

# Opazovanja geomagnetizma na daljavo

Franc Dimc

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

## Remote Observations of Geomagnetism

**Abstract.** *Driven by the expectations of the navigational public for accurate magnetic declination data, an overview of the sources reflecting in the geomagnetism is presented. The paper describes how the world's geomagnetic models were originally created by observatories on the Earth's surface and have been updated over the past 20 years with data from remote observations by satellites in low and geostationary orbits. On-site data filtering is progressing, but the farther the magnetometer is from Earth or the molten core planet, the more it is exposed to the less predictable storm events and the more difficult it is to model and predict long-term behavior.*

### 1 Uvod

Satelitske in zemeljske geomagnetne meritve se uporabljajo za sestavljanje dolgoročnih modelov zemeljskega magnetnega polja, ki ga povzroča jedro, in obsežna magnetna polja zemeljske skorje. Ti modeli se uporabljajo v navigacijskih in referenčnih sistemih. Redno preizkušanje ladijskega magnetnega kompasa, obvezne naprave za varno navigacijo [1], in njegovo umerjanje sta možni s poznavanjem podatka o lokalni magnetni deklinaciji. Geomagnetni podatki se uporabljajo tudi za spremljanje kratkoročnih sprememb vesoljskega vremena, vključno s pojavom geomagnetnih neviht in za napovedovanje potencialnih nevarnosti za zemeljsko in satelitsko tehnološko infrastrukturo. Satelitski in zemeljski geomagnetni podatki so odprti in dostopni na spletu, tudi geomagnetni indeksi  $K$ . Ti geomagnetni podatki se redko pojavljajo zunaj strokovne skupnosti, verjetno zaradi njihove po naravi stvari zapletene strukture, npr. triosnih časovnih nizov gostote magnetnega pretoka  $B$ , zajetih celo z več satelitov hkrati. Vrzal je torej pomanjkanje uvida o tem, kateri podatki so sploh na voljo, in ali pomanjkanja tehničnih veščin, potrebnih za pridobivanje in uporabo teh podatkov. To so tehnični izzivi, ki zahtevajo proučljivo znanje.

Znanstveni izziv pa je najprej izdelati natančne in stabilne instrumente, nato pa iz njihovih podatkov razložiti počasi spreminjajoče se, a stabilno magnetno polje, ki je nesimetrično zaradi nehomogene sestave skorje, ki se sama počasi premika, medtem ko tokovi hitrih, bolj ali manj vročih naelektrenih delcev iz vesolja prispevajo dodatne variacije polja, ki med drugim povzročajo majhne, a zemeljskim bitjem zaznavne spremembe. Rešitev je v Gaussovem uvidu, da izmerjene podatke o gostoti magnetnega pretoka lahko privzamemo kot gradient magnetnega potenciala, ki se

ga da razviti v vrsto sfernih funkcij. Ključ določitve modela je v vesolju in na Zemlji vrednostim  $B$  pripisati ustrezne koeficiente razvoja v vrsto, da bodo rezultati modela veljali za vso uporabo na površju, seveda še za letalstvo in vožnje po vesolju in tudi npr. satelitska geodezija jih potrebuje. Za izdelavo natančnejših modelov za referenčne sisteme potrebujemo višjo stopnjo in red funkcij kot za modele za navigacijske sisteme in določanje ustrezno več koeficientov, poseben izziv specializiranih raziskovalnih skupin. Za magnetno polje na večjih oddaljenostih od Zemlje, t.i. zunanje polje, se določajo drugačni modeli, saj je tam zemeljsko magnetno polje šibko in prepušča glavno vlogo medplanetnemu, Sončevemu, in vplivom tokov naelektrenih delcev.

*Navigacija:* Če na primer satelitsko podprti navigacijski sistemi (GNSS) v nekaterih okoliščinah ne morejo določiti položaja, uporabimo element, ki omogoča, da ne ostanemo brez tega podatka, da ne izgublamo podatkov o položaju v preteklosti, sedanjosti ali prihodnosti. Ta element je t.i. svetovni model [2] – védenje, ki ga imamo o fizičnem svetu in védenje, ki iz tega sveta izvira in tudi omogoča, da razumemo podatke navigacijskih senzorjev. Temeljna sestavina omenjenega modela je védenje o magnetnem polju Zemlje [3], ki izvira: iz 45 stoletij uporabnosti njegove počasi spreminjajoče se komponente, iz volje do spoznavanja očem skritih časovno spremenljivih izvorov, iz štirih stoletij izzivov opisovanja trenutnih učinkov na površju in dobrega pol stoletja tudi v vesolju ter napovedovanja prihodnjih pojavov [4]. GNSS zahteva za delovanje infrastrukturo, satelitske sisteme, vključno z njihovim nadzornim delom, kar zahtevajo tudi opazovanja zemeljskih polj. Magnetometriški senzori, temelječi na kvantnih pojavih v diamantih [5], bodo v zelo natančnih opazovanjih magnetnega polja zamenjali pretočne (*flux-gate*) in anizotropno magnetno-uporovne ter v navigaciji spet povečali pomen rabe magnetizma [6], celo za določanje položaja [7].

