

# Geomagnetske oluje

---

**Sabolović, Emanuel**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:665203>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike**

**GEOMAGNETSKE OLUJE**

**Završni rad**

**Emanuel Sabolović**

**Osijek, 2019.**

## Sadržaj

<b>1. UVOD</b> .....	3
1.1. Zadatak završnog rada.....	3
<b>2. SUNCE</b> .....	4
<b>2.1. Vanjski dio Sunca</b> .....	5
2.1.1. Fotosfera .....	5
2.1.2. Kromosfera.....	7
2.1.3. Prijelazno područje.....	7
2.1.4. Korona.....	8
<b>2.2. Sunčev vjetar</b> .....	9
<b>2.3. Eruptivne pojave u vanjskim slojevima Sunca</b> .....	11
<b>3. ZEMLJA</b> .....	13
<b>3.1. Geomagnetsko polje</b> .....	13
<b>3.2. Geomagnetske oluje</b> .....	15
<b>3.3. Indeksi geomagnetske aktivnosti</b> .....	16
3.3.1. K indeks.....	16
3.3.2. <i>Kp</i> indeks .....	16
3.3.3. AE indeks .....	17
3.3.4. Dst indeks.....	18
3.3.5. <i>Ap</i> indeks.....	19
<b>3.4. Klasifikacija geomagnetskih oluja</b> .....	20
<b>4. UČINAK GEOMAGNETSKIH OLUJA</b> .....	22
<b>4.1. Polarna svjetlost</b> .....	22
<b>4.2. Utjecaj na ljude</b> .....	23
<b>4.3. Utjecaj na životinje</b> .....	23
<b>4.4. Elektroenergetski sustavi</b> .....	23
<b>4.5. Radiokomunikacijski sustavi</b> .....	24
<b>4.6. Navigacijski i satelitski sustavi</b> .....	25
<b>5. PROGNOZIRANJE GEOMAGNETSKIH OLUJA</b> .....	27
<b>5.1. Trodnevna prognoza</b> .....	27
<b>5.2. Prognoza za 27 dana</b> .....	28
<b>5.3. Diskusija rezultata prognoze svemirskog vremena</b> .....	29
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	33
<b>POPIS LITERATURE</b> .....	34
<b>SAŽETAK</b> .....	36
<b>SUMMARY</b> .....	37

# 1. UVOD

Planet Zemlja nalazi se u vanjskom sloju Sunca, heliosferi. Sunce je izvor većine energije koju imamo na Zemlji, a njegova aktivnost utječe na geomagnetsko polje. Jake geomagnetske oluje mogu ometati rad satelita, telekomunikaciju, navigaciju, dok ekstremne geomagnetske oluje mogu uzrokovati i prekid prijenosa električne energije na tlu. Stoga je u našem tehnološki razvijenom svijetu praćenje i prognoziranje svemirskog vremena od velike važnosti.

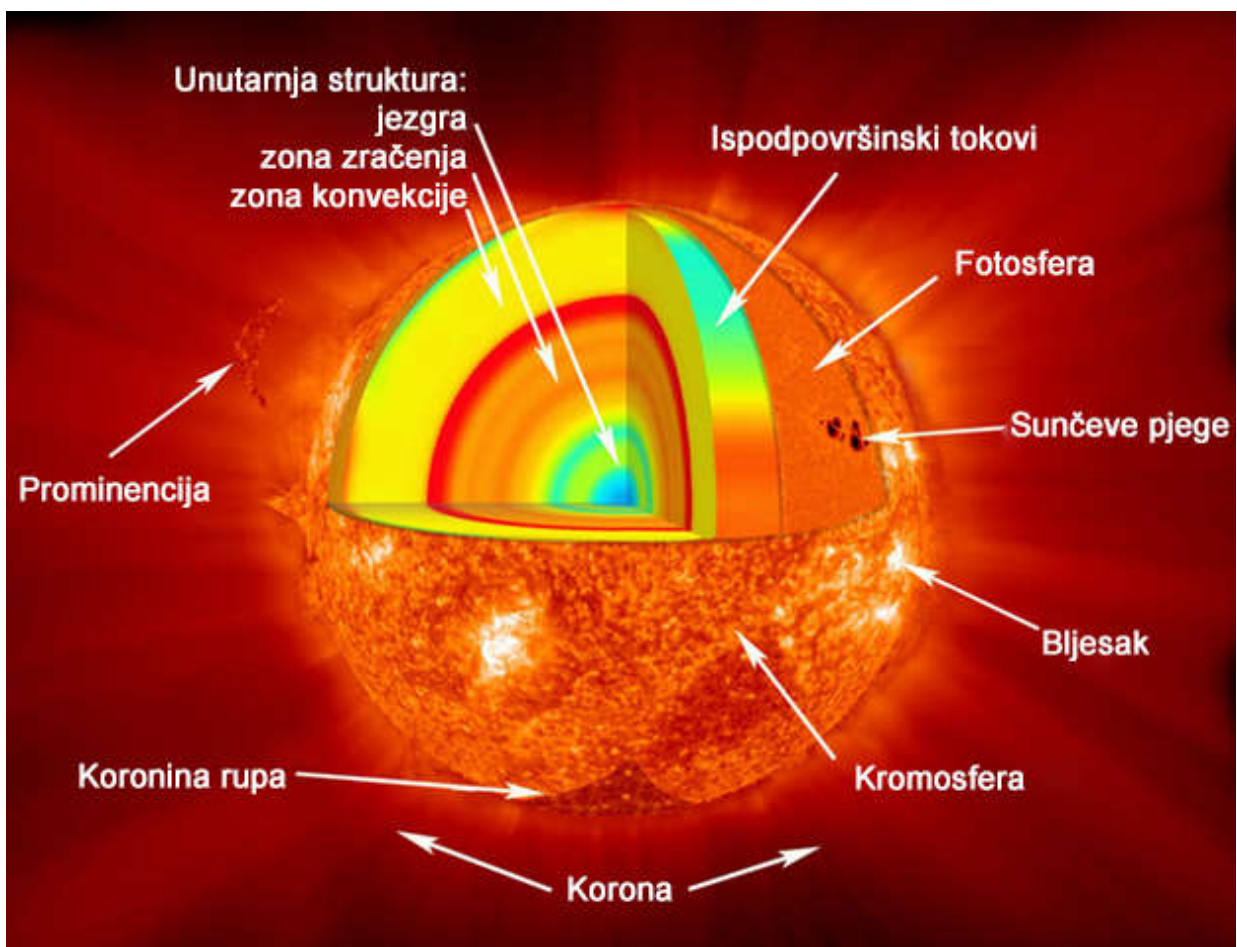
U poglavlju 2 ovoga rada kvalitativno smo opisali zvijezdu Sunce, dajući pregled osnovnih karakteristika njegovih vanjskih slojeva. Kvalitativno su, u najosnovnijim crtama, opisane eruptivne pojave i širenje Sunčevog vjetra, koji utječu na Zemljinu magnetosferu. U poglavlju 3 je u osnovnim crtama opisano geomagnetsko polje te su okarakterizirane geomagnetske oluje putem indeksa geomagnetske aktivnosti,  $K$ ,  $K_p$ ,  $AE$ ,  $Dst$ ,  $A_p$ , te je dana klasifikacija geomagnetskih oluja obzirom na njihovu jačinu. U poglavlju 4 opisuje se učinak geomagnetskih oluja kroz pojavu polarne svjetlosti, utjecaj na ljude i životinje te na elektroenergetske i radiokomunikacijske, navigacijske i satelitske sustave. U 5. poglavlju se pomoću SWPC/NOAA portala iznosi trenutna karakterizacija ambijentalnog Sunčevog vjetra i prognoza svemirskog vremena za 3 i 27 dana unaprijed, te se diskutiraju rezultati. U 6. poglavlju napisan je zaključak.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Kvalitativno objašnjenje pojma geomagnetske oluje kroz odabrane fizikalne veličine i indekse geomagnetske aktivnosti. Pomoću SWPC/NOAA centra dijagnosticirano je trenutno geomagnetsko stanje i dana je prognoza svemirskog vremena za 3 dana i 27 dana.

## 2. SUNCE

Sunce je zvijezda koja se nalazi u središtu našeg Sunčevog sustava. Ono spada u takozvane žute patuljke, a procjenjuje se da je staro oko  $4,5 \cdot 10^9$  godina. Građeno je od vruće plazme. Oko 71% površinske mase Sunca sačinjava vodik, oko 27% čini helij, a oko 2% sačinjavaju teži elementi. Na površini Sunca je akceleracija Sunčeve gravitacije jednaka. Sunce ima oblik gotovo savršene kugle promjera  $\sim 1392000\text{km}$  i masu  $\sim 2 \cdot 10^{30}\text{kg}$ . Sunce je najproučavanija zvijezda i ujedno jedina zvijezda na kojoj možemo razlučiti prostorne skale na kojima se odvijaju fundamentalni fizikalni procesi. Sunce daje gotovo svu energiju koju imamo na Zemlji. Sunčevom unutrašnjošću smatramo dio Sunca ispod njegove optičke površine, a sastoji se od jezgre u kojoj se odvijaju termonuklearne reakcije, te zone zračenja i zone konvekcije. Vanjski dio Sunca, takozvana Sunčeva atmosfera, jest dio Sunca koji se može izravno opažati, a dijelimo ga na fotosferu, kromosferu, koronu i heliosferu. Mi se nalazimo u heliosferi, odnosno u vanjskom sloju Sunca.



Slika 2.1. - Struktura Sunca [1].

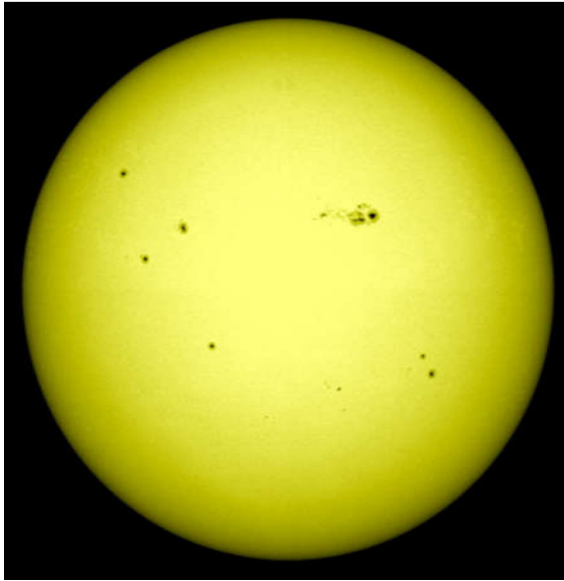
## 2.1. Vanjski dio Sunca

### 2.1.1. Fotosfera

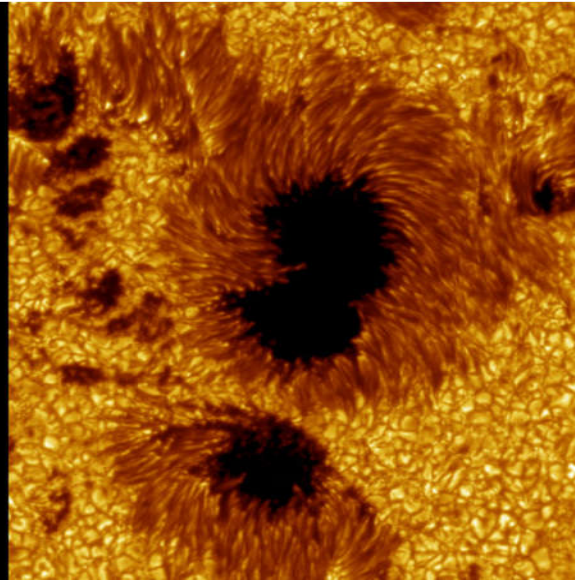
Tablica 2.1 – Tipične vrijednosti fizikalnih parametara vanjskih slojeva Sunca.

	Temperatura [K]	Brojčana gustoća [ $cm^{-3}$ ]
Fotosfera	4000 do 6000	$10^{15}$ do $10^{17}$
Kromosfera	6000 do 50000	$10^{11}$ do $10^{15}$
Prijelazno područje	50000 do $10^6$	$10^9$ do $10^{11}$
Korona	$10^6$ do $5 \cdot 10^6$	$10^7$ do $10^9$

Fotosfera je izvor većine Sunčevog zračenja. Vidljiva svjetlost i infracrveno zračenje dolaze nam iz fotosfere. Temperatura u fotosferi opada prema van, a energija se transportira zračenjem i donekle konvekcijom. Osnovne strukture koje nalazimo u fotosferi su Sunčeve granule, Sunčeve baklje i Sunčeve pjege. Sunčeve pjege su hladnija i tamnija područja u fotosferi. Sastoje se od tamnijeg središta, umbre, okruženog nešto svjetlijom penumbrom. One su područja smanjene temperature uslijed koncentriranog toka magnetskog polja koje inhibira konvekciju. Sunčeve pjege se obično pojavljuju u parovima suprotne magnetske polarnosti. Njihov broj na Sunčevom disku mijenja se sljedeći 11 godišnji ciklus [2]. Pojedinačne Sunčeve pjege ili skupine Sunčevih pjega mogu trajati od par dana do par mjeseci, a na kraju nestaju. Veće se Sunčeve pjege u odgovarajućim atmosferskim uvjetima na Zemlji mogu vidjeti sa Zemlje bez optičkih pomagala. Uz Sunčeve pjege vezana je intenzivna magnetska aktivnost, dok većina eruptivnih pojava u Sunčevoj atmosferi ima svoj izvor u magnetski aktivnim područjima koje se nalaze upravo oko vidljivih Sunčevih pjega. Sunčeve pjege su bile opažane u drevnoj Kini još u vremenu prije Krista. U Europi najstariji crtež Sunčeve pjege datira iz 12. stoljeća. Početkom 17. stoljeća Galileo Galilei upotrijebio je teleskop za promatranje Sunčevih pjega iz čega je izveo zaključak da Sunce rotira oko vlastite osi.



