

Utjecaj svemirskog vremena na GNSS

Dukić, Igor

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:401216>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



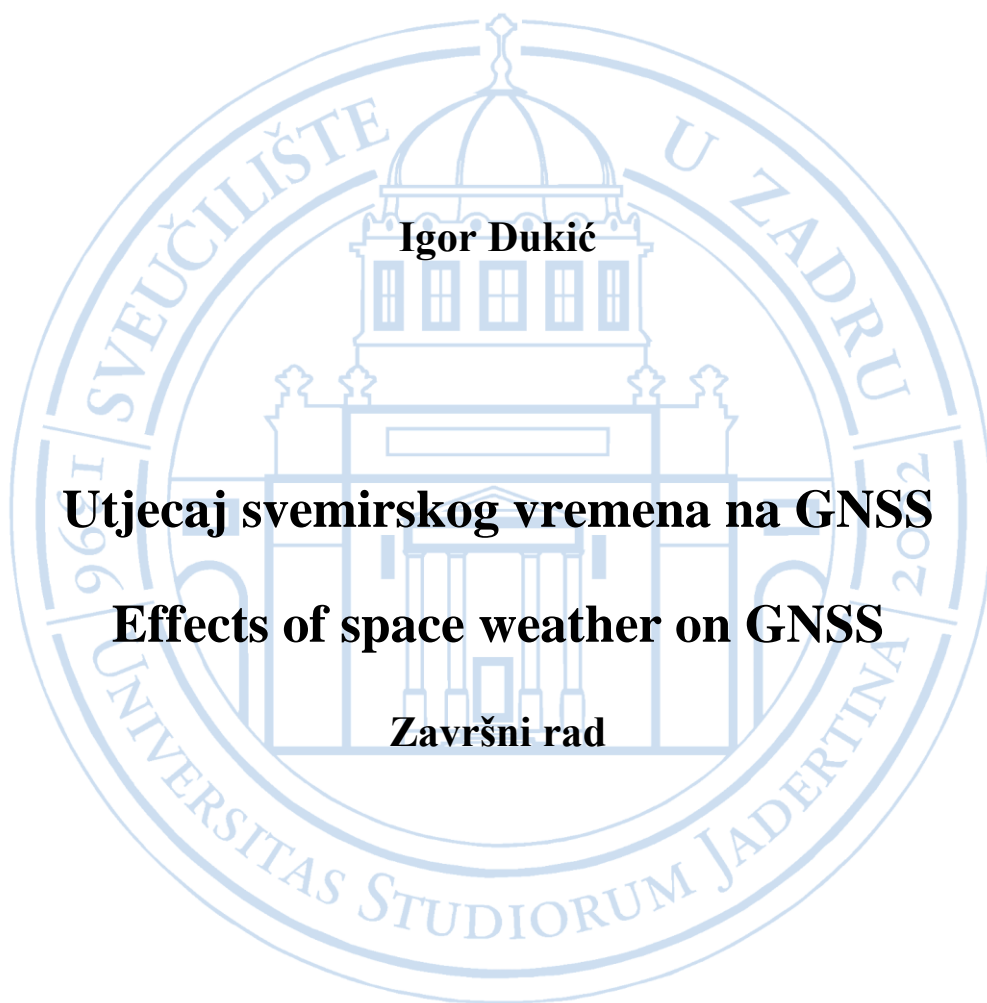
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zadru

Pomorski odjel

Sveučilišni prijediplomski studij

Nautika i tehnologija pomorskog prometa



Igor Dukić

Utjecaj svemirskog vremena na GNSS

Effects of space weather on GNSS

Završni rad

Zadar, 2024.

Sveučilište u Zadru
Pomorski odjel
Sveučilišni prijediplomski studij
Nautika i tehnologija pomorskog prometa

Utjecaj svemirskog vremena na GNSS

Effects of space weather on GNSS

Završni rad

Student/ica:

Igor Dukić

Mentor/ica:

doc. dr. sc. Ivan Toman

Zadar, 2024.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Igor Dukić**, ovime izjavljujem da je moj **završni** rad pod naslovom **Utijeca svemirskog vremena na GNSS** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 1. rujan 2024.

1. Uvod	1
2. Globalni satelitski navigacijski sustavi (GNSS).....	3
2.1. GPS	3
2.2. GLONASS	4
2.3. Galileo.....	4
2.4. BeiDou	4
3. Solarni Ciklusi	5
3.1. Sunčeve pjege	5
3.2. Radio tok.....	6
4. Solarne baklje	7
4.1. Istraživanje Sunčevih baklji	8
5. Koronalna izbacivanja mase	9
6. Geomagnetske Oluje.....	11
6.1. Kp indeks	13
6.2. Polarna svijetlost.....	14
7. Povijesne Geomagnetske Oluje	15
7.1. Carringtonov događaj.....	15
8. Ionosferski poremećaji.....	17
8.1. Efekti ionosfere na GNSS	21
9. Pomoćni (back up) sustavi.....	22
9.1. LORAN.....	22
10. Zaključak.....	23
11. Popis literature	24
12. Popis izvora.....	25

Sažetak

Najčešći izvor utjecaja svemirskoga vremena je solarna aktivnost, prvenstveno potaknuta Sunčevim 11-godišnjim solarnim ciklusom. Svemirsko vrijeme može imati značajne implikacije na različite tehnologije na Zemlji, kao što je GNSS. GNSS su satelitski sustavi kojima je u cilju pronalaženje i praćenje pozicije na našoj planeti. Ključne pojave svemirskog vremena uključuju solarne baklje, koronalna izbacivanja mase, solarni vjetar, geomagnetske oluje, ionosferski poremećaji, zračenje odnosno radijacija. Geomagnetske oluje i solarne baklje predstavljaju najveće rizike za točnost i pouzdanost satelitskih navigacijskih sustava. Geomagnetske oluje najznačajniji su vremenski događaji koji utječu na GNSS. Često ih uzrokuju izbačaji koronalne mase (CME) i brzi tokovi solarnog vjetra u interakciji sa Zemljinim magnetskim poljem. Ove oluje mogu uzrokovati ozbiljne ionosferske poremećaje, što dovodi do velikih TEC varijacija, povećane scintilacije i poremećaja signala. Učinci ovih događaja mogu biti ozbiljne pogreške u pozicioniranju, gubitak signala, vremenske pogreške i povećane greške u preciznosti (DOP). Indeks F10.7 kao i kp indeks nam služe kao važni alati u prognozi svemirskoga vremena. Što se tiče pripreme i spremnosti na smetnje, postoje razne mjere i planovi kao rad na jačoj zaštiti kritičnih sistema u uređajima i održavanje suvišnih dijelova sistema. Još jedan primjer su stariji sistemi koji su manje izloženi utjecaju. Zabilježeni povijesni događaji nam omogućuju bolje razumijevanje našoj izloženosti svemirskom utjecaju, što je važan faktor u našem napretku razumijevanja ovakvih pojava. Uz sva dosadašnja saznanja, proučavanje svemirskoga vremena je sve relevantnije kako modernija tehnologija postaje sve izloženija utjecaju svemirskoga vremena.

Ključne riječi: GNSS, svemirsko vrijeme, solarni ciklus, solarne baklje, koronalni izbačaji mase, CME, geomagnetska oluja, povijesne geomagnetske oluje, ionosferski poremećaji, magnetosfera, ionosfera, Carrington event.

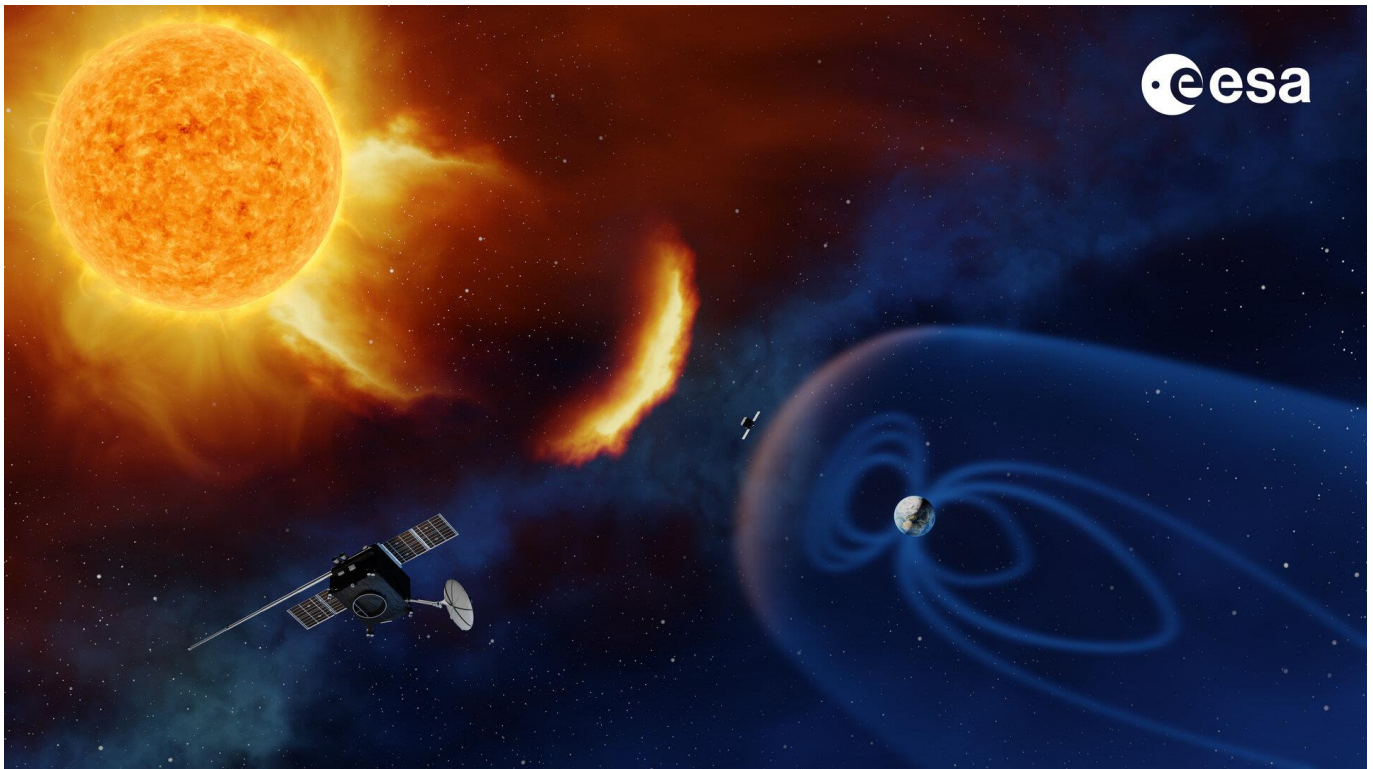
Summary

The most common source of space weather influences is solar activity, primarily driven by the Sun's 11-year solar cycle. Space weather can have significant implications for various technologies on Earth, such as GNSS. GNSS are satellite systems whose goal is to find and track the position on our planet. Key phenomena of space weather include solar flares, coronal mass ejections, solar wind, geomagnetic storms, ionospheric disturbances, radiation. Geomagnetic storms and solar flares pose the greatest risks to the accuracy and reliability of satellite navigation systems. Geomagnetic storms are the most significant weather events affecting GNSS. They are often caused by coronal mass ejections (CMEs) and fast streams of the solar wind interacting with the Earth's magnetic field. These storms can cause severe ionospheric disturbances, leading to large TEC variations, increased scintillation and signal disturbances. The effects of these events can be severe positioning errors, signal loss, timing errors, and increased errors of precision (DOP). The F10.7 index as well as the kp index serve us as important tools in space weather forecasting. As for preparation and preparedness for disturbances, there are various measures and plans such as development of stronger protection of critical systems in devices and maintenance of redundant parts of the system. Another example is older systems that are less exposed to influence. Recorded historical events allow us to better understand our exposure to cosmic influence, which is an important factor in our progress in understanding such phenomena. With all the knowledge so far, the study of space weather is more and more relevant as modern technology becomes more and more exposed to the influence of space weather.