*Raba v znanosti in v vsakdanji praksi navigatorjev:* Magnetna polja imajo pomembno vlogo v fizikalnih procesih v vesolju. V našem sončnem sistemu so magnetna polja planetov presenetljivo različna, čeprav imajo planeti podobne zgradbe [8]. Kozmologom je prisotnost magnetnega polja dokaz evolucije planeta, z njim zelo neposredno nadzoruje svoje elektrodinamično okolje [9]. Magnetna polja planetov organizirajo ionizirano snov v svoji okolici. Odkrivanje obsežnih plazemskih formacij v magnetosferah planetov je pomembno, ker vedénje te plazme daje vpogled v načine porazdelitve in obnašanja plazme v vesolju.

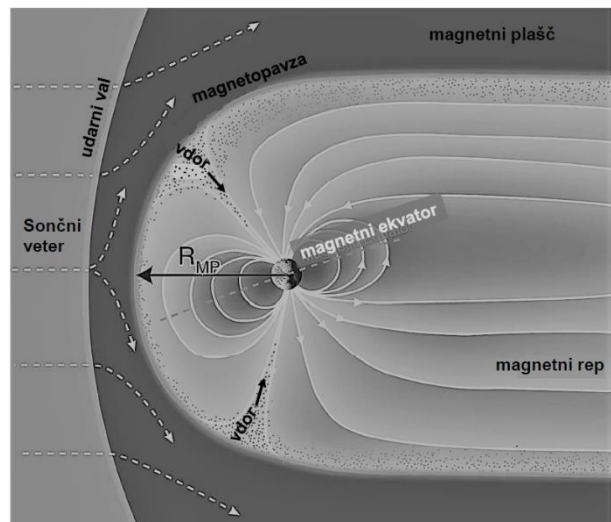
Geološkim raziskovalcem, fizikom visoko energijskih delcev, biologom in kozmologom sicer ne,

toda uporabniku storitev v navigaciji se smisel uporabe geomagnetizma izgublja - v običajnih razmerah sta natančno izmerjen čas in podatek o lastnem položaju v prostoru, važnejša od podatka o smeri, saj že dolgo ni več določljiv le z magnetnim kompasom. Med množico podatkov uporabnik komaj zazna vrednost lokalne magnetne deklinacije, ko spremlja na poveljniškem mostu podatke o smeri plovbe ali v pilotski kabini podatke o letu, saj so odčitki magnetnega kompasa, če sploh je še na krovu, tesno združeni s podatki drugih pripomočkov. Človek se je pri natančnem merjenju časa osamosvojil od zakonitosti vrtenja Zemlje, odkar je spoznal, da se vrtenje v zahtevah po visoki točnosti, navkljub znanemu mehanskemu modelu, pogosto obnaša nepredvidljivo. Za najnatančnejše meritve je človek izdelal atomsko uro, bistveni element sodobnih zemeljskih in vesoljskih navigacijskih sistemov. Preučevanje obnašanja geomagnetnega polja pa natančno spoznava, nova spoznanja pa prenaša v modele, ki so vključeni v prostorske navigacijske in referenčne karte. Napovedljive spremembe geomagnetnega polja se uporabniku vključijo v karto, ko posodablja elektronske storitve. Varnostni vidik posodabljanja kart je za navigatorja pomemben, izpostavljenost kibernetiskim napadom ob posodobitvah pa vodi v popolnoma drugo inženirsko panogo.

*Območje opazovanj geomagnetnih pojavov:* Učinki magnetnega polja Zemlje, popularno imenovani tudi geomagnetizem, so določljivi v spremenljivo velikem območju, ki ga imenujemo magnetosfera, katere Soncu bližnji del v svetlejši sivi barvi prikazuje Slika 1. Magnetosfera zajema prostor okoli Zemlje, znotraj katerega vpliv magnetnega polja Zemlje na naelektrene delce prevladuje nad vplivom medplanetnega oz. Sončevega in je tlak Sončevega vetra, tok plazme in naelektrenih delcev s Sonca, v ravnotežju s tlakom plazme v magnetosferi [10]. Spremenljiva struktura magnetosfere se odziva na spremembe, ki jih povzročata Sonce ob vsakdanjih in izrednih dogodkih. Če bi bila Zemlja edini magnetni objekt v vesolju, bi njena magnetosfera zajemala vse vesolje, pretok Sončevega vetra pa magnetosfero zamejuje v prostor z obliko, podobno kometu. Po nekaj urah od npr. nenadnih koronalnih izbruhov naelektrenih delcev na Soncu (*Coronal Mass Ejection*) pretok stiska sončno stran magnetosfere na le 6-kratnik polmera Zemlje, v mirnih obdobjih pa na 10-kratnik (polmer  $R_{MP}$  na Slika 1).

Plast ozračja 700 km nad površjem Zemlje imenujemo ionosfera. Zaradi prisotnosti Zemljinega magnetnega polja in območij prostih naelektrenih delcev za razširjanje radiofrekvenčnih elektromagnetnih valov je ionosfera anizotropen in disperziven medij. Podrobna fizika razširjanja elektromagnetnega valovanja skozi plazmo postane bolj zapletena, ko je plazma ujeta v magnetno polje. Zaznaven učinek magnetnega polja je postopen lom elektromagnetnih valovanj, izvirajočih iz nižjih plasti ionosfere. Ionosfera obkroža Zemljo v vseh obdobjih ciklusa aktivnosti Sonca, v njej se atomi na dnevni strani pod vplivom ultravijoličnih sevanj, valovnih dolžin pod 130 nm, napovedljivo ionizirajo, na nočni pa rekombinirajo (modela Klobuchar, 1987 in NeQuick G, 2013, [11]).

