni na observatoriju PIA.

Geomagnetna nevihta, ki je 11. maja 2024 na planetarni ravni dosegla ekstremno stopnjo G5, je nastala po izbruhih CME v skupini sončevih peg AR3664, ki so se vrstili po 8. maju 2024. Velikost te pege se je potem, ko se je 1. maja 2024 pojavila na vzhodnem robu sončevega diska, postopoma povečala za več kot dvakrat. Dosegla je velikost sončeve pege, ki je od 1. do 2. septembra 1859 povzročila najmočnejšo do sedaj znano geomagnetno nevihto (angl. *Carrington event*). Take ekstremne geomagnetne nevihte so se v zadnjih petsto letih ponavljale na vsakih 40 do 60 let (Carrington, 1859; Cliver in Dietrich, 2013).

Geomagnetna nevihta 11. maja 2024 spada med dvajset največjih geomagnetnih neviht v zadnjih petsto letih. Povzročila je namreč polarni sij pod 30° magnetne širine (angl. *magnetic latitude*) tako na severni kot tudi na južni polobli: na Novi Kaledoniji (-26.4° magnetne širine) in v Portoriku (27.2° magnetne širine) (Phillips, 2024). Ekstremna geomagnetna nevihta je tudi dodatno naelektrila naš celotni planet za več kot štiri dni (Nicoll, 2014; Tacza, Li in Raulin, 2024). Izjemno močan sunek v sončevem vetru je iztiril satelite, ki krožijo okoli Zemlje, zato je bilo treba že 10. maja 2024 več kot pet tisočim popraviti položaj. V štirih dneh trajanja geomagnetne nevihte so se sateliti in vesoljski odpadki na nizki orbiti LEO (angl. *low Earth orbit*) pospešeno premikali proti Zemlji s hitrostjo 180 metrov na dan (Parker in Linares, 2024). Takšna močna geomagnetna nevihta vpliva tudi na satelitske navigacijske sisteme v celoti, potnike in posadke letal, radijske komunikacije in na elektroenergetska omrežja (Extreme, 2013). Glede teh vplivov in morebitnih poškodb se šele zbirajo podatki (Public Safety, 2024; Impeacts, 2024). Ta geomagnetna nevihta pa je dobila tudi svoje ime: Gannon (Lugaz et al., 2024).

Geomagnetno nevihto 11. maja 2024 lahko primerjamo s preteklimi velikimi geomagnetnimi nevihtami. Ekstremna geomagnetna nevihta v 23. sončevem ciklu z začetkom 29. oktobra 2003 je dosegla višek naslednji dan. 30. 10. 2003 je imela dva maksimuma: dopoldne $Dst = -353$ nT in v večernih urah $Dst = -383$ nT. Naslednja geomagnetna nevihta v istem sončevem ciklu, ki je bila 20. 11. 2003, je v večernih urah dosegla indeks $Dst = -422$ nT. V sedanjem 25. sončevem ciklu obravnavana ekstremna

geomagnetna nevihta 11. 5. 2024 je v dopoldanskih urah dosegla $Dst = -412$ nT (Geomagnetic Equatorial, 2024). Ta geomagnetna nevihta se je po učinku približala zaporedju geomagnetnih neviht izpred 20,6 leta.



Slika 4: Vrednosti linearnih geomagnetnih indeksov A v 27 dneh enega efektivnega obrata Sonca od 18. aprila do 14. maja 2024.