Keywords: GNSS, space weather, solar cycle, solar flares, coronal mass ejections, CME, geomagnetic storm, historical geomagnetic storms, ionospheric disturbances, magnetosphere, ionosphere, Carrington event.

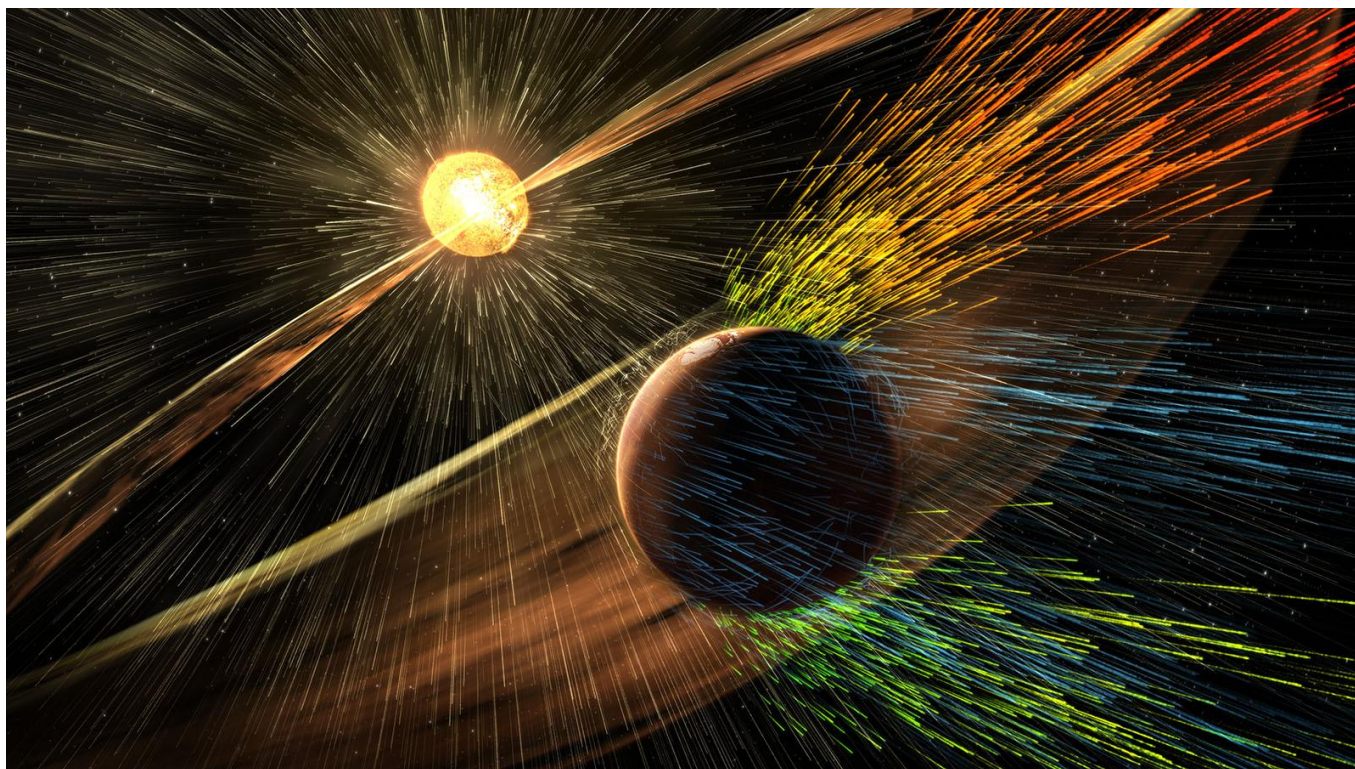
1. Uvod

Svemirsko vrijeme odnosi se na uvjete i pojave koji se javljaju u svemirskom prostoru koje okružuje Zemlju, posebno pod utjecajem Sunčeve aktivnosti i interakcije između Sunčevih čestica i Zemljinog magnetskog polja. Sunce kontinuirano ispušta tok nabijenih čestica, poznatih kao solarni vjetar, koje stupaju u interakciju sa Zemljinim magnetskim poljem i gornjom atmosferom, što dovodi do različitih učinaka svemirskog vremena. Najutjecajniji odnosno najčešći izvor svemirsko vremenskih događaja je solarna aktivnost, prvenstveno potaknuta Sunčevim 11-godišnjim solarnim ciklusom. Svemirsko vrijeme može imati značajne implikacije na različite tehnologije i infrastrukture na Zemlji, uključujući satelitsku komunikaciju, GNSS navigaciju, distribuciju električne energije, zrakoplovstvo i svemirske misije. Kako se oslanjanje čovječanstva na tehnologiju povećava, razumijevanje i predviđanje svemirskog vremena postaje sve aktualnije za ublažavanje potencijalnih negativnih utjecaja i osiguravanje sigurnosti i funkcionalnosti kritičnih sustava.



Slika 1. Slikovni prikaz buduće misije Europske svemirske agencije za praćenje svemirskog vremena. Izvor: URL 1

Ključne komponente i pojave svemirskog vremena uključuju solarne baklje, koronalna izbacivanja mase, solarni vjetar, geomagnetske oluje, ionosferski poremećaji, zračenje odnosno radijacija. Solarne baklje su iznenadna i intenzivna oslobađanja energije na Sunčevoj površini. Koronalna izbacivanja mase su masivne erupcije solarne plazme i magnetskih polja koja su izbačena iz Sunčeve korone u svemir. Solarni vjetar ili Sunčev vjetar kontinuirani je tok nabijenih čestica (uglavnom elektrona i protona) koje Sunce oslobađa u svemir. Geomagnetske oluje su poremećaji u Zemljinoj magnetosferi uzrokovani interakcijom između Sunčevog vjetra i Zemljinog magnetskog polja. Ionosferski poremećaji su rezultat utjecaja svemirskog vremena na ionosferu, što često utječe na propagiranje radiovalova. Zračenje tijekom intenzivnih svemirsko vremenskih događaja, povećane razine zračenja u svemiru mogu predstavljati rizik za astronaute odnosno svemirske letjelice i satelite, potencijalno oštećujući elektroničke komponente.



Slika 2. Ovaj umjetnički prikaz prikazuje solarnu oluju koja pogađa Mars i uklanja ione iz gornje atmosfere planeta. Izvor: URL 2

2. Globalni satelitski navigacijski sustavi (GNSS)

Globalni satelitski navigacijski sustavi (engl. Global Navigation Satellite Systems -GNSS) je naziv dan satelitskim sustavima kojima je u cilju određivanje i praćenje pozicije na Zemlji. Četiri globalna GNSS sustava su u vlasništvu pojedinih država koji ih održavaju i s njima upravljaju. Pod globalnim satelitskim navigacijskim sustavima ubrajamo GPS (Sjedinjene Američke Države - SAD), GLONASS (Ruska Federacija), Galileo (Europska unija), BeiDou (Narodna Republika Kina). Također još postoje dva lokalna odnosno regionalna sustava – QZSS (Japan) i IRNSS ili NavIC (Republika Indija). Posljedice svemirskoga vrijeme može imati značajan učinak na sustave GNSS-a zbog svog utjecaja na Zemljinu ionosferu i signale koji se emitiraju s GNSS satelita. Glavni fenomeni svemirskog vremena koji mogu utjecati na GNSS uključuju solarne baklje, oluje Sunčevog zračenja i geomagnetske oluje. GNSS sustavi određuju položaje na Zemlji kroz proces koji se zove trilateracija. Prvo sateliti konstantno odašilju signal sa svojom pozicijom i s vremenom kada se signal poslao. GNSS prijamnik na Zemlji prima signal od satelita, što više signala primi to će pozicija će biti preciznija. Potom prijamnik izračuna udaljenost s pomoću vremena koji je trebao signalu do prijamnika. Vremenska razlika odašiljanja i prijama signala se množi s brzinom svjetlosti ($299\,792\,458\text{ m/s}$) da se dobije udaljenost satelita. Koristeći udaljenosti od najmanje četiri satelita trilateracijom prijamnik može odrediti geografsku širinu, dužinu i nadmorsku visinu.

2.1. GPS

Globalni sustav pozicioniranja (engl. Global positioning system - GPS) je uslužni program u vlasništvu SAD-a koji korisnicima pruža usluge pozicioniranja, navigacije i vremena. Ovaj sustav se sastoji od tri segmenta: svemirskog segmenta, kontrolnog segmenta i korisničkog segmenta. Svemirske snage SAD-a razvijaju, održavaju i upravljaju svemirskim i kontrolnim segmentima. Svemirski segment GPS-a sastoji se od konstelacije satelita koji odašilju radio signale korisnicima. Konstelacija satelita se sastoji od najmanje 24 operativna satelita. SAD u orbiti održava 31 operativna GPS satelita da bi u 95 % slučajeva bilo najmanje 24 aktivna satelita. GPS sateliti se nalaze u srednjoj zemljinoj orbiti otprilike na visini 20200 kilometara (12,550 milja). Sateliti u GPS konstelaciji raspoređeni su u šest jednako razmaknutih orbitalnih ravnina koje okružuju našu planetu. Svaka ravnina sadrži četiri "slot" zauzeta osnovnim satelitima. Ovaj raspored satelita osigurava korisnicima da mogu imati pristup najmanje četiri satelita s gotovo bilo koje točke na planetu. Primjena GPS-a se pronalazi u mnogim industrijskim sektorima i općenito u društvu. Poboljšava produktivnost u svim granama ekonomije što uključuje na primjer: poljoprivredu, građevinu, rudarstvo, geodeziju, dostavu paketa i logističko upravljanje opskrbnim lancem. Glavne komunikacijske mreže, bankarski sustavi, financijska tržišta i elektroenergetske mreže uvelike ovise o GPS-u za preciznu sinkronizaciju

vremena. Neke bežične usluge ne mogu raditi bez njega. GPS je također važan za vojnu spremu SAD-a, njegove su aplikacije integrirane u gotovo svaki aspekt američkih vojnih operacija. Gotovo sva nova vojna sredstva od vozila do streljiva opremljena su GPS-om.