Večina hitrih naelektrenih delcev Sončevega vetra, gibajočih se s hitrostmi od nekaj 100 do 1000 km/s, se ob približevanju sorazmerno mirujoči magnetosferi upočasnijo, ustvari udarni val, se segreje ter zaradi Lorentzove sile zaobide Zemljo vzdolž magnetnega plašča. Upočasnjeni naelektreni delci ostajajo izven mejne ploskve magnetosfere, ki jo imenujemo magnetopavza, vpliv njihovega toka raztegne nočno stran magnetosfere v magnetni rep, celo na 1000-kratnik polmera Zemlje, v katerem se zgodijo tudi magnetne ponovne povezave (*magnetic reconnection*). Po tem dogodku se sprosti energija, pospešijo naelektreni delci nazaj proti Zemlji. Po vdoru hitrih delcev v bližino magnetnih polov (glej Slika 1) in trkih z delci ionosfere nastanejo pogoji za polarni sij oz. v magnetnem polju za avroralno nevihto. Nevihte lahko trajajo več ur ali celo dni. Pogostnost polarnih sijev je povezana s številom sončnih peg, katerih pojav je koreliran tudi s spremembami v geomagnetnem polju. V magnetosferi Zemlje ležijo tudi območja magnetno ujetih protonov in elektronov, imenovana Van Allenovi pasovi, katerih oblika se tudi spreminja pod vplivom Sončevega vetra, v njih inducirani tokovi plazme dodatno prispevajo h geomagnetnim nevihtam in sevanjem, ki lahko povzročajo odpovedi satelitov v srednjih tirnicah.



Slika 1. Na dvopolno magnetosfero Zemlje vpliva Sončev veter, prirejeno po [12].

Pregled področja opazovanj nadaljujeta poglavje o modeliranjih geomagnetnega polja in o osnovnih podatkih o satelitih z merilniki magnetnega polja.

## 2 Geomagnetno polje in modeli

Zemljino magnetno polje se glede na razlago v Uvodu spreminja, tako prostorsko kot časovno. Tekoče jedro proizvaja magnetno polje, ki daje v rezultatih opazovanj prevladujoč signal, izmerljiv z magnetometri na površju Zemlje in v nizki tirnici. Magnetno polje, izmerjeno na ali blizu površine planeta, je superpozicija prispevkov različnih virov v planetarnem okolju (npr. električni tokovi, ki tečejo v ionosferi in magnetosferi) in njegovi notranjosti (npr. tekoče jedro, namagnetnost kamnin v skorji in inducirani tokovi v planetovi notranjosti s časovnimi variacijami zunanjih polj). Prehodne pojave v

polju povzročajo glavni zunanji magnetosferski viri: obročasti tok, tokovni sistem magnetnega repa, tokovi ob magnetopavzi in obsežni sistemi tokov, ki so poravnani z geomagnetnim poljem [13]. Znanstveni izziv je že v uvodu omenjena zapletenost razločevanja vplivov teh različnih virov in natančna določitev njihove prostorske in časovne strukture [8].

Matematične predstave o geomagnetnem polju je na temeljih podatkov zemeljskih opazovanj razvil Carl Friedrich Gauss leta 1839 in z matematičnimi modeli že takrat razločil zunanje in notranje vire geomagnetnega polja. Uvid v drugačnost obravnave notranjega in zunanjega polja že od tedaj omogoča njuno ločeno obravnavo [8]. Na temeljih študij magnetnih neviht, polarnih sijev ter drugih učinkov Sončeve dejavnosti, je bil leta 1958 privzet splošen pojem zunanjega geomagnetnega polja [14], ki iz rezultatov opazovanj izloča vplive interakcij med premikajočo se plazmo in magnetnimi ovirami [8]. Vodoravni, na površino tangencialni komponenti vektorja magnetnega polja Zemlje podajata informacijo o vsoti notranjega in zunanjega polja, medtem ko navpična oz. radialna komponenta podaja informacijo o njuni razliki. Analiza vseh treh komponent vektorja torej omogoča razločevanje notranjih in zunanjih izvorov [8].

Na površini Zemlje je gostota dipolnega jedrnega polja razporejena od približno 23.000 nT na magnetnem ekvatorju do 62.000 nT na magnetnih polih, z geomagnetno šibkejšimi geomagnetnimi nevihtami zaradi sončevega vetra po okoli 20 nT na srednjih zemljepisnih širinah in po 100 nT v polarnih območjih. Med različno dolgimi geomagnetnimi nevihtami pa največje spremembe segajo nad 1000 nT v polarnih območjih in nad 250 nT v srednjih zemljepisnih širinah [15]. Lokalna odstopanja, ki jih povzročata narava zemeljske skorje, imenovana geomagnetne anomalije, segajo do približno 100 nT. Manjše, a enakomerno ponavljajoče se magnetne variacije, od 20 do 50 nT, povzročajo tokovi zaradi sile na proste elektrone v ionosferi, kar naj bi živali uporabljale celo kot biološko uro [16].

