

Spoznanja iz opazovanj geomagnetizma na daljavo

Franc Dimc, Matej Bažec

Fakulteta za pomorstvo in promet, Univerza v Ljubljani, Pot pomorščakov 4, Portorož
E-pošta: franc.dimc@fpp.uni-lj.si

Conclusions from geomagnetism satellite based observations

Abstract. *The magnetic fields acting on the sensor elements of satellites are mainly influenced by the Earth's fields in lower orbits and mainly by the fields from space in higher orbits, since the moving charges cause different types of currents that align themselves with the magnetic field lines either in the quiet magnetosphere or under the influence of the solar plasma. Information can be obtained from this data, but the charges themselves can be lethal to the satellites.*

1 Uvod

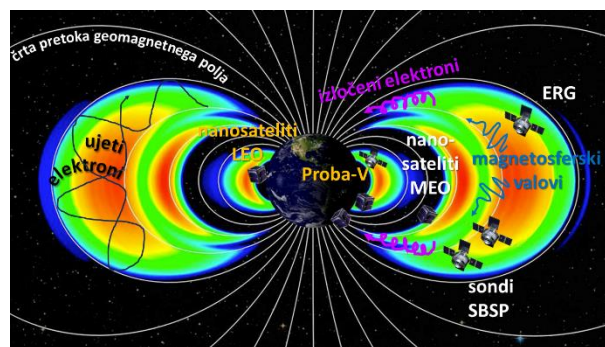
Geomagnetno polje po splošno priznani teoriji povzročajo vrteči se konvekcijski tokovi električno prevodne tekočine v Zemljinem zunanjem jedru, ki vplivajo na skorjo v geodinamskem procesu. Magnetno polje na površini Zemlje je občutljiv kazalnik dogodkov v strukturah in dinamiki Zemlje, še posebno sorazmerno počasnih dogajanj v zemeljskih globinah, ki lahko povzročajo tudi nenadne pojave na površini. Najave zamenjave magnetnih polov, ki je spektakularen in redek pojav [1], ne moremo razpoznavati iz rezultatov nad zemeljsko površino zaradi prekratke dobe opazovanj, analizirati je treba namagnetenost kamnin skorje, v kateri so zapisane periode premagnetenj, dolge do milijon let. Obdobja sorazmerno stabilnega polja trajajo povprečno med 30 in 40 tisoč let, procesi obračanja, med katerimi skupna gostota magnetnega pretoka B_{geo} upada proti nič, pa praviloma do 10 tisoč let.

Rezultati geomagnetnih meritev na površini ali v vesolju kažejo značilne variacije polja z različnimi periodami, ki jih pripisujemo geodinamiki Zemlje in tudi ponovljivim vplivom iz vesolja. S podatki zadosti hitrih magnetometrov umetnih satelitov v različnih tirnicah je Zemlja opisljiva kot celovit sistem. Za beleženje neperiodičnih pojavov, ki vzbujajo šibkejše spremembe B_{geo} , so potrebni zadosti občutljivi in na šume odporni merilniki. Poleg počasnih magnetometrov *fluxgate* so v rabi tudi magnetometri s tremi med seboj pravokotnimi tuljavami z jedri (*magnetic search coil, MSC*) [2], v katerih se glede na spremembe okoliškega magnetnega pretoka inducira ustrezna napetost, namenjenih za opazovanja valovnih pojavov. MSC zagotavlja podatke o obliki valov, amplitude in faze komponent sprememb B, zaradi svoje odpornosti tudi v območjih plazme in sevanja. MSC je bil zasnovan posebej za opazovanje magnetnega polja grupnih pojavov (*chorus*), žvižgajočih (*whistler*) in magneto-zvočnih valov okrog ekvatorja v frekvenčnem območju od nekaj Hz do 100 kHz, medtem ko se magnetometer *fluxgate* uporablja za opazovanja

valov s frekvencami pod 10 Hz, s čimer beleži zaznane valove ultra nizkih frekvenc (ULF) in elektromagnetne valove ionskih ciklotronskih pojavov (EMIC), pod žiroskopsko frekvenco protonov.

V rezultatih izmerjenih magnetnih gostot B so lahko opazne spremembe, ki jih raziskovalci pripisujejo pojavom razelektritev v atmosferi, zaradi katerih nastajajo signali s frekvenčnim preletom oz. t.i. žvižgajoči valovi [3],[4],[5],[6], električnim tokom na površinah oceanov in celo nenadnim pojavom pod površjem, ki včasih spremljajo močnejše *potrese*, zaradi katerih nastajajo t.i. sikajoči valovi (*hiss waves*) [3], [7], [8]. Rezultati merjenj gostote magnetnega pretoka na daljavo, ko se satelit oddaljuje od površine, denimo v eliptični tirnici (npr. Akebono [9]), kažejo pričakovano vedno večji vpliv magnetnih polj nebesnih teles, posebno močnega vpliva nima le Sončevo oz. medplanetno magnetno polje (*Interplanetary Magnetic field, IMF*), ampak tudi magnetni učinki Sončevega vetra, elektrine v obliki plazme, ki jo Sonce izseva v smeri proti Zemlji.

