

UNIVERZA V NOVI GORICI
POSLOVNO-TEHNIŠKA FAKULTETA

**VESOLJSKO VREME IN ZAZNAVANJE SONČEVIH
BLIŠČEV V PODROČJU RENTGENSKEGA SEVANJA Z
RADIJSKIMI VALOVI**

DIPLOMSKO DELO

Sergej Lasič

Mentorica: prof. dr. Vida Žigman

Nova Gorica, 2010

ZAHVALA

Zahvaljujem se Laboratoriju za fiziko plazme in observatoriju AbsPAL Instituta za fiziko Beograd za dostop do VLF podatkov, ki so analizirani v diplomskem delu. Podatki so bili posredovani v sklopu bilateralnega sodelovanja med Institutom za fiziko Beograd in Univerzo v Novi Gorici.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. Vidi Žigman za posredovano znanje, vztrajno pomoč pri delu in učinkovito usmerjanje pri snovanju diplomskega dela.

NASLOV

Vesoljsko vreme in zaznavanje Sončevih blišcev v področju rentgenskega sevanja z radijskimi valovi

IZVLEČEK

Vesoljsko vreme je fizično in pojavno stanje naravnega okolja v vesolju. Zajema pogoje na Soncu, v Sončevem vetru, medplanetarnem prostoru, planetarni magnetosferi in ionosferi. Zaradi odločilnega vpliva na infrastrukturo sodobne visokotehnološke družbe je vesoljsko vreme disciplina v ospredju sodobnih raziskav *geoprostora*. Združujejo se opažanja iz vesolja in z Zemlje v želji razumeti fizikalne procese v ozadju vesoljskega vremena, ki ga tvorijo magnetna polja, *ElektroMagnetno Valovanje (EMV)* in plazma v medsebojnem delovanju. Razumevanje procesov ima za cilj razvijanje sposobnosti napovedovanja posledic na Zemljino okolje in njeno tehnološko infrastrukturo.

Diplomsko delo prikaže področje raziskav vesoljskega vremena, organiziranost prizadevanj na evropski in svetovni ravni tako opazovanj kot modeliranja. Opisani so pojavi, ki tvorijo vesoljsko vreme na celotni verigi Sonce-Zemlja, in njihovi vplivi na Zemljino okolje, magnetosfero in ionosfero. Prikazana je metoda detekcije Sončevih blišcev z radijskimi valovi zelo nizkih frekvenc (VLF). Opravljena je analiza nekaterih karakterističnih dogodkov Sončevega blišča iz 23. Sončevega cikla. Določeni in urejeni podatki o motnjah faze in amplitude signala VLF v korelaciji z meritvami sevanja s Sonca (0,1-0,8 nm), opravljenimi v vesolju, so originalni prispevek diplomskega dela. S tem so pripravljene vhodne podatkovne baze za dva sodobna in neodvisna modela (*Long Wavelength Propagation Capability LWPC*) in $N(t)$, ki se uporabljata za določanje zvišanja elektronske koncentracije nizke ionosfere, inducirane s Sončevimi blišči v področju rentgenskega sevanja.

KLJUČNE BESEDE

Vesoljsko vreme, Sončev veter, povezave Sonce-Zemlja, Sončevi blišči v področju rentgenskega sevanja, ionosfera, plast D ionosfere, propagiranje *ElektroMagnetnega Valovanja (EMV)* zelo nizkih frekvenc, elektronska koncentracija.

TITLE

Space weather and remote sensing of Solar X-ray flares by radiowaves

ABSTRACT

Space weather is the physical and phenomenological state of natural space environment. It encompasses the conditions on the Sun in the solar wind, the interplanetary space, and the planetary magnetosphere and ionosphere. For its determining influence on the infrastructure of the 'hightech' society, space weather is a discipline at the forefront of the timely research of geospace. Space based and ground-based observations are joined in the attempt to understand the underlying physical processes that result from the interaction of magnetic fields, (*ElectroMagnetic Waves EMW*), and plasma. Understanding the processes is to establish the capability to predict the consequences on the Earth's environment and its technological infrastructure.

The diploma work presents the research field of space weather, its organization at the European and worldwide level, considering both observations and modelling. The description is given of the phenomena that constitute space weather along the complete Sun-Earth chain and their influence on the Earth's environment, the magnetosphere and ionosphere. The method of detection of Solar flares by (*Very Low Frequency VLF*) radio waves is presented. The analysis of several characteristic flare events from Solar cycle 23 is performed. Determined and compiled data on the VLF signal amplitude and phase perturbations in conjunction with space measurements of solar irradiance (0.1-0.8 nm), make an original contribution of the present work. Thus, input databases are prepared for two up-to-date and independent models (*Long Wavelength Propagation Capability LWPC*) and $N(t)$, which are currently used for determining the enhancement of electron density of the lower ionosphere, during Solar X-ray flares.

KEY WORDS

Space weather, solar wind, solar-terrestrial connections, solar X-ray flares, ionosphere, ionospheric D layer, propagation of electromagnetic (*Very Low Frequency VLF*) waves, electron density.

KAZALO

1	UVOD.....	1
2	VESOLJSKO VREME.....	3
2.1	Zgodovina	9
3	VARIABILNO SONCE	11
3.1	Sončevo jedro.....	14
3.2	Sevalno in konvekcijsko območje.....	16
3.3	Sončeva fotosfera	17
3.4	Sončeva kromosfera	18
3.5	Sončeva notranja korona	19
3.6	Sončeva aktivnost, magnetizem in pege	19
4	INTERAKCIJA SONCE-ZEMLJA	23
4.1	Neregularne spremembe.....	24
4.2	Sončevi blišči	24
5	ZEMLJINO VESOLJSKO OKOLJE	27
5.1	Geomagnetno polje	27
5.2	Magnetosfera Zemlje	27
5.3	Van Allenovi radiacijski pasovi	30
5.4	Interakcija Sončev veter-magnetosfera	31
6	IONOSFERA ZEMLJE.....	35
6.1	Plast D	39

7	VPLIVI VESOLJSKEGA VREMENA NA TEHNOLOŠKE SISTEME.....	41
7.1	Vplivi na vesoljsko tehnologijo	41
7.2	Vplivi na letalsko tehnologijo	42
7.3	Vplivi na Zemeljsko tehnologijo.....	43
7.4	Vplivi na radijsko komunikacijsko in navigacijsko tehnologijo.....	45
8	ZAZNAVANJE SONČEVIH BLIŠČEV Z RADIJSKIMI VALOVI.....	49
8.1	VLF zaznavanje Sončevih bliščev	54
8.1.1	Učinek Sončevega blišča dne 06.07.2006.....	56
8.1.2	Učinki Sončevih bliščev dne 26.04.2006	58
9	ZAKLJUČEK	60
10	LITERATURA.....	61

KAZALO SLIK

Slika 1: Relativna jakost spektralne porazdelitve EMV s Sonca	14
Slika 2: Vplivi diferencialne rotacije Sonca.....	21
Slika 3: Odvisnost pojava Sončevih peg od heliopisne širine v času petih Sončevih ciklov.....	22
Slika 4: Zemljina magnetosfera prikazana v ekvatorialni in poldan-polnoč ravnini .	28
Slika 5: Primerjava števila Sončevih peg, ionosferskih neviht in SID v obdobju 19. Sončevega cikla (leta 1954-1964).....	34
Slika 6: Profili dnevne in nočne koncentracije elektronov na srednjih zemljepisnih širinah v pogojih minimuma in maksimuma Sončevega cikla.....	37
Slika 7: Vpliv ionosfere na razširjanje radijskih valov	46
Slika 8: Vzoredne meritve jakosti sevanja s Sonca (0,1-0,8 nm), faze in amplitude signala VLF oddajnika GQD/22,1 kHz, na dan 12.07.2005	50
Slika 9: Gostota energijskega toka v področju (0,1-0,8 nm), dne 06.07.2006 s satelita GOES 12	56
Slika 10: Signal VLF oddajnika NAA/24,0 kHz za moten (06.07.2006) in miren dan (05.07.2006).....	57
Slika 11: Signal VLF oddajnika GQD/22,1 kHz za moten (06.07.2006) in miren dan (05.07.2006).....	58
Slika 12: Vzoredni prikaz meritev jakosti sevanja s Sonca (0,1-0,8 nm), faze in amplitude signala VLF oddajnika NAA/24,0 kHz, na dan 26.04.2006	59

KAZALO TABEL

Tabela 1: Osnovni statistični podatki o Soncu	12
Tabela 2: Klasifikacija Sončevih blišcev v področju rentgenskega sevanja.....	26
Tabela 3: Karakteristike plasti ionosfere.....	38
Tabela 4: Območja spektra radijskih valov po Mednarodni telekomunikacijski zvezi	45
Tabela 5: Karakteristični parametri Sončevih blišcev zaznanih z VLF signalom dveh oddajnikov NAA in GQD	55

1 UVOD

Dva pereča vidika človeške dejavnosti terjata vsestranske in hitre znanstvene odgovore: trajnostni razvoj in telekomunikacije. Oba vidika imata za izhodišče rezultate raziskav pojavov in procesov v *geoprostoru* in njihov vpliv na litosfero, atmosfero in ionosfero Zemlje.

Čeprav se naša zvezda Sonce od začetka zgodovine človeštva ni veliko spremenila, se je močno spremenila človeška družba, ki danes v razvitem svetu deluje na temeljih tako imenovane *visoke* tehnologije. Vesoljsko vreme (*Space Weather SW*) obsega pojave na Soncu ter v Sončevem vetru, magnetosferi, ionosferi in termosferi Zemlje, ki jih zaznavamo z napravami ali brez njih, (npr. polarni sij) na Zemlji in v vesolju in, ki istočasno vplivajo na zemeljske in vesoljske tehnološke sisteme.

Visoka tehnologija je omogočila hitri prenos informacij in energije na Zemlji in njenem okolju (energije planetarnega izvora) z uporabo *istih* naravnih prenosnikov kot so tisti, ki nam prinašajo primarno energijo s Sonca: nabitih delcev in *ElektroMagnetnega Valovanja (EMV)*.