Glavna dolgoročna modela polja sta *Mednarodno geomagnetno referenčno polje* (IGRF) [17] in *Svetovni magnetni model* (WMM) [18], [19]. IGRF se uporablja v magnetnih referenčnih sistemih, dolgoročno dinamiko polja zemeljskega jedra, elektrodinamiko ionosfere, vesoljske vremenske pojave, elektromagnetno indukcijo, lokalne magnetne anomalije v zemeljski skorji in geodezijo, glavna uporabnost WMM pa je zagotoviti magnetno deklinacijo, horizontalno komponento in skupno gostoto magnetnega pretoka ter inklinacijo katere koli izbrane točke izven polarnih območij zemeljske površine v času do naslednje posodobitve od 1 km pod površino svetovnega elipsoida WGS 84 do 850 km nad njo. Oba modela vključujeta prispevke počasi spreminjajočega se polja jedra in (litosferskega) polja skorje, ki je glede na dosedanje analize skoraj statično. Modela posodobijo vsakih 5 let, posodobitve upoštevajo časovne spremembe v osrednjem polju, vanje je vključena tudi linearna napoved počasne, t.i. sekularne variacije za oceno polja za naslednjih 5 let.

IGRF in WMM sta določena podobno, z razvojem sfernih harmoničnih funkcij magnetnega potenciala  $V$  v vrsto [19]. Opazovanja glavnega magnetnega polja Zemlje s satelitov v nizki tirnici in z opazovalnic na površju vključujejo tudi časovno spremenljivost zaradi konvekcijskih tokov in valov v Zemljinem jedru in počasi spreminjajočo se (sekularno) komponento, toda brez učinkov induciranih električnih tokov zaradi vplivov Sonca. Način iskanja rešitve nabora Gaussovih koeficientov, ki omogočajo najboljše ujemanje vrste z rezultati opazovanj, predvideva, da v območju veljavnosti IGRF in WMM ni lokalnih virov magnetnega polja. Zaradi stisnjenosti oblike Zemlje na polih moramo namesto  $\varphi$  upoštevati  $\varphi'$ , prilagojeno zemljepisno širino. Gostoto magnetnega pretoka  $\mathbf{B}$  je mogoče izraziti v omejenem območju točk  $(\lambda, \varphi')$  na omejeni razdalji  $r$  od središča Zemlje v omejenem časovnem intervalu oz. epohi  $t$ , kot gradient skalarnega časovno spremenljivega in nehomogenega potenciala  $V$ :

$$\mathbf{B}(\lambda, \varphi', r, t) = -\nabla V(\lambda, \varphi', r, t). \quad (1)$$

Mednarodno združenje za geomagnetizem in aeronomijo (IAGA) je sestavilo model IGRF s Huberjevo utežitvijo naborov nizov koeficientov različnih skupin, ki so razvijale  $V$  v vrsto po sfernih funkcijah stopnje in reda 13 [17]. WMM pa je izračunan z manj koeficienti na podoben način, toda z razvojem vrste do stopnje in reda 12. Za WMM sta odgovorna Nacionalno središče ZDA za informacije o okolju (NCEI) in Britanski geološki zavod (BGS). Ker vseh sprememb ni mogoče v celoti predvideti, se negotovost WMM sčasoma počasi povečuje, letna poročila vključujejo tudi opise premikanja magnetnih polov in upadanje gostote pretoka geomagnetnega polja južnoatlantske anomalije [3], nad katero sateliti dobivajo večje doze sevanja iz virov izven magnetosfere kot drugje na Zemlji, kar je pomemben podatek za pomorščake in letalce.

V zemeljskih opazovanjih po svojih standardih izstopa program INTERMAGNET [20], ki od 1987 vzpostavlja svetovno omrežje sodelujočih magnetnih observatorijev, ki sprejemajo sodobne standardne specifikacije za merilno in snemalno opremo, da bi olajšali izmenjavo podatkov in proizvodnjo geomagnetnih izdelkov v skoraj realnem času. Oblikujejo tudi t.i. planetni indeks  $K_p$ , ki na lestvici od 0 do 9 ponazarja stanje geomagnetnega polja, od povsem mirnega do izredno močne geomagnetne nevihte, in temelji na opaženih variacijah geomagnetnega polja. Lokalni indeks  $K$  poleg planetnega zagotavlja natančnejšo določitev stopnje geomagnetne aktivnosti na omejenem območju (nekaj tisoč km<sup>2</sup>). Takšen lokalni indeks lahko zazna manjše motnje in jih pogosto zazna prej kot globalni. Shema podatkov programa INTERMAGNET uporabljajo sateliti Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), s katero uspešno usklajujejo geomagnetne podatke med IAGA in Mednarodno zvezo za geodezijo in geofiziko.

Omenimo še *model polja magnetosfere CHAOS-7* Danmarks Tekniske Universitet (DTU), enega najboljših kandidatov za model IGRF-13 v obdobju brez geomagnetnih neviht, ki združuje izsledke satelitskih opazovanj in dodatno obdelane podatke 182 zemeljskih

opazovalnic sekularnih geomagnetnih sprememb od 1997 do 2019 [3], preko Gaussovih koeficientov za notranja polja in zunanja polja razločuje tudi nastala polja v električno prevodnih oceanih in prevodni zemeljski notranjosti.

Natančnost modeliranja magnetnih polj v bolj oddaljenem v vesolju je odvisno od kakovosti in količine podatkov v določenem območju ter njihovega časovnega okna. *Model TS05* [21] računa magnetno polje v obdobjih sončnega vetra in večjih geomagnetnih indeksov  $K_p$ . TS05 so zato v geostacionarni tirnici uporabili leta 2018 med geomagnetno nevihto ( $K_p = 4$ ) za umerjanje sistema SOSMAG [22].