2.2. GLONASS

GLONASS (engl. Global Navigation Satellite System) nastao je 1970-ih, a razvio ga je Sovjetski Savez kao eksperimentalni komunikacijski sustav za vojne svrhe. Krajem hladnog rata, Sovjetski Savez je prepoznao da njegov satelitski sistem ima mogućnost poboljšati i druge dijelove društva kroz sposobnost sustava da odašilje vremensku prognozu, poboljša komunikaciju i također da pomogne olakšati navigaciji. GLONASS-ov prvi satelit lansiran je 1982. godine, a sustav je postao potpuno operativnim 1993. godine. Poslije razdoblja u kojem su performanse GLONASS-a pale, Ruska Federacija se obvezala poboljšati sustav na potrebni minimum od 18 aktivnih satelita. Trenutno GLONASS ima potpunu raspodjelu od 24 (orbitalnim radijusom od 19.140 kilometara (11.893 milja), oko 1.060 km (659 milja) niže od GPS satelita) satelita u konstelaciji.

2.3. Galileo

Galileo globalni satelitski navigacijski sustav u vlasništvu Europske unije koji pruža vrlo preciznu, zajamčenu uslugu globalnog pozicioniranja pod civilnom kontrolom. Galileo je kompatibilan s GPS-om i GLONASS-om, SAD-ovim i Ruskim globalnim satelitskim navigacijskim sustavima. Nudeći standardno dvostruke frekvencije, Galileo može isporučiti točnost pozicioniranja u stvarnom vremenu do raspona od nekoliko metara. Korištenje Galileo sustava postalo je dostupno 15. prosinca 2016. godine pružajući pristup početnim uslugama. Galileo satelitski sustav ima konstelaciju od ukupno 28 satelita. Svi sateliti osim dva postavljena su u tri kružne ravnine srednje Zemljine orbite (MEO) na 23 222 km visine iznad Zemlje i pod nagibom orbitalnih ravnina od 56 stupnjeva prema ekvatoru. Galileo pruža konzistentnu i dobru pokrivenost do 75. stupnja Geografske širine i dalje.

2.4. BeiDou

Satelitski navigacijski sustav Beidou kritična je komponenta kineske svemirske infrastrukture, pruža pouzdane i točne globalne navigacijske usluge, poboljšava i civilne i vojne sposobnosti te poboljšava gospodarski razvoj. Ovaj satelitski sustav ima 35 sustava u geocentričnoj orbiti, srednjoj Zemljinoj orbiti, nagnuta geosinkrona orbita. Beidou započeo je sa svojom prvom fazom 2000., a puna konstelacija satelita dovršena je 2020.. Pruža usluge globalne navigacije, uključujući informacije o pozicioniranju, i vremenu. Također se koristi u raznim sektorima, kao što su transport, poljoprivreda i pomoć hitnim službama, povećavajući kineske sposobnosti u tim područjima.

3. Solarni Ciklusi

Svakih 11 godina Sunčevo magnetsko polje napravi potpuni preokret. Što znači da Sunčev sjeverni i južni pol mijenjaju mjesta. Nakon preokreta magnetskoga polja potrebno ponovno oko 11 godina da se Sunčev južni i sjeverni pol ponovno zamjene mjesta. Ovu pojavu nazivamo Sunčevim odnosno solarnim ciklusom.

Solarna aktivnost raste i pada u ciklusu od 11 godina, što utječe na moderan život na mnogo načina. Povećanje u Sunčevoj aktivnosti uključuje povećanje u ultraljubičastim (engl. Ultraviolet - UV) i x-ray zračenjem od Sunca, što uzrokuje dramatične posljedice na zemljinu gornju atmosferu. Povezano atmosfersko zagrijavanje i rast gustoće atmosfere na visinama svemirskih letjelica. Povećanja atmosferskog otpora na satelite u niskoj zemljinoj orbiti može dramatično skratiti orbitalni vijek ovih vrijednih imovina. (Hathaway, 2015.)

Sunce u centru našeg zvjezdanog sustava je velika nakupina električki nabijenoga plina ogromnih temperatura. Taj plin je konstantno u pokretu što generira veliko magnetsko polje. Aktivnosti na Suncu poput Sunčevih pjega su usko vezane uz solarni ciklus što nam omogućuje predviđanje pojave Sunčevih pjega. Praćenje solarnoga ciklusa je neophodno za očekivanja pojačanih aktivnosti svemirskoga vremena poput solarnih baklji i omogućuje nam predviđanje hoće li biti ikakvoga utjecaja odnosno posljedica na našu planetu.

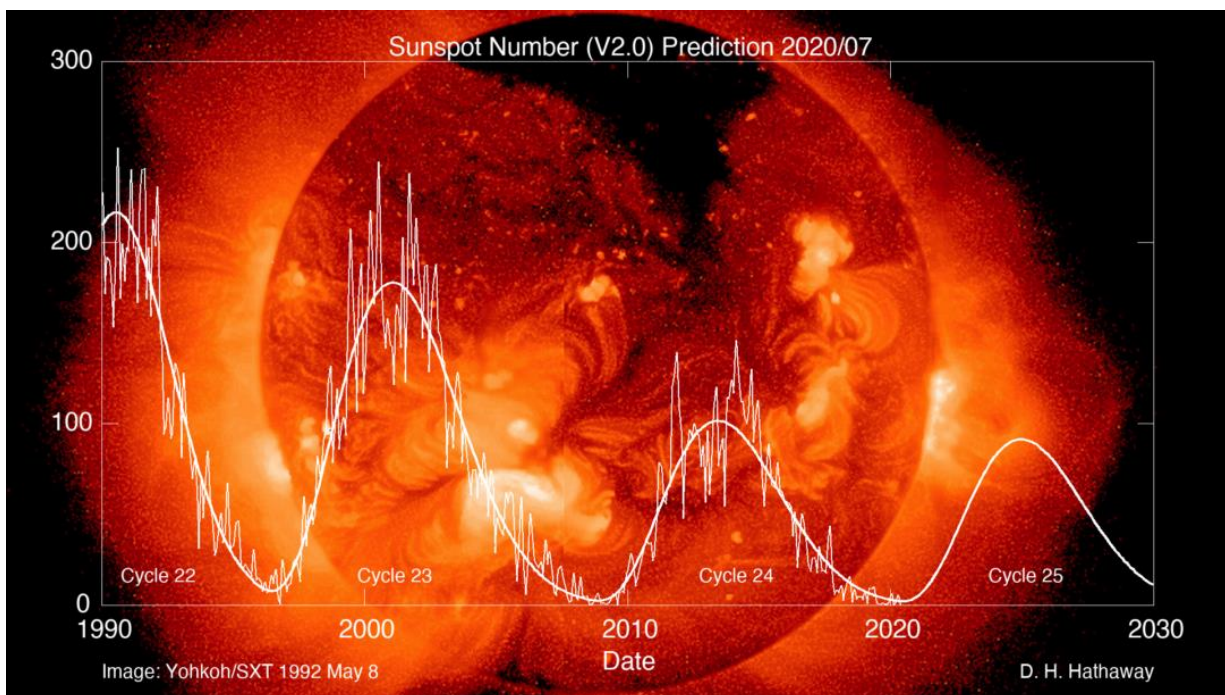
3.1. Sunčeve pjege

Struktura Sunca je podijeljena u dijelove, po redu iznutra prema vani: Jezgra (engl. The core), zona radijacije ili zračenja (engl. Radiation zone), Konvekcijska zona (engl. Convection zone), Fotosfera (engl. Photosphere), Kromosfera (engl. Chromosphere) i Sunčeva korona (engl. Corona). Dobar pokazatelj Sunčeve aktivnosti je pojava zvana Sunčeve pjege koje nastaju u Fotosferi, djelu Sunca koje isijava svjetlost. Sunčeve pjege izgledaju kao privremene mrlje na Suncu koje su tamnije od okolnih regija. Ovaj fenomen je posljedica smanjenje temperature u određenoj regiji što je rezultat koncentracije magnetskih tokova (engl. magnetic flux). Karakteristika pojave Sunčevih pjega je ta da u aktivnim regijama dolaze vrlo često u paru, različitih magnetskih polariteta. Veličina Sunčevih pjega poprilično varira od instance do instance, zabilježeni su njihovi dijometri od 160000 kilometara do 16 kilometara. Veće instance mogu biti se vidjeti, sa zemlje čak i bez teleskopa. Pri početku ovoga fenomena, Sunčeve pjege se mogu kretati stotinama metara po sekundi. U vremenskom periodu pojave Sunčeve pjege se širu i smanjuju kako se kreću po Sunčevoj površini, taj vremenski period njihovog trajanja može biti od nekoliko dana do nekoliko mjeseci. Sve Sunčeve pjege nakon nekog vremena se polako smanje pa nestanu. Pošto su pokazatelji pojačane magnetske aktivnosti možemo

očekivati i druge solarne pojave oko Sunčevih pjega. Specifično solarne baklje i koronalne izbačaje mase često potječu od Sunčevih pjega.

3.2. Radio tok

Savršen pokazatelj Sunčevih aktivnosti odnosno pojava koja nam mnogo pomaže u praćenju Sunčevog ciklusa je radio tok (engl. Radio flux). Često zvan indeks F10.7 je mjera solarnog radijskog toka po jedinici frekvencije na valnoj duljini od 10,7 cm, blizu vrha promatranih emitiranja radio valova od Sunca. Radio emisije F10.7 potječu visoko iz kromosfere i nisko iz Sunčevoj korone. Radio tok je posljedica koronalne plazme zarobljene u magnetskim poljima koja prekrivaju Sunčeve pjege odnosno aktivna područja. Radi konzistentnog radio toka možemo vjerno mjeriti količine Sunčeve aktivnosti. F10.7 često se izražava u jedinicama solarnog toka (engl. Solar flux unit - SFU). F10.7 radio emisija može varirati od ispod 50 SFU, do iznad 300 SFU, tijekom solarnog ciklusa. F10.7 se mjeri kontinuirano u Kanadi od 1947 godine. Pojačana emitiranja radio toka F10.7 uzrokuje veliki učinak na radio-komunikacije između točaka velike udaljenosti, najveće smetnje se događaju u kratkovalnoj kategoriji, međutim srednjevalne i niže vrlo visoke frekvencije (engl. Very high frequency - VHF) frekvencije su također pogođene iako manje. Iako donosu smetnje pojačane aktivnosti Sunčevih pjega također mogu omogućiti višim frekvencijama propagiranje radiovalova na veće udaljenosti. Povećanje radio toka je popraćeno i povećanjem UV zračenja što u kontaktu s našom planetom uzrokuje ionosferske poremećaje.