Posledično interakcije naraščajo in viharne dogodki na Soncu, kot so koronalni izbruhi mase (*Coronal Mass Ejection CME*) in izbruhi *ElektroMagnetnega (EM)* sevanja (Sončevi blišči), ogrožajo tehnološko infrastrukturo na Zemlji: proizvodnjo in prenos električne energije, transport energentov (olje in plin), letalski transport, telekomunikacije, sisteme za določanje položaja, sistem globalnega določanja položaja (*Global Positioning System GPS*) in satelite. Da bi negativne učinke odpravili ali vsaj ublažili, potrebujemo natančno napovedovanje Sončeve aktivnosti in kvantifikacijo odziva zemeljskega okolja na njo. To je cilj discipline vesoljsko vreme.

V diplomskem delu sta zajeta oba vidika vesoljskega vremena. Vesoljsko vreme kot raziskovalna in aplikativna disciplina, ki se nahaja v ospredju sodobnih raziskav geoprostora in v bodočnosti načrtovanega ekonomskega izkoriščanja vesolja, je prikazano v poglavju 2.

Poglavja 3, 4, 5 in 6 so posvečena opisu zaznavnega vesoljskega vremena na celotni verigi Sonce-Zemlja. Podan je opis pojavov na Soncu v mirnih in viharne pogojih,

in njihova daljša evolucija na poti skozi medplanetarni prostor do magnetosfere in ionosfere Zemlje. Prikazani so osnovni učinki vesoljskega vremena na tehnološke sisteme ob visoki Sončevi aktivnosti (poglavje 7).

Poglavje 8 obravnava zaznavanje Sončevih bliščev v področju rentgenskega sevanja z radijskimi valovi zelo nizkih frekvenc (*Very Low Frequency VLF*), metode uveljavljene v raziskavah nizke ionosfere. Opravljena je analiza meritev motenj faze in amplitude VLF signala oddajnikov na Zemlji in simultanih meritev sevanja s Sonca v vesolju. Z obdelavo so pripravljene vhodne datoteke za računalniško aplikacijo modelov, ki predvidevajo profil naraščanja elektronske koncentracije med Sončevimi blišči.

Kolikor je avtorju in mentorju znano, je diplomsko delo prvo strokovno čtivo o vesoljskem vremenu v slovenskem jeziku. To je pomembno tudi zaradi razširjanja znanja o odpiranju novega vidika vesoljske problematike med študenti in bodočimi mladimi raziskovalci. Pomembnosti prizanašata še dve aktualni dejstvi: Slovenija je januarja leta 2010 uradno postala sodelujoča država v Evropski vesoljski agenciji (*European Space Agency ESA*) (MVZT, 2009), kar je priložnost za slovenske institucije znanja in podjetja. Začel se je nov 24. *Sončev cikel* z maksimumom v Sončevi aktivnosti, ki bo dosežen v prihodnjih letih (~ 2012-2013), kar daje vesoljskemu vremenu nadvse prednostni pomen.

2 VESOLJSKO VREME

Sonce je za Zemljo osnovni vir energije, mogočno gonilo procesov v geoprostoru in v atmosferskem okolju. Od začetnih raziskav o posameznih curkih nabitih delcev s Sonca (Chapman in Ferraro, 1931) do razvoja teorije nadzvočnega Sončevega vetra (Parker, 1958) skozi sodobna satelitska opazovanja vedno znova ugotavljamo, da ima Sonce obdajajoči vpliv na Zemljo. Ta vpliv vključuje svetlobo in toploto kot najbolj zastopani EM sevanji v spektru Sonca, a tudi bolj kočljive in zapletene vplive plazme in izbruhov visokoenergijskih delcev, ki imajo učinek na človeka in sodobno infrastrukturo na Zemlji in njenem vesoljskem okolju.

V splošnem sprejet izraz vesoljsko vreme se nanaša na časovno variabilno energijsko stanje Sonca in njegove vplive, ki se skozi medplanetarni prostor prenašajo do magnetosfere in atmosfere Zemlje. Torej vesoljsko vreme zajema pogoje na Soncu, v Sončevem vetru in v geoprostoru, ki vplivajo na delovanje in zanesljivost vesoljskih in zemeljskih tehnoloških sistemov (Pulkkinen, 2007).

Danes imamo evropsko definicijo vesoljskega vremena, ki jo je podal projekt COST-724 (*Co-Operation in the field of Scientific and Technical research COST*): Razvijanje znanstvenih osnov za nadzorovanje, modeliranje in napovedovanje vesoljskega vremena (*Developing the scientific basis for monitoring, modelling and predicting space weather*) (Space Weather, 2009):

»Vesoljsko vreme je fizično in pojavno stanje naravnega okolja v vesolju. Pridružena disciplina skuša z opazovanjem, sledenjem, analizo in modeliranjem razumeti in napovedati stanje Sonca, medplanetarnega in planetarnega okolja ter vpliv motenj, do katerih prihaja zaradi procesov na Soncu ali drugih dejavnikov. Prav tako je cilj discipline napovedati in ugotavljati morebitne vplive na biološke in tehnološke sisteme«.

»Space weather is the physical and phenomenological state of natural space environments. The associated discipline aims, through observation, monitoring, analysis and modelling, at understanding and predicting the state of the Sun, the interplanetary and planetary environments, and the solar and non-solar driven

perturbations that affect them; and also at forecasting and nowcasting the possible impacts on biological and technological systems» (Space Weather, 2009).

Sodobna družba temelji na visoki tehnologiji, ki je še posebej ranljiva s strani vplivov s Sonca, tako da povezave Sonce-Zemlja danes pridobivajo nove razsežnosti. Viharno vesoljsko vreme, ki ga sprožajo eksplozivni dogodki na Soncu, ima škodljiv učinek na obratovanje vesoljskih in zemeljskih tehnoloških sistemov (satelitska navigacija, telekomunikacije, električna omrežja), vpliva pa tudi na biološke sisteme in lahko ogrozi zdravje človeka. Ekonomske posledice so ogromne. Škodo, ki jo lahko povzroči močan Sončev izbruh, se ocenjuje v trilijonih ameriških dolarjev (Baker, 2002).

Razumevanje in napovedovanje vesoljskega vremena je pomembno za raziskovanje vesolja, vključno z vesoljskimi poletji s posadkami, za zaščito bioloških sistemov na Zemlji in zemeljske tehnološke infrastrukture (Pulkkinen, 2007).

Pojave vesoljskega vremena narekujejo vsesplošni fizikalni procesi, ki jih v polnosti še ne razumemo. Ti univerzalni fizikalni procesi vključujejo prehodni dinamični razvoj magnetnih struktur, ki v delovanju s plazemskim okoljem sprožajo Sončeve blišče in CME na Soncu ter magnetne nevihte, *ponovno vezavo* ali (rekonekcijo) magnetnih polj, pospeševanje in segrevanje delcev v medplanetarnem prostoru, v katerega je umeščena tudi magnetosfera Zemlje.

Zaradi zapletenosti pojavov se preučevanje vesoljskega vremena razvija v smeri povezovanja več naravoslovnih znanstvenih disciplin, ki se prepletajo z ekonomskimi znanji (Moldwin, 2008). Za napovedovanje vesoljskega vremena in odpravo negativnih vplivov je potrebno združiti fizikalna, kemijska, biološka in tehnološka znanja (Jansen in drugi, 2000).

Razvoj raziskav pojavov vesoljskega vremena je uveljavil novo znanstveno in tehniško področje, ki se tudi imenuje *vesoljsko vreme (space weather)*. Vesoljsko vreme kot raziskovalno področje je v osnovi interdisciplinarna veda, ki stremi k temu, da se učinki pojavov vesoljskega vremena razumejo, pojasnijo in odpravijo. Disciplina zajema ne samo vesolje, ampak predvsem našo umeščenost v njem, Zemljo in njeno vesoljsko okolico, prav tako tudi zemeljsko in vesoljsko

infrastrukturo, ki jo je zgradila sodobna visoko-tehnološka družba. Zaznavno vesoljsko vreme ne pozna ne državnih ne celinskih meja, ki smo jih umetno ustvarili v naši civilizaciji, negativni učinki so vseprisotni in predvsem prizadevajo tehnološko razvite dele sveta, industrijsko in komunikacijsko družbo.

Zato se raziskovalne moči na področju vesoljskega vremena združujejo na globalni ravni preko nacionalnih agencij kot so Nacionalna aeronavtična in vesoljska uprava (*National Aeronautics and Space Administration NASA*) v (Združenih Državah Amerike ZDA), Avstralska agencija za vesoljsko vreme (*Australian Space Weather Agency ASWA*), Služba za informiranje o vesoljskem okolju (*Space Environmental Information Service SEIS*), (NICT, 2010) Japonskega Instituta za vesoljsko in astronautsko znanost (*Institute of Space and Astronautical Science ISAS*) in nenazadnje Kitajska nacionalna vesoljska uprava (*China National Space Administration CNSA*).

Nacionalne iniciative na področju vesoljskega vremena v Evropi mednarodno povezuje in podpira ESA in programi COST Evropske komisije, v svetovnem merilu jih združuje Mednarodna služba za vesoljsko okolje (*International Space Environment Service ISES*), ki je stalna ustanova pod okriljem najstarejše mednarodne znanstvene zveze, Mednarodne radio-znanstvene zveze (*Union Radio-Scientifique Internationale URSI*) (*International Union of Radio Science*), Mednarodne astronomske zveze (*International Astronomical Union IAU*) in Mednarodne zveze za geofiziko in geodezijo (*International Union of Geophysics and Geodesy IUGG*).