### 3 Opazovanja geomagnetnega polja s sateliti

Prve podatke o geomagnetnem polju na višinah do 5 km so v 50. letih 20. stoletja zagotovila letala, po desetih letih so podatke o polju nad 200 km začeli posredovati tudi sateliti (Sputnik, Cosmos, Space Rocket, Pioneer, Explorer). Prvi satelit, za natančna opazovanja posebej opremljen z magnetometri, je bil leta 1979 v Soncu sinhrono orbito utirjeni Magsat [4], ki je pol leta omogočal za današnje zahteve še sorazmerno grob model geomagnetnega polja. Za modeliranja od leta 1999 naprej pa so podatke zagotavljali sateliti Ørsted, CHAMP, SAC-C, Cryo-Sat-2, danes pa sistem Swarm [23] zagotavlja podatke s točnostjo približno 1 nT [8].

Hitro krožeči sateliti za opazovanja Zemlje na nizkih tirnicah (LEO), npr. TRISAT [24] ali za komunikacije, primer Iridium Next [13] uporabljajo magnetometre kot pomemben navigacijski element. Eden od prvih nanosatelitov v srednji tirnici (MEO, na 5900 km, v osrčju magnetosfere), je slovenski TRISAT-R [25], ki poleg opreme za merjenje ionizirnih sevanj in demonstracijo trdoživosti elektronike nosi na krovu tudi zelo občutljive magnetometre, za vodenje pa uporablja uveljavljene magnetne obračalnike (*magnetorquer*), zelo koristnega pripomočka za izogibanje - vesoljskim smetem.

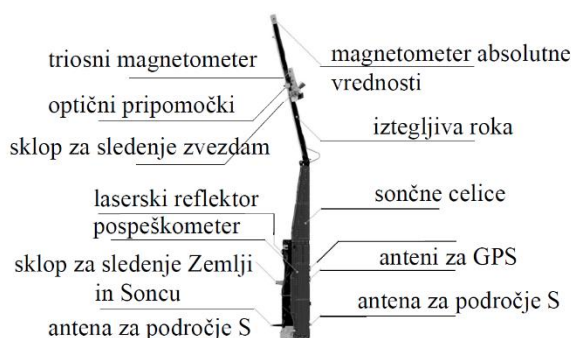
V tem poglavju se omejujemo predvsem na namenska satelitska opazovanja geomagnetnega polja na nizkih tirnicah 400 -500 km ter vplivov iz vesolja na magnetno polje vzdolž geostacionarne tirnice (GEO), 35.800 km od površine Zemlje.

#### 3.1 Swarm v nizki tirnici

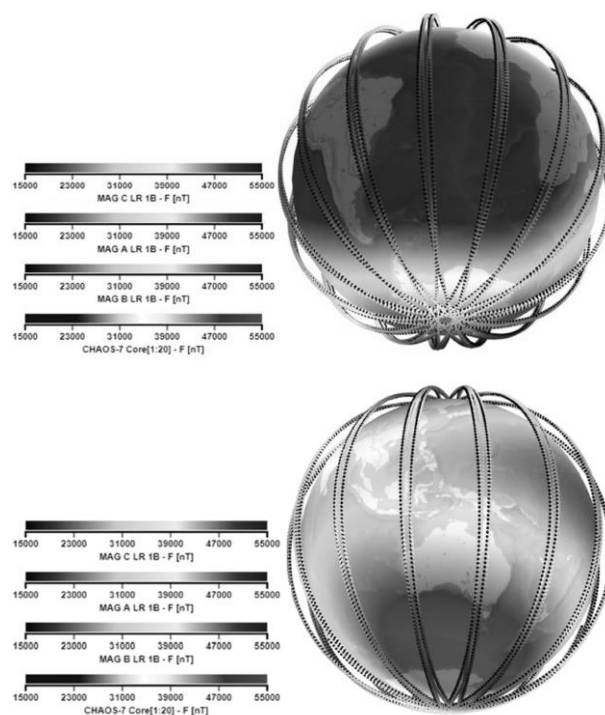
Od leta 2013 Evropska vesoljska agencija (ESA) s sistemom Swarm [23] omogoča natančno preučevanje dinamike jedra, geodinamskih procesov, interakcij med jedrom in plaščem, kartiranje namagnetnosti zemeljskega plašča in njegova geološka interpretacija, določitev prostorske porazdelitve električne prevodnosti plašča, raziskava električnih tokov, ki tečejo v magnetosferi in ionosferi, poleg tega pa tudi: prepoznavanje oceanskih krožnih tokov s pomočjo njihovih magnetnih podpisov ter ocenjevanje velikosti magnetnega vpliva zgornjih plasti ozračja.

