

# Geomagnetne nevihte ob koncu cikla sončnih peg

Rudi Čop<sup>1</sup>

## Povzetek

Geomagnetne nevihte nastajajo ob povečani aktivnosti Sonca. Najstarejši način ugotavljanja te aktivnosti je štetje sončnih peg na vidni strani sončnega diska. Danes to aktivnost spremljamo s pomočjo instrumentov na vesoljskih plovilih. Ob času pomladnih in jesenskih enakonočij in ob nekaterih prehodih Zemlje skozi mejno področje magnetnega polja v medplanetarnem prostoru se poveča število tako polarnih sijev kot geomagnetnih neviht. Geomagnetne nevihte lahko povzročajo izbruhi v koroni Sonca ali prehodi Zemlje preko tokovnic sončnega vetra z različno hitrostjo in gostoto. Učinki interakcije medplanetarnega in zemeljskega magnetnega polja se ne kažejo enako po celotni zemeljski obli. Magnetogrami geomagnetnih neviht, izmerjeni na geomagnetnih observatorijih v srednjem širinskem pasu niso enaki magnetogramom, izmerjenih v ekvatorialnem pasu ali v polarnem območju. V članku so obdelani tipični primeri geomagnetnih neviht, izmerjeni na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia) tekom leta 2016. Aktivnost Sonca je bila v tem letu zelo majhna, ker je cikel sončnih peg postopoma prehajal v obdobje svojega minimuma.

**Ključne besede:** izvori geomagnetnih neviht, sončni cikli, mejno področje magnetnega polja v medplanetarnem prostoru, ekvatorialni krožni električni tok

**Key words:** sources of geomagnetic storms, solar cycles, heliospheric current sheet, equatorial ring current

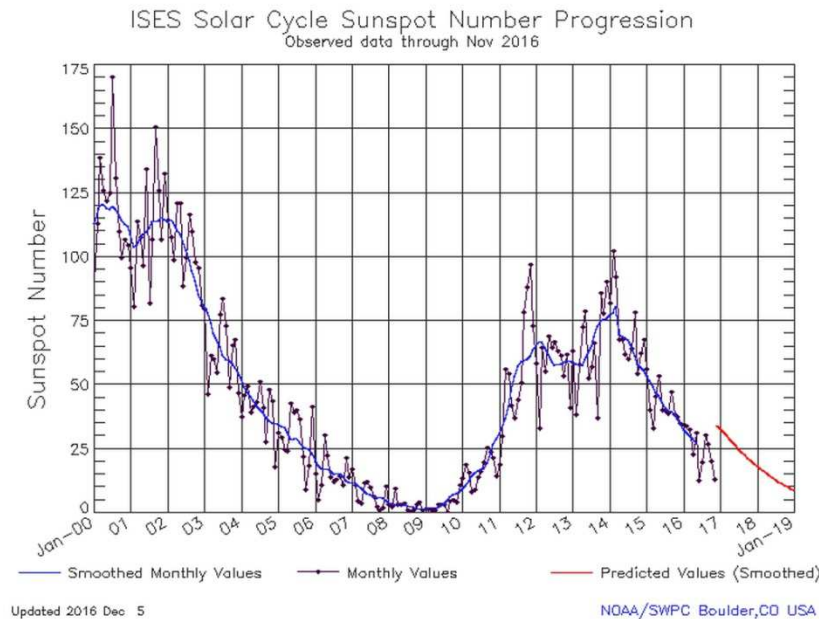
## Ciklične spremembe števila geomagnetnih neviht

Geomagnetne nevihte so močne in nestalne spremembe zemeljskega magnetnega polja. Nastajajo zaradi udarnih valov, nastalih v sončnem vetru (Čop, 2016) 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 (Lakhina & Tsurutani, 2016). V primeru, da je magnetno polje IMF (angl. interplanetary magnetic field) v medplanetarnem prostoru v bližini Zemlje obrnjeno v južno smer, potem se le-to poveže z zemeljskim magnetnim poljem in se zato v magnetosferi ustvarijo razpoke (Parker, 2001; Rangarajan & Barreto, 2000). Skozi te razpoke nato vdre sončni veter in vpliva tako na magnetosfero kot tudi na celotno atmosfero. Geomagnetne nevihte je mogoče meriti na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje. Stanje vremena v vesolju v bližini Zemlje (angl. space weather) (Kane, 2006), ki pogojuje njihov nastanek, merimo s pomočjo merilnih instrumentov na vesoljskih plovilih.

Pogostnost geomagnetnih neviht je vezana na cikel sončnih peg (Maunder, 1904; Geomagnetic Storms, 2011) in je največja v času njegovega maksimuma ter v času njegovega pojanja. Tako v ciklu sončnih peg kot v ciklu geomagnetnih neviht je zaznaven 27 dnevni efektivni obrat Sonca (Reuveni & Price, 2009) in 22 letni cikel preklonov njegovih magnetnih polov (Mursula et al., 2002). Velik del geomagnetnih neviht se namreč ponavlja v ritmu efektivnega obrata Sonca (Dan et al., 2014) (Slika1). Zaradi tega so geomagnetne nevihte napovedljive, predvsem tiste z manjšo jakostjo.

---

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



Slika 1 - Potek druge polovice 23. in sedanjega 24. sončnega cikla (Solar Cycle Progression, 2016). V krivulji, ki ni glajena, so opazni učinkoviti obrati Sonca.