Da bi dojemeli procese v ozadju vesoljskega vremena, potrebujemo opazovanja *heliosfere* in geoprostora. Da bi razumeli poti, po katerih energija in snov prihajata s Sonca v Zemljino okolje, moramo nenehno opazovati primarni vir Sonce. Od 60. let prejšnjega stoletja, ko so prvi sateliti *Pioneer* začeli zaznavati vesolje okrog nas, smo se obdali z močno armado satelitov in plovil, ki zaznavajo vesolje okrog Zemlje. Danes se zahtevne misije raziskovanja vesolja opravljajo v globalnem sodelovanju, pogosto v okviru programa Mednarodna fizika vesolja in Zemlje (*International Solar Terrestrial Physics ISTP*), ki so ga ustanovile tri vodilne vesoljske agencije: NASA, ESA in ISAS v izključno znanstvene namene. Raziskovanja si prizadevajo osvetliti

processe v celotni verigi od notranjosti Sonca do atmosfere Zemlje. Skupni projekti razvoja satelitskih sistemov in opreme, izstrelitve in nadalje njihova eksploatacija in vzdrževanje, so danes skoraj pravilo. Omenimo le nekoliko satelitov, ki so odločilno vplivali na našo sliko o vesolju v zadnjih dveh desetletjih. Verjetno je najbolj znan (*SOlar and Heliospheric Observatory SOHO*), ki je rezultat sodelovanja ESA in NASA, lansiran je bil leta 1995, kroži okrog *Lagrangeve* točke L1 na oddaljenosti $1,50 \cdot 10^6$ km od Zemlje in ima neprekinjen *pogled* na Sonce. SOHO nosi številne instrumente za opazovanje Sonca: teleskop v (Ekstremni Ultra Vijolični *EUV*) svetlobi, (Ultra Vijolični *UV*) koronograf Lasco, Dopplersko slikanje itd.. Tu je še TRACE (NASA), leto 1998, majhen satelit z vesoljskim teleskopom za opazovanje razvoja magnetnih struktur na Soncu, ki je priskrbel čudovite fotografije Sončeve fotosfere, Sončeve korone in koronalnih magnetnih zank. ACE satelit (NASA), leta 1997-2024, za raziskave snovi Sončevega vetra in medplanetarnega prostora, *in situ* posreduje podatke v realnem času za Center za napovedovanje vesoljskega vremena (*Space Weather Prediction Center SWPC*) s ciljem izboljšanja napovedi in opozoril. Ima več masnih spektrometrov za določanje sestave Sončevega vetra in izotopov iz galaktičnih kozmičnih žarkov, do $Z = 30$. Raziskavam strukture Sončevega vetra je namenjen tudi ULYSSES, japonski YOHKOH, leta 1991-2001 (ISAS), žal že izgubljen, ki je desetletje zaznaval rentgenske in gama žarke, sprožene z erupcijami v Sončevi koroni. Za zaznavanje magnetosfere je opremljena formacija štirih satelitov Cluster in sedaj Cluster II, leto 2000. Geotail (ISAS in NASA) je namenjen raziskavam magnetnega repa Zemljine magnetosfere na dolžini (8-200 R_E) Zemljinih polmerov (radijev). Polar (ISTP) zbira podatke o pretoku energije med Sončevim vetrom in magnetosfero skozi polarne kape. Tu je še Wind, 1994 (ISTP), ki naj bi izpopolnil sliko o Sončevem vetru, njegovi plazmi in medplanetarnem magnetnem polju (Lilensten in Bornarel, 2006).

Bližje Zemlji so umeščeni okoljski vremenski sateliti. Njihovi podatki se prvotno uporabljajo za vremenske napovedi, javnost, radio in televizijo, različne agencije, obrambo, kmetijstvo in transport. Najbolj znana je grupacija satelitov Nacionalne oceanske in atmosferske administracije (*National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA*) v ZDA, tako imenovani sateliti (*Geostationary Operational Environmental Satellites GOES*) z opozorili v kratkem času (*short-range warning*), ki

opravljajo globalno zaznavanje vremena in delno dogodkov, ki se skozi medplanetarni prostor širijo od Sonca proti Zemlji. V floti GOES satelitov prvi datira v leto 1975 in se nenehno vzdržuje, obnavlja in izpopolnjuje (Lilensten in Bornarel, 2006). GOES sateliti opravljajo kontinuirano zaznavanje, nepogrešljivo za intenzivno analizo podatkov. Krožijo okrog Zemlje po geosinhrotroni tirnici, se pravi v ekvatorialni ravnini, z hitrostjo, ki se ujema z Zemljino dnevno rotacijo. Geosinhrotrona tirnica se nahaja približno 35800 km nad Zemljo, tako, da imajo sateliti pregled nad celotnim Zemljinim diskom. Razen tega, da nenehno nadzorujejo površje Zemlje, so opremljeni z magnetometri, senzorji za detekcijo rentgenskih žarkov, detektorji za visokoenergijske elektrone, protone in alfa delce, s katerimi zaznavajo Zemljino vesoljsko okolje oziroma vesoljsko vreme. Novejša GOES 12 in 14 vsebujeta tudi snemalec Sončevih rentgenskih žarkov (*Solar X-Ray Imager SXI*). Prav te podatkovne baze so uporabljene pri detekciji in analizi Sončevih bliščev, vzporedno zaznanih z zelo dolgimi radijskimi valovi umetnih oddajnikov na Zemlji, kot je prikazano v diplomskem delu (Thomson in drugi, 2005, Žigman in drugi, 2007).

Petdeset let po izstrelitvi prvega meteorološkega satelita Vanguard 2 iz vesoljskega centra Goddard v ZDA, je ESA novembra leta 2009 izstrelila svoj prvi satelit za nadzorovanje vesoljskega vremena Proba 2, ki bo med drugim analogno s satelitom GOES zaznaval rentgensko sevanje s Sonca. Načrtujejo se nove misije nadzovanja in raziskovanja vesolja.

Dosedanje in trenutne raziskave, ki vključujejo SOHO, ACE in Wind v bližini L1, Cluster, Polar, Geotail in GOES v orbiti okrog Zemlje, so podale pomembna opažanja na razsežnostih od Sončeve atmosfere do geoprostora. Ta opazovanja kažejo časovno zaporedje dogodkov vesoljskega vremena. Na osnovi statistične povezave dogodkov in analize obsežnih podatkovnih baz je razvito določeno število teoretičnih modelov za razumevanje prenosa energije in snovi v času eksplozivnih dogodkov, kot so Sončevi blišči, CME in magnetne nevihte. V ZDA so pomembni dosežki ustvarjeni in zabeleženi v Centru za napovedovanje vesoljskega vremena SWPC v Nacionalni oceanski in atmosferski administraciji NOAA (NOAA, 2009). Ustanovljen je Center skupnosti za koordinirano modeliranje (*Community Coordinated Modeling Center CCMC*) (CCMC, 2009), ki v partnerstvu združuje več

agencij in ima za cilj izvedbo in testiranje modelov vesoljskega vremena in oskrbo podpore napovedovalni službi. SWPC deluje kakor Svetovni opozorilni center (World Warning Centre) za omrežje ISES in objavlja napovedi izbranih trenutnih v (realnem času) in bodočih parametrov vesoljskega vremena, za potrebe uporabnikov v javnem in privatnem sektorju. Pridružitvev evropskega Regionalnega opozorilnega centra (ISES) tem napovedim kaže na pomembnost in kvaliteto javnosti dostopnih opazovanj na podlagi evropskih naprav in opreme. Evropske raziskave vesoljskega vremena, ki zajemajo fiziko Sonca, medplanetarnega prostora, magnetosfere, ionosfere in atmosfere, so osnovane na razvejani in dokaj razdrobljeni, toda močni znanstveni strokovnosti. Njena koordinacija je ena od osnovnih nalog ESA, ki je v ta namen ustanovila Delovno skupino za vesoljsko vreme (*Space Weather Working Team SWWT*) in si prizadeva utrditi Evropsko omrežje vesoljskega vremena (*Space Weather European NETWORK SWENET*), ki bi delovalo komplementarno z ostalimi udeleženci mreže ISES na ostalih celinah.

Nenazadnje so poleg opazovanj iz vesolja za napoved vesoljskega vremena pomembna tudi opazovanja na Zemlji in njihova korelacija z opazovanji iz vesolja, predvsem nam najbližjih območij v verigi Sonce-Zemlja, kot to uveljavlja mreža evropskih ionosferskih observatorijev, na primer Digitalni strežnik za visoko atmosfero (*DIGital upper Atmosphere Server DIAS*), ki razvija podatkovno bazo za podporo visokofrekvenčni (*High Frequency HF*) komunikaciji (Pulkkinen, 2007).

Pri raziskavah nizke ionosfere najbližje Zemlji, tako imenovani plasti D, razširjanje radijskih valov zelo nizkih frekvenc VLF ostaja osnovno orodje, ki temelji na lastnosti plasti D in deluje kot zelo velik detektor rentgenskih žarkov, ki se sprožajo ob Sončevih izbruhih kot predkurzorji, ki najhitreje prenašajo informacijo o eksplozivnih dogodkih na Soncu (Žigman in drugi, 2007).

V diplomskem delu smo se osredotočili na ta vidik raziskav Zemlji najbližjega ioniziranega okolja, zaznavanje Sončevih blišcev v področju rentgenskega sevanja z radijskimi valovi umetnih oddajnikov na Zemlji. Nizka ionosfera je izredno kompleksna zaradi relativno visokih tlakov in prisotnosti različnih zvrsti atomov in molekul in je zadnji člen v verigi Sonce-Zemlja, kot pripadajoča nam najbližjemu vesolju pa tudi izredno pomembna (Žigman in drugi, 2007).

2.1 Zgodovina

Opazovanje povezav med Soncem in Zemljo se začne z enim od najbolj spektakularnih naravnih dogodkov: polarnim sijem, ki ga je mogoče opazovati s prostim očesom in je buril domišljijo predvsem nordijskih narodov že tisoče let nazaj. Danski astronom Tycho Brache je opazoval dogodke polarnega sija med leti 1582 in 1598, torej skozi obdobje daljše od enega Sončevega cikla, in posledično ugotovil, da število dogodkov z leti niha. Prve korake k razumevanju povezav med Soncem in Zemljo je naredil leta 1716 Edmund Halley, ki je domneval, da so vzrok polarnega sija delci, ki potujejo po silnicah magnetnega polja Zemlje (Moldwin, 2008).