Sistem sestavljajo trije enaki sateliti. A in C sta bila na začetni višini 462 km utirjena tako, da C zaostaja na tirnici za A z zamikom, zmanjšanim z začetnih 10 s na samo 2 s, tretji, B, pa za podatke o višinskem profilu

polja kroži na 511 km. Oprema kanadskega satelita CASSIOPE, imenovana e-POP, je bila leta 2018 kot četrti element vključena v konstelacijo Swarm (Swarm-Echo). Vsak od satelitov Swarm nosi poleg ostalih vrst instrumentov (glej Slika 2) tudi triosni (vektorski) magnetometer, nameščen zadosti stran od sončnih celic, da polnilni tokovi do baterij ne vplivajo na kakovost odčitkov magnetnih polj. Senzorji električnega polja so prvi primer dajanja tovrstnih prostorskih posnetkov ionsferskih razmer v nizki tirnici in določanja TEC (*Total Electron Content*). V južnoatlantski magnetni depresiji je satelitom sistema Swarm redno kratkotrajno odpovedovala elektronika (*single-event electronic upsets*), s čimer je še dodatno georeferenciran učinek sevanj v šibkih magnetnih poljih [3].



Slika 2. Instrumenti na satelitih sistema Swarm, prirejeno po [26]



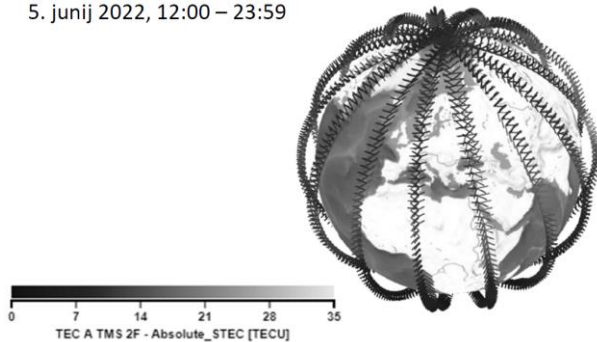
Slika 3. Skalarnе vrednosti  $|B_{geo}|$  oz.  $F$  geomagnetnega modela na višini 450 km nad elipsoidom *zgornja* na območju južnoatlantske depresije in *spodnja* nad Avstralijo skupaj s tirnicami satelitov Swarm A, B in C, 16. avgusta 2022, [26].

Podatki opazovanj so stalno dostopni in pregledno predstavljeni s pripomočkom VirES [26]. Slika 3 prikazuje podobnost vrednosti modela CHAOS-7 na

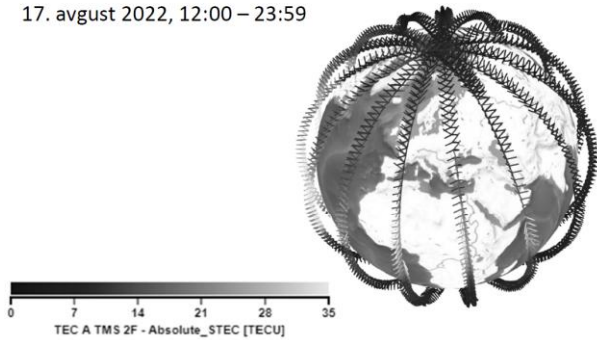
višini 450 km, prikazanih kot barva površja Zemlje, in odčitkov  $|B_{geo}|$  oz.  $F$  med prehodi južnoatlantske depresije in južnega magnetnega pola vseh treh satelitov sistema Swarm 16. avgusta 2022 od 00:00 do 23:59.

Slika 4 pa prikazuje vpliv  $K_p$  na odčitke komponent gostote prostih elektronov TEC v enakih obdobjih dneva, večji TEC v odčitkih pri večjem  $K_p$  vsaj nad južnim Atlantikom je očitno. Vključuje orodja za preučevanje različnih geomagnetnih modelov s primerjavo z rezultati satelitskih meritev Swarm pri danem vesoljskem vremenu in pogojih ionosfere. Stran [23] vsebuje tudi podatke o polarnih sijih (glej *swarm aurora*), vključno z zaporedji posnetkov kamer oz. keogrami.

5. junij 2022, 12:00 – 23:59



17. avgust 2022, 12:00 – 23:59



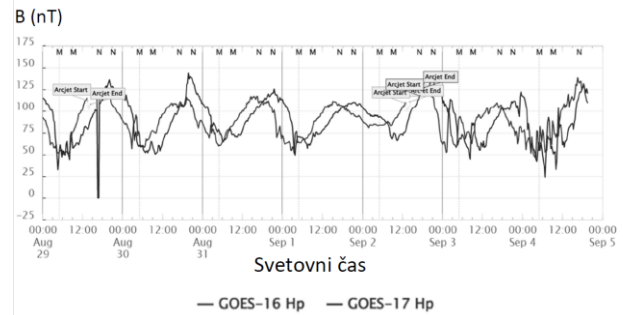
Slika 4. Vpliv  $K_p$  na odčitke TEC satelita Swarm A, posnete v enakih obdobjih zemeljskega dneva: *zgornja*) 5. junija 2022 pri  $K_p \leq 2$  in *spodnja*) 17. avgusta 2022 pri  $K_p \leq 6$ , [26]

Naše Sonce pravkar vstopa v zelo aktiven del svojega 'sončnega cikla', vrh bo cikel predvidoma dosegel leta 2025. Ta dejavnost povečuje gostoto Zemljinega zgornjega ozračja. Sateliti potujejo skozi gostejše ozračje, kar jih upočasnjuje in od njih zahteva, da porabijo več goriva na krovu, da ostanejo v orbiti. A in C sta se pomaknila v višji, manj gost del ozračja, kjer lahko dlje vzdržita na svojih tirnicah [27].