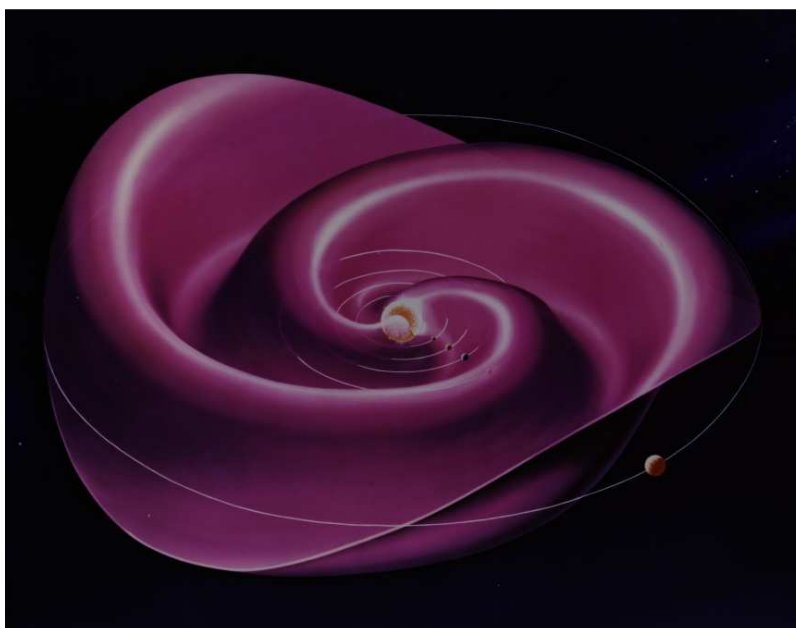
Osnovno določilo za aktivnost Sonca je število in površina sončnih peg v posameznem dnevu leta, opaženih na vidnem delu sončnega diska (Hathaway, 2010; Svalgaard, 2013). Solarna aktivnost ni določena s številom sončnih peg samo zaradi enostavnosti in točnosti tega določevanja, temveč tudi zaradi dolžine teh opazovanj, ki se merijo v stoletjih. Sončne pege so temnejši deli sončeve površine, v katerih magnetno polje iz notranjosti Sonca prodre na površino in se v obliki zank zaključuje nad njo. Število sončnih peg se povečuje in zmanjšuje v periodah, ki v povprečju trajajo nekaj več kot 11 let. Vendar se aktivnost Sonca ne opisuje le s številom sončnih peg, temveč tudi z njegovim sevanjem elektromagnetnih valov dolžine 10,7 cm, emisijo elementarnih delcev velikih energij SEP (angl. solar energetic particles) ter številom sončnih bakel in izbruhov v koroni Sonca CME. Vsa ta opazovanja je mogoče uspešno opraviti le iz vesoljskih plovil. Opazovanje Sonca s pomočjo solarnih radioteleskopov pa je mogoče tudi iz površine Zemlje in to ob vsakem vremenu. Jakost mikrovalov dolžine 10,7 cm (2,8 GHz) izsevanih iz Sonca (angl. solar flux) je namreč proporcionalna jakosti tako njegovih žarkov X kot tudi jakosti celotnega spektra ultravijoličnih žarkov. Je v korelaciji s stopnjo ionizacije atmosfere in je zato jakost mikrovalov frekvence 2,8 GHz skupaj z geomagnetnimi indeksi pomembna za napoved širjenja elektromagnetnih valov skozi zemeljske zračne plasti (Tohmatsu, 1990; Eddy, 2009).

Že pred stoletji so opazili, da se pogostnost polarnih sijev poveča na vsake pol leta. Po začetku sistematičnih geomagnetnih meritev v prvi polovici devetnajstega stoletja je bil tudi v njih prepoznan vzorec polletne spremenljivosti. Polletne spremembe geomagnetne aktivnosti poskušajo razložiti s pomočjo relativnih sprememb položaja Zemlje glede na vidni disk Sonca, relativnih sprememb položaja osi vrtenja Zemlje glede na zveznico med njo in Soncem ter na osnovi šestmesečne spremembe medplanetarnega magnetnega polja, obravnavanega v solarnih koordinatah (Russell & McPherron, 1973; Clivera, et al., 2002). Nobena od teh skupin razlag pa ne uspe vključiti tudi dnevne spremembe zemeljskega magnetnega polja, izmerjene na površini Zemlje. Na polletne spremembe geomagnetne aktivnosti očitno močno vplivajo medsebojna povezava (interakcije) sončnega vetra in magnetosfere Zemlje ter prenos energije med njima. Te povezave se v zadnjem desetletju

pospešeno raziskuje s floto satelitov, ki preletavajo območje zemeljske magnetosfere (Blagau, 2007; Choi, 2016).

### **Prehod Zemlje skozi mejno področje magnetnega polja v medplanetarnem prostoru**

Na osnovi meritev medplanetarnega magnetnega polja, ki so se začele v šestdesetih letih preteklega stoletja s pomočjo satelitov, je bil potrjen obstoj najprej sončnega vetra, nato pa še medplanetarnega magnetnega polja (Ness, 1967). Najprej so bile te meritve narejene okoli Zemlje, z razvojem satelitske, telekomunikacijske in merilne tehnike pa tudi v preostalem medplanetarnem prostoru vse do roba heliosfere (Burlaga, et al. 2008). Vzporedno so se razvijali tudi ustrezni matematični modeli medplanetarnega magnetnega polja (Zhao & Hoeksema, 1994; Linker, 1998). Znanje o njem pa se še vedno dopolnjuje.



