

Geomagnetna nevihta in polarni sij v Sloveniji v letu 2023

Rudi Čop¹, Jure Atanackov²

Povzetek

V letu 2023 je sedanji 25. Sončev cikel dosegel prvo polovico svoje druge tretjine. Nam najbližja zvezda se približuje svojemu maksimumu aktivnosti in temu primeren je tudi njen vpliv na Zemljo. Geomagnetno polje je zelo pogosto razburkano, kar najbolj zaznamo v spremljajočih svetlobnih učinkih. Med njimi je najbolj poznan polarni sij, ki se pojavlja v vsakokrat drugačni obliki na višjih geografskih širinah. V članku je narejen pregled polarnih sijej, opaženih v Sloveniji v prvih enajstih mesecih leta 2023. Slovenija namreč leži na srednjih geografskih širinah, torej zunaj območja, kjer se polarni siji običajno pojavljajo. Predstavljena je geomagnetna nevihta, ki se je začela 4.11.2023 in naslednji dan dosegla stopnjo G3 (Strong). Ta nevihta je povzročila polarni sij, ki je bil viden skoraj po vsej Evropi. Pojavil se je tudi SAR (Stable Auroral Red), ki spremlja močne geomagnetne nevihte in ni značilen za območja znotraj polarnega kroga. Vse rezultate opazovanj na slovenskem podežlju sva primerjala z rezultati meritev spremembe lokalnega magnetnega polja na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran, Slovenia).

Ključne besede: geomagnetne nevihte, polarni siji, SAR, Slovenija

Keywords: geomagnetic storms, northern lights, SAR, Slovenia

Pojavi polarnih sijej v Sloveniji

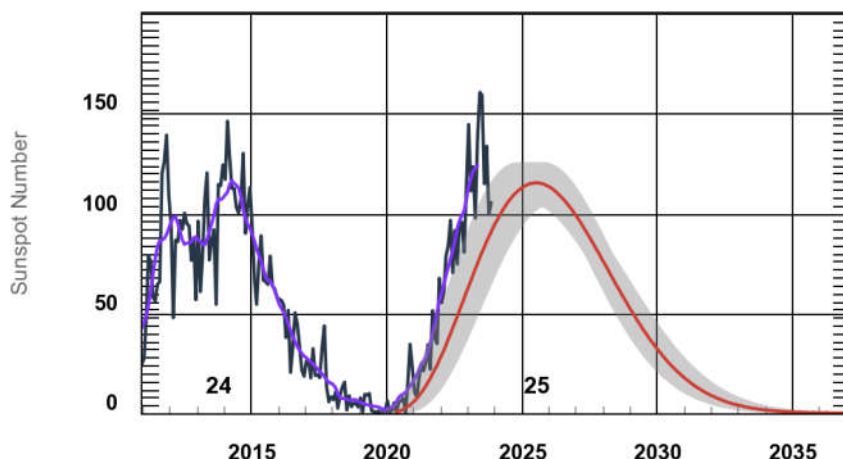
Ker je Slovenija od severnega pola precej oddaljena (subauroral latitudes), so pri nas videni pojavi polarnih sijej precej redki. Običajno se pojavljajo ob vrhuncih Sončeve aktivnosti, ki se ciklično ponavljajo približno vsakih 11 let (Slika 1). V tem obdobju so namreč pogostejši močni izbruhi na Soncu. Zato lahko še v naslednjih dveh do petih letih zagotovo pričakujemo polarne sije tudi pri nas.

Od 1.1.2023 do 1.12.2023 je bilo v Sloveniji vidnih 17 polarnih sijej. Do tega podatka sva prišla na podlagi opazovanj na podežlju ali na podlagi posnetkov spletnih kamer v Sloveniji. Kadar vremenske razmere niso bile ugodne za opazovanje, sva podatke dobila iz spletnih kamer sosednjih držav, ki so na istih geografskih širinah kot Slovenija. Od teh 17 polarnih sijej bi lahko bilo v Sloveniji vidnih od 12 do 14. Vsaj trije od njih najverjetneje ne bi dosegli zadostne svetilnosti, da bi jih lahko opazovali s prostim očesom.