### 3.2 GOES v geostacionarni tirnici

Od leta 1975 ima magnetometre vsak od geostacionarnih satelitov GOES, v upravljanju agencije ZDA za oceanografijo in ozračje (NOAA), ki so v zemljepisni ekvatorski ravnini Zemlje, za približno 6-kratnik zemeljskega polmera od površja Zemlje. Spremljajo geomagnetno polje in njegove variacije. Operativna sta po dva satelita GOES: GOES East (na Slika 5 oznaka 16) nad vzhodno obalo ZDA ( $75,2^\circ$  W) in GOES West (na Slika 5 z oznako 17) nad Pacifikom, tik ob zahodni obali ZDA ( $137,2^\circ$  W).

Slika 5 prikazuje zapis komponente vektorja gostote magnetnega pretoka  $H_p$  (v nT), izmerjene v smeri vzporednice z osjo vrtenja Zemlje [29]. Podatki dnevno variirajo zaradi magnetosferskih tokov, ki na geosinhroni orbiti proizvajajo na dnevni strani Zemlje močnejše magnetno polje, in na nočni strani šibkejša magnetna polja. Vrednost  $F$  se lahko na dnevni strani zmanjša do vrednosti blizu nič ali spusti celo pod njo, kar je lahko posledica stiskanja zemeljske magnetopavze do meje geosinhronne orbite. Manjše vrednosti polja na nočni strani kažejo na močne tokove v magnetnem repu, ki so pogosto vzrok za podaljševanje repa in kasnejše sproščanje energije v njem. Tak pojav lahko že napoveduje nastanek geomagnetne nevihte, ki ima za posledico polarni sij na večjih zemljepisnih širinah ob vdorih delcev z visoko energijo energije v bližino geosinhronne orbite. Lokalni čas opoldne je označen z N, polnoč pa z M.



Slika 5. Zapisi enega tedna komponente  $H_p$  gostote magnetnega pretoka na satelitih GOES 16 in 17, [29].

Meritve geomagnetnega polja so pomembne za interpretacijo meritev energijskih delcev GOES in za zagotavljanje opozoril številnim uporabnikom, posebej za označevanje nenadnega začetka geomagnetne nevihte. Tudi podatki magnetometra GOES se uporabljajo za izdelavo modelov magnetnega polja in za pomoč napovedovalcem pri prepoznavanju pogojev za kopičenje in sproščanje energije v Zemljini magnetosferi, ki se pojavi med geomagnetnimi nevihtami. Meritve magnetnega polja lahko tudi pokažejo, kdaj je sončni veter potisnil mejo magnetosfere, torej magnetopavzo, znotraj geosinhronne orbite, kar se običajno zgodi v zelo motenih vesoljskih vremenskih razmerah. Podatki so bili pogosto uporabljeni za podporo odločitvam o izstrelitvi raket z raziskovalnimi plovili na krovu. Rezultati se lahko uporabijo tudi za potrjevanje uspešnosti obsežnih modelov vesoljskega okolja sklopljene magnetosfere in ionosfere; Središče za napovedovanje vesoljskega vremena (SWPC) [28] tak model načrtuje v bližnji prihodnosti.

### 3.3 SOSMAG v geostacionarni tirnici

Instrument SOSMAG [22], ki ga je ESA vključila v opremo korejskega satelita GEO-KOMPSAT-2A, je od decembra 2018 nameščen nad indonezijskim otočjem na  $128,2^\circ$  E. SOSMAG je sistem magnetometrov, sestavljen iz dveh "fluxgate", ki sodita v znanstveni razred in sta nameščena na 1 m dolg nosilec, ter dveh anizotropnih magnetno-uporovnih. Podatki se zapisujejo

kot 3-osni vektor  $\mathbf{B}$  (sever, vzhod, nadir) [22]. Vsak magnetometer sistema SOSMAG, ki neprekinjeno z vsaj 12 bitnimi A/D pretvorniki vzorči magnetno polje s 128 vektorji na sekundo. Enota za obdelavo podatkov samostojno ali na ukaz z Zemlje prilagaja filtriranje podatkov, samostojno izloča šume do 40 nT, ki nastanejo ob velikih variacijah magnetnega polja v samem satelitu. Satelit na področju X pošilja rezultate vseh senzorjev na portal ESA pretežno kot 1 vektor na sekundo, kar dosega hitrosti do 115 Mbit/s [29].

Močne geomagnetne nevihte lahko povzročijo okvare komunikacijskih sistemov in satelitov, obsežne izpade električne energije in požare na plinskih cevovodih. V tem oziru so možne tudi povezave med astronomskimi pojavi in zemeljskim življenjem, čeprav zemeljsko magnetno polje zmanjšuje vplive nezemeljskih delcev.

#### 4 Sklepi

Satelitska tehnika omogoča razširitev območja opazovanja magnetnih polj po vsej Zemlji. Raziskovanja planetov že z opazovanjem magnetosfer in razporeditvijo naelektrenih delcev v ozračjih dajejo globlji vpogled v nevidne izvore pod površino. Magnetometri z veliko ločljivostjo, orodja za obdelavo podatkov in uveljavljeni način modeliranja lahko odpravljajo učinke prehodnih pojavov ob geomagnetnih nevihtah, zato imajo napovedi obnašanja geomagnetnega polja, ki jih dajejo novi modela za referenčne sisteme ali za navigacijo, vedno večjo informacijsko vrednost, tudi za varnost plovbe.