Slika 2 - Risba mejnega področja magnetnega polja v medplanetarnem prostoru s Soncem v sredini. Njegovo magnetno polje je v začetni fazi sončnega cikla bipolarno (Artist's Conception, 2006).

Izvor magnetnega polja v medplanetarnem prostoru je Sonce, sončni veter pa ga po tem prostoru raznaša v radialni smeri (Boberg, et al., 2002). Ta izhodiščna razlaga se je postopoma dopolnila z ugotovitvijo, da se medplanetarno magnetno polje začneja oblikovati v sončevi fotosferi. Z oddaljenostjo od Sonca se sicer zamotana podoba magnetnega polja v njegovi fotosferi vedno bolj poenostavlja. Na oddaljenosti okoli 2,3 polmera Sonca se v njegovem ekvatorialnem delu ustvari enotno mejno področje, ki deli medplanetarni prostor v dva dela. V enem delu je magnetno polje usmerjeno proti, v drugem pa od Sonca. V tem solarnem mejnem področju tečejo električni toki (angl. heliospheric current sheet). Tokovna plošča, ki obdaja Sonce, je nagnjena glede na njegov ekvator za  $15^\circ$ .

Tokovni disk, ki obkroža Sonce in se širi po celotni heliosferi, obstaja v območju, kjer sončevo magnetno polje spremeni svojo smer. V tem tokovnem disku nastajajo valovi majhnih amplitud, podobni Alfvenovim strižnim valovom (Wilcox & Scherrer, 1981;

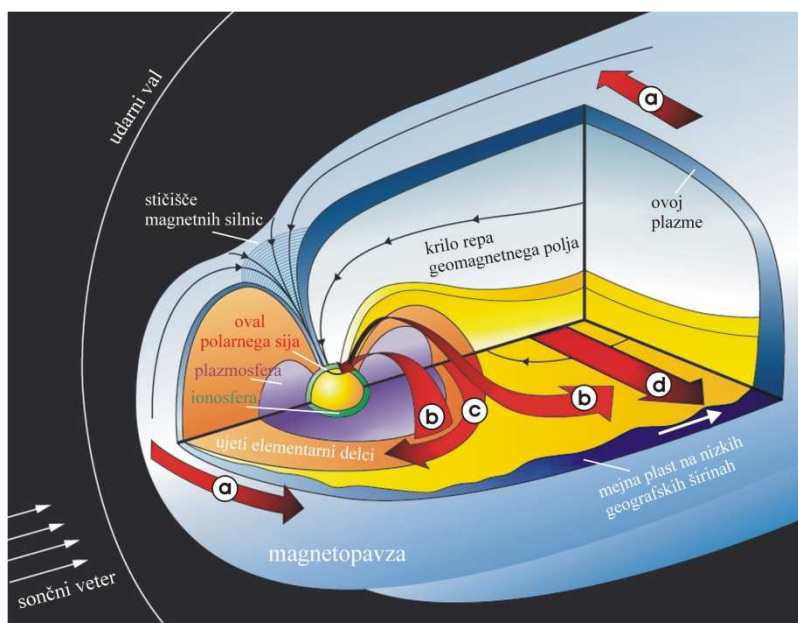
Bertin & Coppi, 1985). Zaradi vrtenja nam najbližje zvezde se ti valovi oblikujejo v spirale (Gekelman, et al., 1997).

Celotno mejno področje preoblikujejo spremembe v sončnem vetru, ki se širijo v medplanetarni prostor s povprečno hitrostjo med 300 in 800 km/s (Svalgaard & Wilcox, 1976). Za krajši ali daljši čas pa nanj močno vplivajo izbruhi v koroni Sonca CME (Kataoka, et al., 2009). Skoraj v celotnem sončnem ciklu je oblika mejnega področja medplanetarnega magnetnega polja rezultat bipolnega magnetnega polja Sonca (Slika 2) z motnjami, ki jih ustvarja njegovo štiri-polno magnetno polje. Štiri-polno magnetno polje se pojavi okoli maksimuma sončnega cikla. V samem maksimumu, ob preklopu magnetnih polov na Soncu, pa postane oblika magnetnega polja Sonca zelo komplicirana (Hudson, et al., 2015).

Solarno mejno področje zajema celotni solarni sistem in je eno največjih struktur v njem. Med seboj ločuje področja z nasprotno usmerjenostjo medplanetarnega magnetnega polja. Zemlja pri svojem obhodu okoli Sonca to strukturo večkrat prečka. Preide jo v nekaj urah do največ v nekaj dneh, kar pomeni, da je relativno zelo tanka. Ker v njej tečejo električni toki, so ob prehodu Zemlje skozi pogostejši polarni siji in geomagnetne nevihte.

### Krožni električni tok

Krožni električni tok (angl. ring current) teče v ravnini geomagnetnega ekvatorja znotraj magnetosfere (Slika 3). V času geomagnetnih neviht povzroča znatne spremembe zemeljskega magnetnega polja v krajih z nižjo geografsko širino (Kobe, et al., 1998; Egeland & Burke, 2012).



Slika 3 - Poenostavljena slika magnetosfere s prisojne strani Zemlje z električnimi toki: a) na dnevni in na nočni strani magnetopavze; b) vzdolž magnetnih silnic Zemlje (FAC - field-aligned current, Birkeland current); c) krožni električni tok v ravnini ekvatorja; in d) prečni električni tok v repu magnetosfere (Eddy, 2009).