Slika 3. Predviđanja snage 25. ciklus po broju Sunčevih pjega, u usporedbi s prethodna tri. Izvor:URL 3

4. Solarne baklje

Solarne baklje (engl. solar flares) su najmoćnija pojava u svemirskome vremenu. Povijesno sumnjamo da su jače geomagnetske oluje i međuplanetarne smetnje povezani sa solarnim bakljama koje su ukratko opisane kao veliki izbačaji energije koji nastaje u jakom magnetskom polju u ovom slučaju Sunčevom magnetskom polju. Taj nagli izbačaj energije naglo zagrijava koronalni i kromosferski materijal koji se širi odnosno izbacuje u međuplanetarni prostor. Nekad u slučaju poprilično energetičnih događaja naglo širenje materijala uzrokuje udarni val koji se odašilje u međuplanetarni prostor. Solarne baklje imaju razni niz posljedica odnosno efekta i podijeljene su u kategorije po njihovoj jačini odnosno snazi.

Glavne karakteristike solarnih baklji su:

- Izbačaj energije: Solarne baklje izbacuju značajnu količinu energije u obliku svjetlosti, na primjer u obliku x-zraka (x-rays) i gamma zraka (gamma rays). Količina energije koja se izbacuje se može usporediti s milijunima atomskih bombi koje eksplodiraju u istom trenutku.
- Emisije elektromagnetske radijacije: Elektromagnetska radijacija u solarnim bakljama dolazi u raznom spektru od radio valova do gamma zračenja. Utjecaj takvih zračenja na Tehnologiju na zemlji može biti raznolik što ovisi o valnoj duljini za vrijeme takvih događaja. Također ovakva zračenja imaju utjecaj i na samu zemljinu atmosferu.
- Vrijeme trajanja: Solarne baklje mogu trajati od nekoliko minuta do par sati i mnogo se razlikuju po vremenu jer je zabilježeno da jače solarne baklje obično traju kraće, od slabijih koje traju duže.
- Klasifikacija: Klasifikacijski sistem koji koristimo zove se "GOES" (engl. Geostationary Operational Environmental Satellites - GOES) skala. Ovaj sistem rangira solarne baklje po klasama A, B, C, M i X. Od najslabije A-klase do najjače X-klase, svaka klasa ima deset puta više energije od prijašnje. Za klasifikaciju solarnih baklji mjerimo količinu UV zračenja kao i količinu x-zraka.
- Utjecaj na zemlju: Najznačajnije klase solarnih baklji su M i X klase. Razne posljedice solarnih baklji na zemlju i njezinu tehnologiju uključuju ometanje radio komunikacije i uzrokovanje prekid radio signala. Ometanje u radu satelita i satelitskih sustava ometa sve na zemlji povezano sa satelitskim sustavima GNSS-a, na primjer pomorsku navigaciju i zrakoplovni promet. U ekstremnim slučajevima solarne baklje mogu nanijeti veliku štetu električnoj mreži. Također solarne baklje mogu ugroziti živote astronauta i svemirskoga prijevoza.

U svom radu Gold i Hoyle (1960.) navode kako su dovedeni do razmišljanja o procesu solarne baklje u dva odvojena stadija. Kao prvo, nakupljanje pohrane energije u kromosferi s pomoću struja usmjerenih duž magnetskih linija sile. Ove struje moraju biti generirane interakcijom magnetskog polja s komponentom fotosferskog turbulentnog gibanja. Drugi proces je eksplozivno oslobađanje pohranjene energije u toplinu, masovno gibanje, emisijsku liniju i moguće također kontinuiranu svjetlost, kao i čestice visoke energije.

Solarne baklje su povezane sa Sunčevim pjegama. Sunčeve pjege su područja na Suncu gdje je jako magnetsko polje pod jako velikim stresom što najčešće rezultira jakim energetskim izbačajem u obliku solarnih baklji. Radi ovih spoznaja možemo očekivati pojavu solarnih baklji u i okolo Sunčevih pjega

4.1. Istraživanje Sunčevih baklji

Solarne baklje ispuštaju radijaciju koja pokriva skoro cijeli elektromagnetski spektar od kilometarskih radio valova do gamma zraka. Detektiranje i mjerenje radijacije kod takvih događaja moguće je iz opservacijskih postaja sa zemlje kao i sa satelitskom opservacijom. Posljedice solarnih baklji poput geomagnetskih oluja i ionosferskih poremećaja mogu biti više direktno promatrani i studirani od solarnih baklji. Mogućnost istraživanja i proučavanja ovakvih događaja omogućena su od strane mnogih kompleksnih sistema uređaja na satelitima i orbitalnim postajama kao i efikasna komunikacija i koordinacija između postaja u svemiru i na zemlji. Promatranje događaja solarnih baklji je jako važno ako želimo predvidjeti i očekivati udar na sisteme koji su podložni utjecaju od strane solarnih baklji. Mogućnost predviđanja solarnih baklji nam omogućava pripremu i smanjenje rizika u slučaju većih smetnji kao i minimaliziranju štete.

5. Koronalna izbacivanja mase

Vanjska solarna atmosfera, korona, sastoji se od jakih magnetskih polja. Tamo gdje su ta polja zatvorena, često iznad Sunčevih pjega, ograničena Sunčeva atmosfera može iznenada i nasilno osloboditi mjehuriće plina s magnetskim poljima. Koronalna izbacivanja mase (engl. Coronal Mass Ejections - CME-s) su masivna izbacivanja plazme i magnetskog polja iz Sunčeve korone. Mogu izbaciti milijarde tona koronalnog materijala i nose ugrađeno magnetsko polje koje je snažnije od jačine međuplanetarnog magnetskog polja (engl. interplanetary magnetic field - IMF) pozadinskog solarnog vjetra. Koronalni materijal koji se nalazi u vanjskom dijelu Sunčeve atmosfere je u stanju plazme, s vrlo visokim temperaturama (nekoliko milijuna K-kelvina) i s vrlo malom gustoćom (reda veličine 10^{15} čestica/m³). Plazma se sastoji od materijala koji je uglavnom vodik kao i unutrašnjost Sunca. Međutim sasvim je ioniziran što znači da ima protona i elektrona, također ima mali udio ostalih atoma. Koronalna izbacivanja mase od Sunca putuju prema van u brzinama u rasponu od 250 kilometara u sekundi (km/s) do čak 3000 km/s. Najbrži koronalni izbačaji mase koji su usmjereni prema Zemlji mogu dosegnuti naš planet za samo 15-18 sati. Za sporije instance može trebati nekoliko dana da stignu. U svom radu autori Webb i Howard (2012.) navode da trenutačno popularna ideja je aktivacija koronalnih magnetskih polja dovodi do CME-a, koja započinje puno prije pojave bilo koje povezane površinske aktivnosti kao što su baklje ili erupcije. Dio energije oslobođene tokom CME-a mogao bi pokrenuti aktivnost, i tu su neki dokazi predstojećih aktivnosti nekoliko desetaka minuta do par sati prije početka površinske aktivnosti pa čak i prije pojave koronalnih izbačaja mase. Nakon interakcije s našom planetom koronalni izbačaji mase imaju različite posljedice, najčešće geomagnetske oluje i ionsferski poremećaji. Geomagnetske oluje, od slabijih do ekstremnih su određene često karakteristikama koronalnih izbačaja mase koji im je uzrok.



Slika 4. ;Sunce je 31. kolovoza 2012. lansiralo ovo koronalno izbacivanje mase pri nekih 900 milja/sekundi (gotovo 1500 km/s). Zemlja nije tako blizu Sunca, samo za referentne svrhe. (Slika: NASA) Izvor:URL 4

Aurore, kao fenomen povezan s geomagnetskim olujama, imaju veću vidljivost na nižim geografskim širinama uz naravno veću intenzivnost. Koronalni izbačaji mase, što se tiče direktnog utjecaja na ljude, imaju posljedice na razne dijelove civilizacije. Energetski sustav može imati problema kao što su nestabilnost voltaže, šteta opremi i općenito pad mreže. Komunikacijski sustavi može očekivati smetnje na visokofrekventnim (engl. High frequency-HF) frekvencijama. Što se tiče satelitskih sistema, koronalni izbačaji mase mogu poremetiti orbitu satelitima u konstelaciji, oštetiti elektroniku na njima radi energetskih čestica u oblaku i utjecati na njihov rad kroz smetnje sensorima koje uzrokuje radijacija. U ovakvim događajima radijacija također može predstavljati prijetnju astronautima i sektoru avijacije. Specifično putnicima i posadi na velikim visinama što se računa u plan leta. Ukratko najčešći problemi su tehnološki sistemi koji ovise o preciznom praćenju vremena i točnosti u prijenosu informacija. Praćenje i predviđanje opasnosti od koronalnih izbačaja mase provode razne organizacije po svijetu zadužene za praćenje svemirskoga vremena, na primjer NOAA-in centar za praćenje svemirskoga vremena (SWPC- Space weather prediction center).

6. Geomagnetske Oluje

Uzroci geomagnetske oluje su često interakcije između solarnih pojava i Zemljine magnetosfere. U svome radu Lastovička i Danilov (2001) spominju kako bi geomagnetsku oluju trebalo bi nazvati magnetosferskom olujom, jer su promatrane promjene geomagnetskog polja u biti posljedica jakih i brzih magnetosferskih procesa i promjena pod djelovanjem Sunčevog vjetra. Ime “geomagnetska oluja” je tradicionalna, jer je oluja bila promatrano prvo kao promjene geomagnetskog polja, i do sada su praćeni s pomoću geomagnetskih aktivnosti.

Koronalni izbačaji mase su najznačajniji uzrok zbog svoje značajne energije i plazme koji rezultiraju jačim geomagnetskim olujama. Velike brine strujanja solarnog vjetra, solarne baklje (neizravno), korotirajuća područja interakcije, međuplanetarni šokovi i iznenadni impulsi također pokazuju značajan utjecaj na pojave geomagnetskih oluja. Koronalne rupe su područja gdje se linije Sunčevog magnetskog polja otvaraju u svemir, dopuštajući solarnom vjetru veće brzine da pobjegne. Kada brze struje Sunčevog vjetra udare u Zemljinu magnetosferu, mogu je komprimirati odnosno pojačati geomagnetsku aktivnost.