V preglednici (Preglednica 1) so zbrani podatki o tistih polarnih sijih, ki so jih v letu 2023 dobro dokumentirali opazovalci, ki pri nas ljubiteljsko sledijo tem naravnim pojavom. Polarni siji so se vsakokrat pojavili ob geomagnetnih nevihtah. Te so razporejene v kategorije od G1 do G5 (Minor, Moderate, Strong, Severe, Extreme) (NOAA, 2011). Kategorije, opisane v razpredelnici, so določene na podlagi geomagnetnih indeksov K_{PIA} , ki veljajo za ozemlje Slovenije. Izračunani so iz merilnih podatkov, pridobljenih na geomagnetnem observatoriju z mednarodno kodo PIA (Piran, Slovenia) (v nadaljevanju: Observatorij).

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

² Geološki zavod Slovenije, Dimičeva ulica 14, 1000 Ljubljana



Slika 1 – Število Sončevih peg v predhodnem 24. in sedanjem 25. Sončevem ciklu: modre barve so srednje mesečne vrednosti, vijolične izravnane mesečne vrednosti in rdeče barve napovedane mesečne vrednosti (Solar Cycle, 2023).

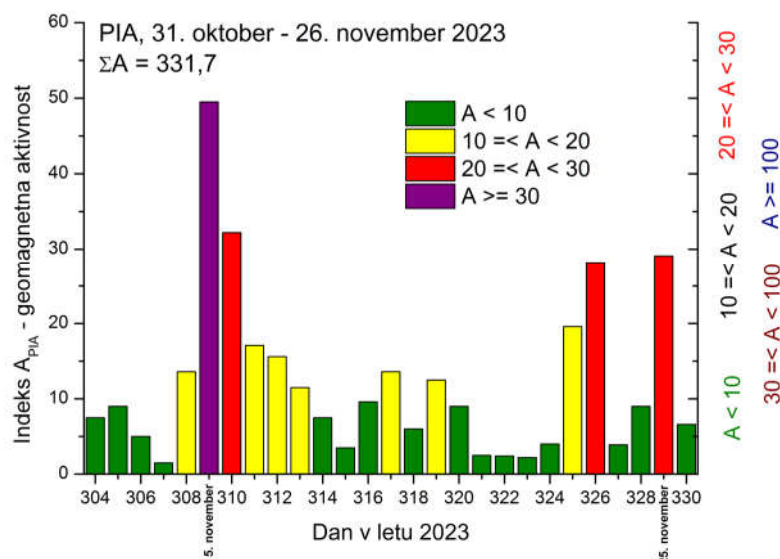
Preglednica 1 - Leta 2023 v Sloveniji opazovani polarni siji in/ali SAR-i

| Datum [yyyy-mm-dd] | K_{PIA} interval | Vrednost | NEVIHTA (Kategorija) | Aktivnost A | Opazovan in fotografiran |
|-----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| 2023-03-23 | 8 | 7 | G3 (Strong) | 42,9 | Polarni sij |
| 2023-04-23 | 7 | 7 | G3 (Strong) | 37,8 | Polarni sij - SAR |
| 2023-06-25 | 1 | 5 | G1 (Minor) | 16,1 | Polarni sij |
| 2023-09-12 | 5 | 5 | G1 (Minor) | 21,4 | Polarni sij |
| 2023-09-25 | 1 | 5 | G1 (Minor) | 23,6 | Polarni sij |
| 2023-11-05 | 6 | 7 | G3 (Strong) | 49,5 | Polarni sij - SAR |
| 2023-11-25 | 7 | 6 | G2 (Moderate) | 29,1 | Polarni sij |
| 2023-12-01 | 4 | 6 | G2 (Moderate) | 46,5 | Polarni sij |

Opomba: Seznam opazovanj je narejen za obdobje od 1.1.2023 do 5.12.2023.

Meritve sprememb lokalnega magnetnega polja

Meritve sprememb lokalnega magnetnega polja na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje so meritve aktivnosti električnih tokov v ionosferi in magnetosferi ter motenj, ki jih ti tokovi povzročajo. Iz teh meritev izhaja indeks geomagnetne aktivnosti K , primeren predvsem za opis geomagnetnih razmer v srednjih geografskih širinah. Za izračunavanje tega indeksa je izbran tri urni interval v času UTC (Universal Time Coordinated). V tem intervalu so zajete geomagnetne motnje, ki trajajo od ene do dveh ur. Interval je dovolj kratek, da se z njim lahko ločita dva zaporedna dogodka, nastala v času enega dneva (Čop et al, 2015). Z osmimi indeksi K se opiše geomagnetno dogajanje preko celega dneva. Iz teh indeksov se izračuna geomagnetna aktivnost posameznega dne, indeks A (Slika 2), ki je linearen in z vrednostmi od 0 do 400 (Mayaud, 1980).