Prvi je teorijo o obstoju krožnega električnega toka objavil norveški matematik in fizik Carl Størmer (1874-1957) leta 1910 (Egeland & Burke, 2013). Z njo je razložil premik polarnih sijev od polov proti ekvatorju v času močnih geomagnetnih neviht. S to teorijo pa se ni dalo razložiti prehoda elementarnih delcev iz sončnega vetra med plasti magnetosfere, kjer tvorijo krožni električni tok.

Z odkritjem šibkega toda stalnega medplanetarnega magnetnega polja in njegove povezave z magnetnim poljem Zemlje (merging – reconnection model) (Reconnection of Magnetic Fields, 2007) je bil odkrit tudi mehanizem vnosa elementarnih delcev sončnega vetra v magnetosfero, v plazmosfero. Še vedno pa je neznan mehanizem pospeševanja sicer hladnih ionov kisika  $O^+$  na energijski nivo krožnega električnega toka (Kistler, 2017; Moore et al., 2017), ali z drugimi besedami, ni še razložen način prenosa energije na te pozitivne ione.

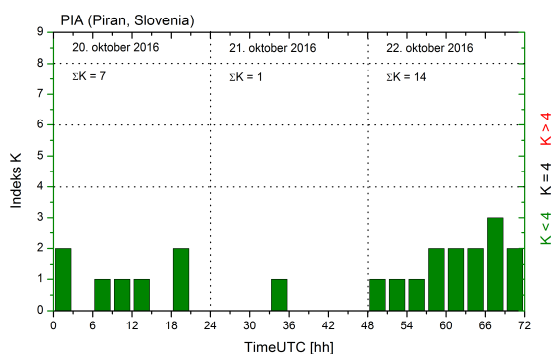
### Geomagnetno miren dan

Na geomagnetnem observatoriju PIA se za zvezno registracijo sprememb zemeljskega magnetnega polja uporablja triosni magnetometer fluxgate. Iz eno-sekundnih merilnih podatkov, ki jih magnetometer izmeri, se skoraj v realnem času izračunajo enominutne srednje vrednosti, iz njih pa nato geomagnetni indeksi  $K$  (Čop, et al., 2015). Indeks  $K$  podaja relativno spremembo v triurnem časovnem intervalu glede na geomagnetno miren dan. Izračunan je iz meritve horizontalnih komponent zemeljskega magnetnega polja na posameznem geomagnetnem observatoriju v času UTC (Coordinated Universal Time). Vrednosti tega indeksa so prilagojene vsakemu geomagnetnemu observatoriju posebej. V daljšem časovnem obdobju se njegove vrednosti ponovijo na vseh observatorijih približno enako krat. Ker je indeks  $K$  logaritmične oblike, bi bila zato dnevna vsota vrednosti vseh osmih indeksov posameznega dneva geometrijska vsota (Understanding Solar Metrics Data, 2015). Linearni ekvivalent geomagnetnega indeksa  $K$  je indeks  $a$  (preglednica 1). Vsota vseh osmih indeksov  $a$  posameznega dne je indeks  $A$ , ki pa je aritmetična vsota.

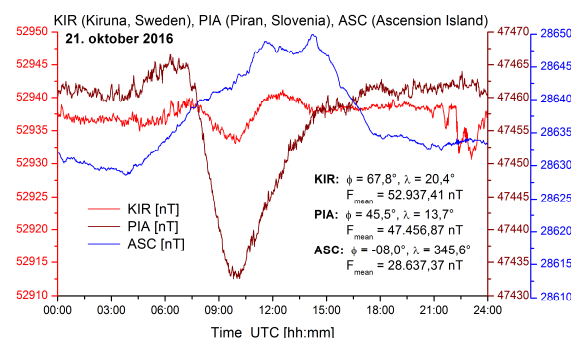
Preglednica 1 - Geomagnetni indeks  $K$  in  $a$  ter stanje geomagnetnega polja.

Indeks:	Vrednosti:									
$K$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a$	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400
Stanje:	mirno	mirno	nestanovitno	razburkano	geomagnetna nevihta					
Nevihta:					manjša	zmerna	močna	huda	ekstremna	
					G1	G2	G3	G4	G5	

Geomagnetno zelo miren dan je določen s pomočjo geomagnetnih indeksov  $K$  (Čop, et al., 2015), kot primer so izračunani na osnovi meritev na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia) (Slika 4). 21. oktobra 2016 je bila na tem observatoriju vsota geomagnetnega indeksa  $\Sigma K = 1$ ,  $A = 3$ , na planetarni ravni pa  $\Sigma K_p = 3$ ,  $A_p = 9$  (Preglednica 1). Observatorij PIA leži v srednjih severnih geografskih širinah na  $\phi = 45,5^\circ$ . Na ta geomagnetno zelo miren dan je bila izmerjena absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja  $F$  [nT] na treh geomagnetnih observatorijih na zelo različnih geografskih širinah (Slika 5). V meritvi opravljeni na observatoriju ASC (Ascension Island) se opazi vpliv krožnega električnega toka. Ta observatorij leži v ekvatorialnem pasu na južni geografski širini  $\phi = 8,0^\circ$ .



Slika 4 - Vrednosti lokalnih geomagnetnih indeksov  $K$  na observatoriju PIA od 20. do 22. oktobra 2016.