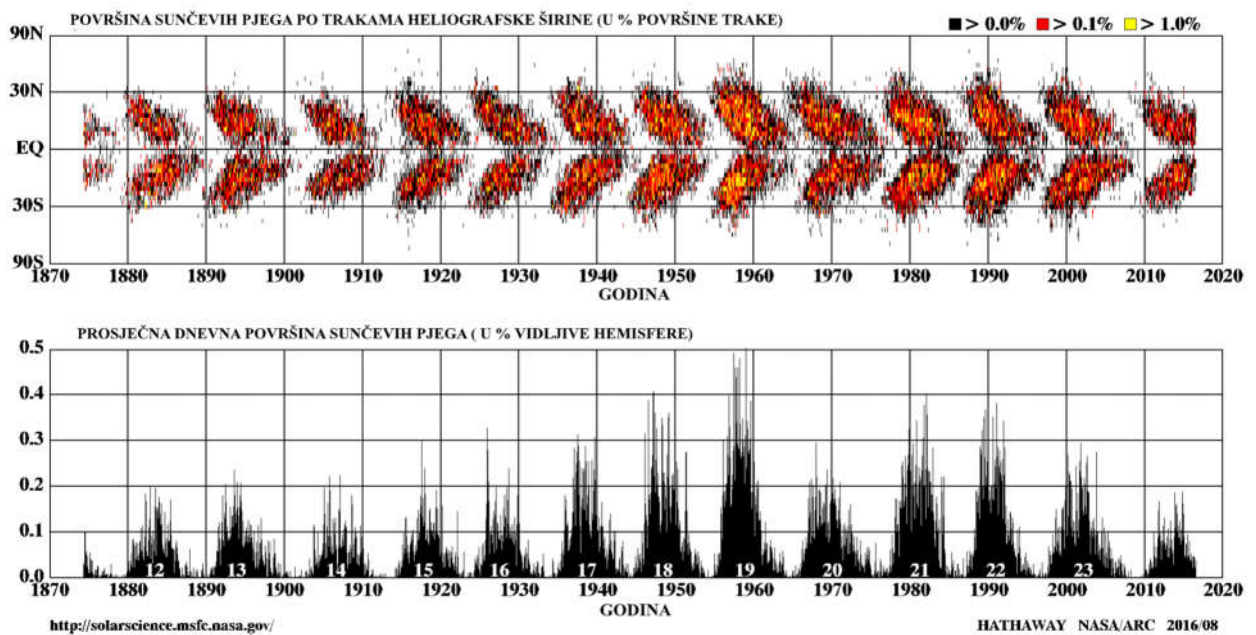
Slika 2.2.



Slika 2.3.

Dva pogleda na Sunčeve pjege u fotosferi. Na lijevoj slici se nalazi nekoliko Sunčevih pjega, snimljenih 9. studenog 2011.g. pomoću NASA/SDO. Na desnoj slici imamo povećani pogled na skupinu Sunčevih pjega snimljenih pomoću švedskog teleskopa na Kanarskim otocima 15. srpnja 2002. godine. [3]

Na početku 11 godišnjeg ciklusa, Sunčeve pjege pojavljuju se na višim heliografskim širinama, a kako ciklus napreduje prema maksimumu sele se bliže ekvatoru.



Slika 2.4. – Dnevna površina Sunčevih pjega uprosječena po pojedinačnim Sunčevim rotacijama [4].

U vrijeme Sunčevog maksimuma populacija Sunčevih pjega u fotosferi je najbrojnija. Zbog povezanosti s drugim vrstama Sunčeve aktivnosti, pojavljivanje Sunčevih pjega može biti od koristi u predikcijama svemirskog vremena.

### 2.1.2. Kromosfera

Kromosfera je sloj iznad fotosfere u kojem temperatura raste prema van. Prostorno i vremenski je nehomogena, a energiju se transportira uglavnom zračenjem i valovima. Vidljiva je tijekom potpune pomrčine Sunca kao rozocrvena. Osnovne strukture koje nalazimo u kromosferi su spikule, filamenti, prominencije i magnetske petlje. Budući da su filamenti i prominencije konstitutivni dijelovi mnogih koroninih izbačaja mase, opažanja kromosfere su od velike važnosti za predikcije svemirskog vremena.



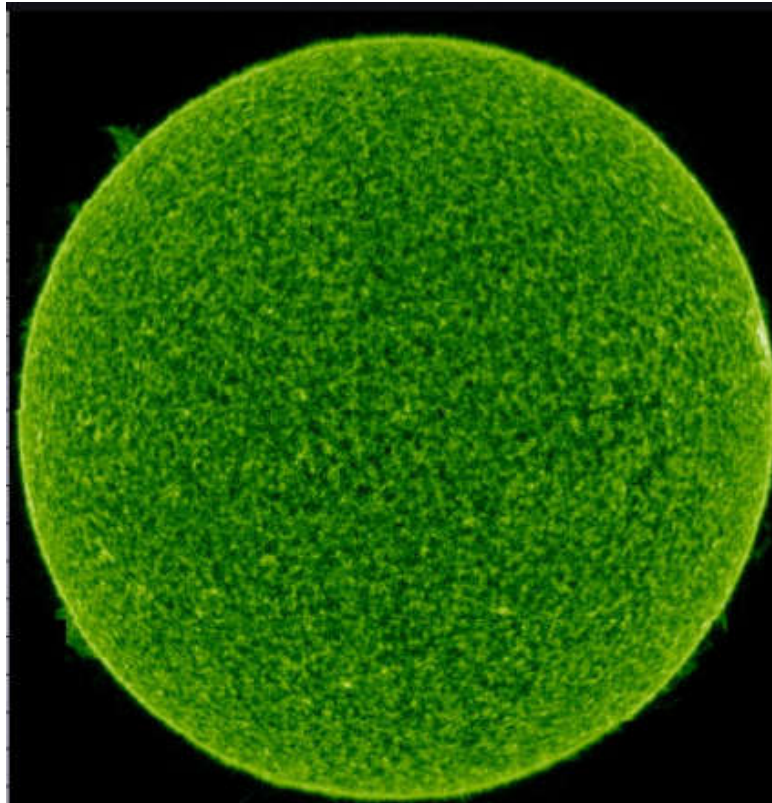
**Slika 2.5.** – Pomrčina Sunca snimljena 11. kolovoza 1999. godine u Francuskoj. Fotografija je snimljena tijekom pomrčine Sunca 11. kolovoza 1999. godine u Francuskoj. Rožo-crveni prsten koji se vidi tijekom totaliteta je kromosfera, Sunčeva donja atmosfera [5].

### 2.1.3. Prijelazno područje

Prijelazno područje je tanko i vrlo je nepravilan sloj između kromosfere i korone. Opažamo ga satelitima u ultraljubičastom području. U prijelaznom području temperatura poraste od  $5 \cdot 10^4 K$



do  $1 \cdot 10^6 K$ , a gustoća dramatično pada. U donjem prijelaznom području temperatura je manja od  $5 \cdot 10^5 K$  te u njemu opažamo mrežastu strukturu sličnu kromosferičnoj. U gornjem prijelaznom području temperatura je veća od  $5 \cdot 10^5 K$  i u njemu vidimo magnetske petlje slične koroninima. Karakteristične strukture u ovom području su nožišta koroninih petlji, nožišta otvorenih magnetskih silnica i hladne magnetske petlje. Smatra se da se ovo područje grije uglavnom kondukcijom topline iz korone.



**Slika 2.6.** - Snimka prijelaznog područja[6] sa SOHO/SUMER pri temperaturi od  $10^5 K$ .

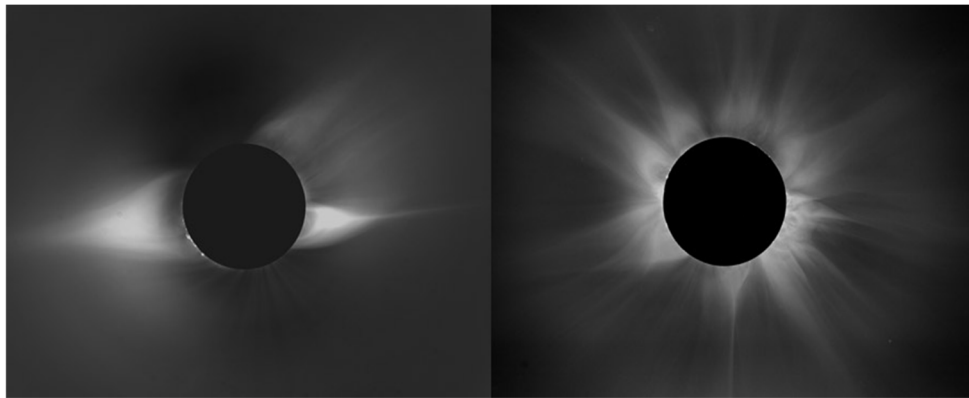
#### 2.1.4. Korona

Vanjski sloj Sunčeve atmosfere nazivamo korona. Unutar korone koegzistiraju različite temperature i gustoće. Vruća je od fotosfere za faktor od 150 do 450, a gustoća joj je tek  $10^{-12}$  gustoće fotosfere. Bez optičkih pomagala možemo je vidjeti samo tijekom pomrčine Sunca, a opažamo je koronografom. Strukture koje nalazimo u koroni su koronine petlje<sup>1</sup> i arkade, aktivna područja, točke koje zrače u X-području i mirno Sunce. Strukture velike skale koje pronalazimo u koroni su *streameri* i koronine rupe.

---

<sup>1</sup> Koronine petlje su zatvorene magnetske silnice u koroni. Zatvoreni magnetski tok ispunjen vrućom plazmom naziva se koronina petlja.

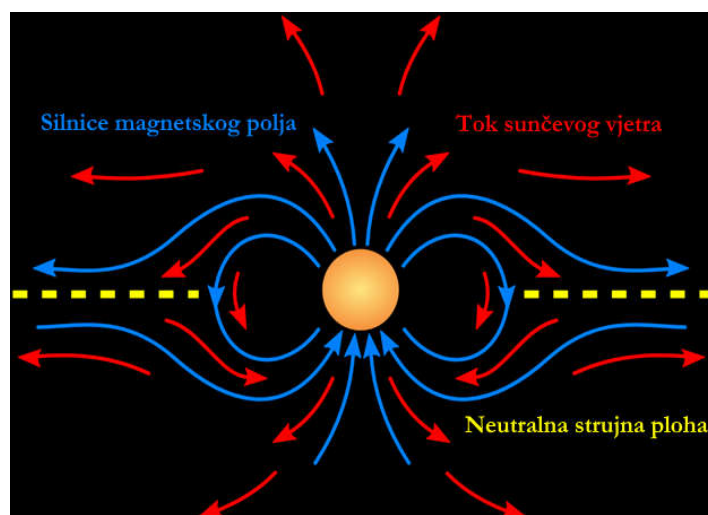
Oblik korone određen je strukturom magnetskog polja te se mijenja tijekom Sunčeva ciklusa. Za vrijeme maksimalne aktivnosti korona je jednoliko raspoređena u svim smjerovima, dok je za vrijeme minimuma aktivnosti ograničena na ekvatorijalna područja.



**Slika 2.7.** - Lijevo: Sunčeva korona oko minimuma Sunčeve aktivnosti, kad je Sunce relativno mirno. Desno: korona u vrijeme maksimuma Sunčeve aktivnosti. Snimka je snimljena pomoću NCAR High Altitude Observatory [7].

## 2.2. Sunčev vjetar

Sunčev vjetar je stalni tok nabijenih čestica koje istječu iz Sunčeve korone. To je ekstenzija Sunčeve korone na vrlo velike heliocentrične udaljenosti. Temperatura mu je od  $10^5$  do  $10^6 K$ , a brzina mu je od . Sunčev vjetar dostiže daleko iza Plutonove orbite pri čemu je tzv. heliopauza locirana na približno 100 - 120 AJ<sup>2</sup>.