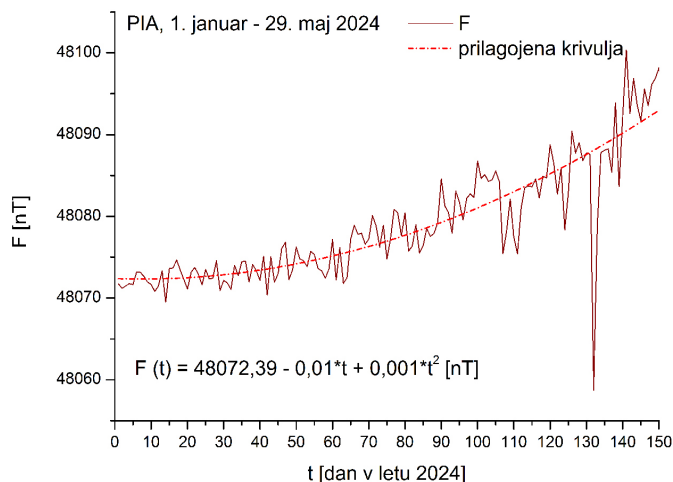
4 SPREMEMBA GOSTOTE ENERGIJE MAGNETNEGA POLJA ZEMLJE

Vrednostim gostote magnetnega polja F [nT] lahko prilagodimo ustrezno enačbo in krivuljo (angl. curve fitting). Postopek prilagoditve zagotavlja najmanjšo možno odstopanje enačbe in krivulje od uporabljenih podatkov (slika 5). Na podlagi te enačbe in krivulje lahko z veliko verjetnostjo napovemo spremembe gostote magnetnega polja F [nT], ki bodo nastale v bližnji prihodnosti. Ne moremo pa s tako enačbo in krivuljo napovedati nenadnih kratkotrajnih sprememb, ki od prilagojene krivulje odstopajo v obliki črke V. Glede na predhodne vrednosti se hitrost spremembe dF/dt [nT/dan] izkazuje kot skok v obliki stopnice, pospeški d^2F/dt^2 [nT/dan²] pa kot impulza na robu te stopnice. Te spremembe v magnetnem polju najboljše ovrednotijo spremembe gostote energije magnetnega polja w_{GM} [J/m³] (Jackson, 1998). Gostota energije geomagnetnega polja, ki je potrebna za oblikovanje tega polja, je namreč proporcionalna kvadratu gostote magnetnega polja F [nT] (1).

S slike 5 lahko razberemo očitno spremembo gostote lokalnega magnetnega polja na 131. dan v letu 2024 (11. maj 2024). Vrednosti F lokalnega magnetnega polja lahko uporabimo tudi za izračun gostote energije v lokalnem magnetnem polju, iz teh pa pospeške v njem.

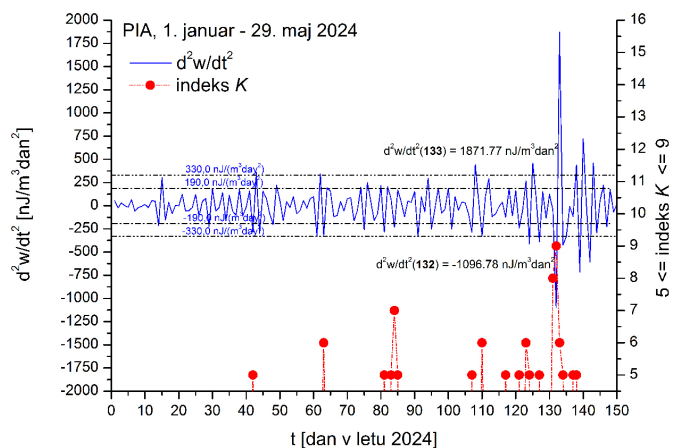
Energija, nakopičena v magnetnem polju v tuljavi, je enaka energiji, potrebni za oblikovanje tega polja (Halliday, Resnick in Walker, 2003; Lowrie, 2007). Gostota energije v magnetnem polju W/V je določena z enačbo (1), ki velja tudi za gostoto energije w v geomagnetnem polju w_{GM} [Ws/m³ = J/m³] v vakuumu.

$$w_{GM} = \frac{1}{V} = \frac{1}{m} F^2 \tag{1}$$



Slika 5: Sprememba gostote lokalnega magnetnega polja F [nT] v prvih 150 dneh v letu 2024 in tem merilnim podatkom prilagojeni enačba in krivulja.

Za merilne podatke na observatoriju PIA v prvih 150 dneh leta 2024 smo izračunali pospeške v gostoti energije v lokalnem magnetnem polju (slika 6). Mejno vrednost šuma teh pospeškov d^2w/dt^2 smo določili z analizo merilnih podatkov v celotnem letu 2021. V tem letu je bil 25. sončev cikel šele na začetku naraščanja in zato so bile geomagnetne nevihte le manjše do največ zmerne in ne pogoste. Pod vrednostjo $190 \text{ nJ/m}^3\text{dan}^2$, ki je zgornja meja šuma, je ostalo 80 % vseh vrednosti (pravilo 80/20) (Dunford et al., 2014). Nad to zgornjo mejo šuma je vmesno področje, ki je navzgor omejeno s spodnjo mejo zelo vplivnih pospeškov. V letu 2021 je bilo vsega 6 % teh zelo vplivnih pospeškov v gostoti energije geomagnetnega polja $d^2w/dt^2 \geq 330 \text{ nJ/m}^3\text{dan}^2$.