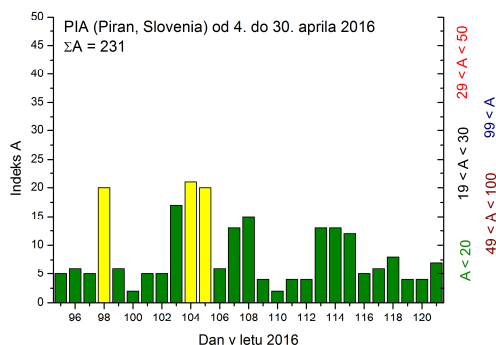
Slika 5 - Magnetogrami izmerjeni 21. oktobra 2016 na treh geomagnetnih observatorijih z različno geografsko širino.

### Geomagnetne nevihte v začetku maja 2016

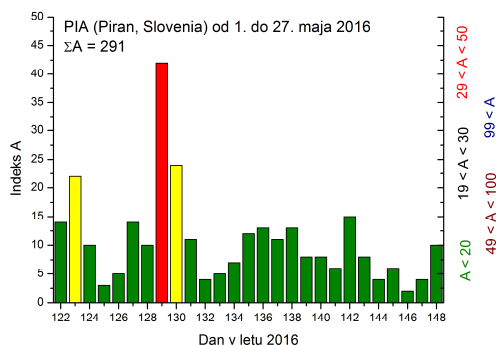
Geomagnetne nevihte v začetku maja 2016 spadajo v opazovano obdobje dveh učinkovitih obratov Sonca, ki vsak traja po 27 dni (Wilcox et al., 1974; Švestka, 1968). Opazovano obdobje se je začelo 4. aprila 2016 in se je končalo 27. maja 2016. Sonce je bilo preko vsega opazovanega obdobja zelo mirno. Ni bilo zaznanih izbruhov v koroni Sonca CME, zato je bilo geomagnetno polje pretežno mirno in le občasno zmerno razburkano (Preliminary Report, 2016a).

2. aprila 2016 je Zemlja v nekaj urah prešla prehodni del medplanetarnega magnetnega polja. Ob tokratnem prehodu skozi to območje je Zemlja prišla v območje negativnega magnetnega polja (Preliminary Report, 2016a). Medplanetarno magnetno polje s tako usmeritvijo ima komponento  $Z$  usmerjeno proti jugu in se zelo lahko poveže z magnetnim poljem Zemlje. Zato so se v opazovanem obdobju pojavili spomladanski polarni siji in ponavljajoče se geomagnetne nevihte. Te nevihte so bile v opazovanem obdobju povzročene izključno zaradi prehodov Zemlje preko tokovnic hitrejšega sončnega vetra, ki je izhajal iz lukenj v koroni Sonca.

V prvih 27 dneh opazovanega obdobja od 4. do 30. aprila 2016, od 95. do 121. dneva v letu 2016, sta bili na observatoriju PIA registrirani dve geomagnetni nevihti (Slika 6), na planetarni ravni pa tri. V drugem učinkovitem obratu Sonca, ki je trajal od 1. do 27. maja 2016 ali od 122. do 148. dneva v letu 2016, sta bile registrirani tako na observatoriju PIA kot tudi na planetarni ravni dve geomagnetni nevihti (Slika 7). V vsem opazovanem obdobju nobena od geomagnetnih neviht ni preseгла zmerne stopnje G2 (angl. moderate) (Preglednica 1) (NOAA, 2011; Poole, 2000). Dnevna geomagnetna aktivnost, ki je bila izmerjena na observatoriju PIA, je izražena s 24-urnim geomagnetnim indeksom  $A$ . V celotnem prvem delu opazovanega obdobja je bila ta aktivnost, podana kot vsota posameznih dnevnih aktivnosti,  $\Sigma A = 231$ , v drugem pa  $\Sigma A = 291$  ali za 1/4 večja (25,97%) od predhodnega obdobja.



Slika 6 – Lokalni geomagnetni indeks A za posamezni dan od 4. do 30. aprila 2016.



Slika 7 – Lokalni geomagnetni indeks A za posamezni dan od 1. do 27. maja 2016.

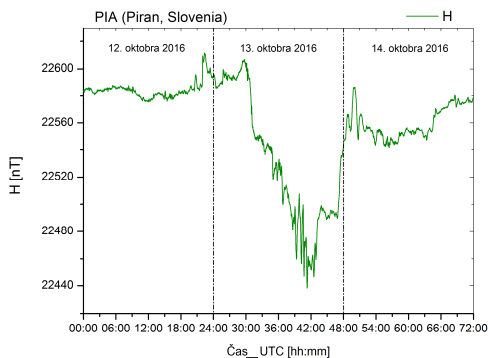
Iz luknje v koroni Sonca izhajajoči sončni veter povečane hitrosti je povzročil geomagnetno nevihto 8. maja 2016 (129 dan v letu 2016), ki je trajala preko 24 ur. Bila je najmočnejša v prvi polovici leta 2016 in je na nekaterih delih planeta dosegla stopnjo G3 (angl. strong). Ta luknja v koroni Sonca je nato zašla za zahodnim limbom sončnega diska. Že po koncu opazovanega obdobja se je ponovno pojavila na vzhodni strani Sonca. Ponovno je povzročila geomagnetno nevihto 4. in 5. junija 2016. Tokrat je bila šibkejša kot v predhodnem efektivnem obratu Sonca od 1. do 27. maja 2016, kljub temu pa je na višjih geografskih širinah zaznavno vplivala na elektroenergetske sisteme in na širjenje radijskih signalov. Vesoljska plovila so se zaradi povečane hitrosti sončnega vetra težje samodejno orientirala, v nižjih orbitah pa se je povečal pritisk nanje (Extreme space weather, 2013).