Anders Celsius in Olof Hiorter sta odkrila, da sprememba lege igle kompasa sovpada s pojavom sijajnega polarnega sija. S primerjavo simultano merjenih magnetnih variacij v Londonu in Uppsali sta ugotovila, da so pojavi, ki jih raziskujeta, vezani na procese planetarnih razsežnosti. Povezanost magnetne aktivnosti Zemlje s procesi na Soncu je bila ugotovljena z opazovanji Carringtona v času polarnega sija leta 1859, ki je bil samo eden od učinkov izredno močne *geomagnetne nevihte* znane kot Carringtonov dogodek (*the Carrington Event*), ta pa je bila vzrok za prekinitev komunikacije v čezoceanskih komunikacijskih vodnikih (Moldwin, 2008).

V 19. st. so se razvili bistveni koncepti fizike, ki so pripomogli k razvozlanju uganke interakcije Sonce-Zemlja. S formulacijo Maxwellovih enačb se je zgodilo drugo veliko poenotenje v fiziki, povezanost električnih in magnetnih pojavov. Svetloba je EMV. J. J. Thomson na Univerzi Cambridge je preučeval prevodnost plinov, katodne žarke in odkril elektron. Guglielmo Marconi leta 1901 izumi brezžični radio in pošlje prvo radijsko sporočilo čez Atlantik. Znanstvenike je begalo, kako EMV propagira okrog zakrivljene Zemlje. Ugotovili so, da Zemljo na višinah nad 60 km obkroža plast atmosfere, v kateri obstajajo nabiti delci ioni in elektroni, in da plast deluje delno kot zrcalo, ki odbija in tudi lomi radijske valove. Območje atmosfere, kjer prevladujejo nabiti delci in se razširja do 1000 km nad površjem Zemlje, imenujemo ionosfera. K razvoju fizike ionosfere v prvi polovici 20. st. je odločilno prispeval Appleton, ki je preučeval lastnosti, pojasnil propagiranje EMV skozi ionosfero in podal njeno delitev na plasti (Hargreaves, 1992).

Za odkritjem ionosfere sta Chapman in Ferraro izdala listino, ki je opisovala, kako tok energijskih delcev s Sonca vpliva na magnetno polje Zemlje in povzroča geomagnetne nevihte (Chapman in Ferraro, 1931). 20 let pozneje Ludwig Biermann ugotovi, da Sonce neprestano emitira ioniziran plin, ki se giblje z nadzvočno hitrostjo. Termin Sončev veter (*Solar Wind SW*) je prvi uporabil Parker leta 1958, da bi nazorno opisal kontinuirani tok plazme v vesolje, ki je bil opažen po gibanju repov kometov že v petdesetih letih prejšnjega stoletja.

V tem obdobju švedski fizik Hannes Alfvén pojasni povezavo med generacijo EMV v plazmi in gibanjem plazme. Te valove danes imenujemo Alfvénovi valovi in podajo mehanizem prenosa energije in gibalne količine v plazemskem sredstvu. Plazma Sončevega vetra ima vir v koroni Sonca, od katerega se oddaljuje po radialnih tirnicah in nosi v sebi *zamrznjeno* magnetno polje. To koronalno polje se prenaša v medplanetarni prostor po magnetnih silnicah, ki izvirajo iz enake koronalne votline na vrtečem se Soncu. Zaradi učinka *skupne rotacije* (korotacije) plazme magnetne silnice oblikujejo obliko *Parkerjevih spiral*. Rezultat je zapletena prostorska konfiguracija magnetnega polja Sončevega vetra, opisana z Alfvénovim modelom *Balerina* iz leta 1977 (Schwenn, 2006).

Tako oblikovano magnetno polje se prenaša v medplanetarni prostor in je znano pod imenom medplanetarno magnetno polje ali *Interplanetarno Magnetno Polje (IMP)*, (*Interplanetary Magnetic Field IMF*). *Magnetizirani* Sončev veter vstopa v interakcijo z zunanjim magnetnim poljem Zemlje, ki prenaša gonilno energijo za vse magnetosferske in ionosferske motnje, znane pod enim imenom kot geomagnetna aktivnost. Od leta 1957, ko je bil izstreljen prvi Zemljin satelit Sputnik, smo se obdali s floto satelitov, ki nam omogočajo boljše razumevanje vesolja z ugodjem visokotehnološke infrastrukture. Človeštvo je vstopilo v novo dobo, v kateri nemirno vesolje začne vplivati na naša vsakdanja življenja.

3 VARIABILNO SONCE

Sonce je aktivna zvezda povprečne velikosti, temperature in izseva. Je osrednje telo v Sončevem sistemu, ki vsebuje več kot 99,97 % celotne mase Sončevega sistema in je dovolj blizu za raziskovanje detajlov na površju, ki so pomembni za znanstveno vedo astrofiziko. Je vrteča kroglja plazme sestavljena iz ~ 94 % vodika, ~ 6 % helija in drugih elementov kisika, ogljika, dušika in vsebuje vse naravne elemente, ki so na Zemlji (Lilensten in Bornarel, 2006).

Lahko opazujemo in izvajamo kvantifikacijo Sončevih peg, flokul, Sončevih bliščev, protuberanc, CME in gibanja snovi pod in nad površjem Sonca, pojavov, ki jih razumemo pod pojmom fenomen Sončeve aktivnosti. Sonce opazujemo v različnih območjih spektra rentgenski, UV in vidni svetlobi. Sonce je plinasto večslojno telo, po sprejetem modelu razdeljeno na notranjost, ki zajema jedro, sevalno in konvekcijsko območje, in zunanost ali atmosfero, ki zajema fotosfero, kromosfero, prehodno območje in korono (tabela 1). Tip sevanja določenega območja je odvisen od temperature. Fotosfera Sonca, od koder prihaja največ svetlobe, seva kot črno telo z ekvivalentno temperaturo ~ 6000 K. Plazmo Sonca obvladujejo lastna gravitacija, notranji izvor toplotne energije in močna magnetna polja (Karalič in drugi, 2000).

Sonce je stabilno v hidrostatičnem ravnovesju, ki ga določa izsev zaradi sile termičnega tlaka, ta sila pa je usmerjena radialno iz centra in nasprotna sili gravitacije. Temperaturne razlike v posameznih plasteh so ključ za prenos energije s sevanjem in konvekcijo. Električni tokovi na površju in v notranjosti proizvajajo magnetna polja in ohranjajo Sončev dinamo. Energija se oddaja v obliki EMV in energijskih nabitih delcev, ki potujejo skozi *heliosfero* in IMP, prispejo do Zemljine magnetosfere in odločilno vplivajo na Zemljino vesoljsko okolje, atmosfero in površje. Večji del emitirane energije je na Zemlji zaznan v območju vidne svetlobe in infrardečega sevanja. Gostota svetlobnega toka, ki pride do zgornje plasti Zemljine atmosfere, je variabilna in ima ključno funkcijo pri vplivih (NASA, 2009).

Tabela 1: Osnovni statistični podatki o Soncu
(NOAA, 2009, str. 11)

Gostota magnetnega polja območij:	
Sončevo polarno polje	0,0001 T
Sončeve pege	0,30 T
Sončeva fotosfera	0,0001 T
Sončeva kromosfera	0,0025 T
Sončeve protuberance	0,001-0,02 T
Volumen Sonca	$1,41 \cdot 10^{27} \text{ m}^3$
Sončeva ubežna hitrost	2224,80 m/s
Gravitacijski pospešek Sonca	274 m/s^2
Masa Sonca	$1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, ~ 333000 Zemljinih mas
Povprečna gostota Sončeve snovi	1410 kg/m^3
Gostota Sončevega jedra	$1,60 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3$
Gostota Sončeve fotosfere	10^{-6} kg/m^3
Gostota Sončeve kromosfere	10^{-9} kg/m^3
Gostota Sončeve korone	10^{-13} kg/m^3
Temperatura Sončevega jedra	$15 \cdot 10^6 \text{ K}$
Temperatura Sončeve kromosfere	4300-10000 K
Temperatura Sončeve korone	$5 \cdot 10^6 \text{ K}$

Ocenimo gostoto integralnega svetlobnega toka, ki prispe do Zemljine atmosfere, se pravi na razdalji ene *astronomske enote* 1 a.e. = ($1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$). Povzamemo, da je Sonce sivo telo. Za izračun izsevane gostote energijskega toka uporabimo Stefan-Boltzmannov zakon:

$$I_s = \varepsilon \sigma T^4, \quad (3.1)$$

kjer je: ε albedo (0,99), σ Stefanova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$), T temperatura Sončeve fotosfere (5800 K). Sledi:

$$I_s = 6,35 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2.$$

Celotni Sončev izsev ali skupno moč energijskega toka izračunamo z enačbo:

$$P_s = 4\pi r_s^2 I_s, \quad (3.2)$$

kjer je: r_s polmer Sonca ($6,96 \cdot 10^8$ m). Iz enačbe (3.2) izračunamo:

$$P_s = 3,87 \cdot 10^{26} \text{ W}.$$

Na razdalji $R = 1$ a.e. se skupna moč energijskega toka (enačba 3.2) porazdeli po površini zamišljene krogle polmera R s centrom v Soncu. Za izračun gostote energijskega toka s Sonca nekje nad Zemljino atmosfero, brez upoštevanja absorpcije, dobimo:

$$I_z = \frac{P_s}{4\pi R^2}, \quad (3.3)$$

kar znese:

$$I_z = 1372 \text{ W/m}^2. \quad (3.4)$$

To je znana Solarna konstanta. Če želimo določiti moč, ki jo sprejme Zemlja, moramo Solarno konstanto množiti s polovično površino Zemlje zaradi stalnosti temne Zemljine polovice, ki ne prejema Sončevega izseva:

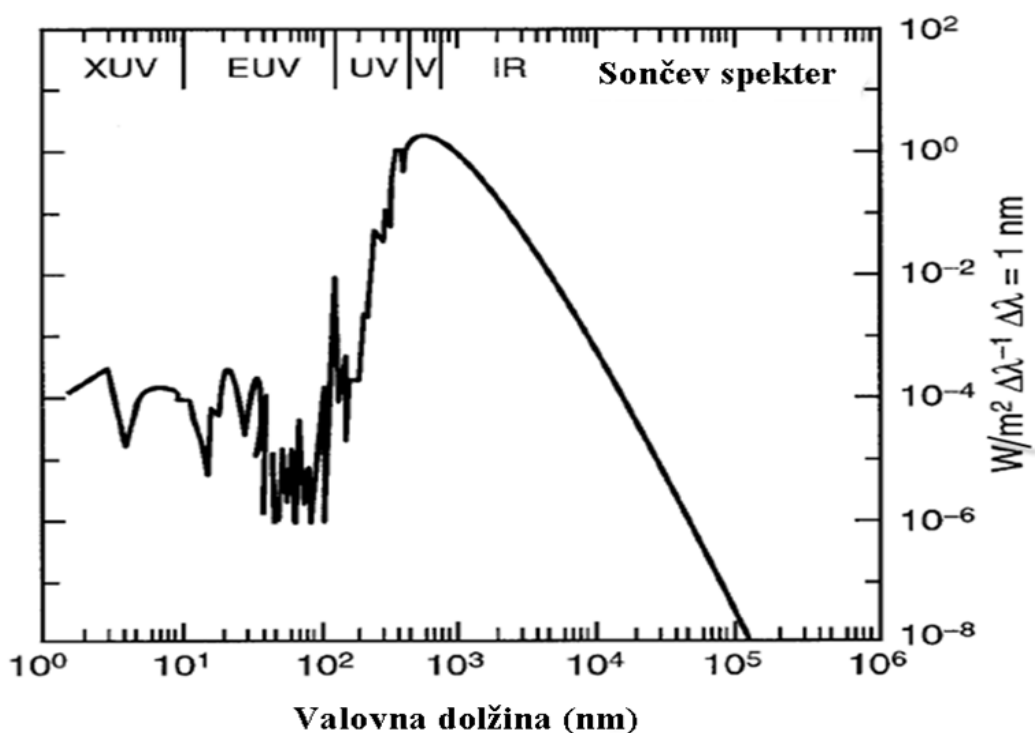
$$P_z = 2\pi r_z^2 I_z, \quad (3.5)$$

kjer je: r_z polmer Zemlje ($6,37 \cdot 10^6$ m). Iz enačbe (3.5) izračunamo:

$$P_z = 3,49 \cdot 10^{17} \text{ W}.$$

Vrednost Solarne konstante (3.4) poda skupni (integralni) izsev s Sonca, ki sicer kaže majhne variacije s Sončevim ciklom. Medtem ko spektralna porazdelitev jakosti EM sevanja s Sonca (slika 1) prikaže opazne spremembe. Najpomembnejši prispevek spremembam jakosti sevanja s Sonca prihaja iz območij rentgenskega sevanja in radijskih valov, (skrajno levo in skrajno desno območje na sliki 1), tistih območij

spektra EMV, ki imajo pomemben vpliv na atmosfero in ionosfero Zemlje. Visokoenergijske komponente EM sevanja, ki ustrezajo razponu UV, EUV in rentgenskim žarkom, se v veliki meri absorbirajo v visoki atmosferi Zemlje. Radijski valovi za razliko ne trpijo absorpcije in pridejo do površja Zemlje (Goodman, 2005).



Slika 1: Relativna jakost spektralne porazdelitve EMV s Sonca, normalizirana na prirastek valovne dolžine 1 nm (Goodman, 2005, str. 35)

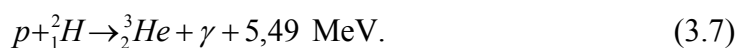
3.1 Sončevo jedro

Za razliko od površinske plasti s temperaturo približno 5800 K, v središču Sonca temperatura doseže $15 \cdot 10^6$ K. To območje je jedro Sonca, v velikosti $1/3$ Sončevega polmera in zajema $\sim 4\%$ celotnega volumna Sonca. Pri tako visoki temperaturi snov obstaja v obliki totalno ionizirane plazme, to je popolnoma ogoljenih jeder, v glavnem protonov, ki se gibljejo s hitrostmi ~ 600 km/s, in elektronov, ki se gibljejo s hitrostmi ~ 26000 km/s. V teh pogojih dva protona lahko premagata električno odbojno silo med njima, imenovano Coulombova sila, in se povežeta z močno jedrsko silo. Ta proces je znan kot jedrsko zlitje oziroma fuzija, pri kateri se lažja jedra zlivajo v težja s sproščanjem energije v obliki gama sevanja. Ekstremna

energija proizvedena v jedru se prenaša navzven, pri čem ima radiacijska plast vlogo izolatorja. V jedru proizvedeni fotoni gama se nenehno sipajo, absorbirajo in ponovno emitirajo v radiacijski plasti z vedno nižjimi energijami. Ko fotoni zapustijo Sonce, so njihove valovne dolžine večinoma v območju vidne svetlobe. Vsak foton gama je konvertiran v več milijonov fotonov izsevane vidne svetlobe. Za prenos energije, ki se proizvede v jedru, do radiacijske plasti je potrebno približno do milijon let (Karalič in drugi, 2000). Na Soncu potekata dve osnovni verigi fuzijskih reakcij; to sta zlivanje vodika (protonov) v helij, tako imenovana proton-proton reakcija, in zlivanje helija v ogljik. V proton-proton reakciji z verjetnostjo 86 % se zlivanje vodika v helij odvija v treh korakih (Poppe, 1996). V prvem koraku se dva vodikova protona p zlijeta skupaj v devterij 2_1H . Sprosti se pozitron e^+ in nevtrino ν_e :



V drugem koraku se proton p zlije z devterijem 2_1H in rezultat je izotop helija 3_2He . Energija je sproščena v obliki gama žarka:



V tretjem koraku pa se dva izotopa helija 3_2He zlijeta v helijevo jedro 4_2He z oddajo dveh protonov p :



Energija, ki se sprošča v zgornjih reakcijah, se lahko izračuna iz Einsteinove relacije ekvivalence mase in energije $\Delta E = \Delta mc^2$, kjer je c hitrost svetlobe v vakuumu ($c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Na primer, za reakcijo (3.7) pokažemo, da je pridobitev energije pri vsaki transformaciji vodika v helij $\sim 5,50 \text{ MeV}$. Sproščeno energijo v reakciji izračunamo kot razliko mas reaktantov in produktov. Mase so podane v *atomske masne enoti* $1u$, ($1u = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$), ($1u = 932 \text{ MeV}$): masa protona p ($1,0068 u$), masa devterija 2_1H ($2,0127 u$), masa izotopa helija 3_2He ($3,0136 u$), sledi:

$$\Delta m = m(p) + m({}^2_1H) - m({}^3_2He), \quad (3.9)$$

kar znese:

$$\Delta E = 5,90 \cdot 10^{-3} \text{ } 1u = 5,49 \text{ MeV}.$$

Zlitje 1 kg vodika sprosti $6,30 \cdot 10^{14}$ J energije, ki je ekvivalent $\sim 1,75 \cdot 10^8$ kWh ali proizvede 0,993 kg helija, ki pomeni spremembo 0,007 kg mase v energijo. Zlivanje vodika v helij je močno odvisno od temperature. Če jedrske reakcije ne bi proizvedle dovolj energije za nadomeščanje izseva, bi se termični tlak zmanjšal, Sonce bi se skrčilo, temperatura v jedru bi se povišala, jedrske reakcije bi zagotovile več energije in ponovno bi se vzpostavilo ravnovesje (Zwitter, 2002).

3.2 Sevalno in konvekcijsko območje

Jedro obdaja sferična plast sevalno ali radiacijsko območje, ki zajema $\sim 50\text{-}70\%$ volumna Sonca. Plast z izolacijskim učinkom vzdržuje visoko temperaturo v jedru. Energija se transportira proti površju s sevanjem, emisijami in absorpcijami fotonov visokih energij skozi stabilne plasti plazme. Gostota in temperatura upadata proti zunanji plasti območja. Zunanja tretjina Sončeve notranjosti se imenuje konvekcijsko območje, v katerem se energija prenaša s konvekcijo. Med sevalnim in konvekcijskim območjem je prehodna strižna plast, v kateri se zaradi diferencialne rotacije Sonca ustvari močno magnetno polje $B \sim 10$ T (NASA, 2009). Plavajoče cevi magnetnih silnic se dvigajo skozi konvekcijsko območje in prebijejo površje Sonca v aktivnih območjih, kjer formirajo Sončeve pege z magnetnimi polji jakosti $B \sim 0,10$ T in koronalne zanke jakosti $B \sim 0,01$ T na Sončevi fotosferi (Poppe, 1996).

Diferencialna rotacija na površju Sonca prepleta, ovija magnetne silnice in preusmerja magnetno polje. Pod magnetnim tlakom je magnetno polje fragmentarno, magnetne silnice prehajajo iz toroidne konfiguracije, ki ima usmerjenost od vzhoda na zahod, v poloidno konfiguracijo, ki povezuje severni in južni pol. Ta proces se imenuje Sončev dinamo, ki spreminja polarnost magnetnega polja Sonca vsakih 11 let oziroma ga povrne v začetno konfiguracijo približno vsakih 22 let. Turbulentna konvekcija proizvaja dvig stopnje Sončevega dinama. Konvekcijski tokovi nastajajo zaradi hitrega ohlajanja zunanje plasti. Konvekcija se odvija v obliki termičnih stebrov, ki transportirajo plazmo iz notranjosti proti fotosferi in dajejo površju zrnato

obliko ali granulacijo. Ohlajena plazma se spusti na spodnji rob območja, prejme toploto iz vrhnje plasti sevalnega območja in ciklus se ponovi. Stebri plazme imajo približno 500 K višjo temperaturo od hladnejših spuščajočih stebrov (Karalič in drugi, 2000). Konvekcijska cirkulacija plazme je generator magnetnih polj, ki ključno vplivajo na nastanek Sončevih peg in bliščev (Poppe, 1996).