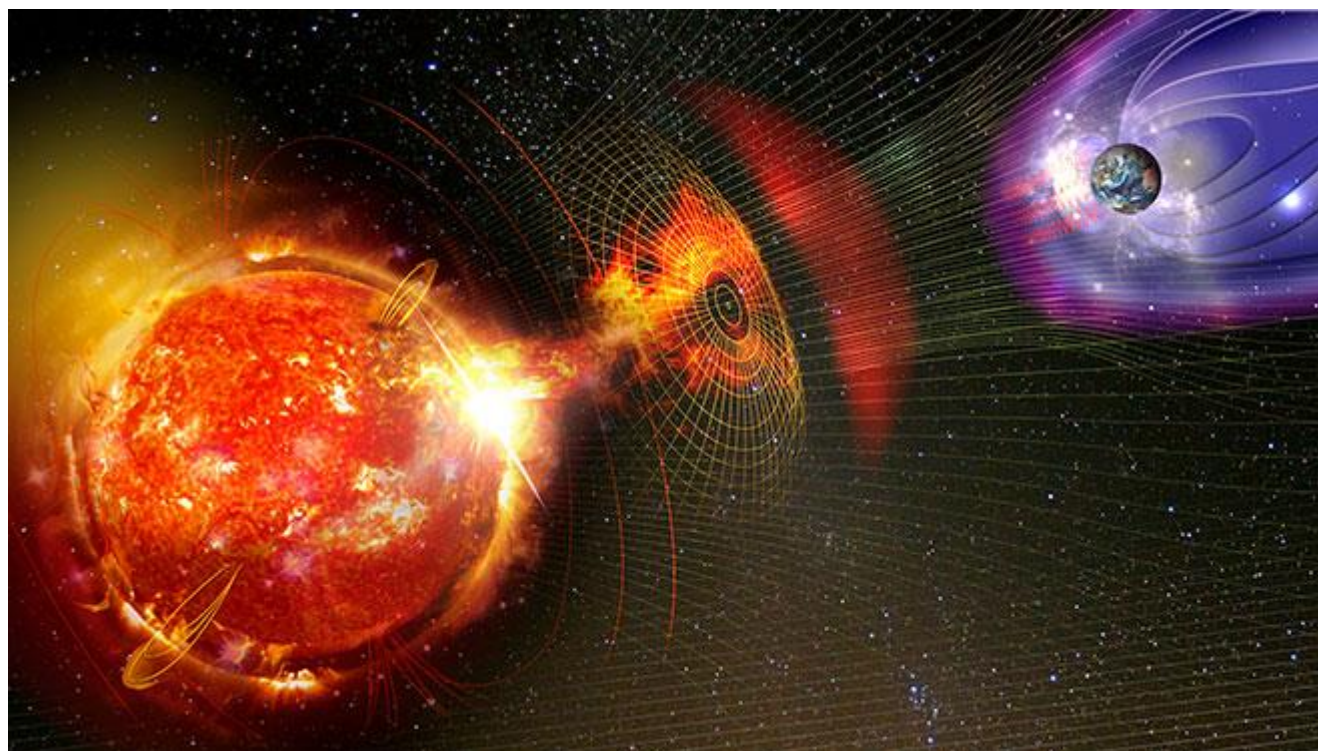
Geomagnetska oluja može se smatrati odgovorom magnetosfere na udar intenzivnog strujanja solarnog vjetra u kojem veličina i smjer magnetskog polja variraju na kompliciran način. (Paul Perreault, S. I. Akasofu, 1978.)

To često rezultira geomagnetskim olujama prosječne snage. Korotirajuće interakcijske regije (Corotating Interaction Regions) nastaju tamo gdje brzi solarni vjetar iz koronalnih rupa sustiže sporiji solarni vjetar ispred sebe, stvarajući turbulentno područje komprimirane plazme i magnetskih polja. Takva pojava dolazi u kontakt sa Zemljinom magnetosferom što rezultira u geomagnetskoj aktivnosti. Međuplanetarni šokovi su valovi u solarnom vjetru koji proizlaze i od drugih poremećaja ali najčešće koronalnih izbačaja mase koji putuju kroz međuplanetarni prostor. Oni mogu komprimirati solarni vjetar i pojačati magnetsko polje dok se propagiraju. Kada međuplanetarni šok dođe do zemlje može naglo komprimirati magnetosferu, što naravno uzrokuje nagli porast u aktivnosti odnosno uzrokuje geomagnetske oluje. Iznenadni impulsi su nagli poremećaji u geomagnetskom polju zemlje koji nastaju iz iznenadnih promjena u pritisku koji solarni vjetar vrši na Zemljinu magnetosferu. Ako se ovakvi uvjeti zadrže nakon nekog vremena dolazi do geomagnetske oluje. Iznenadni impulsi često imaju povezanosti sa solarnim vjetrom velike brzine i koronalnih izbačaja mase. Znanstvena istraživanja ovih izvora je ključno za predviđanje i ublažavanje utjecaja geomagnetskih oluja na funkcioniranje tehnologije i infrastrukture na našoj planeti.

Utvrđeno je da povećanje u prstenastom strujanju tijekom glavne faze intenzivnih geomagnetskih oluja često prolazi kroz dva koraka. Ovo može biti iznenađujuće jer proučavanje geomagnetskih oluja ima dugu povijest, utvrđivanje njihovih prosječnih karakteristika u kojima postoji, jednu glavnu fazu nakon koje

slijedi spora i relativno glatka faza oporavka. Uz ovu jednostavnu sliku na umu, minimum Dst vrijednost u glavnoj fazi dugo se koristila kao magnituda magnetskih oluja. (Kamide, Yokoyama, Gonzalez, Tsurutani, Daglis, Brekke, Masuda, 1998.)

Indeks vremena poremećaja oluje (engl. Disturbance Storm Time indeks-Dst index) je mjera koja se koristi u svemirskom vremenu za kvantificiranje intenziteta geomagnetskih oluja. Prikazuje snagu prstenaste struje oko Zemlje, na koju utječe tok nabijenih čestica u svemiru, osobito tijekom geomagnetskih oluja. Dst indeks izražava se u nanoteslama (nT) i koriste ga znanstvenici za razumijevanje i predviđanje svemirskih vremenskih uvjeta. Pozitivne Dst vrijednosti označavaju normalnu ili tihu geomagnetsku aktivnost, dok negativne Dst vrijednosti ukazuju na prisutnost geomagnetske oluje. Što je oluja jača vrijednost ide sve više u negativno. Dst indeks od -50 nT do -100 nT ukazuje na umjerenu geomagnetsku oluju, međutim vrijednosti ispod -100 nT označavaju jaku odnosno ekstremnu geomagnetsku oluju.



Slika 5. Umjetnički prikaz o utjecaju Sunca na zemlju i prostor do nje. Izvor: URL 5

Postoji velika raznolikost u razvoju geomagnetskih oluja, međutim one su klasificirane u samo dva tipa, takozvani standardni tip (engl. standard type) i postupno započeti tip (engl. gradually commencing type). Glavno obilježje standardnih geomagnetskih oluja je naglo i brzo povećanje geomagnetske aktivnosti. Početak je obilježen oštrom promjenom Zemljinog magnetskog polja u kratkom razdoblju, obično nekoliko minuta do sat vremena. Oluje standardnog tipa obično izazivaju izbačaji koronalne mase, kao i s njima povezani solarni fenomeni. Početak se obično vidi kao oštar, pozitivan otklon u horizontalnoj komponenti geomagnetskog polja. Nakon toga slijedi postupna i dugotrajnija faza u kojoj poremećaj

geomagnetskog polja traje. Geomagnetske oluje standardnog tipa mogu biti intenzivne, što uzrokuje značajne poremećaje u Zemljinoj magnetosferi. Također ove oluje mogu dovesti do jake polarne svjetlosti, povećanih ionosferskih struja i moguće smetnje komunikacijskim i navigacijskim sustavima. Početne karakteristike postupno započetog tipa su geomagnetsko polje koje se postupno povećava u razdoblju od nekoliko sati do jednog dana, bez naglog skoka u snazi magnetskog polja. Kod ovog tipa nema naglo započetih oluja nego magnetsko polje postepeno jača. Solarni vjetar velike brzine, također konstantni pritisak na magnetosferu koju solarni vjetar izvršava na zemljinu su glavni uzroci ovoga tipa. Glavno obilježje postupno započetog tipa je prolongirana glavna faza koja može trajati nekoliko dana. Ove geomagnetske oluje su tipično slabije odnosno manje intenzivne od standardnog tipa. Zemljina magnetosfera sporije se prilagođava ovom tipu zbog prolongiranog pritiska na nju od strane solarnoga vjetera. Događaji poput polarne svjetlosti, poremećaji radijskog signala odnosno smetnje u radu satelita obično su manje ozbiljni međutim trajanje njihovih efekta je izduženo kroz vremenski period trajanja oluje.

6.1. Kp indeks

Kp indeks je globalni indeks geomagnetske aktivnosti koji kvantificira poremećaje u Zemljinom magnetskom polju u vremenskim intervalima od tri sata. Važni faktor koji se koristi u predviđanju i praćenju svemirskog vremena. Skala geomagnetske aktivnosti po Kp indeksu ide od nula do devet. Većinski stabilna geomagnetska aktivnost je nula, a devet je ekstremna geomagnetska oluja. Kalkulacija Kp indeksa je provedena s pomoću praćenja magnetometara koji su locirani svugdje po našoj planeti. Svaka promatračka postaja mjeri maksimalnu devijaciju horizontalne komponente zemljinog magnetskog polja kroz odnosno svaka tri sata. Koje se onda konvertiraju u lokalni Kp indeks. Očitavanja se prikupe od lokacija po planeti i uzme se prosjek lokalnih Kp indeksa po planeti što rezultira globalnim Kp indeksom koji je pokazatelj globalne geomagnetske aktivnosti. Praćenje Kp indeksa omogućava komunikacijskim i navigacijskim sistemima predviđanje i ublažavanje smetnji koje prouzrokuje geomagnetska aktivnost. Praćenje Kp indeksa provodu različite organizacije zadužene za praćenje svemirskoga vremena po svijetu. Jedna od njih je NOAA (engl. NOAA-National Oceanic and Atmospheric Administration) koja za kvalifikaciju geomagnetskih oluja koristi G- skaluu koja je povezana s Kp indeksom.

Tablica 1. NOAA skala svemirskoga vremena za kvalificiranje geomagnetskih oluja. Izvor: Url 6

Kategorija		Fizička mjera	Učestalost (1 ciklus = 11 godina)
Skala	Opis	K _p vrijednost	Broj oluja koje dosegnu K _p vrijednost (Broj dana trajanja oluja)
G5	Ekstremna	K _p = 9	4 po ciklusu (4 dana po ciklusu)
G4	Vrlo jaka	K _p = 8	100 po ciklusu (60 dana po ciklusu)
G3	Jaka	K _p = 7	200 po ciklusu (130 dana po ciklusu)
G2	Srednja	K _p = 6	600 po ciklusu (360 dana po ciklusu)
G1	Slaba	K _p = 5	1700 po ciklusu (900 dana po ciklusu)

6.2. Polarna svjetlost

Polarne svjetlosti odnosno Aurore su uzrokovane međudjelovanjem solarnog vjetera, toka nabijenih čestica sa Sunca, sa Zemljinim magnetskim poljem i atmosferom. Polarnu svjetlost dijelimo na sjevernu svjetlost (Aurora Borealis) na sjevernoj hemisferi i na južnu svjetlost (Aurora Australis) na južnoj hemisferi. Najbolje se vide u polarnim regijama tijekom razdoblja visoke geomagnetske aktivnosti, češće zimi kada su noći duge i tamne. Polarna svjetlost nije samo predivan prirodni fenomen nego također služi i kao važni pokazatelj svemirskoga vremena. Polarna svjetlost pomaže znanstvenicima u proučavanju magnetizma zemlje kao i njegovu interakciju sa svemirskim vremenom, što pridonosi znanju o utjecaju svemirskoga vremena na modernu tehnologiju.