### Dva izvora geomagnetnih neviht

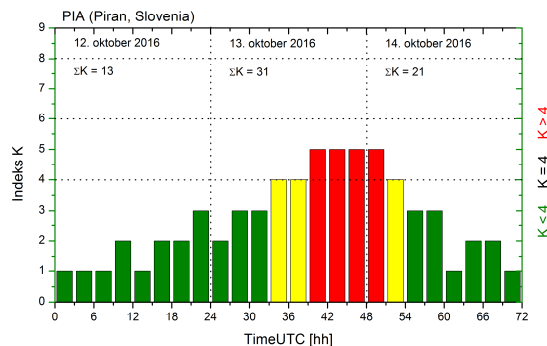
8. oktobra 2016 okoli 16:00 UTC je na severni polobli Sonca nastala eksplozija v njegovem magnetnem polju, ki je kot izbruh v koroni CME odnesla sončevo plazmo v medplanetarni prostor (Preliminary Report, 2016b). Ta prehodni pojav v heliosferi je zemeljsko magnetosfero dosegel 12. oktobra malo pred koncem tega dneva (Slika 8). Najprej je bil zaznan nenadni impulz v zemeljskem magnetnem polju. Ker je bila magnetna orientacija izbruha v koroni Sonca, ki je ta dan dosegel Zemljo, v smeri proti jugu, sta se obe magnetni polji med seboj povezali in povzročili geomagnetno nevihto. Ta je naslednji dan dosegla stopnjo G1 (angl. minor), ki se je nato 14. oktobra 2016 umirila (Slika 9).

Med 11. in 12. oktobrom 2016 je na južni polobli Sonca v koroni nastala obsežna luknja. Iz nje je v smeri proti Zemlji izhajal sončni veter večje hitrosti, ki je Zemljo dosegel 16. oktobra 2016. Na prednjem robu toka sončnega vetra s povečano hitrostjo je bilo prehodno območje med tistim z nižjo in tistim z višjo hitrostjo. Ta prehod je skupaj z razliko gradienta gostote delcev sončnega vetra ter ustrezna usmerjenost spremljajočega magnetnega polja povzročil geomagnetno nevihto značilne oblike (Slika 10, Slika 11).





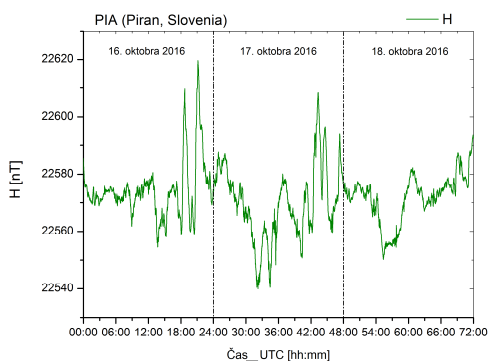
Slika 8 - Na observatoriju PIA izmerjena sprememba horizontalne komponente geomagnetnega polja H v dneh od 12. do 14. oktobra 2016.



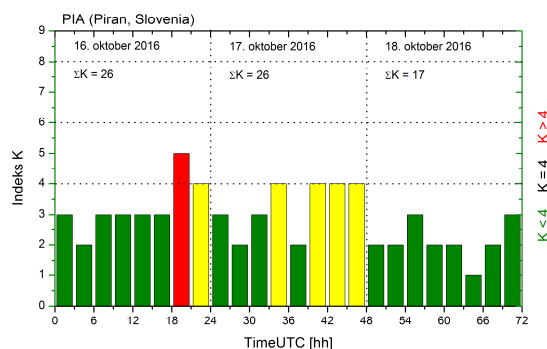
Slika 9 – Lokalni geomagnetni indeksi K izračunani na osnovi meritev na observatoriju PIA v treh zaporednih dneh od 12. do 14. oktobra 2016.

### Zaključki

V letu 2016 ni bilo mogoče opaziti sončnih peg na Soncu tudi po ves teden. To se je zgodilo prvič po letu 2010, ko se je zaključil predhodni sončni cikel. Torej tudi sedanji 24. sončni cikel prehaja v obdobje minimuma. Iztekel pa se bo v letu 2019 ali 2020, ko sončne pege ne bodo vidne tudi po ves mesec. Manjše število sončnih peg pomeni, da je sončnih bakel vse manj in da so izbruhi v koroni Sonca CME vse redkejši. Čeprav je Sonce mirno, pa je stanje v vesolju okoli Zemlje le spremenjeno glede na obdobje maksimuma. Zgornje zračne plasti Zemlje so se skrčile. Pogoji širjenja elektromagnetnih valov skozi zračne plasti so se torej spremenili kot tudi pogoji kroženja predmetov okoli Zemlje na nizkih orbitah. Zaradi manjše aktivnosti Sonca se je skrčila tudi celotna heliosfera in medzvezdni prostor se je približal Zemlji. Zato se je povečala emisija kozmičnih žarkov na njeno površino. Subatomske delci velikih energij, ki sestavljajo kozmične žarke, pa pospešujejo tvorbo oblakov v nižjih plasteh Zemljine atmosfere (Svensmark, 2000).