Slika 6: Pospeški v gostoti energije v lokalnem magnetnem polju, izmerjeni na observatoriju PIA, in stopnja geomagnetnih neviht v prvih 150 dneh v letu 2024.

S slike 6 je več kot očitna korelacija med pospeški v lokalnem geomagnetnem polju ter pojavnostjo geomagnetnih neviht. Posebno to velja za močna geomagnetne nevihte ($8 \leq K \leq 9$).

5 ANALIZA GEOMAGNETNIH SPREMENB NA OBSERVATORIJU PIA

Absolutne vrednosti gostote magnetnega polja Zemlje F [nT] (angl. *total intensity*), v prvih 150 dneh v letu 2024, smo izračunali iz izmerjenih komponent magnetnega polja na observatoriju PIA. Uporabili smo rezultate meritev z vektorskim magnetometrom, ki meri tri med seboj neodvisne komponente lokalnega magnetnega polja. Točnost izračunanih vrednosti F [nT] je zato slabša od 0,1 nT. Razlogi, da nismo uporabili točnejše absolutne vrednosti vektorja gostote magnetnega S [nT], merjene s skalarnim magnetometrom, so: a) daljša zgodovina merilnih podatkov iz vektorskega magnetometra na tem observatoriju; b) neposredna primerljivost prispevka posamezne komponente h gostoti magnetne energije w [J/m^3] in c) način določanja geomagnetnega indeksa K .

V članku smo geomagnetne indekse K uporabili kot izhodišče za primerjavo z vrednostmi pospeškov v gostoti energije lokalnega magnetnega polja d^2w/dt^2 [$\text{nJ}/\text{m}^3\text{dan}^2$]. Geomagnetni indeksi K , ki so v splošni uporabi od leta 1939, se določajo iz horizontalnih komponent gostote lokalnega magnetnega polja H [nT]. Te so neposredno pod vplivom motenj iz vesolja. Izhodišče za izračun indeksov K so geomagnetno mirni dnevi S_q (angl. *solar quiet*). Za izračunavanje posameznega indeksa je izbran triurni interval, ki je dovolj kratek, da se z njim ločita dva zaporedna dogodka, nastala med dnevom. Rezultate meritev na posameznih geomagnetnih observatorijih je mogoče med seboj tudi primerjati šele preko geomagnetnih indeksov (Čop, Deželjin in De Reggi, 2015).

Pospeški gostote energije magnetnega polja d^2w/dt^2 , izračunani iz meritev na observatoriju PIA v prvih 150 dneh v letu 2024, so glede na njihovo velikost omejeni na tri območja z mejama pri $190 \text{ nJ}/\text{m}^3\text{dan}^2$ in $330 \text{ nJ}/\text{m}^3\text{dan}^2$ (slika 6). Pospešek, ki se je začel 14. dan v letu 2024, ni nastal zaradi vplivov iz vesolja. Vplivi iz vesolja tudi niso povzročili pospeškov v gostoti energije magnetnega polja v 42., 61. in 107. dnevnu. Večje pospeške od 121. do 127. dneva je povzročilo zaporedje večjega števila manjših geomagnetnih neviht in ene zmerne med njimi. Izjemno močni pospeški so nastali zaradi zelo močne geomagnetne nevihte z geomagnetnim indeksom $K = 9$ v 132. dnevnu. Zaradi te nevihte, ki je dosegla pospešek $d^2w/dt^2 = 1871,77 \text{ nJ}/\text{m}^3\text{dan}^2$, se je gostota energije lokalnega magnetnega polja pospeševala še vse do 147. dne ali polnih 15 dni. Čeprav smo uporabili širše časovno okno ter enostavnejši način filtriranja in transformacije kot pri določevanju geomagnetnega indeksa K , je z izračunavanjem pospeškov v gostoti lokalnega magnetnega polja znan znatno daljši časovni vpliv močne geomagnetne nevihte na lokalno magnetno polje.

V naslednjih dveh letih, ko bo sedanji 25. sončev cikel še vedno v svojem maksimumu, sledijo raziskave glede vrednotenja vpliva geomagnetnih neviht zmerne kategorije ($6 \leq K \leq 7$). Njihov prispevek h gostoti energije lokalnega magnetnega polja je lahko zelo majhen, kot je to pri nevihti, ki je bila 84. dan v letu 2024. V tem primeru je potrebna podrobnejša analiza prispevkov posameznih komponent geomagnetnega polja, ki med seboj ne delujejo neodvisno, temveč povezano.