7. Povijesne Geomagnetske Oluje

Geomagnetske oluje su događaji koji su i u povijesti ljudi znali zabilježiti kroz spomene neobične svjetlosti na nebu, Aurore. Iako nisu imali znanstvenu spoznaju koju mi imamo danas znamo da su kroz povijest ljudi svjedočili posljedicama svemirskoga vremena na našu planetu. Kroz mogućnosti sve modernije tehnologije možemo sve bolje mjeriti i bilježiti geomagnetske oluje. Samo u razdoblju od 1957. do 1991. ukupno su identificirane 1252 geomagnetske oluje u skoro puna tri solarna ciklusa. Najveća i najvažnija povijesna geomagnetska oluja je Carringtonov događaj koji je pogodio zemlju 1859. godine. U svibnju 1921 dogodila se oluja koja je uzrokovala kritične smetnje telegrafskim i telefonskim sistemima na širokom području. Neke telegrafске postaje su zabilježile požare povezane s ovom geomagnetskom olujom dok se aurora mogla vidjeti u Kaliforniji i Japanu. Ova povijesna oluja nam je pokazala ranjivost komunikacijske mreže geomagnetskim smetnjama. 1989. Godine u ožujku koronalni izbačaj mase je uzrokovao ozbiljnu geomagnetsku oluju koja je uzrokovala branu u Kanadi da se sruši, čiji je rezultat bio nestanak struje koji je trajao 9 sati za milijune ljudi. Satelitski sistemi su trpjeli velike smetnje, čak je i kratkovalna komunikacija bila pogođena, a aurora se mogla primijetiti u američkim državama Floridi i Teksasu. Ova oluja pokazala je ozbiljnost utjecaja svemirskoga vremena na energetska infrastrukturu, satelitske sisteme i općenito pojasnila rizike vezane uz svemirsko vrijeme. Par koronalnih izbačaja mase su u studenome 2003 godine uzrokovali više uzastopnih geomagnetskih oluja. Švedska je imala probleme s energetska mrežom, satelitski sistemi su privremeno izgubili sav kontakt sa satelitima, a zrakoplovni sektor je morao preusmjeriti komercijalne letove u polarnim dijelovima radi opasnosti od zračenja. Ova oluja je pokazala kompleksnu prirodu geomagnetskih poremećaja, kao i rezultat dužih instanci geomagnetskih oluja na razne grane moderne tehnologije. Proučavanje povijesnih geomagnetskih oluja omogućuje nam lakše predviđanje budućih instanci kao i posljedice koje će imati na našu tehnologiju. Umanjivanje rizika povezanih sa svemirskim vremenom je sve važnije kako nam tehnologija postaje sve više ovisna o preciznosti i satelitskim sistemima.

Carringtonov događaj iz 1859., oluja iz ožujka 1989. odgovorna za nestanak struje u Quebecu ili oluja iz listopada 2003. koja je zaprijetila električnoj mreži u Južnoj Africi i Švedskoj ne mogu se propustiti u kratkom popisu povijesnih zapisa o ekstremnim geomagnetskim olujama zbog njihovih posljedica na društvo. Sve ove tri oluje ostavile su posljedice na infrastrukturu, a sve su bile super intenzivne što se vidi po Dst indeksu. Doista, Dst je dosegao vrhunac ispod -250 nT za ove događaje prema već spomenutoj klasifikaciji. (Cid, Palacios, Saiz, Guerrero, Cerrato, 2014)

7.1. Carringtonov događaj

Carringtonov događaj (engl. Carrington event) je povijesni događaj koji se dogodio prvog i drugog dana u devetom mjesecu 1859. godine koji je imao globalne posljedice i povijesnu važnost.

Carringtonov događaj je bez presedana najveća geomagnetska oluja ikad zabilježena u povijesti. Britanski astronomi Richard Christopher Carrington i Richard Hodgson su primijetili kako Sunčeve pjege eruptiraju u solarnu baklju koja je pogodila zemlju navodno kratko zasljepljujući Carringtona koji je kasnije geomagnetsku oluju povezo sa Sunčevim aktivnostima što mu je donijelo priznanje i u čast njemu ovaj povijesni događaj je dobio ime. Toliki je bio opseg ove geomagnetske oluje da se no primijetio globalno s obzirom na to da većina ljudi nije znalo što se dešava. Novine su pisale o svijetlima na nebu i o padu telegrafске komunikacije što je izazivalo od panike do potražnje za odgovorima od strane znanstvenika. Aurora kao fenomen je obično samo opažan u polarnim regijama međutim toliki je bio udar koronalnog izbacivanja mase da se aurora mogla vidjeti na mnogo manjoj geografskoj širini. Svjedoci iz događaja su pisali da je svjetlost koju je aurora pružala na područjima u kojima je bila nezapažena dosad, bila toliko jaka da su mogli čitati novine po noći i da je vidljivost bila skoro kao i po danu. Također je zabilježeno da su ljudi mislili da je svjetlost uzrokovana od strane ogromnih šumskih požara ili da Sunce zalazi kasnije zbog nekog razloga. Efekti ove geomagnetske oluje su se osjetili globalno do te mjere da se aurora čak mogla vidjeti u tropskom pojasu i uglavnom može se reći da je skoro čitava sjeverna hemisfera bila obasjana za vrijeme Carringtonovog događaja. Na južnoj hemisferi, zapisi iz Australije također spominju o zapažanjima Aurore puno sjevernije nego što je bilo za očekivati. Tadašnja međukontinentalna komunikacije je ovisila o telegrafskoj mreži kroz koju je prolazilo mnogo informacije od vijesti do financijskih transakcija. Dolaskom geomagnetskih smetnji za vrijeme ove solarne oluje uzrokovalo je pad telegrafске mreže. Zapisi govore da je utjecaj ove geomagnetske oluje prouzrokovalo iskrenje pa čak i požare u određenim slučajevima i da kada bi telegrafisti pokušali slati poruke bili bi šokirani. Sljedeći dan kada su došli na radno mjesto smetnje su i dalje telegrafsku mrežu činile skoro nemogućom, međutim ubrzo su saznali da ako isključe baterije s telegrafa on i dalje radi i da mogu slati poruke s pomoću Aurorine elektromagnetske struje prouzrokovano geomagnetskom olujom, iako na kraće udaljenosti.

8. Ionosferski poremećaji

Jedni od najvažnijih faktora koji uzrokuju poremećaje ionosfere su događaji vezani uz solarnu aktivnost. Događaji svemirskoga vremena kao što su solarne baklje, izbacivanje koronalne mase (CME), solarni vjetar često oslobađaju odnosno donose čestice visoke energije i zračenje koje će stupiti u interakciju sa Zemljinim magnetskim poljem i slojevima Zemljine ionosfere. Kontakt ionosfere sa zračenjem i visoko energetske čestice vrlo vjerojatno će dovesti do poremećaja u gustoći elektrona, razinama ionizacije i očekivane temperature unutar Zemljine ionosfere, uzrokujući nepravilnosti i oscilacije u propagiranju radiovalova. Za ionizaciju je obično odgovorna konstantna x-ray i UV zračenja od strane Sunca. Ionosferski poremećaji su kompleksni fenomeni koji definiraju svakakve varijacije i nepravilnosti u ionosferi, što je područje Zemljine gornje atmosfere koje se proteže od oko 50 kilometara do 1000 kilometara udaljenosti od zemljine površine. Ionosferu karakterizira velika koncentracija slobodnih elektrona i ona, koji kao posljedica njihovih karakteristika imaju generalnu ulogu u refleksiji, lomu i apsorpciji radiovalova i signala koji se njime prenose. Ionosfera je podijeljena u nekoliko slojeva, uključujući sloj D, E i F, od kojih svaki ima specifične karakteristike u smislu gustoće elektrona, temperature, nadmorske visine i ionizacije. Promjene u ovim parametrima mogu dovesti do promjena okolnosti odnosno poremećaja u ionosferi koji mogu imati značajan učinak na tehnologiju, kao na primjer utjecaj na različite komunikacijske i navigacijske sustave.

Slojevi ionosfere i njihove karakteristike:

1. Sloj D

Na visini otprilike od 60 km do 90 km, sloj D je prvi odnosno najniži sloj ionosfere, uglavnom formiran od ioniziranih molekula Dušika (N_2) i Kisika (O_2). Ima najnižu količinu elektrona po kubnom metru, međutim poznat je po tome da apsorbira HF radiovalove. Naročito preko dana, ta apsorpcija otežava HF komunikaciju. D sloj može potpuno nestati tijekom noći radi slabljenja ionizacije.

2. Sloj E

Na visini otprilike od 90 km do 150 km, sloj E je drugi nakon sloja D dio ionosfere. Također sastavljen od ioniziranih molekula Dušika (N_2) i Kisika (O_2), sa srednjom gustoćom elektrona. Ovaj sloj može reflektirati srednjevalne frekvencije (engl. Medium Frequency - MF) i HF frekvencije. Nekada se u ovome sloju mogu pojaviti područja veće ionizacije, koja čak mogu reflektirati i neke VHF frekvencije i tako nenadano povećati doomet VHF-a.