Slika 10 - Na observatoriju PIA izmerjena sprememba horizontalne komponente zemeljskega magnetnega polja H v dneh od 16. do 18. oktobra 2016.



Slika 11 – Lokalni geomagnetni indeksi K izračunani na osnovi meritev na observatoriju PIA v treh zaporednih dneh od 16. do 18. oktobra 2016.



V obdobju minimuma sončnega cikla povzročajo geomagnetne nevihte predvsem prehodi Zemlje preko tokovnic različnih hitrosti sončnega vetra. En sam izvor geomagnetnih neviht pa poenostavi opazovanje prehoda Zemlje skozi solarno mejno področje, kar je bilo v obdobju maksimalne aktivnosti Sonca težje izvedljivo. Razlaga merilnih rezultatov spremembe zemeljskega magnetnega polja, ki so bili izmerjeni na geomagnetnem observatoriju na površini Zemlje, je poenostavljena. Ko je medplanetarno magnetno polje orientirano tako, da se združi z zemeljskim magnetnim poljem, vsak prehod našega planeta preko tokovnic različnih hitrosti sončnega vetra povzroči tudi geomagnetno nevihto.

## Literatura

- Artist's Conception of the Heliospheric Current Sheet (2006). Stanford (CA, US): The Wilcox Solar Observatory – WSO.  
<http://wso.stanford.edu/gifs/HCS.html> (3. april 2016)
- Bertin, G., Coppi, B. (1985). Bending Waves and Current Disk Model for the Heliosphere. *The Astrophysical Journal*, 298, 387-399.
- Blagau, A. (2007). Characteristics of Earth's magnetopause from Cluster measurements. Dissertation. München (D): Ludwig-Maximilians-Universität München; Faculty of Geosciences.
- Boberg, F., Lundstedt, H., Hoeksema, J. T., Scherrer, P. H., Liu, W. (2002). Solar mean magnetic field variability: A wavelet approach to Wilcox Solar Observatory and SOHO/Michelson Doppler Imager observations. *Journal of Geophysical Research*, 107 (A10: 1318).
- Burlaga, L. F., Ness, N. F., Acuna, M. H., Wang, Y.-M., Sheeley Jr, N. R., Wang, C., Richardson, J. D. (2008). Global structure and dynamics of large-scale fluctuations in the solar wind: Voyager 2 observations during 2005 and 2006. *Journal of Geophysical Research*, 113, A02104.
- Choi, Q. C. (2016). NASA Probes Witness Powerful Magnetic Storms Near Earth, a Space First. *Space.com*, 12 May 2016.  
<http://www.space.com/32866-explosive-magnetic-reconnection-storms-spotted-nasa-probes.html> (14. maj 2016)
- Cliвера, E. W., Kamideb, Y., Ling, A. G. (2002). The semiannual variation of geomagnetic activity: phases and profiles for 130 years of *aa* data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 47–53.
- Čop, R., Deželjin, D. De Reggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa *K*. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697-708.
- Čop, R. (2016). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (2), 197-211.
- Dan, A., Chaudhuri, D., Nag, A. (2014). Geomagnetic Parameters Influencing Geomagnetic Storms in Relation to Solar Terrestrial Relationship. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology IJRSET*, 3 (6), 63-67.
- Eddy, A. J. (2009). *The Sun, the Earth, and Near-Earth Space. A Guide to the Sun-Earth system.* NASA Living With a Star grant number NNG06EC631. NASA Publication #NP-2009-1-066-GSFC. Washington (DC, US): U.S. Government Printing Office.
- Egeland, A., Burke, W. J. (2012). *The ring current: a short biography.* *History of Geo and Space Sciences*, 3, 131–142.
- Egeland, A., Burke, J. W. (2013). *Carl Størmer, Auroral Pioneer.* *Astrophysics and Space Science Library.* Berlin, Heidelberg (D): Springer.
- Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure* (2013). London (UK): Royal Academy of Engineering.
- Geomagnetic Storms* (2011). OECD/IFP Futures Project on "Future Global Shocks". Burlington (MA, US): CENTRA Technology.