3.3 Sončeva fotosfera

Fotosfera je tanka plast Sončevega površja, ki jo opazamo v beli svetlobi. Je zgornji del konvekcijske plasti, meja med Sončevo notranjostjo in zunanostjo debeline 300-500 km. Tvori jo delno ionizirana plazma s temperaturo ~ 6000 K. Največ je vodika: ~ 92 % in helija: $\sim 7,80$ %. Fotosfera se definira kot območje višin, s katerih se neposredno oddajajo fotoni. Energija se prenaša s konvekcijo. Fotosfero prepreda mreža 1000 km širokih vrhov konvekcijskih celic. V njih se vroča plazma iz notranjosti Sonca dviguje in ohlaja in se ponovno vrača v globlje plasti. Od časa do časa se odlepijo izbruhi dvigajočih se lokov plazme, ki sledijo silnicam magnetnega polja. V fotosferi je magnetno polje *zamrznjeno* v plazmo. V obdobju več let se pojavljajo in izginevajo hladnejše temne lise, Sončeve pege, ki nastanejo, kadar silnice magnetnega polja prebadajo fotosfero. V smeri proti opazovalcu gre svetloba iz fotosfere skozi hladnejšo plast kromosfere, ki absorbira valovne dolžine elementov, ki so v plasti, zato opazimo na določenih mestih v spektru temne absorpcijske črte ali *Fraunhoferjeve* črte, ki so pomembne pri raziskovanju kemijske sestave plinov, temperature, gostote magnetnega polja in turbulenc (Karalič in drugi, 2000).

Skoraj vsa svetloba, ki pride do Zemlje, je iz spodnje plasti fotosfere, ki je debeline 150 km. Spekter svetlobe, ki jo seva plazma, je zvezen. V fotosferi se pojavljajo bakle ali svetle lise, ki imajo višjo temperaturo od okolice in so svetlejše. So gladina konvekcijskih termičnih stebrov, ki so vertikalni tokovi plazme, katerim magnetno polje onemogoča horizontalen odklon (NASA, 2009). Mehanizem, ki povzroči izpust energije iz fotosfere, še ni popolnoma raziskan, znano pa je, da obstaja hitra pretvorba magnetne energije v kinetično energijo energijsko nabitih delcev kot posledica močnih magnetnih polj in ukrivljenih magnetnih silnic na Sončevem površju (Poppe, 1996).

3.4 Sončeva kromosfera

Kromosfera je spodnji del Sončeve atmosfere, ki se dviga do povprečne višine približno 2000 km nad fotosfero. Je izredno dinamično območje heterogene mešanice hladnih plinov in vroče plazme v divergentnem magnetnem polju. Temperatura najprej upade do minimalnih 4300 K na višini ~ 500 km nad fotosfero in nato hitro narašča do temperature 10000 K v zgornji kromosferi. Kromosfera je prozorna za bleščečo svetlobo, ki jo oddaja fotosfera (Karalič in drugi, 2000).

Značilnost kromosferskega spektra so emisijske črte, ki so zaradi absorpcije videti kot temne črte na disku. Osnovne spektralne črte so črte vodika, kalcija in helija. Najsvetlejša je rdeča vodikova *Ha* ali *Balmerjeva* črta valovne dolžine 656 nm, ki daje barvo kromosferi. Videz fine strukture kromosfere se spreminja v odvisnosti od svetlobe, spektralne črte, v kateri jo opazujemo. V spektralnih črtah *CaII* kromosferske slike pokažejo svetlo omrežje granulacijskih konvekcijskih celic. Na mejah celic je močno magnetno polje, ki požene vertikalne curke ali stebre plazme, ki jim pravimo spikule, in se dvigujejo vzdolž magnetnih silnic od 1000 do 10000 km višine. Čas trajanja spikul je le nekaj minut (Karalič in drugi, 2000).

Drugi pomemben pojav so protuberance, izbruhi plazme, ki se dvigujejo nad robom Sončeve ploskve vzdolž magnetnih silnic s hitrostmi več 100 km/s do višin Sončevega polmera in lahko trajajo več tednov (Poppe, 1996). Protuberance so pogosto v povezavi z območji Sončevih peg, ki jih oblikuje magnetno polje, odtrgajo se v medplanetarni prostor kot ogromne zanke plazme visoko nad Sončevo atmosfero. Flokule so svetli oblaki plazme, ki se zadržujejo nad baklami in obkrožajo Sončeve pege. Pojavijo se tudi kromosferski izbruhi, pri katerih se del flokule močno zasveti in nastane Sončev blišč, ki je posledica močnega stiska plazme v flokuli zaradi ekstremno močnega magnetnega polja v Sončevi pegi. Aktivna območja spojena s Sončevimi pegami proizvedejo močna magnetna polja, ki ustvarijo zanke, ki prebadajo kromosfero. Vzrok nastanka ni še docela pojasnjen. Stiskanje plazme zvišuje temperaturo flokule, magnetno polje pospešuje delce do visokih hitrosti in okrepi se radijsko in rentgensko sevanje (Avsec in Prosen, 1971).

3.5 Sončeva notranja korona

Nad kromosfero se temperatura močno poveča z višino v relativno tankem območju, nad katerim je korona, območje razredčene plazme visoke temperature in nizke koncentracije, ki se v vidnem območju spektra razširja v vesolje z nadzvočno hitrostjo do razdalje enega Sončevega polmera in več. Je močan vir rentgenskega in EUV sevanja. Količina emitirane energije iz korone je manjša od količine iz gostejših plasti atmosfere. Pri opazovanju korone z teleskopi koronografi v področju rentgenskega sevanja je lepo vidna struktura korone (Poppe, 1996).

Aktivna območja korone so lokalizirana območja močnega magnetnega polja, ki se vidijo kot Sončeve pege v optičnih valovnih dolžinah. Zaradi nenehne magnetne aktivnosti, preboja magnetnih cevi iz notranjosti in ponora nazaj v notranjost se odvijajo dinamični procesi, kot so segrevanje plazme, Sončevi blišči in CME. Kromosfersko segrevanje plazme ustvari višinske tokove v obliki koronalnih zank, ki dajejo aktivnemu območju obliko zapolnjenih zank višje temperature in gostote od korone v ozadju. Ta območja so viri sevanja rentgenskih žarkov in EUV območja spektra EMV. Koronalne luknje so polarna območja, ki so temnejša od ekvatorialnih območij. So območja, kjer prevladujejo odprta magnetna polja, ki delujejo kot brizgalke segrete plazme iz kromosferskih plazemskih tokov v Sončev veter (Karalič in drugi, 2000).

3.6 Sončeva aktivnost, magnetizem in pege

Največ informacij o magnetnem polju Sonca dobimo iz opažanj magnetnega polja fotosfere na osnovi *Zeemanovega efekta*, razcepljenosti spektralnih črt elementov, na primer železa v zunanjem magnetnem polju v območju vidne svetlobe. Iz dvodimenzionalnih kart jakosti magnetnega polja fotosfere se ekstrapolira koronalno tridimenzionalno magnetno polje ali se poskuša izslediti subfotosfersko poreklo iz izstopajočega magnetnega pretoka (Poppe, 1996).

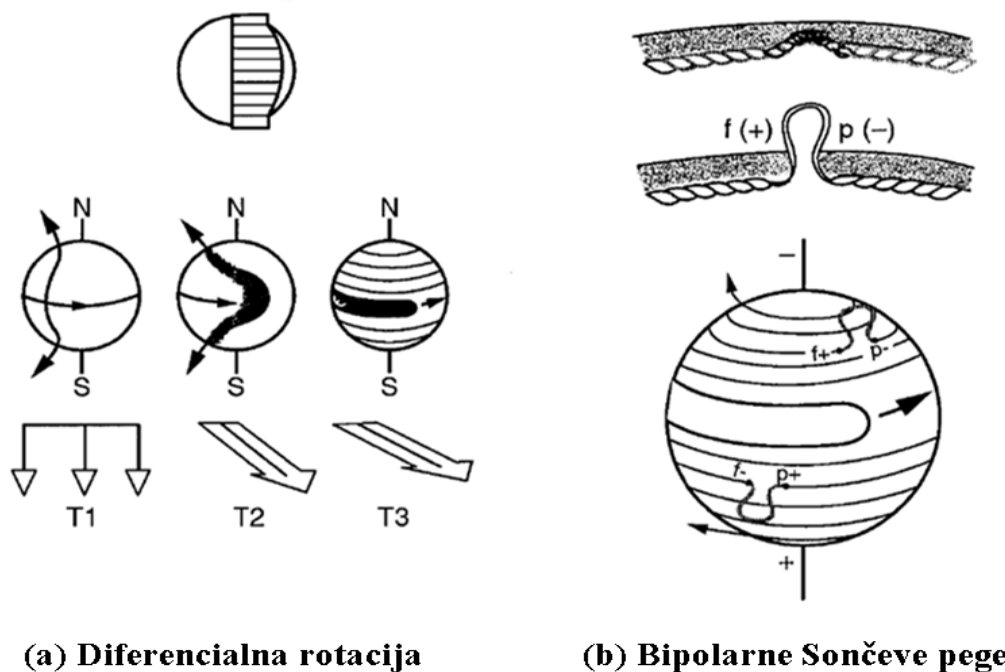
Najmočnejša magnetna polja izvirajo iz Sončevih peg in so jakosti do nekaj desetink T, dokler polja reda velikosti stotink T obdajajo celotna aktivna območja. Tokovne hitrosti sprožene s fotosfersko konvekcijo so približno 1 km/s. Na mirnem Soncu

daleč od aktivnih območij povprečna gostota magnetnega polja znaša $\sim 10^{-4}$ T (glej tabelo 1) (Poppe, 1996).