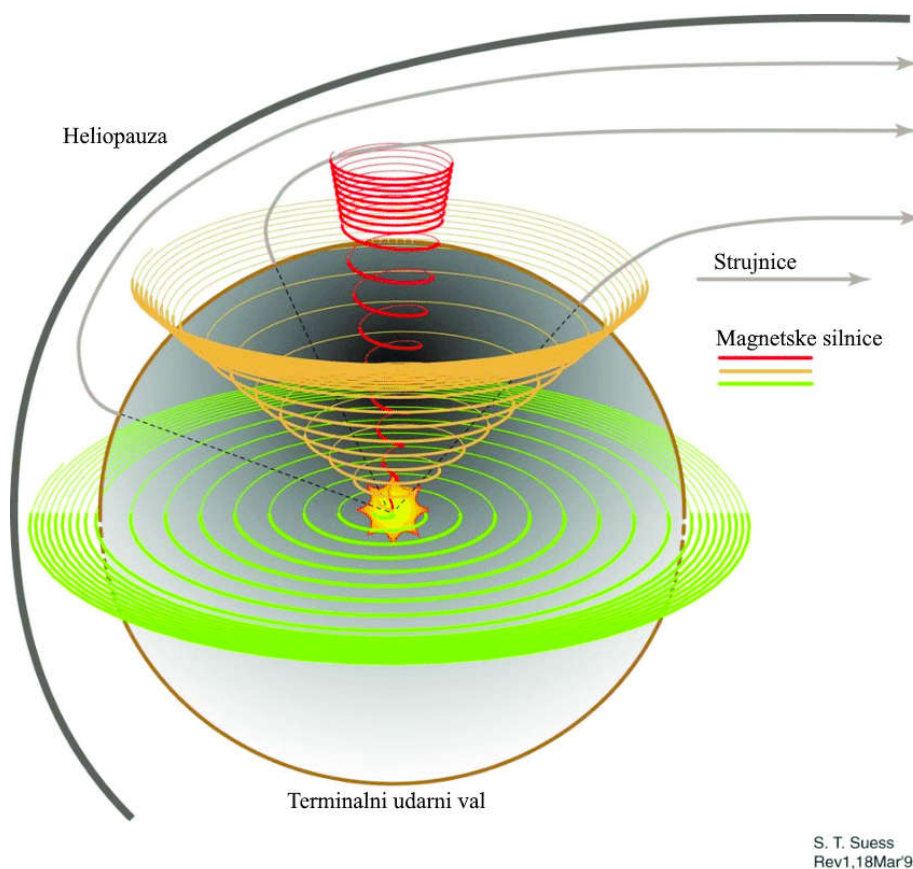


**Slika 2.8.** - Međuplanetarno magnetsko polje [8].

<sup>2</sup> AJ - Astronomska Jedinica, prosječna udaljenost od Zemlje do Sunca.

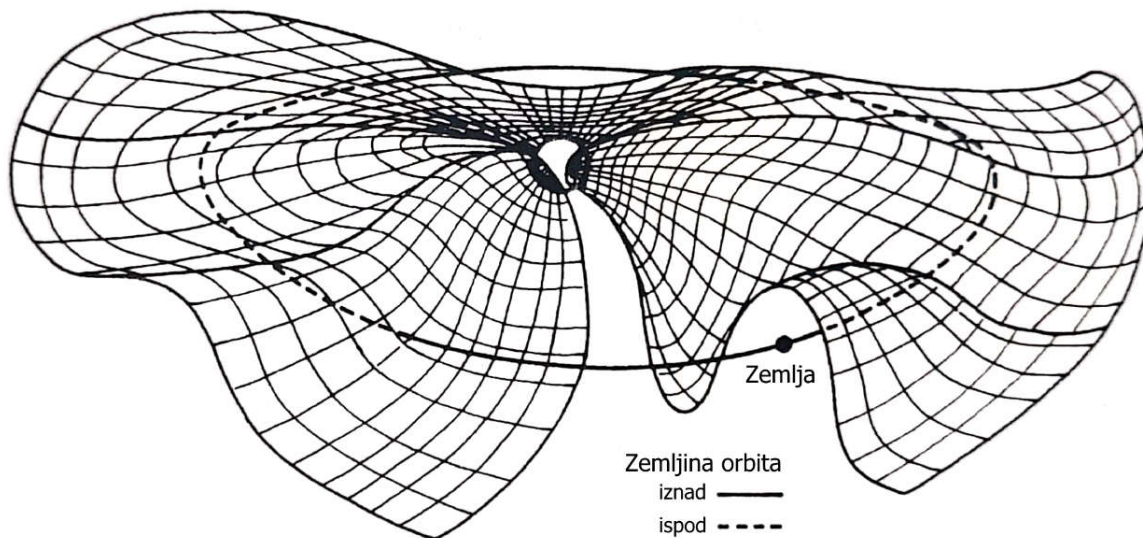
Brzi Sunčev vjetar izlazi iz koroninih rupa, na 1 AJ ima brzine do 800km/s, te je vrlo postojan. Spori Sunčev vjetar izlazi iz mirnog Sunca i aktivnih područja te ima brzine od 300 do 400km/s na 1 AJ, varijabilan je i sadrži fluktuacije gustoće.

Krećući od teorijskog opisa Sunčeve korone kao sferično simetričnog hidrostatskog sustava i razlike tlakova međuzvezdanog medija i tlaka u podnožju Sunčeve korone, E.N. Parker je pokazao da Sunčeva korona mora ekspanirati. Pronašao je rješenje za takav Sunčev vjetar, koji se kreće kreće subsoničnim brzinama iz podnožja korone, te se u daljnjoj propagaciji ubrzava do supersoničnih brzina.



**Slika 2.9.** - Uslijed rotacije Sunca magnetsko polje biva razvučeno u trodimenzionalne forme koje nazivamo Parkerovom spiralom [9].

Sunčeva rotacija vuče magnetsko polje u formu koja u ekvatorijalnoj ravnini Sunca poprima oblik Arhimedove spirale, i proteže se kroz cijeli Sunčev sustav. Ovu pojavu često nazivamo Parkerovom spiralom u čast rada E.N. Parkera koji je predvidio strukturu međuplanetarnog magnetskog polja. Utjecaj ovog spiralnog međuplanetarnog magnetskog polja na Sunčev vjetar stvara najveću strukturu u Sunčevom sustavu, heliosferičnu strujnu plohu. Ona se zakrivljuje u valoviti spiralni oblik te je zbog toga nazivamo balerininom suknjom.

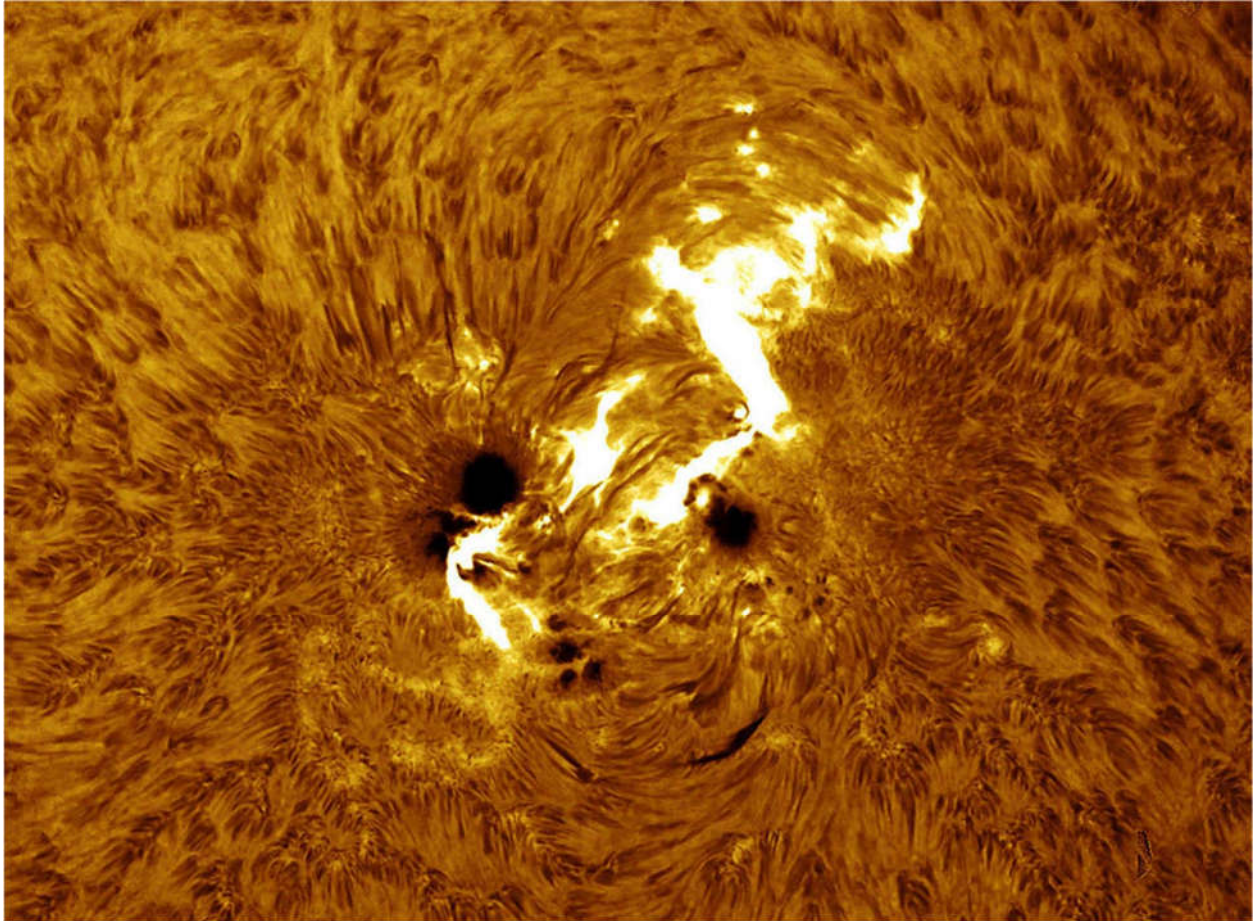


**Slika 2.10.** - Valovita struktura međuplanetarne strujne plohe, tzv. balerinina suknja [10].

Heliosferična strujna ploha rotira zajedno sa Suncem s periodom od oko 25 dana. Tijekom tog perioda njezine karakteristike prolaze kroz Zemljinu magnetosferu i interagiraju s njom.

### **2.3. Eruptivne pojave u vanjskim slojevima Sunca**

Naglo povećanje elektromagnetskog zračenja sa Sunca nazivamo Sunčevim bljeskom. Običavamo ga opažati u blizini Sunčeve optičke površine, u aktivnim područjima, nedaleko od Sunčevih pjega. Sunčevi bljeskovi manifestiraju se u svim slojevima Sunčeve atmosfere. Plazma biva ugrijana na desetke milijuna kelvina dok elektroni, protoni i teži ioni bivaju akcelerirani do brzina usporedivih sa brzinom svjetlosti. Energija potrebna za Sunčev bljesak dobiva se pretvorbom magnetske energije pohranjene u koroni. X-zračenje i ultraljubičasto zračenje emitirano u Sunčevom bljesku može utjecati na Zemljinu ionosferu i ometati dugodosežne radio komunikacije. Radio emisija decimetarskih valnih duljina može ometati funkcioniranje radara. Za vrijeme maksimuma Sunčeve aktivnosti, događa se nekoliko Sunčevih bljeskova dnevno, a u periodu Sunčevog minimuma opažamo manje od jednog tjedno. Sunčevi bljeskovi mogu poslati tok visoko energetskih čestica u Sunčev vjetar. Te čestice mogu utjecati na Zemljinu magnetosferu te ugrožavati satelitsku tehnologiju i astronaute. Čestice visoke energije u Zemljinoj magnetosferi doprinose pojavi polarne svjetlosti.



**Slika 2.11.** – Sunčev bljesak opažan u  $H_{\alpha}$  [11].

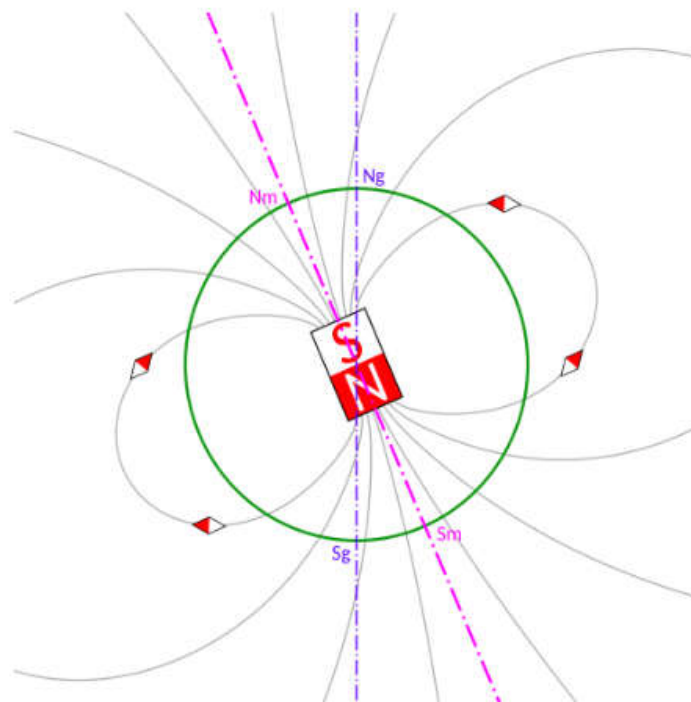
Sunčevi bljeskovi su često popraćeni koroninim izbačajima mase, izbacivanjem plazme i pripadajućeg magnetskog polja iz Sunčeve korone. Tijekom erupcije Sunčevih prominencija opažamo i koronine izbačaje mase. Oslobođena plazma propagira kroz Sunčev vjetar i može se opažati u koronografskim snimkama.