Pri svojih nalogah satelitski merilniki magnetnega polja zaznavajo vplive že omenjenih gibajočih se elektrin in magnetizma iz vesolja, ki se sklapljajo z vplivi elektrin, strnjenih v sevalnem pasu okoli Zemlje oz. v t. i. Van Allenova obroča (slika 1), odkrita leta 1958 z Explorerjem 1, s prvim satelitom z znanstveno opremo na krovu [10].



Slika 1: Sateliti, ki spremljajo procese v Zemljinem sevalnem pasu oz. Van Allenovih obročih, na sliki je tudi tretji, opažen leta 2012. Prirejeno po [10] in svs.gsfc.nasa.gov.

NASA je leta 2012 izstrelila sondi RBSP (*Radiation Belt Storm Probes*) [3], JAXA 2016 satelit ERG (*Exploration of energization and Radiation in Geospace*) [2], [10], ESA je vtirila 2013 v nizko tirnico (LEO) satelit Proba-V in leta 2022 podprla vtirjenje treh nanosatelitov v srednjo (MEO) [11]. Vsi omenjeni sateliti merijo in opisujejo Zemljin sevalni pas, ki se razteza od 600 do 58.000 km nad površjem. Sevalni pas Zemlje torej običajno sestavljata dva različna pasova ujetih, visoko energijskih delcev (slika 1).

Zunanji pas je sestavljen pretežno iz visokoenergijskih (več MeV) elektronov, katerih intenzivnost oscilacij se ohranja od nekaj ur do nekaj dni, odvisno predvsem od vpliva Sončevega vetra. Večji vnosi energije v magnetosfero povzročajo poleg različnih tokov tudi t.i. Alfvénove valove [12]. Notranji pas je sestavljen iz pomešanih visokoenergijskih elektronov in visoko energijskih pozitivnih ionov (večinoma protonov), ohranjajoč visoko stopnjo intenzivnosti od nekaj let do desetletij. Analize opazovanj RBSP so pokazale povsem ločeni tretji obroč visokoenergijskih (nad 2 MeV) elektronov (slika 3), ki je 2. septembra 2012 nastal na 3,0 do ~3,5 zemeljskih polmerov in vzdržal več kot 4 tedne, preden ga je skoraj izničil močan prehod medplanetarnega udarnega vala Sončevega vetra [13].

Izraz vesoljsko vreme povzema vse spremembe v vesolju med Soncem in Zemljo. Za namen članka so posebej zanimivi pojavi v magnetosferi, ki vplivajo na sisteme v tirnicah satelitov in na zemeljski površini. Nevihta na Soncu zapusti skozi korono ožje območje Sonca kot Sončev veter. Energija vetra se prenese na redke delce zemeljske magnetosfere, tokovi elektronov in protonov se usmerijo vzdolž silnic geomagnetnega polja. Pospešena elektrina nato trči ob ionosferske in atmosferske delce, zaradi geometrijske oblike geomagnetnega polja se največ energijskih pretvorb zgodi med trki ob geomagnetnih polih, kar povzroča polarne sije.

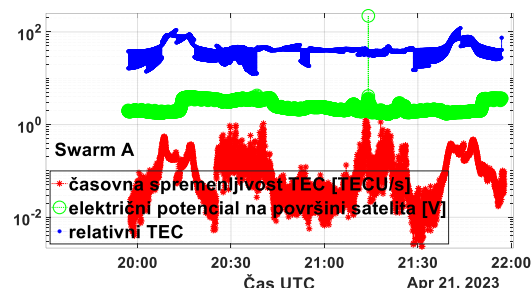
Sistemi so različno odporni proti tovrstnim spremembam v vesolju, v čim višji tirnici so sateliti, s tem večjo verjetnostjo in hitreje pridejo do meje zmogljivosti vgrajene zaščite.

1.1 Odpornost satelitov v nizki tirnici

Sonce vstopa v najbolj aktiven del svojega 'sončnega cikla', vrh bo cikel predvidoma dosegel leta 2024. Do dosega vrha se povečuje: a) pogostnost izbruhov plazme na Soncu in b) posredno gostota Zemljine zgornje atmosfere. Satelite v nizki tirnici (LEO) potovanje skozi gostejše ozračje upočasnjuje in od njih zahteva večjo porabo goriva, da ostanejo v želeni tirnici. Upravitelci ESA so morali satelita A in C sistema Swarm julija 2022, izmikajoč se vesoljskim smetem in z željo po ohranitvi konstelacije sistema [14], v 10-tedenskem procesu oddaljiti od Zemlje. Satelita sta zato zdaj bolj izpostavljena vplivom iz vesolja. Sprejemniki GNSS satelitov Swarm v južnoatlantski depresiji geomagnetnega polja pogosto ne dajejo podatkov o položaju [30].