Slika 2 – Geomagnetna aktivnost A v Sloveniji v času enega učinkovitega obrata Sonca od 31. oktobra do 26. novembra 2023.

Indeks K je neimenovano število: od 0 za najbolj miren dan do 5, ko nastopa najmilejša oblika geomagnetne nevihte, pa vse do 9 za opis razmer, ko je zemeljsko magnetno polje najbolj razburkano. Jakost geomagnetnih neviht narašča od geomagnetnega ekvatorja proti področjema polarnih sijev. Zato ima vsak observatorij svojo skalo indeksa K . Ta skala je logaritemska, 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).

Planetarni geomagnetni indeks K_p je danes izhodiščni indeks v geomagnetizmu in aeronomiji, znanosti o električnih tokih, ki tečejo v zgornjih plasteh atmosfere. Vrednost tega indeksa se napoveduje in nato tudi naknadno obdeluje (postprocesira) (Geomagnetic K_p , 2023). V ta namen se uporabljajo merilni podatki tistih geomagnetnih observatorijev, ki v popolnosti zadoščajo priporočilom mednarodnih organizacij IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) in INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network).

Geomagnetne nevihte nastajajo 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. Vezane so na cikel sončnih peg. Leto največje geomagnetne aktivnosti običajno zaostaja za dve ali tri leta za letom z največjo sončevo aktivnostjo. Po obliki njihovega magnetograma se geomagnetne nevihte delijo v dve skupini: na geomagnetne nevihte z nenadnim začetkom (angl. sudden commencement storms) in geomagnetne nevihte s postopnim začetkom (angl. gradual commencement storms). Tako v ciklu sončnih peg kot v ciklu geomagnetnih neviht je zaznaven 27 dnevni učinkoviti obrat Sonca (Čop, 2020). Geomagnetne nevihte so torej zelo predvidljive. Napovedati jih je mogoče razmeroma točno na podlagi meritev na namenskih umetnih satelitih in to vsaj 2 dni vnaprej.

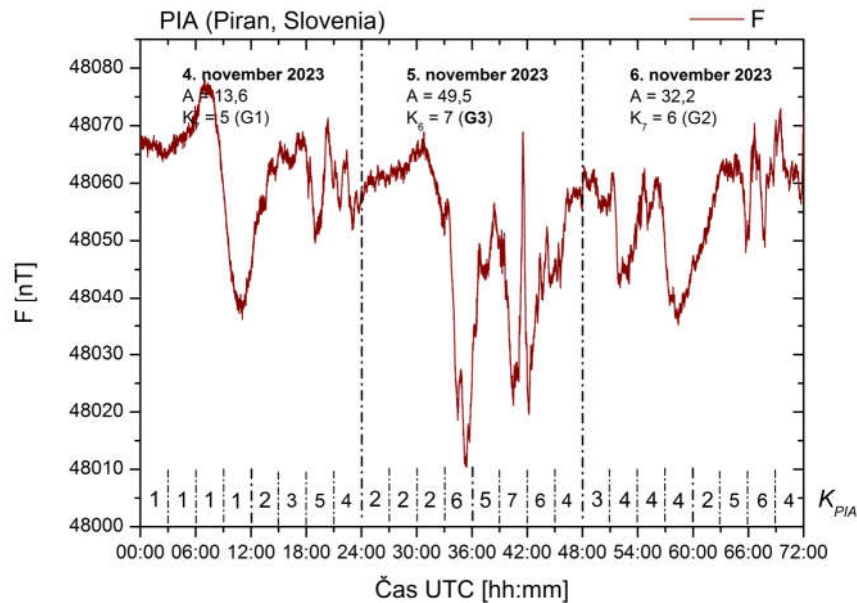
Geomagnetna nevihta kategorije G3 z začetkom 4. novembra 2023

Zaradi precej zapletenega stanja magnetnega polja na Soncu (Geomagnetic storm, 2023) je 3. novembra 2023 nastal izbruh v njegovi koroni CME. Usmerjen je bil neposredno proti Zemlji. Posnetek tega izbruha je bil narejen s teleskopom, ki je nameščen na ameriškem geosinhronem satelitu SDO (Solar Dynamics Observatory), v ultravijoličnem delu spektra svetlobe EUV (Extreme ultraviolet radiation) $\lambda = 304$ nm. NASA (National Aeronautics and Space Administration) je satelit SDO izstrelila v geocentrično orbito 11.02.2010. Tudi na satelitu SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) je posnet ta izbruh na Soncu (LASCO Coronagraph, 2023) s pomočjo koronografa (LASCO, 1994). Vesoljski observatorij SOHO je bil izstreljen 2.12.1995 v sodelovanju ESA (European Space Agency) in NASA. Utirjen je v Lagrangevi točki L_1 med Soncem in Zemljo, kjer se njuni gravitacijski sili izenačita. Satelit je zgradilo podjetje Matra Marconi Space (Toulouse, France), izstreljen pa je bil z ameriško nosilno raketo Atlas II in deluje že preko 25 let.