6 ZAKLJUČEK

Geomagnetne meritve, katerih rezultati so objavljeni v tem članku, so bile izvedene na observatoriju PIA, ki je zgrajen ob južnem robu zaselka Sikuri ($45^\circ 27' \text{ N}$; $13^\circ 41' \text{ E}$), delu vasi Sv. Peter nad Dragonjo. V mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET (angl. *International Real-time Magnetic Observatory Network*) je bil redno vključen 1. januarja 2015 kot geomagnetni observatorij skupine TEST. Rezultati meritev sprememb gostote lokalnega magnetnega polja F [nT], izmerjeni 11. maja 2024 na tem obser-

vatoriju, so bili v njegovi desetletni zgodovini meritev res izjemni. Zato se bodo ugotovitve iz meritev geomagnetne nevihte s stopnjo indeksa $K = 9$, ki je nastopila 11. maja 2024, uporabljali kot izhodišče za obdelavo rezultatov meritev predvsem v preteklih letih, ko so bili na ozemlju Slovenije izmerjeni zelo vplivni pospeški v gostoti energije geomagnetnega polja in niso izvirali iz vesolja. Bodo pa te ugotovitve tudi pomembna pomoč pri analizi rezultatov meritev na observatoriju PIA, ki bodo izmerjeni v prihodnje.

Literatura in viri:

- Carrington, C. R. (1859). Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – MNRAS*, 20, 13–15. DOI: 10.1093/mnras/20.1.13
- Cid, C., Palacios, J., Saiz, E., Guerrero, A., Cerrato, Y. (2014). On extreme geomagnetic storms. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 4, A28. DOI: 10.1051/swsc/2014026
- Clette, F., Lefèvre, L., Chatzistergos, T., Hayakawa, H., Carrasco, V. M. S., Arlt, R., Cliver, E. W., Dudok de Wit, T., Friedli, T. K., Karachik, N., Kopp, G., Lockwood, M., Mathieu, S., Muñoz-Jaramillo, A., Owens, M., Pesnell, D., Pevtsov, A., Svalgaard, L., Usoskin, I. G., Van Driel-Gesztelyi, L., Vaquero, J. M. (2023). Recalibration of the Sunspot-Number: Status Report. *Solar Physics*, 298 (44). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02136-3>
- Cliver, W. E., Dietrich, F. W. (2013). The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A31. DOI: 10.1051/swsc/2013053
- 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. (2020). 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 – SZGG*, 21–28.
- Čop, R., Deželjin, D., De Reggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K . *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697–708. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.697-708
- Čop, R., Jere Jakulin, T. (2022). The influence of the Sun on our lives. *International Journal for Quality Research*, 16 (3), 703–716. DOI: 10.24874/IJQR16.03-03
- Dunford, R., Su, Q., Tamang, E., Wintour, A. (2014). The Pareto Principle. *Plymouth Student Scientist*, 7 (1), 140–148.
- Echer, E., Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., Gonzalez, A. L. C. (2008). Interplanetary conditions causing intense geomagnetic storms ($Dst \leq 100$ nT) during solar cycle 23 (1996–2006). *Journal of Geophysical Research*, 113, A05221. DOI: 10.1029/2007JA012744.
- Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure. London (UK): Royal Academy of Engineering, 2013.
- Finley, A. J., Brun, A. S. (2023). Accounting for differential rotation in calculations of the Sun's angular momentum-loss rate. *Astronomy & Astrophysics*, 674, A42. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245642>
- Geomagnetic Equatorial Dst index Home Page. (2024). Kyoto (Japan): World Data Center for Geomagnetism, 1957. <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>, pridobljeno 23.6.2024
- Geomagnetic Kp index (2023). Potsdam (Germany): Helmholtz-Zentrum Potsdam – Deutsches Geoforschungszentrum GFZ. <https://kp.gfz-potsdam.de/en/>, pridobljeno 3. 12. 2023.
- Gonzalez, D. W., Tsurutani, T. B., Clúa De Gonzalez, L. A., (1999). Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Review*, 88, 529–562. DOI: 10.1023/A:1005160129098
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2003). *Fundamentals of Physics. 9th edition – extended. Parts 3 and 4.* Hoboken (NJ, US): John Wiley & Sons.
- Hesse, M., Cassak, P. A. (2020). Magnetic reconnection in the space sciences: Past, present, and future. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2018JA025935. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JA025935>
- Impacts of the Extreme Gannon Geomagnetic Storm of May 2024 throughout the Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere System (2024). <https://www.frontiersin.org/research-topics/65596/impacts-of-the-extreme-gannon-geomagnetic-storm-of-may-2024-throughout-the-magnetosphere-ionosphere-thermosphere-system>, pridobljeno 31. 7. 2024.
- ISGI – International Service of Geomagnetic Indices (2023). Strasbourg (France): SIIG/ISGI, 2013. <https://isgi.unistra.fr/>, pridobljeno 3. 12. 2023.
- Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics. Third edition.* New York: Wiley, 212–215.
- Kamide, Y., Yokoyama, N., Gonzalez, W., Tsurutani, B. T., Daglis, I. A., Brekke, A., Masuda, S. (1998). Two-step development of geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 103 (A4), 6917–6921. DOI: <https://doi.org/10.1029/97JA03337>
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics. Second edition.* Cambridge (UK): Cambridge University.
- Lugaz, N., Knipp, D., Morley, S., Liu, H., Hapgood, A. M., Carter, B., Zou, S., Lei, J., Welling, D. (2024). In Memoriam of Editor Jennifer L. Gannon. *Space Weather*, 2024, 22 (6), 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1029/2024SW004016>
- Maunder, E. W. (1904). Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874–1902. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 64, 747–761.
- Mayaud, P.N. (1980). *Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. Gophysical monograph 22.* Washington (DC, US): American Geophysical Union, 1980.
- Miesch, M. (2024). *Solar Cycle Progression Updated Prediction (Experimental): Validation Document.* Boulder (CO, US): University of Colorado Boulder; Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences – CIRES; NOAA Space Weather Prediction Center.
- Mihajlović, J. S., Čop, R., Palangio, P. (2010). The Structure of the Big Magnetic Storms. *Geologica Macedonica*, 24 (1/2), 1–12.
- Nagatsuma, T. (2002). 3–5 Geomagnetic Storms. *Journal of the Communications Research Laboratory*, 49 (3), 139–154.