Načrtovalci satelitov vključujejo v svoje načrte analize vzrokov težav predhodnih satelitov z nepredvidljivimi pojavi, ki niso bili samo nadležni, ampak so povzročili tudi odpovedi satelitov. V teh postopkih vključijo med vzroke z majhnim deležem tudi vesoljsko vreme [15]. Pri oblikovanju satelitov upoštevajo informacije, v kakšnih primerih vesoljsko vreme vpliva na odpovedi, ki jo dobijo s korelacijami časovnih vrst pojavnosti okvar na satelitih in zapisov o vesoljskem vremenu.

Primer zabeleženih podatkov o stanju na satelitu v nizki tirnici in količine in spremenljivosti elektrine v okolici satelita A (*Total Electron Content*, TEC) v času dveh ur prikazuje slika 2. Enota za določanje TEC je TECU, ki pomeni 10^{16} elektronov/m².



Slika 2. Zabeleženi podatki satelita Swarm A 21. aprila 2023 od 19:57 do 21:57 UTC (VirES) [22].

1.2 Odpornost satelitov v višjih tirnicah

Nenadne spremembe magnetnih polj oz. geomagnetne nevihte v višjih tirnicah povzročajo kopičenje elektrine na površinah satelitov, kar običajno povzroča nadležne električne oblake in iskrenja, v izrednih primerih pa tudi odpovedi [15]. Načrtovalci zmanjšujejo občutljivost elektronike na razelektritve v kombinaciji s konstrukcijo, ki omejuje kopičenje elektrine. Tuneliranju protonov ali težjih atomskih jeder z visoko energijo skozi satelit predvsem v notranjem sevalnem pasu, ki lahko spotoma preuredi stanja v pomnilniških elementih, se načrtovalci upirajo z ustreznimi zasnovami zgradbe in algoritmi mikroprocesorjev za rekonstruiranje stanja pred neželenim pojavom. Nenadni izbruhi na Soncu (*coronal mass ejection*) lahko predvsem v zunanem sevalnem pasu povzročajo ogromne pretoke hitrih elektronov mimo satelitov, kar povzroča že omenjene elektrostatične pojave na površini, elektroni lahko prodrejo celo skozi površino, zaobidejo varovalne elemente, prodrejo v elektronske vezja, obtičijo v njih in jih poškodujejo [16].

2 Sklepanje iz zaznanih sprememb B

Konvektivni tokovi elektrine v vesolju torej izvirajo iz nebesnih teles, na primer iz Sonca kot sončev veter, ki se skozi prazen prostor giblje s hitrostmi od nekaj sto do 1000 km/s, hitro gibajoče se elektrine pa obstajajo tudi v sevalnih pasovih Zemlje, kamor se je elektrina 'ujela' pod vplivom geomagnetnega polja [17]. Gibanja elektrine opisujemo s konvektivnimi tokovi gostote \mathbf{j} in s premikalnimi tokovi, določenimi s časovnim odvodom gostote električnega pretoka $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ oz. $\epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$. Ta gibanja elektrine po vesolju povzročajo zaznavne magnetne pojave, ki jih opisuje Ampèrev zakon [18]. S pomočjo Stokesovega izreka in z Maxwelllovo razširitvijo zakon zapišemo kot:

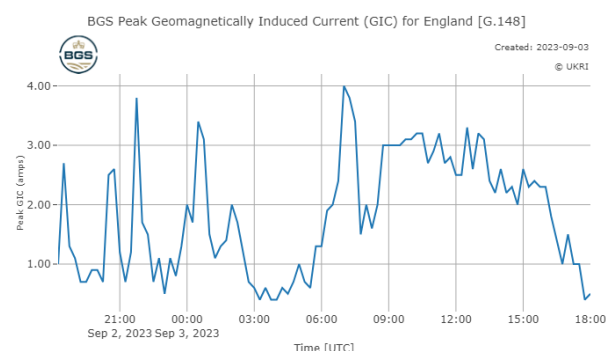
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1)$$

Konvektivne tokove j izračunamo s pomočjo vrtničenja (rotorja) \mathbf{B} oz. Ampèrevega zakona, neposredno iz izmerjenih podatkov \mathbf{B} para satelitov, ki krožita drug ob drugem, predvsem iz njihovih nizov izmerjenih \mathbf{B} in trenutnih podatkov globalnega modela magnetosfere, o čemer podrobneje v naslednjem podpoglavju.

2.1 Zaznave magnetosferskih pojavov na Zemlji

Konvektivni tokovi v magnetosferi ali ionosferi lahko povzročijo tokove v skorji in oceanih našega planeta. Med motnjami, ki jih povzroča vesoljsko vreme, elektromagnetna indukcija deluje na veliko območje, nastale tokove pa imenujemo geomagnetno inducirane (GIC). Tokovi, jakosti več kot milijon amperov, tečejo skozi ionosfero na visokih zemljepisnih širinah, kar povzroča poleg polarnih sijev tudi segrevanje atmosfere. Ti tokovi niso enakomerni, ampak se nenehno spreminjajo v prostoru in času [12].