U blizini maksimuma Sunčeve aktivnosti, Sunce daje oko tri koronina izbačaja dnevno, dok se u minimumu Sunčeve aktivnosti opaža tek jedan koronin izbačaj u pet dana. Udar koroninog izbačaja mase u Zemljinu magnetosferu uzrokuje perturbacije geomagnetskog polja.

### 3. ZEMLJA

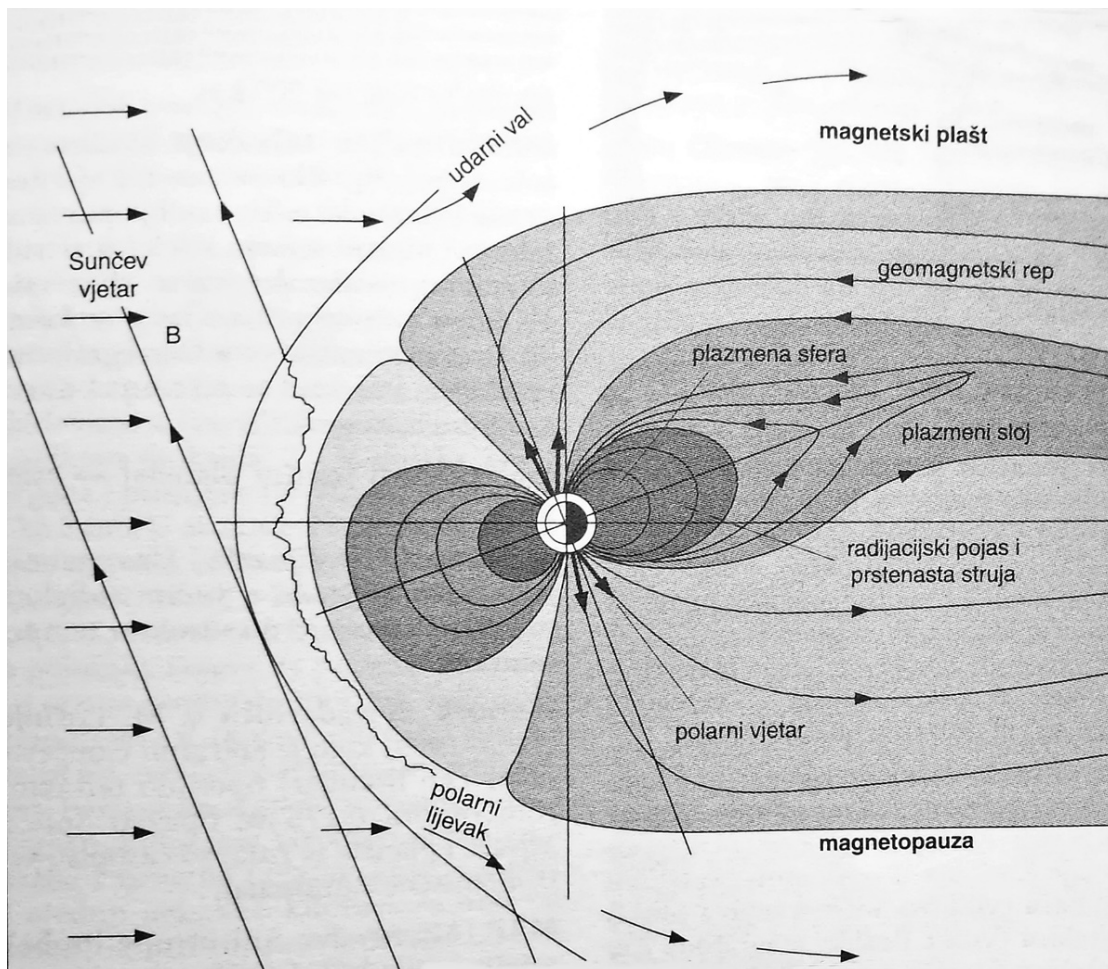
#### 3.1. Geomagnetsko polje

Geomagnetsko polje je magnetsko polje koje se proteže iz Zemljine unutrašnjosti u vanjski prostor, u kojem interagira sa Sunčevim vjetrom. Ovo magnetsko polje nastaje prirodnim procesom koji nazivamo geodinamo. Na Zemljinoj površini Zemljino magnetsko polje iznosi od 25 do 65  $\mu T$ . Zemljino magnetsko polje aproksimiramo poljem magnetskog dipola koje je  $11^\circ$  nagnut na Zemljinu rotacijsku os, kao kad bi smo imali štapićasti magnet koji se nalazi u unutrašnjosti Zemlje.



**Slika 3.1.** – Zemljino magnetsko polje u dobrom približenju možemo zamisliti kao polje magnetskog dipola  $\sim 11^\circ$  nagnutog na Zemljinu os rotacije[12].

Magnetski polovi kontinuirano vrlo polagano mijenjaju položaj na geološkim vremenskim skalama. Zemljino magnetsko polje skreće većinu nadolazećeg Sunčevog vjetra, čije bi nabijene čestice inače erodirale ozonski sloj koji štiti Zemlju od ultraljubičastog zračenja. Područje u kojemu je tlak Sunčevog vjetra i tlak Zemljinog magnetskog polja izjednačen, tj. granica magnetosfere, nazivamo magnetopauzom. Unatoč svom imenu magnetosfera je asimetrična, sa stranom okrenutom Suncu protegnutom do  $\sim 10 R_\oplus$ , dok se na noćnoj strani proteže u takozvani magnetorep dugačak  $\sim 200R_\oplus$ . Kad Sunčev vjetar susretne Zemljino magnetsko polje, formira se zakrivljeni udarni val, u kojem se Sunčev vjetar naglo decelerira.



**Slika 3.2.** – Magnetosfera zemlje [13].

Unutar magnetosfere nalazi se plazmasfera oblika torusa koja sadrži nabijene čestice male energije. Plazmasfera počinje na 60 km iznad tla i proteže se 3 do 4  $R_{\oplus}$ , uključujući ionosferu, te rotira zajedno sa Zemljom.

Također, dva koncentrična područja u toroidalnog oblika koja sadrže ione visokih energija, od kojih većina potječe iz Sunčevog vjetra, nazivaju se Van Allenovi pojasevi zračenja. Unutarnji pojas nalazi se na jedan do dva radijusa Zemlje dok se vanjski nalazi 4-7 $R_{\oplus}$ . Van Allenovi pojasevi se djelomično preklapaju sa plazmasferom, pri čemu to preklapanje ovisi o Sunčevoj aktivnosti. Držeći u zatočeništvu elektrone, protone i nešto alfa čestica<sup>3</sup> visokih energija, Van Allenovi pojasevi štite Zemljinu atmosferu od uništenja. Satelitska tehnologija za koju se planira da će duži period vremena provoditi u Van Allenovim zonama mora u to vrijeme imati zaštićene svoje osjetljive dijelove [14].

<sup>3</sup> Alfa čestica – jezgra helija koja se sastoji od dva protona i dva neutrona.

Osim što skreće Sunčev vjetar, Zemljino magnetsko polje skreće i kozmičke zrake, nabijene čestice visokih energija koje većinom potječu izvan Sunčevog sustava.

Neke nabijene čestice iz Sunčevog vjetra prodru u magnetosferu, krećući se spiralno oko magnetskih silnica te se odbijaju od jednog magnetskog pola drugom. Pozitivni ioni polagano se kreću prema zapadu, dok se negativni ioni kreću prema istoku, što stvara tzv. struju prstena. Struja prstena smanjuje magnetsko polje na samoj površini Zemlje. Nabijene čestice koje uđu u ionosferu i sudaraju se s atomima stvaraju polarnu svjetlost te emitiraju u X-području. Promjenjivi uvjeti u Zemljinoj magnetosferi, poznati kao svemirsko vrijeme, većim su dijelom pod utjecajem Sunčeve aktivnosti. Ako je Sunčev vjetar slabiji, Zemljina magnetosfera se širi. Ako je pak Sunčev vjetar jak, pritišće magnetosferu s dnevne strane pri čemu više nabijenih čestica prodire u magnetosferu.

### **3.2. Geomagnetske oluje**

Geomagnetska oluja je privremeni poremećaj Zemljine magnetosfere uzrokovan udarnim valom koji propagira kroz Sunčev vjetar ili oblakom magnetizirane plazme koji interagira sa Zemljinim magnetskom poljem. Poremećaj koji uzrokuje magnetsku oluju jest Sunčev koronin izbačaj mase ili korotirajuće područje interakcije, mlaz čestica Sunčevog vjetra velike brzine koji dolazi iz koronine rupe. Za vrijeme maksimalne Sunčeve aktivnosti, geomagnetske oluje su učestalije, pri čemu je većina uzrokovana koroninim izbačajima mase. Za vrijeme Sunčevog minimuma geomagnetske oluje su većinom uzrokovane korotirajućim područjima interakcije.

Pojave svemirskog vremena vezane uz geomagnetsku oluju su događaji Sunčevih energetske čestice, tj. protonske oluje, geomagnetski inducirane struje, poremećaji ionosfere koji ometaju radio i radarsku komunikaciju, navigaciju pomoću kompasa i dovode polarnu svjetlost na niže geografske širine.

Najveća zabilježena geomagnetska oluja zbila se 1859. godine, tzv. Carringtonov događaj, a u njoj je bio uništen dio američke telegrafske mreže. U novije vrijeme najveća geomagnetska oluja zbila se 1989. godine. Ova velika geomagnetska oluja omela je distribuciju energije u kanadskom Quebecu pri čemu se polarnu svjetlost moglo vidjeti i u Texasu.



### 3.3. Indeksi geomagnetske aktivnosti

Geomagnetski indeksi aktivnosti koriste se u svrhu karakteriziranja sustava Zemljine magnetosfere i ionosfere. Temelje se na zemaljskim magnetogramima koji snimaju, koji snimaju magnetsko polje kao funkciju vremena. Iznos vektora geomagnetskog polja naziva se totalni intenzitet, a označava se sa  $F$ . Njegova horizontalna komponenta naziva se horizontalni intenzitet označava se sa  $H$ . Vertikalna se komponenta naziva vertikalni intenzitet,  $Z$ . Komponente magnetskog polja prema sjeveru i prema istoku označavamo sa  $X$  i  $Y$ , redom.  $X, Y, Z$  čine Kartezijeve komponente vektora magnetskog polja, pri čemu  $Z$ -komponenta pokazuje prema dolje. Kut,  $D$ , između sjeverne komponente i komponente horizontalnog magnetskog polja naziva se deklinacija. Kut,  $I$ , između horizontalne komponente i totalnog vektora magnetskog polja naziva se inklinacija. Veličine  $F, H, X, Y, Z, D$  i  $I$  nazivamo magnetskim elementima [15].

Mjerenjem poremećaja magnetskog polja dobije se matematički zapis koji opisuje geomagnetske aktivnosti, tzv. geomagnetske indekse. Indeksi se mogu podijeliti u dvije skupine: a) indeksi koji opisuju planetarnu aktivnost, kao što su  $K, K_p, A_p$ ; b) indeksi koji opisuju pojave koje uzrokuju geomagnetske poremećaje, a to su  $Dst, AE$ .

#### 3.3.1. K indeks

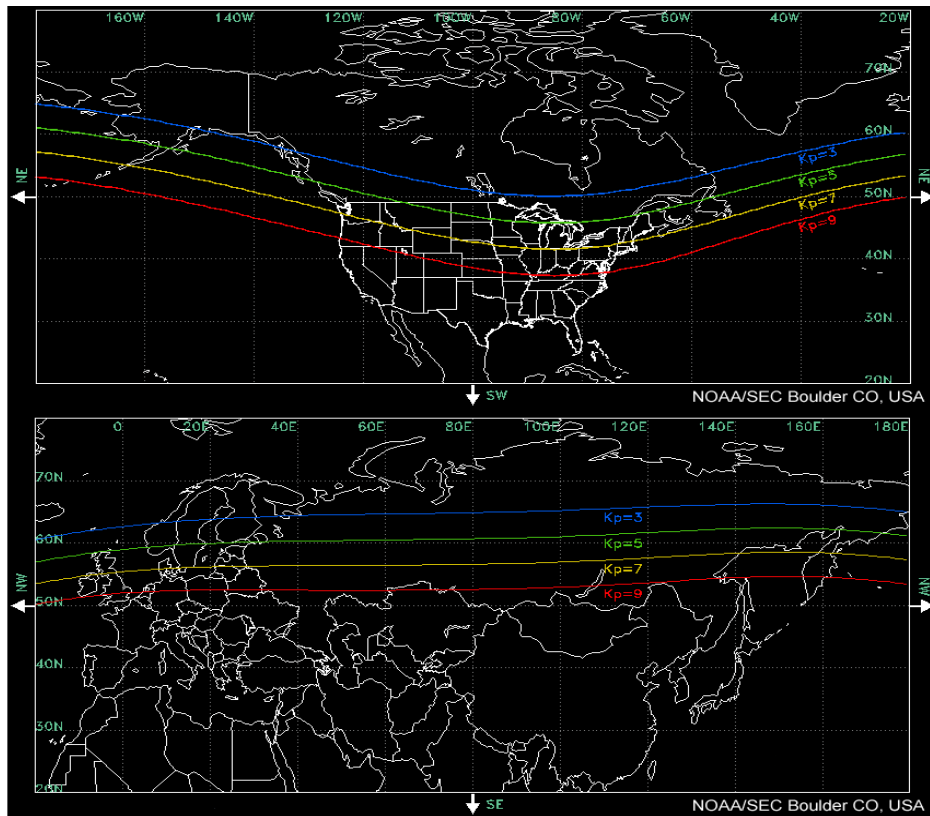
$K$  indeks je mjera nepravilnih kratkotrajnih varijacija standardnih magnetograma i karakterizira opći stupanj poremećaja na danom opservatoriju. On reflektira primarno aktivnost zone polarne svjetlosti.