3. Sloj F

Na visini otprilike 150 km nadalje, Sloj F je najutjecajniji i najviši sloj ionosfere s najvećom gustoćom elektrona. Sastoji se od većinski ioniziranih atoma kisika (O), najčešće ionizirani od

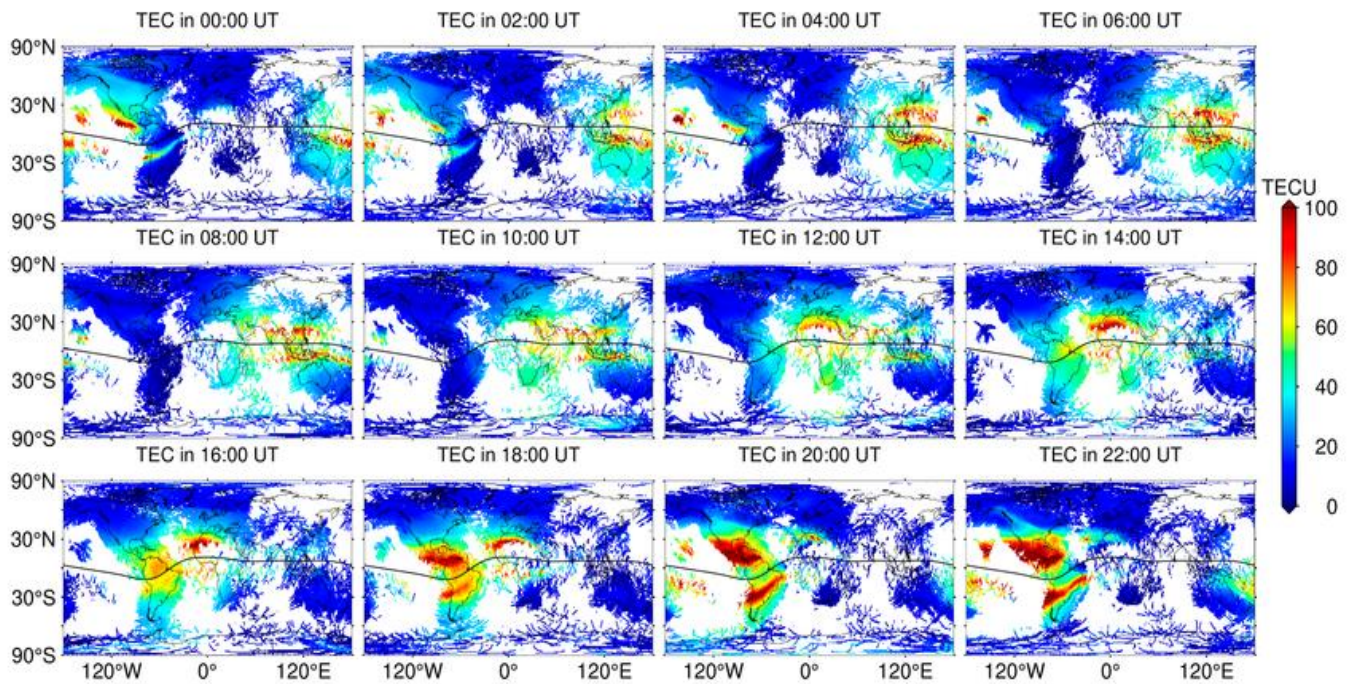
strane ekstremno ultraljubičasto zračenja (engl. extreme ultraviolet - EUV) od strane Sunca. Za vrijeme dana, F sloj se djeluje na pod slojeve F1 i F2. F1 je otprilike na visini od 150 km do 250 km, s manjom gustoćom i brojem elektrona. Iznad sloja F1 nalazi se F2, koji ima najveći utjecaj na GNSS i HF radio komunikaciju. S najvećom gustoćom i brojem elektrona, F2 reflektira HF valove natrag na Zemlju. Iako se po noći F1 i F2 spajaju u jedan sloj sa slabijom gustoćom elektrona, sloj F i dalje utječe na propagaciju radio valova.

Varijacije ukupnog sadržaja elektrona (Engl. Total Electron Content - TEC) u ionosferi imaju ključnu ulogu u utjecaju na točnost i pouzdanost Globalnih satelitskih navigacijskih sustava. TEC je ukupan broj elektrona u stupcu ionosfere s površinom poprečnog presjeka od 1 kvadratnog metra od Zemljine površine do vrha ionosfere. Možemo reći i da je mjera ukupnog broja elektrona prisutnih na putu između satelita i prijemnika na Zemlji. TEC se mijenja ovisno o dobu dana, tijekom dana je veći zbog Sunčevog zračenja, noću je niži. Mijenja se i s godišnjim dobima, najveći u razdobljima ekvinocija. TEC po planeti varira i s geografskom širinom, dužinom i nadmorskom visinom. Radi ekvatorijalne ionizacijske anomalije ima sklonost biti veći u blizini ekvatora.

Obično se mjeri u TEC jedinicama (engl. TEC Units - TECU), gdje je $1 \text{ TECU} = 10^{16}$ elektrona po kvadratnom metru. TEC je poprilično važan faktor za određivanje mjere ionosferskog kašnjenja signala, između GNSS satelita i korisničkog prijavnika kroz kojeg prolazi GNSS signal. Mjerenje TEC-a je također korisno za mjerenje utjecaja pojava svemirskog vremena poput solarnih baklji i CME-a. Vrijednost TEC-a možemo dobiti kroz prikupljena signala iz prijavnika Globalnih satelitskih navigacijskih sustava, uspoređujući primljene signale s dvije različite frekvencije, možemo procijeniti TEC između satelita i antene prijavnika. Još jedan način mjerenja TEC-a je oprema opremljena sensorima za ionosferu, na primjer Ionosonde, može se nalaziti na satelitima i na zemlji. Neka oprema mjeri TEC direktno, dok druga mjeri preko drugih svojstava ionosfere.

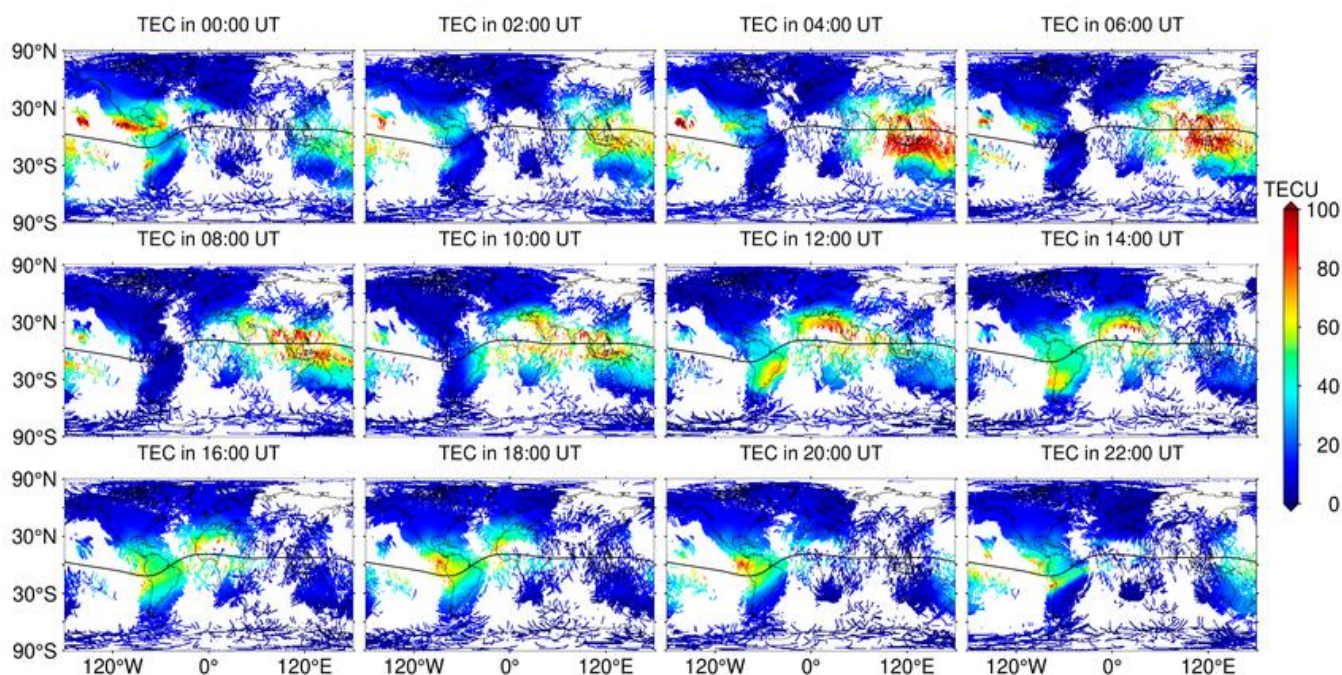
$TEC = \int N_e(s) ds$, N_e = gustoća elektrona u stupcu (m^{-3}), s = put signala do satelita (m). Ova jednačba predstavlja integrirani broj slobodnih elektrona vertikalnog stupca presjeka jedan metar kvadratni ($1m^2$), koji se nalaze na putu GNSS signala kada se satelit nalazi u zenitu.

TEC se obično mjeri s pomoću signala iz Globalnih satelitskih navigacijskih sustava (GNSS) poput GPS-a. Uspoređujući signale primljene na dvije različite frekvencije, znanstvenici mogu procijeniti TEC između satelita i zemaljske stanice.



. Slika 7. Distribucija prosječnih vrijednosti TEC vrijednosti globalne ionosfere 23. travnja 2023. za vrijeme geomagnetske oluje. Izvor: URL 7

Geomagnetska aktivnost, najčešće geomagnetske oluje izazvane interakcijama solarnog vjetera sa Zemljinim magnetskim poljem odnosno magnetosferom, također može izazvati poremećaje ionosfere. Magnetske oluje, koje su izražene u naglim promjenama u Zemljinom magnetskom polju, utječu na ravnotežu nabijenih čestica u ionosferi, što može uzrokovati poremećaje u gustoći elektrona i strukturi ionosfere. Najčešće su promjene vidljive u F2 sloju ionosfere, gdje je za vrijeme geomagnetskih oluja vrlo velika promjena koncentracije slobodnih elektrona. Ionosferski poremećaji imaju tri faze, pozitivnu, negativnu i fazu oporavka. Pozitivna faza predstavlja rast visine F2 sloja zbog povećanja TEC-a i koncentracije molekula plina, kisika (O_2) i Dušika (N_2). Glavna faza odnosno negativna faza poremećaja označava interval kada atmosferski vjetrovi uklanjaju molekule plina i slobodne elektrone, i odnosu ih u niže geografske širine. Zadnja faza oporavka se događi nakon ekspanzije iz glavne faze, gdje se situacija odnosno stanje ionosfere vraća na početno. Koristeći podatke TEC vrijednosti, možemo analizirati odgovor ionosfere na geomagnetsku oluju. Događaji svemirskoga vremena kao što su solarni vjetar i općenito zračenje imaju najveći utjecaj na TEC vrijednosti radi ionizacije.



Slika 8. Distribucija prosječnih vrijednosti TEC vrijednosti globalne ionosfere 24. travnja 2023. za vrijeme geomagnetske oluje. Izvor: URL 7

U svome radu Wang i suradnici (2023) objašnjavajući svoju analizu ionosferskih poremećaja potaknutih geomagnetskom olujom, pronašli su značajnu pozitivnu ionosfersku TEC anomaliju u širokom rasponu niskih i srednjih geografskih širina tijekom glavne faze geomagnetske oluje. Fenomen koji se naziva pozitivna ionosferska oluja, u vremenskom periodu od 20:00 UT 23. travnja do 00:00 UT 24. travnja. Ionosferske oluje uzrokovane geomagnetskim olujama kategoriziraju se u pozitivne i negativne oluje, a fizički čimbenici koji utječu na promjene parametara ionosfere tijekom geomagnetskih oluja uključuju termosfersku cirkulaciju, dinamički električni poremećaj polja, električna polja prodora (engl. Penetration electric field), i promjene neutralne komponente.