Spreminjajoči se tokovi ustvarjajo nestabilna magnetna polja, ki jih čutimo tudi na površini Zemlje, saj povzročajo tokove v velikih prevodnikih, v naravnih (različno prevodne kamnine v zemeljski skorji ali slana oceanska voda) in umetnih strukturah, kakršne so cevovodi, čezoceanski kabli in daljnovodi. Primer spreminjanja induciranih tokov v električnem omrežju prikazuje slika 3.



Slika 3. Spreminjanje vršnih vrednosti induciranih tokov v električnem omrežju Anglije. Vir: British Geological Survey in ESA Space Safety Programme [19].

Tovrstni inducirani tokovi lahko motijo delovanje električnih omrežij.

2.2 Opazovanja s Swarm v nizki tirnici

Misija Swarm [20] s skupino treh oz. štirih satelitov na višinah LEO beleži magnetno polje, proučuje časovni razvoj geomagnetnega polja ter zagotavlja najboljšo raziskavo geomagnetnega polja doslej. Podatki misije pomagajo izboljšati razumevanje obnašanja oceanskih tokov in interakcij delcev in valovanj v ozračju, električnih tokov v ionosferi in njihove povezanosti s pojavi v magnetosferi [21]. Instrumenti na krovu satelitov zagotavljajo zelo natančne vektorske podatke o električnih in magnetnih poljih. S konstelacijo treh satelitov v skoraj polarnih orbitah (naklon približno 87°) na dveh različnih višinah, enega satelita na 530 km in para na 450 km, je misija še posebej primerna za

preučevanje kompleksnih tokovnih sistemov ionosfere nad geomagnetnima poloma. Satelita A in C, ki letita drug ob drugem, sta ločena z $1,6^\circ$ zemljepisne dolžine, kar ju, ko letita nad ekvatorjem, ločuje za približno 180 km v smeri vzhod - zahod. Hkratne meritve na zamaknjenih mestih zagotavljajo možnost vključitve manjkajoče, na tirnico satelita prečne, komponente magnetnega polja neposredno v izračun in ustvarjanje popolnejših rezultatov [20].

Projekt SWESMAG temelji na podatkih o magnetnem polju satelitskega sistema Swarm za raziskovanje učinkov vesoljskega vremena [23]. Spremlja GICe, ki jih poganjajo predvsem hitre spremembe tokov ionosferskega polarnega *elektrojeta* (PEJ) in so pretežno določljivi iz časovnih sprememb horizontalne komponente zemeljskega magnetnega polja dB_H/dt [17]. S skupino satelitov Swarm je v ionosferi možna sprotna določitev tokov, usmerjenih vzdolž črt pretoka magnetnega polja (*Field Aligned Currents, FAC*). To omogoča nedvoumno določitev tokov elektrine v ionosferi, usmerjene vzdolž polja (FAC) z neposredno uporabo rotorja \mathbf{B} .

V območju pojava polarnih sijev, v bližini okoli magnetnih polov, je obstoj FAC po analizah norveške polarne raziskave 1902-1903 že leta 1908 spoznal fizik Kristian Birkeland. Opazovanje FAC s pomočjo satelitov sta Ritter in Lühr razvila tako imenovano tehniko *Curl-B* (rotor gostote magnetnega pretoka) [17]. Njun pristop izhaja iz opazovanja z komponente tokovne gostote v enačbi (1), ki se poenostavi na [17]:

$$j_z = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

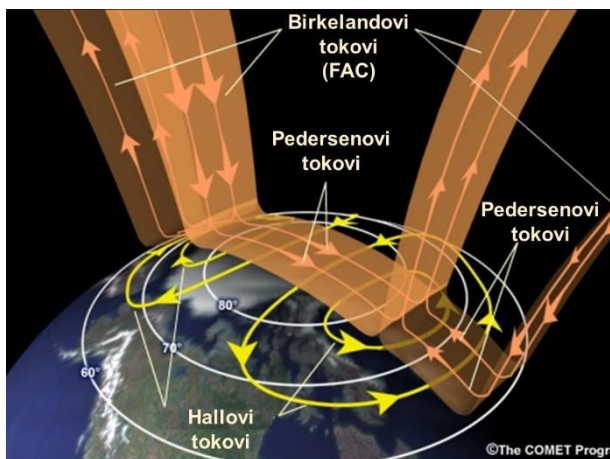
S pomočjo meritev magnetnega polja dveh satelitov in upoštevajoč, da sta satelita na isti zemljepisni širini ob različnih časih in različnih, a na ne preveč oddaljenih krajih, lahko zgornjo enačbo diskretiziramo in prevedemo na [17]:

$$j_z = \frac{2}{\mu_0} [(B_{vA}(t_1) + B_{vA}(t_2)) dl_{vA} + (B_{tA}(t_2) + B_{tB}(t'_2)) dl_{t2} - (B_{vB}(t'_2) + B_{vB}(t'_1)) dl_{vB} - (B_{tB}(t'_1) + B_{tA}(t_1)) dl_{t1}] \times \frac{1}{(dl_{vA} + dl_{vB})(dl_{t1} + dl_{t2})} \quad (3)$$

kjer so z indeksi v označene količine v smeri leta satelita, s t v smeri veznice glede na drugi satelit, A in B označujeta oba satelita, t_1 in t_2 sta časa preletov na obeh širinah satelita A, količini s črtico pa satelita B. \mathbf{B} je gostota magnetnega pretoka, dl pa razdalje, ki morajo biti zadosti majhne, da je diskretizacija še upravičena.