Poreklo Sončevih peg je vezano na strukturo in dinamiko magnetnega polja Sonca. V mirnih pogojih je magnetno polje Sonca orientirano v smeri sever-jug v heliografskem koordinatnem sistemu in njegova gostota znaša nekoliko več od gostote magnetnega polja Zemlje, ki je $\sim 10^{-4}$ T. Za razliko od geomagnetnega polja, ki ima izvor v kovinskem jedru Zemlje, je Sončevo magnetno polje omejeno na prostor v bližini površja in nastane zaradi gibanja površinske plazme, medsebojnega delovanja Sončeve rotacije in konvekcijskega gibanja (Hanslmeier, 2002). Konfiguracija magnetnega polja, prikazana z magnetnimi silnicami, odraža stanje plazme na površju. Z gibanjem plazme se določena konfiguracija prenaša skozi prostor *zamrznjena* v plazmi.

Pri rotaciji Sonca okrog osi sever-jug se pojavi *skupna rotacija* (korotacija) magnetnega polja. Ker je Sonce fluidno in ne trdno telo, pride do diferencialne rotacije, hitrejše rotacije v ekvatorialnem območju kot na višjih heliopisnih širinah. Magnetne silnice se razpotegnejo in v nekaj letih *navijejo* okrog Sonca. Po zakonitostih hidrodinamike v območju večjih hitrosti se sproži turbulentno gibanje plazme in posledično deformacija magnetnih silnic. Na mestih deformacije narašča gostota energije in tlak magnetnega polja in kadar slednji preraste tlak plazme, magnetno polje prodre skozi plazemsko ovojnico in na Sončevem površju se pojavijo bipolarne pentlje ali zanke (Poppe, 1996). Na površju Sonca se opazita dve novi Sončevi pegi. Mesto, kjer magnetne silnice izstopajo iz notranjosti Sonca, predstavlja severni magnetni pol, kjer magnetne silnice vstopajo, pa je južni magnetni pol (NOAA, 2009). Na teh mestih gostota magnetnega polja doseže vrednosti do 0,40 T. Tako močno magnetno polje onemogoča pretok plazemske energije iz notranjosti proti površju. Točke nasprotne polarnosti so več tisoč stopinj hladnejše od okolice in se vidijo kot temne Sončeve pege na fotosferi. Danes vemo, da so Sončeve pege kljub nižji temperaturi, ~ 4000 K, aktivna območja, kjer se sprožajo Sončevi blišči in izbruhi visokoenergijskih delcev (slika 2) (Lilensten in Bornarel, 2006).

Magnetni pretok



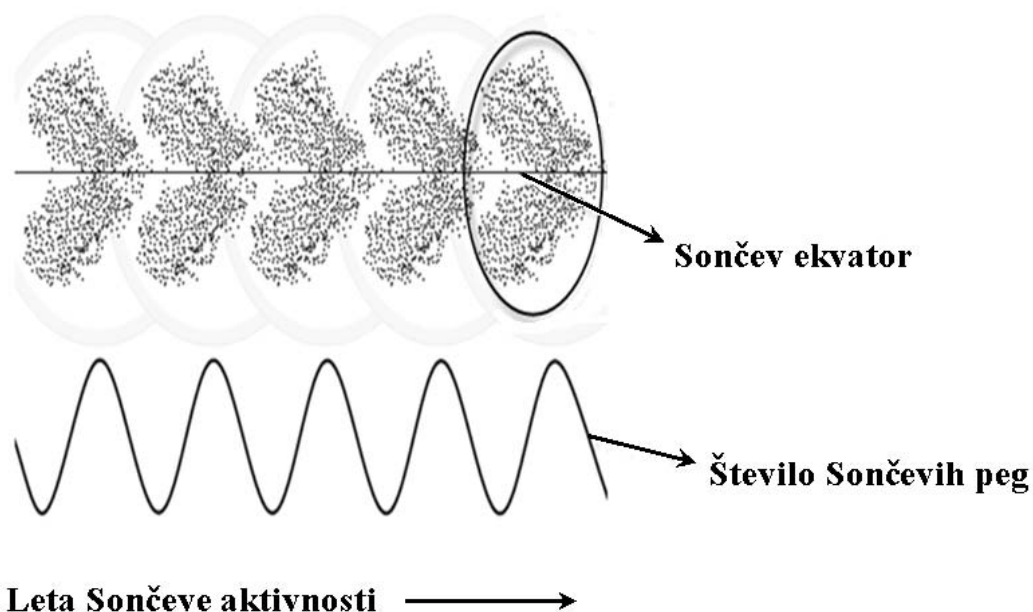
(a) Diferencialna rotacija

(b) Bipolarne Sončeve pege

Slika 2: Vplivi diferencialne rotacije Sonca. (a) Razvoj površinske komponente magnetnega polja v smeri vzhod-zahod pri raztezanju magnetnih silnic navzven, trenutki: T1, T2 in T3. To povzroča zблиževanje magnetnih silnic. (b) Formiranje zank v konfiguraciji plazme in magnetnega polja, ki pripelje do razvoja bipolarnih Sončevih peg (Goodman, 2005, str. 38)

Sončeve pege se prvotno pojavijo na Sončevih heliopskih širinah (30° - 40°), kjer se opaža konvergenca deformiranih magnetnih silnic. Poli prvotno nastalih Sončevih peg so orientirani istovetno kot magnetno polje Sončeve hemisfere, na kateri so nastale. Posledično nastajajo Sončeve pege s poli orientiranimi nasprotno orientaciji magnetnega polja na Sončevi hemisferi. Razvoj celotnega števila Sončevih peg privede do nevtralizacije obstoječega magnetnega polja v času maksimalnega števila Sončevih peg in dalje do obrata polov. Obrat polov spremlja zmanjšanje števila Sončevih peg do minimuma. Proces med dvema minimumoma Sončevih peg traja 11 let in se imenuje *Sončev cikel*. Potrebno je približno 22 let, da bi se ponovila začetna magnetna konfiguracija. Po podatkih NASA se je 24. Sončev cikel začel 4. januarja leta 2008 (NASA, 2009).

Kot območja najmočnejšega magnetnega polja so Sončeve pege dober pokazatelj Sončeve aktivnosti. *Metuljev diagram* nazorno pokaže, da se v zgodnjem obdobju Sončevega cikla Sončeve pege najprej pojavijo na višjih Sončevih heliopolisnih širinah, nakar se premikajo v smeri k ekvatorju proti koncu Sončevega cikla (slika 3) (Poppe, 1996).



Slika 3: Odvisnost pojava Sončevih peg od heliopolisne širine v času petih Sončevih ciklov (NOAA, 2009, str. 21)

Ker magnetno polje določa celotno aktivnost Sonca, enako odvisnost od Sončevega cikla kažejo tudi Sončevi blišči, rentgensko sevanje in radijske emisije. Sončev cikel vseeno različno vpliva na posamezna območja Sončevega spektra. Med minimumom in maksimumom Sončevega cikla variacija jakosti vidne svetlobe znaša le 0,15 %, jakost Lyman α sevanja se poveča za 50 % in jakost v področju rentgenskega sevanja za faktor 10^3 . Sprememba jakosti vidne svetlobe s Sončevim ciklom je praktično zanemarljiva, medtem ko imata rentgensko in EUV sevanje odločilni vpliv na ionizacijo ionosfere Zemlje. Omenimo, da galaktični kozmični žarki oslabijo ob Sončevem maksimumu za faktor 0,50 glede na minimum Sončevega cikla, kar je pojasnjeno z uklanjanjem žarkov iz okolice Zemlje pod delovanjem močnega magnetnega polja Sonca (Poppe, 1996).

4 INTERAKCIJA SONCE-ZEMLJA

Fizika povezave med Soncem in Zemljo se začne v notranjosti Sonca, kjer delovanje dinamika povzroča magnetno polje. Sončevo magnetno polje sklopljeno z oddano mehansko in sevalno energijo iz fuzijskih reakcij v Sončevem jedru določa variabilnost vpliva Sončevega rentgenskega in EUV sevanja ter medplanetarne pogoje v orbiti Zemlje. Pogoji zajemajo lastnosti plazme Sončevega vetra, jakost in smer medplanetarnega magnetnega polja in tokove visokoenergijskih delcev. Izsev visokoenergijskih fotonov in medplanetarni pogoji se spreminjajo s približno 11 letnim Sončevim ciklom, ki ga zaznamuje spremenljiva pogostost Sončevih bliščev in CME dveh osnovnih oblik Sončeve dejavnosti. Le-ta določa pogoje vesoljskega vremena v prostoru okrog Zemlje imenovanem geoprostor, ki zajema magnetosfero, ionosfero in zgornjo atmosfero (Poppe, 1996).

Sončev veter je tok plazme ioniziranega plina, v glavnem elektronov in protonov iz Sončeve zgornje atmosfere. Ta najdaljša razširitev korone, ki izpolnjuje prostor do najmanj 80 a.e., v radialni smeri definira *heliosfero* območje, ki obkroža Sonce. Prevladujoč vodikov (protonski) Sončev veter se izteka prvenstveno iz delov korone, ki so magnetno odprti proti medplanetarnemu prostoru. Območja odprtih magnetnih silnic tvorijo tako imenovane *koronalne luknje*, tako imenovane zaradi njihovega temnega videza na posnetkih v mehki rentgenski in EUV svetlobi. Sončev veter nosi s seboj na zunaj razpotegnjeno koronalno magnetno polje, ki ima v povprečju zunanjo (od Sonca) ali notranjo (proti Soncu) orientacijo v odvisnosti od smeri magnetnega polja in njegove polarnosti v fotosferični osnovi (Poppe, 1996).

Pojem Sončev veter je prvi uporabil E.N. Parker leta 1958, da bi slikovito opisal tok plazme iz Sončeve korone v vesolje. Plazma Sončevega vetra se oddaljuje od Sonca po radialnih tirnicah in nosi s seboj (v sebi zamrznjeno) magnetno polje, ki se prenaša v medplanetarni prostor (Parker, 1958). Zaradi *skupne rotacije* (korotacije) plazme magnetne silnice poprimajo obliko *Parkerjevih spiral*. Rezultat je komplicirana prostorska konfiguracija magnetnega polja Sončevega vetra opisana z Alfenovim modelom *balerina* iz leta 1977. Tako formirano magnetno polje, ki se prenaša v medplanetarni prostor, imenujemo IMP. V povprečju ima Sončev veter v orbiti Zemlje gostoto $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-3}$ in hitrost $\sim 400 \text{ km/s}$, gostota IMP pa znaša $\sim 5 \text{ nT}$.