Ionosferski poremećaji su često jači odnosno izraženiji na velikim geografskim širinama, gdje vektori magnetskog polja ulaze u ionosferu pod strmijim kutovima, što dovodi do pojačanja utjecaja na gustoću elektrona i ponašanje Zemljine ionosfere. Osim solarnih i geomagnetskih uzroka ionosferskih poremećaja, atmosferski valovi kao što su gravitacijski valovi i kretanja plime i oseke mogu se širiti prema gore od niže atmosfere pa sve do ionosfere, njihov utjecaj uzrokuje poremećaje u gustoći elektrona i temperaturi. Seizmička aktivnost, na primjer potresi i vulkanske erupcije, može generirati akustične i gravitacijske valove koji putuju kroz atmosferu i utječu na ionosferu, pridonoseći poremećajima u ionosferi. Rezultati poremećaja u ionosferi su raznoliki, oni mogu biti apsorpcija, refleksija, scintilacija i kašnjenje signala u širenju radiovalova, što uzrokuje probleme s GNSS-om. Uz GNSS tehnologije koje se koriste ionosferom su radio komunikacija i radar, naravno također pod rizikom od ovakvih događaja. Znanstvenici i istraživači nastavljaju proučavati ionosferske poremećaje kako bi poboljšali opće znanje o

tim fenomenima i da poboljšaju našu sposobnost predviđanja i pripremu na njihov utjecaj na GNSS i modernu tehnologiju.

8.1. Efekti ionosfere na GNSS

Scintilacija odnosno ionosferska scintilacija se odnosi na brze promjene amplitude i faze GNSS signala uzrokovane malim nepravilnostima u ionosferi odnosno to je modifikacija radio valova GNSS-a uzrokovana malim strukturama u ionosferi. Scintilacija je posebno značajna u ekvatorijalnim i polarnim prostorima, posebno za vrijeme trajanja geomagnetskih oluja odnosno visoke solarne aktivnosti. Gubitak kontakta sa satelitom, slabljenje signala i značajne pogreške u pozicioniranju su najčešće poteškoće uzrokovane scintilacijom. Scintilacija je veliki izazov za GNSS prijemnike, naročito za jedno frekvencijske uređaje.

Izraz "scintilacije" obično odnosi na brze fluktuacije amplitude i faze u primljenom elektromagnetskom valu. Uzrok može biti difrakcija kada se elektromagnetski valovi raspršuju u nepravilnom mediju sastavljenom od mnogo malih promjena u indeksu loma. Udarni ravni val ulazi u takav medij s prostorno uniformnom fazom, a izlazi iz medija s prostorno nepravilnom fazom. Nakon širenja do prijammnika, nepravilne faze mogu se konstruktivno ili destruktivno kombinirati kako bi povećale ili smanjile amplitudu vala. Alternativno, uzrok može biti lom kad elektromagnetski val uđe u medij povećane ili smanjene fazne brzine. Ravni val ostaje ravni val, ali faza koju promatra prijammnik će se promijeniti kako se mijenja integrirani fazni pomak preko medija. Scintilacije su opažene u prirodnim i ljudskim signalima već desetljećima. (Kitner i suradnici,2007)

Ionosferske anomalije kao što su ekvatorijalne ionizacijske anomalije ili ionosferski mjehurići mogu prouzrokovati lokalizirane poremećaje u GNSS signalima. One su osobito raširene u ekvatorijalnim regijama nakon zalaska Sunca. Lokalne greške u GNSS pozicioniranju, slabljenje signala i povećana greška u pozicioniranju (engl. Dilution of precision - DOP), što posebno utječe na područja na nižim geografskim širinama.

9. Pomoćni (back up) sustavi

U slučaju da svemirsko vrijeme onemogućiti odnosno poremeti tehnološke sustave na zemlji, moguće je koristiti starije sisteme navigacije i ostalih tehnoloških sustava koji bi eventualno bili manje pogođeni od modernijih sistema. Specifično GNSS je dokazano jedan od najizloženijih tehnologija utjecaju svemirskoga vremena. GNSS sistemi su jako važan faktor u globalnoj navigaciji stoga i u globalnoj ekonomiji. Satelitske konstelacije obično imaju više satelita u orbiti nego što je potrebno za pružanje usluga. Postavljanje dodatnih satelita u orbitama manje pogođenim geomagnetskim olujama, kao što su geostacionarni sateliti ili sateliti na velikim visinama, može pomoći u održavanju usluga kada su sateliti u niskoj Zemljinoj orbiti ugroženi. Također osim satelita u rezervi radi se na zaštiti od geomagnetskih oluja za kritične dijelove satelita kao i smanjenja suvišnosti u sistemu. Osim pripreme u svemirskom segmentu u navigaciji možemo primijeniti starije sisteme poput E-LORAN sistema

9.1. LORAN

Sistem navigacije dugog dometa (engl. Long range navigation - LORAN) je radionavigacijski sustav razvijen u Sjedinjenim Državama tijekom Drugog svjetskog rata. Najmodernije izdanje je eLoran što je tehnološki unaprijeđen sistem koji radi na starijem principu. Loran sistem se odnosi na međunarodnu mrežu obalnih stanica koje odašilju radio valove niske frekvencije koje brodski Loran prijammnici pakupe. Koristeći izračune vremenske razlike između primljenog signala između dvije stanice dobijemo hiperbolu kao liniju pozicije. Korištenjem izračuna od više parova obalnih stanica možemo dobiti poprilično točnu poziciju u navigaciji.

Što se tiče komunikacijskog sustava, HF radija i održavane mreže fiksne telekomunikacije mogu poslužiti kao pomoćni sistemi moderne komunikacije jer su manje podložni utjecaju. Energetske mreže imaju pripremljene pomoćne sisteme opskrbe, kao što su generatori, u slučaju pada sistema pogotovo za važnu infrastrukturu npr. Bolnice. Uz to sam sistem može biti postavljen da u slučaju pada mreže manja područja budu pogođena umjesto čitavog sektora. Također se provodi i jačanje primarne infrastrukture tako da bude manje podložna utjecaju geomagnetskih struja. Implementacija pomoćnih sustava nam omogućuje daljnje funkcioniranje društva u slučaju ekstremnih događaja.

10.Zaključak

Proučavanje utjecaje svemirskog vremena na GNSS pokazuje nam ranjivost satelitske navigacije i sustava za vrijeme trajanja solarne i geomagnetske aktivnosti. GNSS tehnologija je općenito vrlo pouzdana u normalnim uvjetima, međutim vremensko stanje u svemiru može dovesti do kritičnih poremećaja, posebno u smislu integriteta, točnosti i dostupnosti signala GNSS-a. Radi osiguranja kontinuirane pouzdanosti GNSS-a u suočavanju s rizicima povezanih sa svemirskim vremenom, stalna istraživanja, praćenje i razvoj strategija umanjavanja rizika su ključni. Ovakvi napori pomoći će u zaštiti kritičnih sustava i aplikacija koje ovise o točnim i kontinuiranim GNSS signalima, što je sve važnije kako se sve više oslanjamo na ovakve tehnologije u civilnom pa i vojnom sektoru društva.

11. Popis literature

1. Akasofu S. I., Perreault, P., (1978.), A study of geomagnetic storms, *Geophysical Journal International*, (online), Vol. 54, stranice 547 – 573, citirana stranica:569, Dostupno na: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1978.tb05494.x>, Pristupljeno: 26.08.2024
2. Cid, C., Palacios, J., Saiz, E., Guerrero, A., Cerrato, Y., (2014.), On extreme geomagnetic storms, *Journal of Space Weather and Space Climate*, (online), Vol 4, citirana stranica: 2, Dostupno na: <https://www.swsc-journal.org/component/article?access=doi&doi=10.1051/swsc/2014026>, Pristupljeno: 29.08.2024
3. Gold, T., Hoyle, F., (1960.), On the Origin of Solar Flares, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, (online), Vol. 120, Izdanje 2, stranice 89–105, citirana stranica: 7, Dostupno na: <https://doi.org/10.1093/mnras/120.2.89>, Pristupljeno: 23.08.2024
4. Hathaway, D.H., (2015.), The Solar Cycle, *Living Reviews in Solar Physics*, (online), Vol. 12, citirana stranica: 7, Dostupno na: <https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>, Pristupljeno: 29.08.2024
5. Kintner, P.M., Ledvina, B. M., De Paula E. R., (2007.), GPS and ionospheric scintillations, *Space Weather*, (online), Vol. 5, Citirana stranica:1, Dostupno na: <https://doi.org/10.1029/2006SW000260>, Pristupljeno: 30.08.2024
6. Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., Tsurutani B. T., Daglis I. A., Brekke A., Masuda S., (1998.), Two-step development of geomagnetic storms, *Journal of geophysical research*, (online), Vol. 103, stranice 6917-6921, citirane stranica: 6919, Dostupno na: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JA03337>, Pristupljeno: 27.08.2024
7. Lastovička J., Danilov A. D., (2001.), Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere, *International Journal of Geomagnetism And Aeronomy*, (online), Vol. 2, Stranice 209–224, citirana stranica: 209, Dostupno na: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=04ad6b0986495fc998f1039a9a5a5ef30afa0bad>, Pristupljeno: 27.08.2024
8. Webb, D.F., Howard, T.A. (2012.), Coronal Mass Ejections: Observations, *Living Reviews in Solar Physics*, (online), Vol. 9, citirana stranica: 43, Dostupno na: <https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>, Pristupljeno: 25.08.2024
9. Wang, Yifan & Yuan, Yunbin & Li, Min & Zhang, Ting & Geng, Hao & Wang, Guofang & Wen, Gang. (2023.). Effects of Strong Geomagnetic Storms on the Ionosphere and Degradation of Precise Point Positioning Accuracy during the 25th Solar Cycle Rising Phase: A Case Study., *Remote Sensing*, (online), citirana stranica: 14, Dostupno

na:https://www.researchgate.net/figure/Distribution-of-global-ionospheric-TEC-hours-averaged-values-on-24-April-2023_fig4_375926693, Pristupljeno: 30.08.2024

12. Popis izvora

URL 1: https://www.esa.int/Space_Safety/How_ESA_is_getting_data_on_space_weather

URL 2: <https://science.howstuffworks.com/dictionary/astronomy-terms/solar-wind-info.htm>

URL 3: <http://solarcyclescience.com/forecasts.html>

URL 4: <https://www.livescience.com/what-are-coronal-mass-ejections>

URL 5: <https://www.bchydro.com/news/conservation/2021/geomagnetic-storms.html>

URL 6: https://www.researchgate.net/figure/NOAA-SPACE-WEATHER-SCALE-FOR-GEOMAGNETIC-STORMS-12_tbl1_232271901

URL 7: https://www.researchgate.net/figure/Distribution-of-global-ionospheric-TEC-hours-averaged-values-on-24-April-2023_fig4_375926693