Za obdelovanje podatkov konstelacije Swarm je bila vzpostavljena zbirka podatkov o komponentah magnetnega in električnega polja ter ionosferskih tokov [24], [25]. Globalni magnetno-hidrodinamični (MHD) model, ki zajema električne tokove v ionosferi in magnetosferi pod vplivi magnetnih polj, je bil uporabljen za simulacijo interakcije Sončevega vetra z magnetosfero. Gostota magnetnega pretoka \mathbf{B} vpliva na hitrost gibanja elektrine \mathbf{v} preko Lorentzove sile $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ in s tem posledično tudi na gostoto električnega toka \mathbf{J} kot

produkta hitrosti in gostote elektrine. Tokovi, prikazani na sliki 4, poravnani z magnetnim poljem (FAC, Birkelandovi tokovi), se pojavljajo višje v magnetosferi in nižje, v ionosferi ter povezujejo obe območji [12]. Z uporabo empiričnega modela za prevodnost ionosfere, predstavljene s tenzorjem, je izpeljana prostorska porazdelitev električnega potenciala, izračunati pa je mogoče t.i. Hallove in Pedersenove tokove v ionosferskih plasteh D in E (slika 4). Električna prevodnost, vzporedna z električnim poljem, nastalim v Zemljini ionosferi, se imenuje Pedersenova prevodnost in je običajno dvakrat manjša od Hallove prevodnosti, ki je pravokotna na električno polje. Posledično so Hallovi tokovi v ionosferski plasti E (*electrojet*) dejansko močnejši od Pedersenovih ionosferskih tokov smeri sever-jug, ki povezujejo FAC v območju polarnih sijev (t.i. območje 1) in FAC nižjih zemljepisnih širin (t.i. območje 2), slika 4. Tipične motnje v gostoti magnetnega pretoka, ki jih povzroči na zahod tekoči elektrojet, so 500–1000 nT, medtem ko so motnje, ki jih povzroči na vzhod tekoči elektrojet, približno polovico manjše [12], [26].

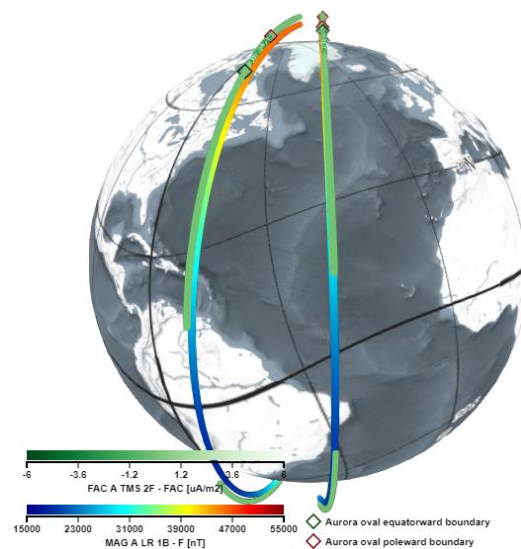


Slika 4. Električni tokovi v ionosferskih plasteh D in E [27].

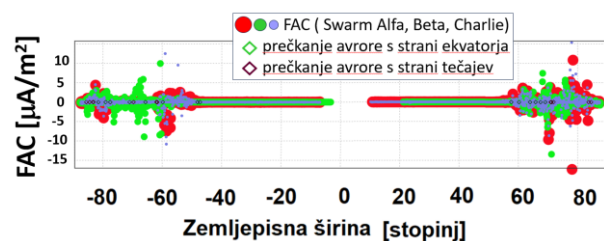
Iz velikosti obojih se določa prostorska porazdelitev deklinacij magnetnega polja. Komponente magnetnega in električnega polja se izračunavajo na krogelni mreži, ki sega od višine 90 km do 4 zemeljskih polmerov. Simulacije se izvajajo za različne orientacije medplanetnega magnetnega polja (IMF), ki predstavljajo mirne do zmerno motene geomagnetne razmere. V tem modelu MHD je aktivnost odvisna od amplitude medplanetnega magnetnega polja B_z .

Z uporabo sistema Swarm se določa porazdelitev tokovne gostote vzdolž tirnic iz podatkov o magnetnem polju [17]. Izračunani tokovi se primerjajo s predvidenimi tokovi. Ujemanje med vhodnim modelom in s primerjavo z dobljenimi FAC, je bistveno boljše v primerjavi z ocenami iz rezultatov, ki jih daje samo en satelit. Nizka zemeljska tirnica satelitov Swarm s kratkimi obhodnimi časi omogoča številne konjunkcije z zemeljskimi magnetnimi postajami, s pomočjo katerih je