#### 3.3.2. $K_p$ indeks

Najrasprostranjeniji je  $K_p$  indeks, pri čemu  $p$  u indeksu označava da se radi o planetarnom indeksu. Izvorno je bio zamišljen da će karakterizirati nivo planetarne geomagnetske aktivnosti. Međutim, ispostavilo se da je najosjetljiviji na aktivnosti u području polarne svjetlosti.  $K_p$  indeks se temelji na  $K$  indeksima iz dvanaestak magnetoopservatorija, a računa se kao aritmetička sredina izmjerenih vrijednosti.

Kad stanice nisu pod utjecajem struja mlazova elektrona u području polarne svjetlosti, takve uvjete nazivamo magnetski mirnima. Ako se područje polarne svjetlosti širi prema ekvatoru, stanice mogu detektirati efekte struje iz mlaza elektrona polarne svjetlosti i od magnetosferičnog prstena struje te od struja u smjeru magnetskog polja koje je spajaju s ionosferom. To se zbiva za vrijeme perioda poremećenog magnetskog polja. Na stanicama koje se nalaze na srednjim magnetskim širinama rijetko se detektira jak horizontalni sustav struja, te stoga magnetske perturbacije mogu

biti dominantne ili u  $H$  ili u  $D$  komponenti. Kp indeks koristi obje perturbacije uzimajući logaritam najveće promjene u  $H$  ili  $D$  tijekom perioda od tri sata i stavlja ju na skalu od 0 do 9. Kp indeks se određuje za svaku magnetsku širinu zasebno i daje nam informaciju o vjerojatnosti da će se moći vidjeti polarna svjetlost.



Slika 3.3 - Kp indeks prikazan obzirom na geografsku širinu [16].

### 3.3.3. AE indeks

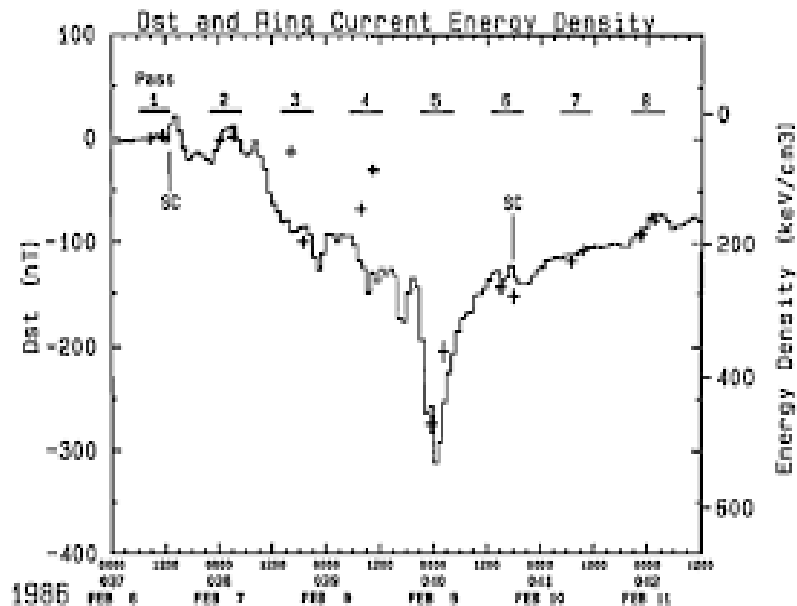
AE indeks (eng. Auroral Electrojet Index) je uveden kao mjera jakosti mlaza elektrona u području polarne svjetlosti, koje relativno nisu pod utjecajem efekata struje prstena.

Ove indekse računamo iz korigiranih grafičkih prikaza  $H$ -komponente, izmjerene nizom magnetometara u području polarne svjetlosti. Mjesečne srednje vrijednosti su oduzete iz vremenskog niza  $H$ -komponente svake stanice, a rezultirajuće krivulje prikazane su u istom grafu. U sljedećem koraku, gornja i donja anvelopa određuje se tako da predstavljaju najvišu i najnižu korigiranu vrijednost  $H$ , izmjenjenog od svih participirajućih opservatorija. AE indeks se određuje kao razlika gornje i donje anvelope.

Koristan je kao korelativni indeks u istraživanjima ponašanja komunikacijskih satelita, radio valova i povezivanja međuplanetarnog magnetskog polja sa magnetskim poljem Zemlje.

### 3.3.4. Dst indeks

Dst indeks (eng. Disturbance Storm Time) iz sata u sat određuje jakost struje prstena. Dobiva se uprosječivanjem reziduala  $H$ -komponenti izmjenjenih na magnetskim opservatorijima koji se nalaze širom svijeta na nižim magnetskim širinama. Prilagodba se radi u odnosu na razine  $H$  u mirnim danima stanice na određenoj magnetskoj širini. Dst indeks je izravna mjera perturbacije  $H$ -komponente uprosječene po satu. Velike negativne perturbacije su indikator porasta intenziteta struje prstena, a tipično se pojavljuju na vremenskim skalama od oko sat vremena. Smanjenje intenziteta može trajati znatno duže, na skali nekoliko sati. Cijeli period se naziva geomagnetska oluja. Za vrijeme geomagnetske oluje može se opaziti nekoliko izoliranih ili jednu prolongiranu podoluju u AE indeksu. Povremeno na rezoluciji duže vremena,  $\sim 5$  minuta, računa verzija ovog indeksa kako bi se promatrao odnos između geomagnetske oluje i podoluje. Čini se da Dst indeks nije povezan samo sa strujom prstena.



**Slika 3.4.** – Dst indeks i gustoća energije struje prstena tijekom velike geomagnetske oluje u veljači 1986. godine [17].

Opaža se pad Dst indeksa i povećanje energije struje prstena između  $L=3$  i  $L=5$ . Energija strujanja je porasla 16 puta od uobičajene vrijednosti, dok je Dst indeks pao na  $-312$  nT. Potpuni oporavak struje prstena na konstantnu razinu trajao je više od mjesec dana.

### 3.3.5. Ap indeks

Ap indeks je mjera dnevnog prosjeka geomagnetske aktivnosti, a računamo ga kao prosjek 8 trosatnih vrijednosti  $A$  indeksa za svaki dan.  $A$  indeks iz kojeg se dobije  $A_p$  indeks je indeks ekvivalentne amplitude lokalne geomagnetske aktivnosti, te je povezan s  $K$  indeksom.  $A_p$  indeks poprima vrijednosti od 0, u izrazito mirnoj geomagnetskoj situaciji, do 400, u situaciji izrazitog poremećaja. Kad Ap indeks dosegne vrijednost 30, to je znak lokalne geomagnetske oluje.

Kp	Kp u decimalama	Ap	G skala
0o	0,00	0	G0
0+	0,33	2	G0
1-	0,67	3	G0
1o	1,00	4	G0
1+	1,33	5	G0
2-	1,67	6	G0
2o	2,00	7	G0
2+	2,33	9	G0
3-	2,67	12	G0
3o	3,00	15	G0
3+	3,33	18	G0
4-	3,67	22	G0
4o	4,00	27	G0
4+	4,33	32	G0
5-	4,67	39	G1
5o	5,00	48	G1
5+	5,33	56	G1
6-	5,67	67	G2
6o	6,00	80	G2
6+	6,33	94	G2
7-	6,67	111	G3
7o	7,00	132	G3
7+	7,33	154	G3
8-	7,67	179	G4
8o	8,00	207	G4
8+	8,33	236	G4
9-	8,67	300	G4
9o	9,00	400	G5

**Tablica 3.1.** Odnos Kp i Ap indeksa [18].

Tablica pobliže objašnjava kako odrediti  $A_p$  indeks za pojedini dan. Za početak, uzima se  $K_p$  indeks vrijednosti prikazanih u prvom stupcu, tj. ta vrijednost  $K_p$  indeksa se pretvara u  $A_p$  indeks. Nakon pretvorbe, dobije se sljedećih 8 vrijednosti: 2, 6, 7, 15, 111, 207, 300 i 400. Prosjek ovih osam vrijednosti će rezultirati  $A_p$  indeksom tog dana, koji u ovom primjeru iznosi 131.

### 3.4. Klasifikacija geomagnetskih oluja

Geomagnetske oluje se obzirom na utjecaj koji imaju na ljude i okolinu kategoriziraju po jačini. Postoji 5 kategorija geomagnetskih oluja obzirom na njihovu jakost, koja se mjeri pomoću različitih indeksa od kojih je najvažniji  $K_p$  indeks [19].

**G1:** u ovu kategoriju ulaze manje geomagnetske oluje koje se ponavljaju do 1700 puta u jednom ciklusu od 11 godina. Indeks ovih oluja iznosi  $K_p=5$ . Oluja ove jačine može utjecati na satelite u orbiti. Također može imati blaži utjecaj na promjene u električnim mrežama. Iako je magnetska aktivnost slaba, već na ovoj razini posljedice su vidljive kod orijentacije migratornih životinja. Polarna svjetlost može biti vidljiva na višim geografskim širinama.

**G2:** umjerena jakost geomagnetske oluje sa  $K_p = 6$ . Ponavljanje ovih oluja je manje nego prethodnih, 600 puta u ciklusu od 11 godina. U slučaju duljeg trajanja geomagnetske oluje, može nastati šteta na naponskim transformatorima i doći do značajnijih promjena u električnim mrežama. Sateliti u orbiti trebaju biti usmjereni na način da budu što manje zahvaćeni olujom. Kod visokofrekventnih radio sustava može doći do smetnje zbog interakcije radio valova s elektronima u ionosferi, a polarna svjetlost je vidljiva do  $55^\circ$  geografske širine.

**G3:** jaka geomagnetska oluja koja se ponavlja 200 puta u ciklusu od 11 godina. Izmjeren  $K_p$  indeks jake oluje iznosi  $K_p = 7$ . Dolazi do opterećenja na satelitima u niskoj orbiti, potrebno je satelite usmjeriti kako bi se zaštitila posada. Može doći do induciranja napona na površini satelita. Neizbježni su problemi i smetnje u niskofrekventnoj radio komunikaciji i satelitskoj navigaciji, a polarna svjetlost je vidljiva do  $50^\circ$  geografske širine.

**G4:** žestoka geomagnetska oluja se događa rjeđe, 100 puta u ciklusu 11 godina. Može doći do induciranja napona u električnim mrežama i pogreški u sigurnosnom sustavu koje će rezultirati isključenjem ključnih elemenata iz mreže. Izmjereni  $K_p$  indeks može biti između 8 i 9. Dolazi do pojave induciranja struje u cjevovodima što je opasno, jer zaštitni sustavi u Zemlje više ne funkcioniraju. Širenje visokofrekventnih radio valova je rijetko, dok satelitska navigacija ne funkcionira satima nakon oluje. Polarna svjetlost može biti vidljiva na  $45^\circ$  geografske širine.

**G5:** ekstremno jaka geomagnetska oluja najvećeg intenziteta sa  $K_p = 9$ . Njena pojava je vrlo rijetka, svega 4 puta u ciklusu od 11 godina. Dolazi do velikih problema u elektroenergetskom sustavu. Naponska zaštita prestaje funkcionirati zbog velikih fluktuacija napona. Moguć je potpuni kolaps sustava, te potpuno isključenje nekih regija. Sateliti imaju problem s komunikacijom i orijentacijom te dolazi do induciranja napona na njihovoj površini. Cjevovodi mogu razviti struju od nekoliko stotina ampera. Radio komunikacija može biti potpuno onemogućena u nekim regijama na nekoliko dana. Satelitska navigacija može izgubiti funkciju na nekoliko dana, a polarna svjetlost se može vidjeti na  $40^\circ$  geografske širine.