#### Literatura

- [1] Ships and marine technology - Marine magnetic compasses, binnacles and azimuth reading devices, International standard, ISO 25862 (2. izdaja, 2019).
- [2] J. F. Raquet: What's Next for Practical Ubiquitous Navigation? Inside GNSS, 2013.
- [3] C. C. Finlay, C. Kloss<sup>1</sup>, N. Olsen, M. D. Hammer<sup>1</sup>, L. Tøffner-Clausen, A. Grayver, A. Kuvshinov: The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly, *Earth, Planets and Space* (2020) zv. 72, št. 156.
- [4] T. A. Potemra, F. F. Mobley, L. D. Eckard: The Geomagnetic Field and Its Measurement: Introduction and Magnetic Field Satellite (MAGSAT) Glossary, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, zv. I, št. 3, 1980, str. 162-170.
- [5] J. S. Bennett, B. E. Vyhnaek, H. Greenall, E. M. Bridge, F. Gotardo, S. Forstner, G. I. Harris, F. A. Miranda, W. P. Bowen: Precision Magnetometers for Aerospace Applications: A Review, *Sensors* 2021, št. 21, str. 5568.
- [6] Quantum sensing, Developing a quantum-assured navigation solution, *Advanced Navigation*, 2022.
- [7] A. J. Canciani: Absolute Positioning Using the Earth's Magnetic Anomaly Field, 2016. doktorska disertacija. <https://scholar.afit.edu/etd/251>.
- [8] N. Olsen, K.-H. Glassmeier, X. Jia: Separation of the Magnetic Field into External and Internal Parts, *Space Sci. Rev.* (2010) št. 152, str. 135-157.
- [9] L. Lanzerotti, S. M. Krimigis: Comparative Magnetospheres, *Johns Hopkins APL Technical Digest*, zv. 4, št. 4, 1986, str. 335-347.
- [10] A. Kaase, *Earth's Magnetosphere*, NASA, dostopano: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/).
- [11] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, E. Wasle: *GNSS - GPS, GLONASS, Galileo & more*, 2008, 1 izdaja, Springer.
- [12] F. Bagenal, S. Bartlett: *Earth magnetosphere: basic dipolar magnetosphere with distance to sub-solar magnetopause ( $R_{mp}$ )*.
- [13] S. Califf, P. Alken, A. Chulliat, B. Anderson, K. Rock, S. Vines, R. Barnes, K. Liou: Investigation of geomagnetic reference models based on the Iridium constellation, *Earth, Planets and Space* (2022) zv. 74, št. 37.
- [14] L. J. Cahill: *Magnetic Field Measurements in Space*, *Space Sci. Rev.*, (1963) št. 1, str. 399-414, Kluwer Academic Publishers.
- [15] J. Matzka, A. Chulliat, M. Mandea, C.C. Finlay, E. Qamili: *Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space*, *Space Sci. Rev.* (2010) št. 155, str. 29-64, Springer.
- [16] Vanselow, K., Jacobsen, S., Hall, C., & Garthe, S. (2018). Solar storms may trigger sperm whale strandings: Explanation approaches for multiple strandings in the North Sea in 2016. *International Journal of Astrobiology*, zv. 17, št. 4.
- [17] P. Alken, E. Thebault, C. Beggan, J. Aubert, J. Baerenzung, W.J. Brown, S. Califf, A. Chulliat, G. Cox, C. C. Finlay (2021) Evaluation of candidate models for the 13th generation international geomagnetic reference field. *Earth Planet Space* zv. 73, št. 1, str. 1-21.
- [18] A. Chulliat, W. Brown, P. Alken, S. Macmillan, M. Panizza: (2021) Modeling Earth's ever-shifting magnetism. *Eos*, p 102.
- [19] NOAA, World Magnetic Model, Accuracy, limitations, magnetic poles and error model.
- [20] INTERMAGNET International Real-time Magnetic Observatory Network. <https://intermagnet.github.io/>.
- [21] Community Coordinated Modelling Center: Tsyganenko Magnetic Field. Version: TS05, <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/Tsyganenko>.
- [22] Sosmag- Service Oriented Spacecraft Magnetometer on GEO-KOMPSAT-2A <https://swe.ssa.esa.int/sosmag>.
- [23] European Space Agency, Swarm / Mission Background <https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm/>.
- [24] N. Kosanič, I. Kramberger: Improving Attitude Determination of a Satellite with Photodiodes for Sun Position Estimation using TRISAT data and Earth Albedo model, Zbornik tridesete mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2021, 20. - 21. september 2021, Portorož, Slovenija.
- [25] ESA, Trisat-R, <https://www.eoportal.org/satellite-missions/trisat-r/#spacecraft>.
- [26] Earth's magnetic field as observed by satellite, VirES for SWARM <https://vires.services/> Changelog <https://vires.services/changelog>.
- [27] Swarm dodges collision during climb to escape Sun's wrath, Space Safety, European Space Agency, 2022. [https://www.esa.int/Space\\_Safety/](https://www.esa.int/Space_Safety/).
- [28] National Oceanic and Atmospheric Administration, Space Weather Prediction Center, Goes Magnetometer, 1 minute data.
- [29] eoPortal, Satellite Missions Catalogue, GEO-KOMPSAT-2 (2016), <https://www.eoportal.org/>.