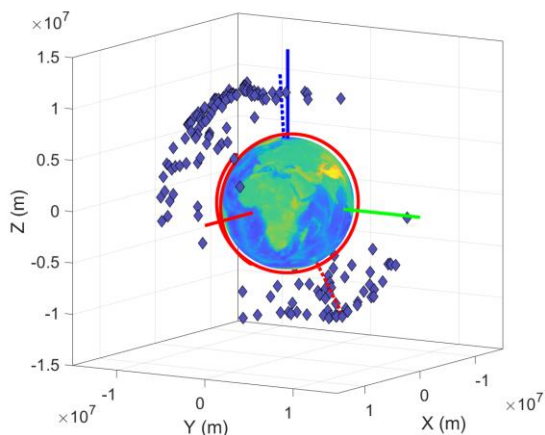
mogoče določiti odvod dB/dt . Projekt *Space Weather Effects by Swarm Magnetic Field Data and Relationship to Ground Observations* (SWESMAG) temelji na merilni verigi, ki jo zagotavljajo Swarmova opazovanja FAC, polarnih tokov PEJ (*Polar Electro-Jet*) in podatki dB/dt z zemeljskih postaj. Za uskladitev opazovanj FAC s potrebami SWESMAG je uveljavljen nov indeks FAC (SFAC), ki vrednoti velikost obsežnega sistema FAC z največjo absolutno vrednostjo magnetne motnje za vsako Swarmovo prečkanje ovala polarnih sijev. Rezultat prikazujeta sliki 5 in 6. Prečkanje ovala v smeri od magnetnega ekvatorja proti magnetnemu polu pri letenju proti severu ali pri prečkanju ovala v nasprotni smeri, kaže zaznavanje FAC (glej sliko 6), na mestih, označenih na sliki 5.



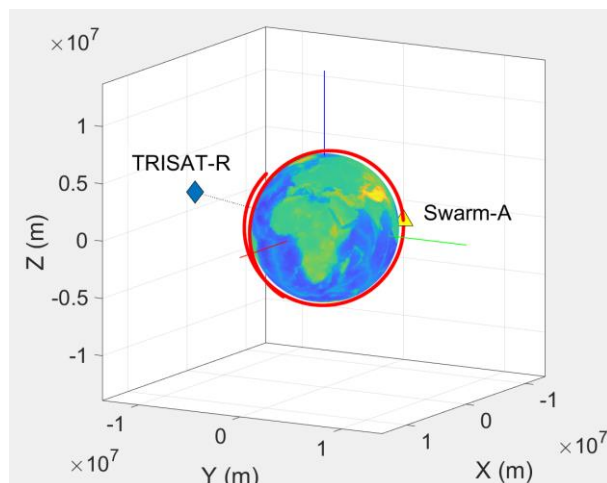
Slika 5. Odsotnost podatkov FAC v okolici magnetnega ekvatorja z manjšo izmerjeno B (MAG) in porast vrednosti FAC nad poloma iz podatkov satelita Swarm A 21. aprila 2023 od 19:57 do 22:04 UTC (VirES for Swarm) [22].



Slika 6. Odsotnost podatkov o FAC v okolici magnetnega ekvatorja in porast FAC ob prečkanju avrornega pasu iz podatkov satelitov Swarm A, B in C 21. aprila 2023 od 19:57 do 22:04 UTC glede na zemljepisno širino (južne so negativne) (VirES for Swarm) [22].



Slika 7. Položaji točk, v katerih je doslej Trisat-R (MEO) v različnih pogojih zabeležil gostoto magnetnega pretoka, so označeni z rombi, rdeča krivulja ponazarja tirnico satelita Swarm A (LEO) 21. aprila 2023 od 19:57 do 21:57 UTC [22], črtkani ravni črti izhajata iz območij trenutnih geomagnetnih polov.



Slika 8. Točki zajema podatkov obeh satelitov 21. aprila 2023 ob 20:57 UTC in tirnica satelita Swarm A od 19:57 do 21:57 UTC [22]. Trisat-R je zajel podatek 5000km nad območjem, nad katerim je bil Swarm ob 20:16 in ob 21:50.

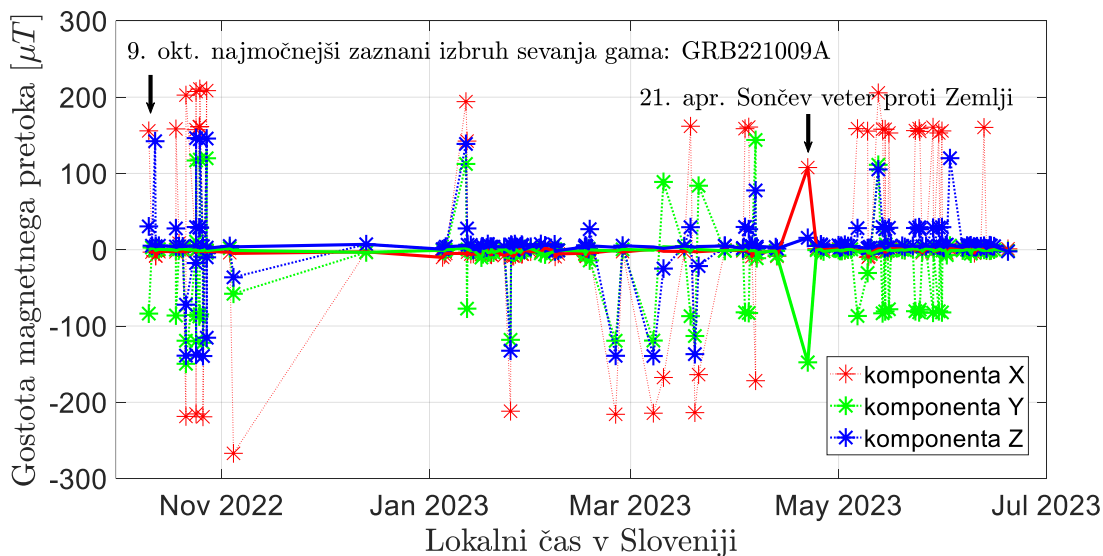
2.3 Opazovanje s TRISAT-R v srednji tirnici