Slika 3 – Polarni sij fotografiran 5. novembra 2023 ob 17:16 UTC v vasi Gomila pri Mirni na Dolenjskem [45°56'2.19"N 15°2'48.49"E].

V nedeljo 5.11.2023, dva dni po izbruhu v koroni Sonca, je bil kot posledica viden severni sij v velikem delu Evrope. V zadnjih dveh desetletjih je bil v naših krajih to eden od najbolj izrazitih polarnih sijev (Slika 3). Meritve na Observatoriju so to tudi potrdile (Slika 4). V času pojava geomagnetne nevihte stopnje G3 (Strong), je bila srednja vrednost meritev gostote lokalnega magnetnega polja na Observatoriju $F = 48049,07$ nT. Sprememba vrednosti te gostote je znašala $\Delta F = 58,54$ nT = 58,54 γ (Gamma) ali vsega 0,12 % od njene srednje vrednosti. Ta sprememba gostote lokalnega magnetnega polja pa je bila vzrok za nastanek v članku opisanih izrednih svetlobnih pojavov v Sloveniji.



Slika 4 – Meritev spremembe lokalnega magnetnega polja na Observatoriju in pripadajoči 3-urni geomagnetni indeksi K_{PIA} v času geomagnetne nevihte kategorije G3 (Strong) od 4. do 6. novembra 2023.

SAR na srednjih geografskih širinah

Polarni siji (Aurora Polaris) nastajajo zaradi trkov naelektrenih atomov, protonov in elektronov iz vesolja ob atome plinov visoko v našem ozračju. Geomagnetno polje v polarnih območjih te naelektrene elementarne delce iz Sončevega vetra usmeri proti atmosferi Zemlje. Polarni siji se redno pojavljajo v pasu med 59° in 71° zemljepisne širine (Aurora Borealis, Aurora Australis). Njihova pojavnost je neposredno povezana s ciklom geomagnetnih neviht. So zelo različnih barv, različnih oblik in imajo svoj ritem. Njihova svetilnost je od komaj zaznavnega tlenja na zvezdnatem nebu pa do svetilnosti polne Lune. Najpogosteje se pojavljajo na višini od 95 km do 210 km, izjemoma pa tudi na višini več kot 600 km. Predvsem v času nizke in srednje aktivnosti Sonca je prevladujoča barva polarnih sijev zelena (557,7 nm), v času njegove največje aktivnosti pa se pogosteje pojavljajo polarni siji pretežno rdeče barve (630 nm). Obe barvi svetlobe sta barvi sevanja atomov kisika, ki pa so različno vzbujeni (Egeland & Burke, 2013).

SAR (Stable Auroral Red) tvori podobne svetlobne loke na nebu kot polarni sij (Slika 5). Pojavlja se samo na geografskih širinah, kjer se sicer polarni sij običajno ne pojavlja. Zanj je značilna samo rdeča barva svetlobe, ki pa jo prosto človeško oko slabo zazna. Zato je SAR viden le ob močnih geomagnetnih nevihtah. Je tlenje zaradi segrevanja zgornjih plasti atmosfere. Povzročajo ga električni toki, ki v obliki kolobarja obkrožajo Zemljo. Rdečemu siju na nebu SAR se lahko pridružil še STEVE (Strong Thermal Emission Velocity Enhancement) v obliki dodatnega pramena bele barve (Gillies et al, 2023). Nastanek tega svetlobnega pojava še ni docela razjasnjen (Nishimura et al, 2023).

V plazmosferi, v notranjem delu magnetosfere in nad ionosfero, se nahaja hladna plazma. Nagel skok v gostoti te plazme (plasmopause) določa zunanjo mejo tega območja. Zaradi turbulentne izgube energije električnih tokov, ki v obliki kolobarja obkrožajo Zemljo, nastane v tej zunanji meji svetlobni lok SAR. V drugem delu geomagnetne nevihte, ko slednja že pojenja (angl. recovery phase, substorm), se namreč to mejno

področje razširi v simetrični krožni električni tok okoli Zemlje (angl. terrestrial ring current) (Cornwall et al, 1970; Foster et al, 1994).