- Gekelman, W., Vincena, S., Leneman, D., Maggs, J. (1997). Laboratory Experiments on Shear Alfvén Waves, and their Relationship to Space Plasmas. *Journal of Geophysical Research*, 102, 7225-7236.
- Hathaway, H. D. (2010). The Solar Cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, 7, 1.
- Hudson, H., Svalgaard, L., Hannah, I. (2015). Solar Sector Structure. arXiv.org; Open access to 1,143,281 e-prints in Physics, Mathematics, Computer Science, Quantitative Biology, Quantitative Finance and Statistics. Ithaca (NY, US): Cornell University; Cornell University Library.
- Kane, R. P. (2006). The idea of Space Weather – A historical perspective. *Advances in Space Research*, 37, 1261–1264.
- Kataoka, R., Ebisuzaki, T., Kusano, K., Shiota, D., Inoue, S., Yamamoto, T. T., Tokumaru, M. (2009). Three-dimensional MHD modeling of the solar wind structures associated with 13 December 2006 coronal mass ejection. *Journal of Geophysical Research*, 114, A10102.
- Kobe, A. T., Amory-Mazaudier, C., Do, J. M., Luhr, H., Houngninou, E., Vassal, J., Blanc, E., Curto, J. J. (1998). Equatorial electrojet as part of the global circuit: a case-study from the IEEY. *Annales Geophysicae*, 16, 698-710.
- Kistler, M. L. (2017). The Impact of O<sup>+</sup> on Magnetotail Dynamics. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling in the Solar System. Geophysical Monograph 222*. Editors: Charles R. Chappell, Robert W. Schunk, Peter M. Banks, James L. Burch, Richard M. Thorne. Washington (DC, US): American Geophysical Union AGU; Hoboken (NY, US): John Wiley and Sons, 79-100.
- Lakhina, S. G., Tsurutani, T. B. (2016). Geomagnetic storms: historical perspective to modern view. *Geoscience Letters*, 3:5.
- Linker, A. J. (1998). Global Magnetohydrodynamic Modeling of the Solar Corona. Final report. NASA Contract: NASW-4968. San Diego (CA, US): Science Application International Cooperation.
- 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.
- Moore, E. T., Brenneman, S. K., Chappell, R. C., Clemmons, H. J., Collinson, A. G., Cully, C., Donovan, E., Earle, D. G., Gershman, J. D., Heelis, R. A., Kistler, M. L., Kepko, L., Khazanov, G., Knudsen, J. D., Lessard, M., MacDonald, A. E., Nicolls, J. M., Pollock, J. C., Pfaff, R., Rowland, E. D., Sanchez, E., Schunk, R. W., Semeter, J., Strangeway, J. R., Thayer, J. (2017). Future Atmosphere-Ionosphere-Magnetosphere Coupling Study Requirements. *Magnetosphere-Ionosphere Coupling in the Solar System. Geophysical Monograph 222*. Editors: Charles R. Chappell, Robert W. Schunk, Peter M. Banks, James L. Burch, Richard M. Thorne. Washington (DC, US): American Geophysical Union AGU; Hoboken (NY, US): John Wiley and Sons.
- Mursula, K., Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A. (2002). A 22-year cycle in sunspot activity. *Advances in Space Research*, 29 (12), 1979-1984.
- Ness, F. N. (1967). Direct measurements of interplanetary magnetic field and plasma. X-612-67-293; NASA TM X-55830. Greenbelt (MA, US): Goodard Space Flight Center.
- NOAA Space Weather Scales (2011). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration; National Weather Service; National Centers for Environmental Prediction; Space Weather Prediction Center.
- Parker, E. N. (2001). A history of early work on the heliospheric magnetic field. *Journal of Geophysical Research*, 106 (A8), 15,797-15,801.
- Poole, I. (2002). Understanding Solar Indices. Newington (CT, US): American Radio Relay League – ARRL. QST, September 2002, 38-40.
- Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data (The Weekly). SWPC PRF 2119 – 2126 (2016a). Boulder (CO, US): National Weather Service; Space Weather Prediction Center - SWPC, 1996-2016.
- Preliminary Report and Forecast of Solar Geophysical Data (The Weekly). SWPC PRF 2119 – 2126 (2016b). Boulder (CO, US): National Weather Service; Space Weather Prediction Center - SWPC, 2144-2149.
- Rangarajan, G. K., Barreto, L. M. (2000). Long term variability in solar wind velocity and IMF intensity and the relationship between solar wind parameters & geomagnetic activity. *Earth Planets Space*, 52, 121–132.

- Reconnection of Magnetic Fields; Magnetohydrodynamics and Collisionless Theory and Observations (2007). Edited by J . Birn and E . R . Priest. Cambridge University.
- Reuveni, Y., Price, C. (2009). A new approach for monitoring the 27-day solar rotation using VLF radio signals on the Earth's surface. *Journal of Geophysical Research*, 114, A10306.
- Russell, C.T., McPherron, R. L. (1973). Semiannual Variation of Geomagnetic Activity. *Journal of Geophysical Research*, 78 (1), 92.
- Solar Cycle Progression; Sunspot Number Progression (2016). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA); Space Weather Prediction Center (SWPC). <http://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (15. december 2016)
- Svalgaard, L. (2013). Solar activity – past, present, future. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3, A24.
- Svalgaard, L., Wilcox, J. M. (1976). Three-dimensional structure of the extended solar magnetic field and the sunspot cycle variation in cosmic ray intensity. Stanford (CA, US): Stanford University, 1976.
- Svensmark, H. (2000). Cosmic Rays and Earth's Climate. *Space Science Reviews*, 93, 155-165.
- Švestka, Z. (1968). Effects associated with the Sector Boundary crossing on July 8, 1966. *Solar Physics*, 4 (3), 361-372.
- Tohmatsu, T. (1990). *Compendium of Aeronomy*. Translated by Ogawa, T. *Developments in Earth and Planetary Sciences, Series Volume 7*. Rotterdam; Springer Netherlands, p.31.
- Understanding Solar Metrics Data; Making Sense of the Solar Metrics (2015). AM 5-610. Fort Huachuca (AZ, US): Department of the Army Military Auxiliary Radio System.
- Wilcox, M. J., Scherrer, H. P., Svalgaard, L., Roberts, O. W., Olson, H. R., Jenne, L. R. (1974). Influence of Solar magnetic Sector Structure on Terrestrial Atmospheric Vorticity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 581- 588.
- Wilcox, M. J., Scherrer, H. P. (1981). What Causes the Warp in the Heliospheric Current Sheet? *Journal of Geophysical Research*, 86 (A7), 5899-5900.
- Zhao, X., Hoeksema, J. T. (1994). A coronal magnetic field model with horizontal volume and sheet currents. *Solar Physics*, 151, 91-105.