## 4. UČINAK GEOMAGNETSKIH OLUJA

S obzirom na jakost geomagnetske oluje, posljedice koje one ostavljaju mogu biti različite. Od dojmive polarne svjetlosti, do induciranja opasnih struja u vodovima elektroenergetskog sustava, koji mogu imati ne samo financijske posljedice, već i katastrofalne posljedice za ljudski život. Jedna od najznačajnijih posljedica geomagnetskih oluja danas bi bila pad elektroenergetske mreže, kao i prekid radio komunikacije i satelitske navigacije [20].

### 4.1. Polarna svjetlost

U polarnim krajevima jakost magnetskog polja je najveća, a silnice izravno prilaze tlu. To je važno zato što se električki nabijene čestice lako gibaju u smjeru magnetskog polja. Stoga one najlakše stignu u niže dijelove atmosfere u polarnim područjima [21].

Nabijene čestice iz Sunčevog vjetra koje prođu u Zemljinu magnetosferu pobuđuju molekule kisika i dušika u gornjoj atmosferi stvarajući polarnu svjetlost koju se noću može vidjeti s viših geografskim širinama.

Polarna svjetlost je obično vidljiva u blizini magnetskih polova sjeverne i južne polutke, nepravilnog ovalnog oblika. Naziv *aurora borealis* se koristi za svjetlost na sjevernoj polutci, a *aurora australis* na južnoj.



Slika 4.1 – Polarna svjetlost [22].

Polarna svjetlost se može vidjeti u različitim bojama, od blijedozelene do ružičaste boje koje su najčešće. Neke od ostalih boja mogu biti nijanse crvene. Varijacije u boji su posljedica emisije uslijed različitih kvantnih prijelaza u atomima i molekulama elemenata koji čine Zemljinu atmosferu. Najčešća boja je zelenkastožuta koju proizvode molekule kisika. Dušik proizvodi plavu ili ljubičasto-zelenu svjetlost [23].

## **4.2. Utjecaj na ljude**

Ljudi na Zemlji su zapravo dobro zaštićeni magnetosferom. Opasnost postoji samo za astronaute, i to ako se nađu u svemiru s premalo zaštite, na primjer samo u svemirskom odijelu. Iako geomagnetske oluje nisu opasne za ljude, one predstavljaju značajnu prijetnju tehnologiji i elektroenergetskim mrežama o kojima ljudi svakodnevno ovise. Procjenjuje se kako bi šteta koju geomagnetska oluja može prouzrokovati bila jednaka šteti jednog od najvećih uragana ili potresa [24].

## **4.3. Utjecaj na životinje**

Usljed jake geomagnetske oluje morske životinje poput kitova mogu se nasukati jer se orijentiraju prema geomagnetskom polju. Opažano je da se golubovi pismoše teže orijentiraju tijekom geomagnetskih oluja. Neke vrste riba poput pastrve imaju specijalizirane stanice s magnetskim kristalima u tkivu nazalne šupljine, a osjetilo za magnetsko polje je otkriveno također kod morskih kornjača [25].

## **4.4. Elektroenergetski sustavi**

Električna mreža na Zemlji koja napaja električne uređaje u domovima i uredima je također podložna utjecaju geomagnetskih oluja. Jaka geomagnetska oluja može uzrokovati skokove jakosti struje u vodovima koji nisu zaštićeni. Inducirane struje na uzemljenju uređaja i transformatoru mogu uzrokovati pregrijavanje, požar ili čak eksploziju. Problemi bi nastali i kod mreže mobilnih telefona te interneta. Jaka geomagnetska oluja može prouzrokovati ogromne financijske troškove popravka i obnove infrastrukture, ali i gubitak podataka na serverima vlade i poduzeća zbog kojih bi oporavak dugo trajao [26].

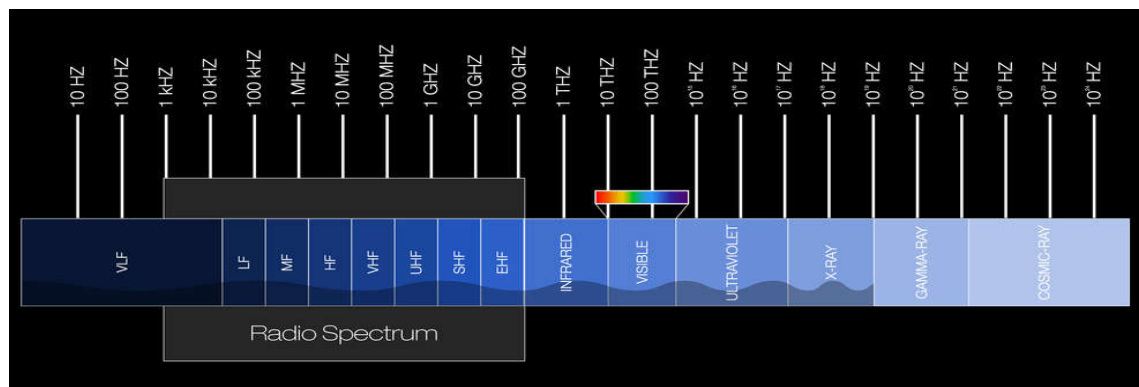
1989. godine je uslijed jake geomagnetske oluje inducirana struja u vodovima u Kanadskom Quebecu što je dovelo do poteškoća u distribuciji struje u velikom dijelu te pokrajine.



Osiguravajuće tvrtke u Sjevernoj Americi su dobile tisuće zahtjeva za naknadu uslijed oštećenja električnih uređaja i opreme između 2000. i 2010. godine. Nakon otklanjanja pritužbu na kvarove koji su se dogodili kao posljedica poplava, krađe, namjernog oštećivanja i slično, razmotrene su samo žalbe zbog padova napona, pregrijavanja ili električnih lukova [27].

#### 4.5. Radiokomunikacijski sustavi

Naglo povećanje elektromagnetskog zračenja sa Sunca brzinom svjetlosti stiže na Zemlju, za približno 8 minuta. Svemirsko vrijeme utječe na radiokomunikaciju. Pri frekvencijama od 1 do 30 MHz, takozvano UF radio područje, promjene u gustoći i strukturi ionosfere mijenjaju transmisijski put pa čak i blokiraju sam prijenos. Ove frekvencije koriste radioamateri, ali komercijalni avio prijevoznici i neke vladine agencije.



Slika 4.2. – Spektar elektromagnetskog zračenja [28].

Sunčevo X-zračenje prodire do dna ionosfere, oko 80 km. Fotoni X-zračenja ioniziraju ionosferu, koja se ponaša kao reflektor radiovalova na nekim frekvencijama, te kao apsorber nekih valova na drugim frekvencijama. Ova radijska tišina uzrokovana Sunčevim bljeskovima očekuje se na dnevnoj strani Zemlje i najintenzivnija je kad je Sunce u zenitu. Sunčevi protoni visokih energija mogu stvoriti takozvanu radijacijsku oluju. Zemljino magnetsko polje vodi ove protone tako da se oni sudaraju s gornjom Zemljinom atmosferom u blizini sjevernog i južnog pola. Brzi protoni imaju sličan efekt fotonima X-zraka, tj. blokiraju UF radio komunikaciju na visokim geografskim širinama. Za vrijeme polarne svjetlosti brzi elektroni mogu utjecati na ionosferu i imati sličan blokirajući efekt na radio komunikaciju. Ovaj se efekt očekuje na noćnoj strani polarnih područja Zemlje[29][30].

## 4.6. Navigacijski i satelitski sustavi

Umjetni sateliti su umjetna tijela u stazi oko Zemlje i drugih tijela Sunčeva sustava, po namjeni, znanstveni, privredni i vojni. Kreću se različitim stazama. Zemlju okružuje oko 10000 aktivnih, 30000 neaktivnih satelita i više stotina tisuća fragmenata [31].

Trenutno se u orbiti nalazi preko 2000 satelita koje čovječanstvo koristi. Satelitske komunikacije koriste UHF signale od 300 MHz do 3 GHz te UHF 3 do 30 GHz. Radio signali koji propagiraju prema i od satelita su pod utjecajem fizikalnih uvjeta u okolini kroz koju propagiraju. U vakuumu radio signali propagiraju brzinom svjetlosti. Radiovalovi bivaju atenuirani te scintiliraju<sup>4</sup>. Utjecaj okoline na signal ovisi o frekvenciji radiovala i u prvoj aproksimaciji je proporcionalan količini strukture u plazmi prisutnoj duž propagacijskog puta.

Uslijed varijabilnosti fizikalnih uvjeta u ionosferi, dolazi do varijabilnosti efekata na propagirajuće signale. Efekte svemirskog vremena je u nekoj mjeri moguće ukloniti pažljivim inženjerskim dizajnom i rješenjima, no svemirsko vrijeme može dovesti do potpunog gubitka komunikacije tijekom prolaska signala kroz ionosferu.

Sila kojom atmosfera utječe na satelit poraste za vrijeme kad je Sunce aktivnije. Kad Sunce doda dodatnu energiju u atmosferu, slojevi male gustoće u niskim orbitama oko Zemlje se podižu i bivaju zamijenjeni gušćim slojevima koji su prije bili na nižim nadmorskim visinama. Uslijed ovog efekta satelit leti kroz sloj veće gustoće i zbog njega djeluje jača sila povlačenja. Kada Sunce nije aktivno, sateliti u niskom orbitama oko Zemlje trebaju povećati orbite oko četiri puta kako bi nadoknadili atmosfersko potezanje. Kad je Sunčeva aktivnost na maksimumu, satelitima treba često, svaka 2 - 3 tjedna, dodatno manevrirati kako bi ostali u svojoj orbiti.

Uz ove dugoročne promjene temperature i gustoće u gornjem slojevima Zemljine atmosfere uzrokovane Sunčevim ciklusom, interakcije između Sunčevog vjetra i Zemljinog magnetskog polja za vrijeme magnetskih oluja, mogu stvoriti velika i kratkotrajna pojačanja temperature i gustoće u gornjoj atmosferi, zbog čega se povećava sila potezanja na satelite i mijenja se njihova orbita.

GPS radio signali putuju od satelita do prijemnika na tlu, pri tome prolazeći kroz Zemljinu ionosferu. Nabijena plazma ionosfere zakreće put GPS-ovog radio signala. Kad se u ionosferi

---

<sup>4</sup> Scintilacija – brza varijacija amplitude i faze primljenog signala, a nastaje uslijed struktura u ionosferi

odvija događaj svemirskog vremena, modeli korekcije više nisu precizni i tada prijemnici više ne mogu pronaći točan položaj satelita [32].

Geomagnetske oluje stvaraju velike poremećaje u ionosferi. Struje i energija uslijed geomagnetske oluje povećavaju broj nabijenih čestica u ionosferi. To se obično zbiva na visokim geografskim širinama, iako veće geomagnetske oluje mogu značajno povećati broj ionosferičnih elektrona i na srednjim geografskim širinama. U blizini Zemljinog magnetskog ekvatora, postoje sustavi struja i električnih polja koji stvaraju nestabilnosti u ionosferi. Ove nestabilnosti su najoštrije upravo nakon zalaska Sunca. One se odvijaju na maloj prostornoj skali, približno 10ak kilometara, i one utječu na GPS signal koji scintilira. Ove ionosferičke scintilacije nisu povezane sa geomagnetskim olujama, već su dio prirodnog ciklusa dana i noći u ekvatorijalnoj ionosferi.

## 5. PROGNOZIRANJE GEOMAGNETSKIH OLUJA

SWPC (Space Weather Prediction Center, SWPC) daje prognoze za više vrsta pojava svemirskog vremena i rezultirajućih utjecaja na Zemlju i ljudske aktivnosti. Koristeći prikupljene podatke, matematičkim modelima i superračunalima simuliraju se elektromagnetske promjene na površini i u atmosferi Sunca, te se računaju i predviđaju buduće oluje. Cilj je preciznije predvidjeti solarne erupcije i prognozirati stanje u svemiru.

### 5.1. Trodnevna prognoza

Dnevna prognoza geomagnetske aktivnosti za slijedeća tri dana. Opažane vrijednosti su predviđanje Ap indeksa deterministički, a slijede ih prognoza vjerojatnosti u četiri kategorije geomagnetske aktivnosti, i deterministička prognoza trosatnog Kp indeksa [33].