Z enim od prvih treh nanosatelitov v srednji tirnici na 5900 km, v osrčju magnetosfere, slovenskim TRISAT-R [11],[29], razvijalci demonstrirajo trdoživost elektronike. Na krovu nosi poleg z umetno inteligenco podprte opreme za merjenje ionizirnih sevanj tudi zelo občutljiv magnetometer [28], [29].

Z občutljivim magnetometrom je bila do oddaje tega prispevka poskusno izmerjena gostota magnetnega pretoka v 155 trenutkih v točkah, ki jih prikazuje Slika 7, odčitke vseh treh komponent \mathbf{B} pa Slika 9. Slika 2 pa prikazuje 21. aprila 2023 izmerjene vrednosti na krovu Swarm A in izračunane v okolici eno uro pred in eno uro po 20:57 UTC, ko je magnetometer na TRISAT-R izmeril povečane vrednosti v točki, prikazani na Sliki 8 skupaj z delom tirnice satelita Swarm A.

3 Sklepi

Tokovi elektrin v magnetosferi in ionosferi povzročajo običajne, ob povečanih dotokih energije s plazmo s Sonca pa izredne pojave v magnetosferi in sevalnem pasu Zemlje. Vplivajo na procese na Zemlji in na kazanje magnetometrov satelitov. Hkratno opazovanje magnetnih polj v okolici več bližnjih satelitov omogoča določitev vzrokov magnetnih polj, ki se pojavljajo poleg geodinamskega, še posebno, če poznamo model pojavljanja, kot je opisano v prispevku za pojave Birkelandovih tokov vzdolž geomagnetnega polja. Sorazmerno redko zajeti podatki satelita v srednji tirnici kažejo občasno povečane vrednosti. Primerjava s podatki sistema Swarm ne kaže posebnega ujemanja, saj je bila sončeva plazma takrat šele na poti in je magnetosfero Zemlje dosegla šele dva dni kasneje.



Slika 9. Vrednosti 155 odčitkov treh komponent gostote magnetnega pretoka, izmerjene z merilnikom na krovu satelita Trisat-R od 10. oktobra 2022 do 19. junija 2023. Črtkane črte povezujejo surove rezultate, neprekinjene pa filtrirane.

Zahvala

Avtorja se zahvaljujeva doc. dr. Iztoku Krambergerju za posredovanje zajetih podatkov gostote magnetnega pretoka s satelita Trisat-R.