Slika 5 – SAR (Stable Auroral Red) fotografiran 5. novembra 2023 ob 18:32 UTC v vasi Gomila pri Mirni na Dolenjskem [45°56'2.19"N 15°2'48.49"E].

Laboratorijske raziskave nastanka polarnih sijev v zadnjem desetletju 19. stoletja so potrdile hipotezo, da polarni sij v polarnem krogu nastaja zaradi naelektrenih delcev, ki prihajajo iz Sonca in jih magnetno polje Zemlje usmerja proti magnetnim polom (Rypdal & Brundtland, 1997). V bližnjem vesolju je torej sončni veter, medplanetarno magnetno polje IMF (angl. interplanetary magnetic field) in stalen električni tok, ki obkroža Zemljo v ekvatorialni ravnini (angl. equatorial electrojet). V drugi polovici prejšnjega stoletja so njihov obstoj potrdile meritve z vesoljskimi sondami. V tem stoletju pa je bilo z njimi, po obsežnih predhodnih pripravah (Dungey, 1962) in večkratnih poizkusih, uspešno raziskano tudi področje magnetosfere in plazmosfere, ter ugotovljen vzrok za njeno dodatno polnjenje s hladno plazmo v času močnih geomagnetnih neviht (Xiao et al, 2007; Treumann et al, 2009). Ugotovljen in potrjen je bil torej vzrok za nastanek SAR-ov v srednjih geografskih širinah.

Zaključki

Pri današnjem urbanem načinu življenja spremljajo svetlobne pojave na nočnem nebu le še posamezniki, ki jih to zanima. Na njem obstaja tudi stalen vir difuzne svetlobe, ki ni neposredno sevanje Sonca v vidnem delu spektra temveč tlenje v atmosferi (angl. airglow). Emisija žarkov UV iz Sonca povzroča v zgornjih plasteh atmosfere fotokemične procese. Vzburjeni atomi kisika sevajo svetlobo zelene barve (Richter et al, 2021). Zato noči niso popolnoma temne. Poleg intenzivnosti sevanja Sonca vpliva na to tlenje tudi planetarno valovanje v atmosferi na njenih velikih višinah (Dickinson, 1969). Mehanizem tlenja v atmosferi torej ni enostaven in tudi še ne docela raziskan. V izjemnih pogojih povzroči tudi svetle noči (lat. solis nocturnus, angl. bright nights) (Shepherd & Cho, 2017).

Svetlobni pojavi, nastali zaradi hitrih sprememb v magnetnem polju Zemlje, niso le zanimivost sama zase, temveč so tudi znanilci vplivov geomagnetnega polja tako na

življenje na Zemlji (Čop, 2022) kot tudi na našo civilizacijo (Čop & Jere Jakulin, 2022). Živimo v tem magnetnem polju in zato Sonce vpliva na naše življenje in na vse oblike naše dejavnosti (Jere Jakulin & Čop, 2017). Nekatere od teh dejavnosti so pod njegovim neposrednim vplivom, med njimi predvsem elektroenergetika (Kirkham et al, 2011), satelitski radionavigacijski sistemi (Zhang et al, 2020; Android Platform, 2023) in brezžični komunikacijski sistemi (Čop, 2015) ter praktično vsa človekova dejavnost.