:Product: Geomagnetic Forecast

:Issued: 2019 Sep 12 2205 UTC

# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center

#

NOAA Ap Index Forecast

Observed Ap 11 Sep 005

Estimated Ap 12 Sep 007

Predicted Ap 13 Sep-15 Sep 005-005-005

NOAA Geomagnetic Activity Probabilities 13 Sep-15 Sep

Active na/na/na

Minor storm na/na/na

Moderate storm na/na/na

Strong-Extreme storm na/na/na

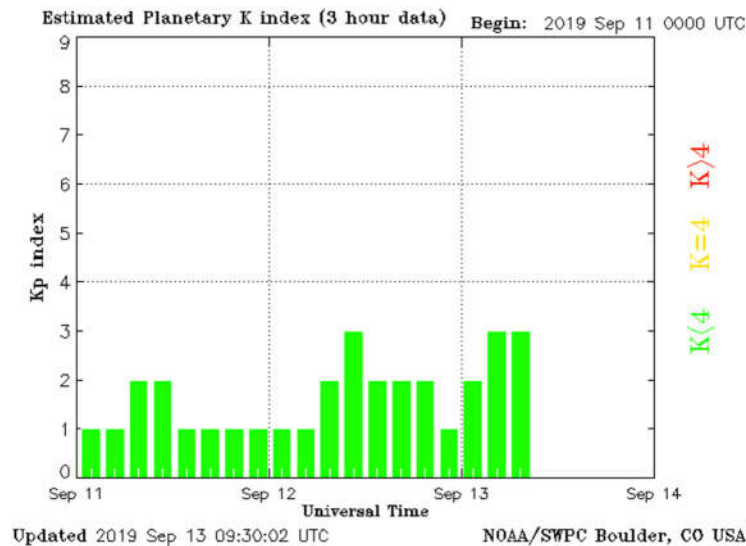
NOAA Kp index forecast 13 Sep - 15 Sep

	Sep 13	Sep 14	Sep 15
00-03UT	1	1	1
03-06UT	1	1	1
06-09UT	1	1	1
09-12UT	1	1	1
12-15UT	1	1	1
15-18UT	1	1	1
18-21UT	1	1	1
21-00UT	1	1	1

Prognoza dobivena 13. rujna 2019. godine u 00:30 UTC<sup>5</sup> izvještava da je najveći očekivani Kp indeks od 13 do 15. rujna 2019. jednak 1, što znači da neće biti pojačane geomagnetske aktivnosti. Ne očekuje se G1 ili veća geomagnetska oluja. Ne očekuje se da će pristići tranzijentne pojave sa Sunca i Sunčevog vjetra. U protekla 24 sata nije prijavljen niti jedan prekid radio signala te se ne očekuje u sljedeća tri dana. Nema većeg aktivnog područja na kojem bi se mogao dogoditi bljesak.

---

<sup>5</sup> Coordinated Universal Time



**Slika 5.1.** – Procijenjeni planetarni indeks procijenjen na 3-satnim podacima s početkom 11. rujna 2019. godine u 00:00 UTC [34].

## 5.2. Prognoza za 27 dana

Ovo je tablica o izgledima svemirskog vrijeme sljedećih 27 dana, koju se izdaje ponedjeljkom do 15:00 UTC, je numerička prognoza triju ključnih pokazatelja: tok radio zračenja valne duljine 10,7cm sa sunca, planetarni A indeks i najveće dnevne K vrijednosti [35].

:Product: 27-day Space Weather Outlook Table 27DO.txt

:Issued: 2019 Sep 09 0301 UTC

# Prepared by the US Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center

# Product description and SWPC contact on the Web

# <https://www.swpc.noaa.gov/content/subscription-services>

#

# 27-day Space Weather Outlook Table

# Issued 2019-09-09

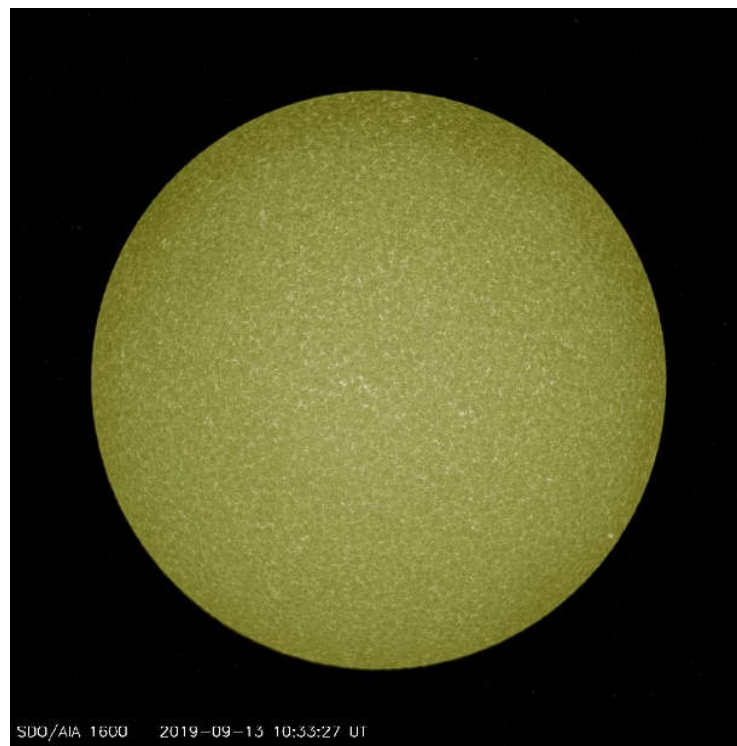
#

# UTC	Radio Flux	Planetary	Largest
# Date	10.7 cm	A Index	Kp Index
2019 Sep 09	68	5	2
2019 Sep 10	68	5	2
2019 Sep 11	68	5	2
2019 Sep 12	68	5	2
2019 Sep 13	68	5	2
2019 Sep 14	68	5	2
2019 Sep 15	68	5	2
2019 Sep 16	68	5	2
2019 Sep 17	68	5	2
2019 Sep 18	68	5	2
2019 Sep 19	68	5	2
2019 Sep 20	68	5	2
2019 Sep 21	68	5	2
2019 Sep 22	68	5	2
2019 Sep 23	69	8	3

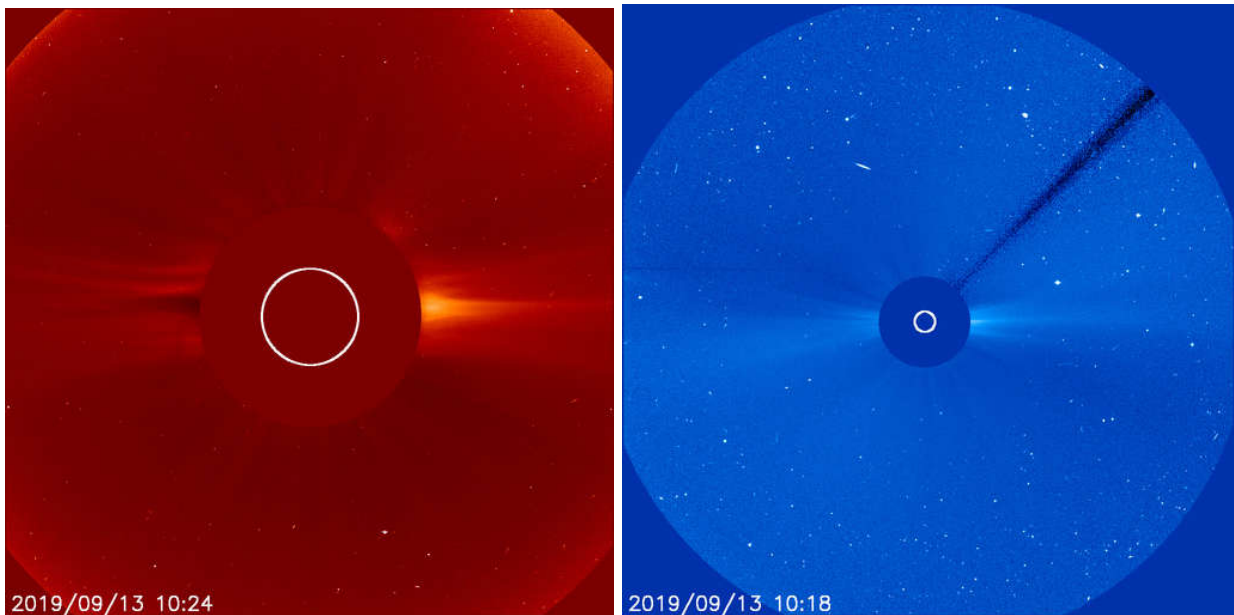
2019 Sep 24	69	5	2
2019 Sep 25	69	5	2
2019 Sep 26	69	10	3
2019 Sep 27	69	35	6
2019 Sep 28	69	45	6
2019 Sep 29	69	20	5
2019 Sep 30	69	10	4
2019 Oct 01	69	8	3
2019 Oct 02	69	10	4
2019 Oct 03	69	8	3
2019 Oct 04	69	5	2
2019 Oct 05	69	5	2

### 5.3. Diskusija rezultata prognoze svemirskog vremena

SWPC je 13. rujna 2019. u 00:30 UTC izdao prognozu za svemirsko vrijeme. U protekla 24 sata sunčeva aktivnost je bila na vrlo niskom nivou. Na sunčevom disku nema sunčevih pjega. Nisu opaženi koronini izbačaji mase koji bi bili usmjereni prema Zemlji.

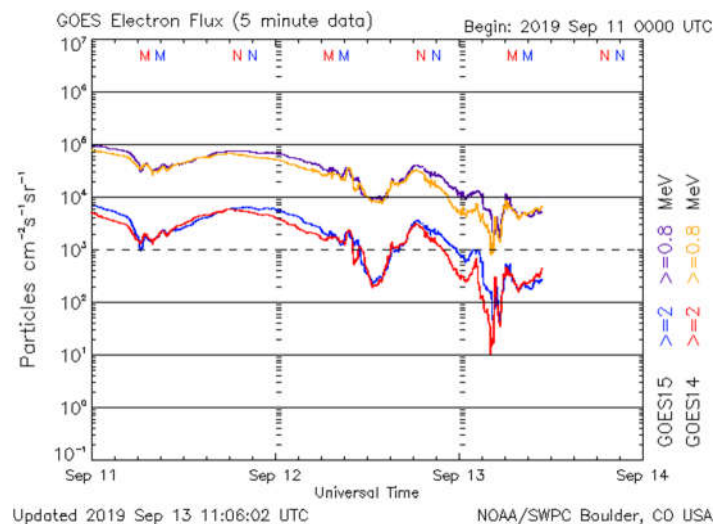


**Slika 5.2.** – SDO/AIA 1600 snimka sunca 13. rujna 2019. godine u 10:33 UTC prikazuje gornju fotosferu i prijelazno područje. Na sunčevom disku, ne opažaju se sunčeve pjege [36].

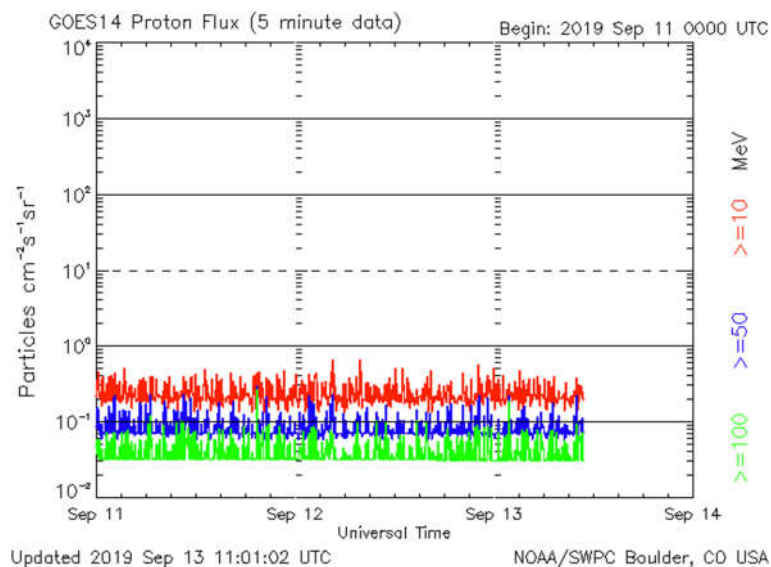


**Slika 5.3.** – SOHO/LASCO koronograf 13. rujna 2019. u 10:24 i 10:18 UTC ne pokazuju prisutnost koroninih izbačaja mase. [37]

Prognoza jest da će sunčeva aktivnost ostati na vrlo niskom novu tijekom sljedeća tri dana. Tok elektrona energije veće od  $2 \text{ MeV}$  dosegao je visoku razinu. Tok protona energije veće od  $10 \text{ MeV}$  jest na razini pozadine. Prognoza jest da će u sljedeća tri dana tok elektrona energije veće od  $2 \text{ MeV}$  biti na visokoj razini uslijed povećane brzine nadolazećeg Sunčevog vjetra. Očekuje se da će tok protona energije veće od  $10 \text{ MeV}$  ostati na razini pozadine.