Literatura

- [1] H. Amit, R. Leonhardt, J. Wicht. Polarity Reversals from Paleomagnetic Observations and Numerical Dynamo Simulations. *Space Sci Rev* št. 155, 2010, str. 293–335. dostopno na: <https://doi.org/10.1007/s11214-010-9695-2>.
- [2] M. Ozaki, S. Yagitani, Y. Kasahara, et al. Magnetic Search Coil (MSC) of Plasma Wave Experiment (PWE) aboard the Arase (ERG) satellite. *Earth Planets Space* 70, 76 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0837-1>.
- [3] C. A. Kletzing, W. S. Kurth, M. Acuna, et al. The Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) on RBSP. *Space Sci Rev*, št. 179, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6>
- [4] U. Ali Ahmad; Y. Kasahara; S. Matsuda; M. Ozaki; Y. Goto. Automatic Detection of Lightning Whistlers Observed by the Plasma Wave Experiment Onboard the Arase Satellite Using the OpenCV Library. *Remote Sens.* 2019, 11, 1785. dosto: <https://doi.org/10.3390/rs11151785>
- [5] M. Hanzelka, O. Santolík. Theories of Growth and Propagation of Parallel Whistler-Mode Chorus Emissions: A Review. *Surv Geophys* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10712-023-09792-x>
- [6] J. Chum, F. Jiricek, O. Santolík, M. Parrot, G. Diendorfer, J. Fiser. Assigning the causative lightning to the whistlers observed on satellites. *Ann. Geophys.*, 24, 2921–2929, 2006, dostopano na: www.ann-geophys.net/24/2921/2006/
- [7] L. Liao, S. F. Zhao, X. H. Shen, Z. M. Zeren, H. Y. Peng, H. X. Lu, Detecting seismic electromagnetic ELF anomalies associated with the 2010 Yushu earthquake in China by DEMETER observations and ELF Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling propagating model. *Sci China Tech Sci*, št. 66, 2023, str. 1192–1202, <https://doi.org/10.1007/s11431-022-2164-7>.
- [8] S. Bhattacharya, S. Sarkar, A.K. Gwal, M. Parrot, Electric and magnetic field perturbations recorded by DEMETER satellite before seismic events of the 17th July 2006 M 7.7 earthquake in Indonesia, *Journal of Asian Earth Sciences*, št. 34, zv. 5, 2009, str. 634-644, dostopno na: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2008.08.010>.
- [9] D. Koroncay, J. Lichtenberger, M. A. Clilverd, C. J. Rodger, S. I. Lotz, D. V. Sannikov, et al.. The source regions of whistlers. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, št. 124, 2019, str. 5082–5096. dostopno na: <https://doi.org/10.1029/2019JA026559>.
- [10] J.-F. Ripoll, G. D. Reeves, D. L. Turner. Radiation Belt Physics From Top To Bottom: Combining Multipoint Satellite Observations And Data Assimilative Models To Determine The Interplay Between Sources And Losses. dostop: <https://www.issibern.ch/teams/radbeltpysics/>
- [11] ESA, AI CubeSat headed to Van Allen Belts on Vega-C. 2022, dostopno na <https://www.esa.int/>
- [12] S. W. H. Cowley. Magnetosphere of the Earth, Magnetosphere of the Earth v: D. Gubbins, E. Herrero-Bervera, (ur.) Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_205
- [13] D. N. Baker, et al. A Long-Lived Relativistic Electron Storage Ring Embedded in Earth's Outer Van Allen Belt, *SCIENCE*, 2013, zv. 340, št. 6129, str. 186-190, <https://doi.org/10.1126/science.1233518>.
- [14] Swarm dodges collision during climb to escape Sun's wrath, *Space Safety*, European Space Agency, 2022. https://www.esa.int/Space_Safety/
- [15] E. Tretkoff, *Space Weather and Satellite Engineering: An Interview With Michael Bodeau*, *Space Weather*, št. 8, 2009, str. 12-13, doi:10.1029/2010SW000584 <https://doi/pdf/10.1029/2010SW000584>.
- [16] D. N. Baker, P. J. Erickson, J. F. Fennell, J. C. Foster, A. N. Jaynes, P. T. Verronen. Space Weather Effects in the Earth's Radiation Belts. *Space Sci Rev* 214, 17, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>.
- [17] P. Ritter, H. Lühr: Curl-B technique applied to Swarm constellation for determining field-aligned currents. *Earth Planets, and Space*, št. 58, 2006, str. 463–476, dostopno na: <https://doi.org/10.1186/BF03351942>.
- [18] M. Vidmar, *Elektrodinamika, Založba FE*, 1. elektronska izdaja, 2020, <http://antena.fe.uni-lj.si/literatura/ed.pdf>
- [19] ESA, Federated products from the British Geological Survey, BGS Peak Geomagnetically Induced Current (GIC) for Scotland, England, Wales and the UK, <https://swe.ssa.esa.int/solar-weather>
- [20] ESA, Swarm Overview - Earth Online, dostopno <https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm/>,
- [21] E. Friis-Christensen, H. Luhr, G. Hulot. Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field. *Earth Planets Space*, št. 58, 2006, str. 351–358.
- [22] Earth's magnetic field as observed by satellite, VirES for SWARM <https://vires.services/>
- [23] ESA, SWESMAG - Earth Online, dostopno na: <https://earth.esa.int/eogateway/activities/swesmag>
- [24] S. Vennerstrom, T. Moretto, L. Rastätter, J. Raeder. Modeling and analysis of solar wind generated contributions to the near-Earth magnetic field. *Earth Planets Space*, 58, 451–461, 2006, dostopno na: <https://doi.org/10.1186/BF03351941>.
- [25] Swarm Utilisation Analysis (SUA) / Swarm Field-Aligned Current (FAC) - Latest plots, dostopno na: <https://swe.ssa.esa.int/gfz-sua-i-federated>.
- [26] E. V. Mishin, A. V. Streltsov, *Nonlinear Wave and Plasma Structures in the Auroral and Subauroral Geospace*, 2022. Elsevier, <https://doi.org/10.1016/C2019-0-02456-9>.
- [27] COMET, *Physics of the Aurora: Earth Systems*. The Univ. Corporation for Atmospheric Research, 2004. https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/161
- [28] F. Dimc, Opazovanje geomagnetizma na daljavo, *Zbornik enaintridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK*, Portorož, Slovenija, 2022.
- [29] ESA, Trisat-R <https://www.eoportal.org/satellite-missions/trisat-r#spacecraft>
- [30] C. Xiong, C. Stolle, H. Lühr, The Swarm satellite loss of GPS signal and its relation to ionospheric plasma irregularities, *Space Weather*, št. 14, 2016, str. 563–577, dostopno na: <https://doi.org/10.1002/2016SW001439>.