- NOAA Space Weather Scales (2023). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA; National Centers for Environmental Prediction.
- Nicoll, K. A. (2014) Space weather influences on atmospheric electricity. *Weather*, 2014, 69 (9). 238-241. DOI: <https://doi.org/10.1002/wea.2323>
- Parker, E. W., Linares, R. (2024). Satellite Drag Analysis During the May 2024 Geomagnetic Storm. *arXiv: Earth and Planetary Astrophysics; Space Physics*, 12 Jun 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.08617>
- Public Safety and Homeland Security Bureau Seeks Commitment on the Impacts of the May 2024 Geomagnetic Storm on the U.S. Communications Sector. DA-24-493. Washington (DC, US): Federal Communications Commission - FCC, May 24, 2024.
- Perreault, P., Akasofu, S.-I. (1978). A study of geomagnetic storms. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 54, 547-573. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb05494.x>
- Pesnell, W. D. (2013). Solar Cycle Predictions. Document ID: 20120008362. Greenbelt (MD, US): NASA Goddard Space Flight Center.
- Phillips, T. (2024). South Pacific Auroras Confirm May 10th Was a Great Storm. <https://spaceweatherarchive.com/2024/05/19/rare-south-pacific-auroras/>, pridobljeno 19. 5. 2024.
- Reyes, I. P., Pinto, A. V., Moya, S. P. (2021). Geomagnetic Storm Occurrence and Their Relation With Solar Cycle Phases. *Space Weather*, 19, e2021SW002766. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021SW002766>
- Severe geomagnetic storm watch (2024). *SpaceWeather.com*, 2019-2021. <https://www.spaceweather.com/archive.php?view=1&day=09&month=05&year=2024>, pridobljeno 9. 5. 2024.
- 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>, pridobljeno 15. 6. 2024.
- Sugiura, M., Kamei, T. (1991). Equatorial Dst index 1957 - 1986. *IAGA Bulletin N° 40*. Saint-Maure-des-Fosses (France): ISGI Publication Office.
- Tacza, J. L. G., Raulin, J.-P. (2024). Effects of Forbush Decreases on the global electric circuit. *Space Weather*, 22, e2023SW003852. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023SW003852>.



Čop R. (2024). Spremembe v gostoti energije magnetnega polja Zemlje med geomagnetno nevihto G5 11. maja 2024.

Geodetski vestnik, 68 (3), 360-369.

DOI: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2024.03.360-369>

ddr. Rudi Čop, univ. dipl. inž. elek.

Zavod Terra Viva

Sv. Peter 115, SI-6333 Sečovelje/Sicciole

e-naslov: rudi.cop@ezs-zveza.si