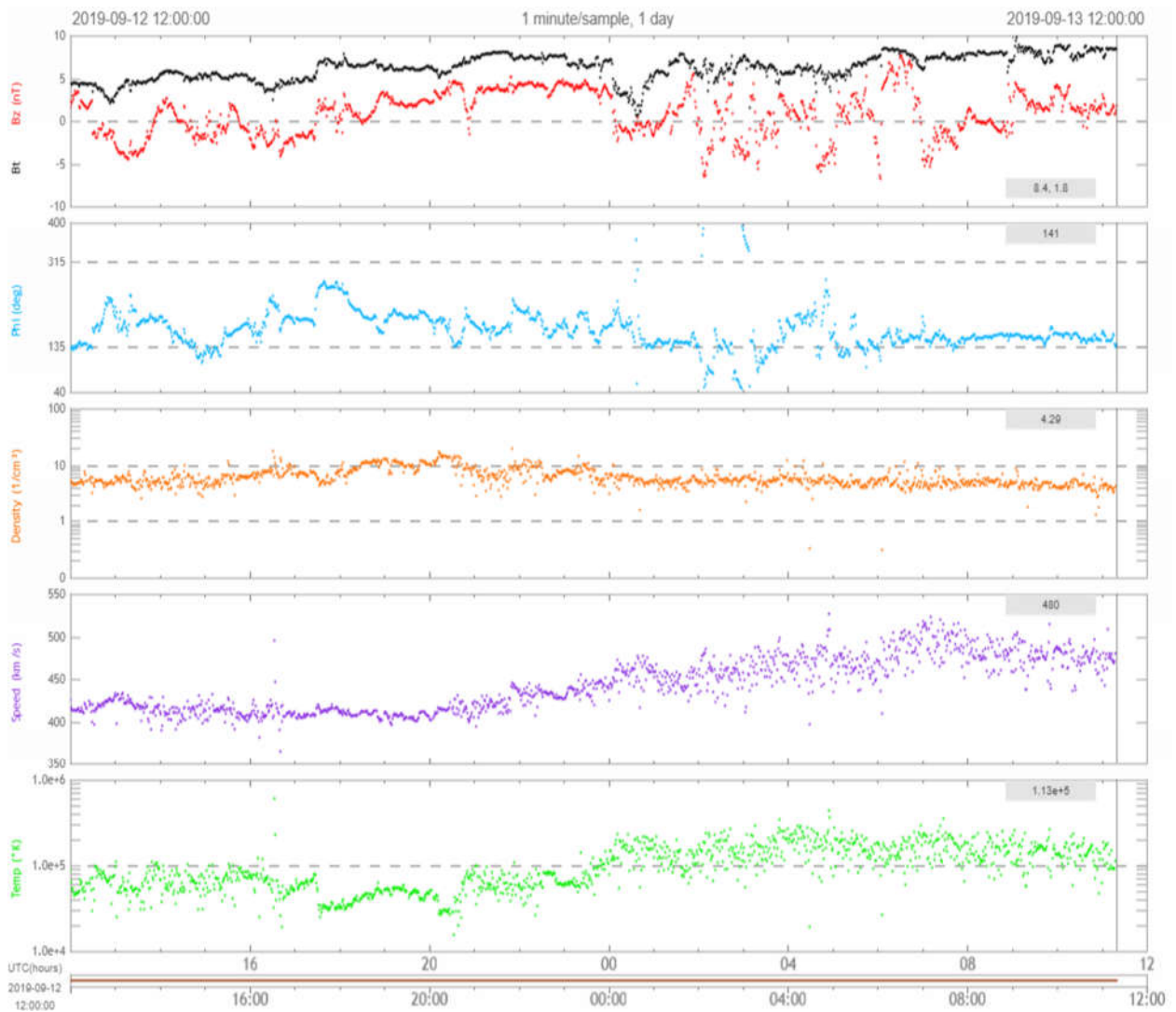
**Slika 5.4.** – Tok elektrona temeljen na 5-minutnim podacima prikazan je kao funkcija vremena. Podaci su izmjereni na satelitu GOES. Početak mjerenja je 11. rujna 2019. godine u 00:00 UTC [38].



**Slika 5.5.** – Tok protona temeljen na 5-minutnim podacima prikazan je kao funkcija vremena. Podaci su izmjereni na satelitu GOES14. Početak mjerenja je 11. rujna 2019. godine u 00:00 UTC [39].

Parametri sunčevog vjetra su povišeni u odnosu na uobičajene ambijentalne vrijednosti. Prosječna brzina sunčevog vjetra iznosi . Ukupno magnetsko polje nalazi se između 3 i 5  $nT$  dok je  $B_z$  komponenta prošla prolongirano zakretanje prema jugu od  $-4nT$  pri kraju perioda.  $\Phi$  kut je predominantno pozitivan sa kratkim dominacijama u negativnu orijentaciju. Prognozira se da će parametri sunčevog vjetra imati ambijentalne vrijednosti u sljedeća tri dana.





**Slika 5.6.** – SWPC prikaz parametara sunčevog vjetra u realnom vremenu na temelju jednominutnih podataka sa satelitskih opservatorija. Prikazani su podaci za temperaturu [K], brzinu, gustoću kut  $\Phi$  [°], te za  $B_t$  i  $B_z$  [nT]. Podaci su prikazani za vremenski interval od 12.09.2019. u 00:00 UTC do 13.09.2019. u 00:00 UTC [40].

U protekla 24 sata geomagnetsko polje je bilo mirno do lagano uznemireno. U slijedeća tri dana očekuje se da će geomagnetsko polje biti većinom mirno uz vjerojatnost izolirane lagane uznemirenosti.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu okarakterizirane su geomagnetske oluje kroz fizikalne veličine koje se koriste pri izračunavanju indeksa geomagnetske aktivnosti. Naznačeni su elementi Sunčeve aktivnosti odgovorni za geomagnetske poremećaje. Pomoću SWPC/NOAA portala očitani su parametri svemirskog vremena za 13. rujna 2019. godine, kao i prognoza svemirskog vremena za sljedeća 3 dana te za sljedećih 27 dana. Utvrđeno je da je trenutno stanje geomagnetski izrazito mirno te da se u bližoj budućnosti ne očekuju veće geomagnetske oluje na Zemlji. Ovako mirno stanje geomagnetskog polja relativno je učestalo tijekom minimuma Sunčeve aktivnosti te bez detektiranih eruptivnih pojava u njegovim vanjskim slojevima.

## POPIS LITERATURE

- [1] Aktivnosti na Suncu, dostupno na: <https://svemir.blog/2009/10/14/261/> [10.09.2019.]
- [2] Sunčeva pjega, dostupno na: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=69666> [10.09.2019]
- [3] The UCAR Center for Science Education (UCAR SciEd), dostupno na: <https://scied.ucar.edu/sunspots> [15.09.2019.]
- [4] Solar Physics NASA, The Sunspot Cycle, dostupno na: <https://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml> [15.09.2019.]
- [5] The UCAR Center for Science Education (UCAR SciEd), Sun's Atmosphere - Corona and Chromosphere, dostupno na: <https://scied.ucar.edu/imagecontent/suns-atmosphere-corona-and-chromosphere> [15.09.2019.]
- [6] Solar Physics NASA, The Transition Region, dostupno na: [https://solarscience.msfc.nasa.gov/t\\_region.shtml](https://solarscience.msfc.nasa.gov/t_region.shtml) [15.09.2019]
- [7] Space place NASA, What Is the Sun's Corona?, dostupno na: <https://spaceplace.nasa.gov/Sun-corona/en/> [15.09.2019.]
- [8] Međuplanetarno magnetsko polje: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Interplanetary\\_magnetic\\_field.svg#filelinks](https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Interplanetary_magnetic_field.svg#filelinks) [13.09.2019.]
- [9] The Interplanetary Magnetic Field, dostupno na: <https://www.spaceweather.com/glossary/imf.html> [15.09.2019.]
- [10] Kelley, M.C., The Earth's Ionosphere, Academic Press, London, 1989.
- [11] Observing the Sun in Hydrogen Alpha, 6.4 Flares, dostupno na: <https://astronomyconnect.com/forums/articles/6-observing-the-Sun-in-hydrogen-alpha.32/> [15.09.2019]
- [12] Wikipedia, Zemljino magnetsko polje, dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zemljino\\_magnetsko\\_polje](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zemljino_magnetsko_polje) [15.09.2019.]
- [13] Vujnović, V. Astronomija 2. II. Izdanje. Školska knjiga, 1994. Zagreb, str 69.

- [14][15] Tamas I. Gombosi, Physics of the Space Environment, Cambridge University Press, 1999., dostupno na: <https://b-ok.cc/book/1194321/279d2e> [19.09.2019.]
- [16] Northern Lights Now, Are the aurora and northern lights active now?, dostupno na: <https://northernlightsnow.com/2016/10/17/are-the-aurora-and-northern-lights-active-now/> [15.09.2019]
- [17] Dst index, dostupno na: <http://pluto.space.swri.edu/image/glossary/dst.html> [15.09.2019]
- [18] The Ap-index, dostupno na: <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/the-ap-index> [15.09.2019.]
- [19] NOAA Space Weather Scales, Geomagnetic storms, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> [15.09.2019.]
- [20] Space Weather Impacts, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts> [15.09.2019.]
- [21] Vujnović, V. Astronomija 2. II. Izdanje. Školska knjiga, 1994. Zagreb.
- [22] TIME, A Solar Storm Could Bring Spectacular Northern Lights Tonight. Here's How You Can See Them, dostupno na: <http://time.com/5199121/solar-storm-northern-lights/> [15.09.2019]
- [23] Northern Lights, dostupno na: <https://www.northernlightscentre.ca/northernlights.html> [15.09.2019]
- [24] What Damage Could Be Caused by a Massive Solar Storm?, dostupno na: <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/what-damage-could-be-caused-by-a-massive-solar-storm-25627394/> [15.09.2019]
- [25] Tian, Lanxiang & Pan, Yongxin, The geomagnetic field effects on animals: A review. Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin, 64. 761-772. 10.1360/N972018-00650, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/332845836\\_The\\_geomagnetic\\_field\\_effects\\_on\\_animals\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/332845836_The_geomagnetic_field_effects_on_animals_A_review) [15.09.2019]
- [26] Electric Power Transmission, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/electric-power-transmission> [15.09.2019.]
- [27] The Hidden Damage From Geomagnetic Storms, dostupno na: <https://medium.com/the-physics-arxiv-blog/insurance-claim-data-reveals-the-hidden-damage-from-geomagnetic-storms-df5c2e4d895e> [15.09.2019.]

- [28] Radio spectrum, dostupno na: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/radio\\_spectrum](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/radio_spectrum) [15.09.2019.]
- [29] NOAA Space Weather scales, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> [15.09.2019.]
- [30][31] HF Radio Communications, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/hf-radio-communications> [15.09.2019.]
- [32] Space weather and GPS systems, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/space-weather-and-gps-systems> [13.09.2019.]
- [33] 3-day Geomagnetic forecast, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/products/3-day-geomagnetic-forecast> [13.09.2019.]
- [34] Planetary K indeks, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index> [13.09.2019.]
- [35] 27-day outlook of 10.7 cm radio flux and geomagnetic indices, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/products/27-day-outlook-107-cm-radio-flux-and-geomagnetic-indices> [13.09.2019.]
- [36] SDO|DATA, The Sun Now, AIA 1600 A, dostupno na: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/> [13.09.2019]
- [37] The Very Latest SOHO Images, LASCO C2 i LASCO C3, dostupno na: <https://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/> [13.09.2019.]
- [38] GOES Electron Flux, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-electron-flux> [13.09.2019.]
- [39] GOES Proton Flux, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux> [13.09.2019]
- [40] Real Time Solar Wind, dostupno na: <https://www.swpc.noaa.gov/products/real-time-solar-wind> [13.09.2019.]

## SAŽETAK

Prognostika svemirskog vremena se u svom opažaćkom dijelu temelji na praćenju Zemljinog magnetskog polja i fizikalnih uvjeta u magnetosferi te opažanja Sunčeve aktivnosti. Slijedeći SWPC/NOAA portal utvrđeno je da je geomagnetsko polje na dan 13. rujna 2019. godine izrazito mirno s tek lokaliziranim laganim poremećajima te da se u bliskoj budućnosti ne očekuje veća geomagnetska oluja. Ovakvo stanje geomagnetskog polja relativno je učestalo u fazi minimuma Sunčeve aktivnosti te bez detektiranih eruptivnih pojava u njegovim vanjskim slojevima.

**Ključne riječi:** geomagnetske oluje, Sunce, magnetosfera, geomagnetsko polje, sunčev vjetar, svemirsko vrijeme.

## SUMMARY

Space weather forecast is based upon measuring physical parameters of geomagnetic field and magnetosphere, as well on observations of the solar activity. Geomagnetic field on the September 13th 2019 is found to be quiet with only localized minor disturbances. The SWPC/NOAA space weather forecast predicts no major geomagnetic storms in the near future. In the solar minimum and with no detectable signs of solar activity such a finding is relatively common.

**Key words:** geomagnetic storms, Sun, magnetosphere, geomagnetic field, solar wind, space weather.

## **ŽIVOTOPIS**

Emanuel Sabolović je rođen 14.04.1996. godine u Bjelovaru. Pohađao je osnovnu školu Veliko Trojstvo u rodnom mjestu Velikom Trojstvu. 2010. godine osvaja drugo mjesto na županijskom natjecanju iz Tehničke kulture. Nakon osnovne škole upisuje Tehničku školu Bjelovar, smjer elektrotehničar. Tijekom srednje škole postaje članom Kulturno umjetničkog društva Veliko Trojstvo i bavi se nizom izvan nastavnih aktivnosti. Nakon završene srednje škole i položene državne mature, upisuje željeni fakultet 2015. godine, Elektrotehnički fakultet Osijek koji 2016. godine mijenja naziv u Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek na Sveučilištu Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.