Literatura

- Android Platform. GeomagneticField. (2023). Android for Developers. <https://developer.android.com/reference/android/hardware/GeomagneticField#public-methods> (4.12.2023)
- Cornwall, J. M. Coroniti, F. V. Thorne, R. M. (1970). A unified theory of SAR Arc. Formation at the Plasmopause. Los Angeles (US): University of California; Department of Physics, 52p.
- Čop, R. (2015). Vpliv Sonca na prenos merilnih podatkov v realnem času po omrežju mobilne telefonije. *Geodetski vestnik*, 60 (2), 197–21.
- Čop, R. Deželjin, D. De Reggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697–708.
- 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. (2022). Magnetna polja in kresnice. Raziskave s področja geodezije in geofizike 2021. Zbornik del. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, 121–126.
- Čop, R. Jere Jakulin, T. (2022). The Influence of the Sun on our Lives. *International Journal for Quality Research*, 16 (3), 703–716.
- Dickinson, E. R. (1969). Theory of Planetary Wave-Zonal Flow Interaction. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26 (1), 73–81.
- Dungey, J. W. (1962). The Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. AFCRL-62-423. Scientific Report No. 157. State College (PA, US): The Pennsylvania State University, 35 p.
- Egeland, A. Burke, J. W. (2013). Carl Størmer. Auroral Pioneer. Berlin; Heidelberg; Springer-Verlag, 195 p.
- Foster, J. C. Buonsanto, M. Mendillo, J. Nottingham, M. D. Rich, F. J. Denig, W. (1994). Coordinated stable auroral red arc observations: Relationship to plasma convection. *Journal of Geophysical Research*, 99 (A6), 429–439.
- Geomagnetic Kp index. (2023). Potsdam (Germany): Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. <https://kp.gfz-potsdam.de/en/> (3.12.2023)
- Geomagnetic storm watch (G2). (2023). SpaceWeather, 2019–2023. <https://www.spaceweather.com/archive.php?view=1&day=04&month=11&year=2023> (4.11.2023)
- Gillies, D. M. Liang, J. Gallardo-Lacourt, B. Donovan, E. (2023). New insight into the transition from a SAR arc to STEVE. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101205.
- ISGI - International Service of Geomagnetic Indices. (2023). Strasbourg (France): SIIG/ISGI. <https://isgi.unistra.fr/> (3.12.2023)
- Jere Jakulin, T. Čop, R. (2017). Sunspot Cycles Impacts on Tourism and Quality of Life. *International Journal for Quality Research*, 11 (3), 717–728.
- Kirkham, H. Makarov. Y. V. Dagle, J. E. Desteese, J. G. Elizondo, M. A. Diao, R. (2011). Geomagnetic Storms and Long-Term Impacts on Power Systems. PNNL-21033. Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830. Richland (WA, US): Pacific Northwest National Laboratory, 37 p.
- LASCO, The Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment. (1994). LASCO Handbook for Scientific Investigators, Version 1.0. Official U.S. Navy Web Site.
- LASCO Coronagraph. (2023). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration; Space Weather Prediction Center.

- <https://www.swpc.noaa.gov/products/lasco-coronagraph> (3.11.2023)
- Mayaud, P. N. (1980). Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. Gophysical monograph 22. Washington (DC, US): American Geophysical Union, 154 p.
- NOAA Space Weather Scales. (2011). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration; Space Weather Prediction Center.
- Nishimura, Y. Dyer, A. Kangas, L. Donovan, E. Angelopoulos, V. (2023). Unsolved problems in Strong Thermal Emission Velocity Enhancement (STEVE) and the picket fence. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10.
- Richter, H. Buchbender, C. Güsten, R. Higgins, R. Klein, B. Stutzki, J. Wiesemeyer, H. Hübers, H.-W. (2021). Direct measurements of atomic oxygen in the mesosphere and lower thermosphere using terahertz heterodyne spectroscopy. *Communications Earth & Environment*, 2, 19.
- Rypdal, K. Brundtland, T. (1997). The Birkeland Terrella Experiments and their Importance for the Modern Synergy of Laboratory and Space Plasma Physics. *Journal de Physique IV*, 7 (C4), C4-113-C4-132.
- Shepherd, G. G. Cho, Y.-M. (2017). WINDII airglow observations of wave superposition and the possible association with historical “bright nights”. *Geophysical Research Letters*, 44, 7036–7043.
- Solar Cycle Progression. (2023). Boulder (CO, US): National Oceanic and Atmospheric Administration; Space Weather Prediction Center. <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (24.11.2023)
- Treumann, R. A. Jaroschek, C. H. Pottellette, R. (2009). Auroral evidence for multiple reconnection in the magnetospheric tail plasma sheet. *EPL*, 85, 49001.
- Xiao, C. J. Wang, X. G. Pu, Z. Y. Ma, Z. W. Zhao, H. Zhou, G. P. Wang, J. X. Kivelson, M. G. Fu, S. Y. Liu, Z. X. Zong, Q. G. Dunlop, M. W. Glassmeier, K.-H. Lucek, E. Reme, H. Dandouras, I. Escoubet, C. P. (2007). Satellite observations of separator-line geometry of three-dimensional magnetic reconnection. *Nature Physics*, 3, 609–613.
- Zhang, S. He, L. Wu, L. (2020). Statistical Study of Loss of GPS Signals Caused by Severe and Great Geomagnetic Storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125 (9), e2019JA027749.