Orientacija IMP vzdolž Parkerjeve spirale v ravnini ekliptike kaže odklon 45° glede na radialno smer. Geomagnetno aktivnost poganja interakcija med IMP in Zemljinim magnetnim poljem (Schwenn, 2006).

4.1 Neregularne spremembe

Spremembe, ki se dogajajo na Soncu in niso regularne v smislu, da se posamični dogodki lahko predvidijo, so ponavadi zelo dramatične in vezane na eksplozivno aktivnost Sonca, najpogosteje v obdobju maksimuma Sončevega cikla (Goodman, 2005). Poznamo tri vrste neregularnih sprememb:

- **Koronalni izbruhi mase** CME so gromozanski oblaki plazme izvrženi iz korone Sonca v medplanetarni prostor. Odvisno od hitrosti in njene usmerjenosti energijski delci ioniziranega plina prispejo do Zemljine orbite v nekaj urah ali nekaj dneh in lahko sprožijo geomagnetne viharje,
- **Sončevi energijski delci** (*Solar Energetic Particles SEP*) so delci pospešeni do relativističnih hitrosti, izstreljeni ob velikih motnjah na Soncu, ki prispejo na Zemljo v nekaj minutah in lahko poškodujejo vesoljska plovila zunaj magnetosfere,
- **Sončevi blišči** (Flares) so izpusti EMV iz celotnega območja EM spektra, od žarkov gama do radijskega valovanja, ki prispejo do Zemlje najhitreje in povzročijo segrevanje visoke atmosfere Zemlje. Sončevi blišči so vzrok mnogim nenadnim ionsferskim motnjam (*Sudden Ionospheric Disturbances SID*). Učinek Sončevih bliščev je najprej opažen na motnjah telekomunikacijskih sistemov, kar je izdatno dokumentirano že v prvi polovici 20. stoletja.

4.2 Sončevi blišči

Sončevi blišči so bili vedno v ospredju pozornosti fizikalne skupnosti, ki se ukvarja z vesoljem. Zaradi njihove pomembnosti v povezavah Sonce-Zemlja, so Sončeve blišče redno opazovali od 70. let prejšnjega stoletja s SOLRAD satelitom in nato z GOES sateliti. Pretežno se razvijajo v bližini Sončevih peg in na območjih zvišanega sevanja v baklah. Še vedno ni dognan izvor energije, ki se sprošča med časom

Sončevih blišcev. Domneva se, da je to proces spontane ponovne vezave (rekonekcije) (reconnection) silnic Sončevega magnetnega polja, pri čem se energija polja prelevi v kinetično energijo delcev, kadar ta polja izginejo. Točen proces še ni znan, predpostavlja pa se, da se konverzija magnetne energije začne v nevtralni točki nad dvema Sončevima pegama različne polarnosti. S kolapsom magnetnega polja se energija delcev iz Sončeve kromosfere povečuje in delci se oddaljujejo od nevtralne točke vzdolž silnic magnetnega polja po vijačnih tirnicah. Elektroni emitirajo sinhrotronsko sevanje v območju radijskih valov. V trkih med elektroni in atomi gostejših plinov v kromosferi prihaja do pojanja in emisije zavornega sevanja na frekvencah trdih rentgenskih žarkov valovnih dolžin manjših od 0,1 nm v naraščajoči fazi Sončevega blišča in sevanja v območju EUV območja spektra tekom nadaljnjega razvoja Sončevega blišča. Istočasno protoni energij od nekaj 10 MeV v procesu *precipitacije* (sesedanja) v območju gostejših plinov lahko stimulirajo nuklearna sevanja s frekvencami, ki ustrezajo žarkom gama. Torej, posledica Sončevega blišča je EM sevanje, ki pokriva celotni spekter EMV (Goodman, 2005).

Celotna izpuščena energija med Sončevim bliščem se lahko razlikuje za več redov velikosti od 10^{19} J za majhne Sončeve blišče, do 10^{25} J za tiste najbolj energijske dogodke. Največji del energije sproščene s Sončevim bliščem je v obliki sevanja, nekaj energije pa se porabi za segrevanje in pospeševanje delcev. Sevanja različnih frekvenc imajo izvor v različnih območjih Sončeve atmosfere, pogojena so z lokacijo, na kateri se sproži Sončev blišč, in se emitirajo v različnih trenutkih procesa Sončevega blišča (Goodman, 2005).

Sončevi blišči se razvrščajo glede na tri osnovne karakteristike po velikosti površine na Soncu, ki jo zajemajo, po optični svetilnosti ali *sijaju* (brightness) bele svetlobe in po jakosti rentgenskega sevanja. Glede na dejstvo, da se ukvarjamo prav z detekcijo Sončevih blišcev v področju rentgenskega sevanja, pogledimo to klasifikacijo podrobneje, saj se kontinuirano uporablja od začetka regularnih opazovanj iz vesolja, torej od leta 1968 s SOLRAD satelitom. Zasnovana je na meritvah mehkega rentgenskega sevanja v področju 0,1-0,8 nm, ki jih opravljajo umerjeni instrumenti na geostacionarnih satelitih GOES in jih organizacija NOAA objavlja v realnem času (NOAA, 2009). Po jakosti v področju mehkega rentgenskega sevanja Sončeve blišče delimo na razrede A, B, C, M in X, od najnižjih do najvišjih jakosti. Jakost sevanja

ali gostota moči (gostota energijskega toka), imenovana tudi *iradianca*, je fizikalna količina, ki predstavlja moč EMV (energijo izsevano v enoti časa) po enoti površine (Goodman, 2005). SI enota za jakost je W/m^2 . Satelitski sistem GOES posreduje podatke za dve spektralni področji 0,1-0,5 nm in 0,1-0,8 nm, klasifikacija pa se opravlja na osnovi področja 0,1-0,8 nm (tabela 2).

Tabela 2: Klasifikacija Sončevih blišcev v področju rentgenskega sevanja
(Goodman, 2005, str. 51)

Razred Sončevega blišča	Gostota energijskega toka (W/m^2)
X	$I > 10^{-4}$
M	$10^{-5} < I < 10^{-4}$
C	$10^{-6} < I < 10^{-5}$
B	$10^{-7} < I < 10^{-6}$
A	$I < 10^{-7}$

Klasifikacija Sončevih blišcev, podana v tabeli 2, je tudi najbolj pomembna za povezavo Sončevih blišcev in njihovih učinkov v ionosferi. Poudarimo, da imajo samo Sončevi blišči razredov C, M in X merljiv učinek na zvišanje elektronske koncentracije nizke ionosfere in s tem povezane učinke SID (Goodman, 2005).

Znano je, da je nivo Sončeve aktivnosti izražen čez število Sončevih peg povezan s številom registriranih Sončevih blišcev (Goodman, 2005). Na splošno je število Sončevih blišcev NF , zabeleženih v času enega Sončevega obrata, sorazmerno s številom Sončevih peg in se prikaže s pol-empiričnim izrazom:

$$NF = a(n_p - 10), \quad (4.1)$$

kjer je n_p število Sončevih peg med časom 27 dnevne periode Sončeve rotacije, a je konstanta v območju 1,5-2. Za $n_p = 110$ (v okolici maksimuma Sončeve aktivnosti) število Sončevih blišcev med časom ene Sončeve rotacije znaša $NF \cong 200$, kar pomeni približno 7 Sončevih blišcev bi lahko zaznali dnevno (Goodman, 2005).

5 ZEMLJINO VESOLJSKO OKOLJE

5.1 Geomagnetno polje

Poreklo magnetnega polja Zemlje še do danes ni pojasnjeno, čeprav se domneva, da ga povzroča naravni dinamo mehanizem oziroma inducirani električni tokovi v Zemljinem jedru pri rotacijskem gibanju fluida in kot posledica različnih transportnih lastnosti fluida kot so električna prevodnost, magnetna susceptibilnost in toplotna prevodnost. Lahko se povzame, da Zemlja deluje kot simetrično namagnetena krogla, v katero prodira in jo obdaja magnetno polje gostote približno $6 \cdot 10^4$ nT takšne usmerjenosti in porazdelitve velikosti, kakor da bi se v središču Zemlje nahajal močan paličasti magnet (Moldwin, 2008). Prostor, v katerem magnetno polje deluje na električno nabite delce Zemljinega okolja, predstavlja magnetosfero, ki bi imela pravilno obliko magnetnega dipola, če bi bila Zemlja enakomerno in simetrično namagnetena in če ne bi bilo nobenih zunanjih vplivov (Pulkkinen, 2007).

Os magnetnih polov je odklonjena za 7° glede na os geografskih polov in poteka na razdalji od nekaj sto kilometrov od središča Zemlje, kar pomeni, da Zemlja ni ne uniformno, ne simetrično namagnetena krogla. Zaradi interakcije z zamrznjenim magnetnim poljem električno nabitih delcev Sončevega vetra in s kozmičnim sevanjem, se silnice magnetnega polja Zemlje deformirajo in je magnetosfera stisnjena s strani obrnjene k Soncu in razpotegnjena v tako imenovani *magnetni rep* (odprt iztegnjen rep) (magnetotail) z nasprotne strani, ki ni osvetljena s Soncem. Magnetni rep se razširja več milijonov kilometrov vzdolž tirnice Sončevega vetra sestavljen iz dveh polovic (režnjev) (lobes), vmesne nevtralne plasti (neutralsheet) in seže prek tirnice Lune. Zaradi dnevne rotacije okrog lastne osi in rotacije okrog Sonca, magnetno polje trpi znatne deformacije. Proces, ki se dogajajo v notranjosti Zemlje, prispevajo $\sim 90\%$ k tvorbi magnetnega polja Zemlje. Ostalih 10% prispevajo Sončevo EMV, visokoenergijski delci, kozmično sevanje in magnetične kamnine v Zemljini skorji (Pulkkinen, 2007).

5.2 Magnetosfera Zemlje

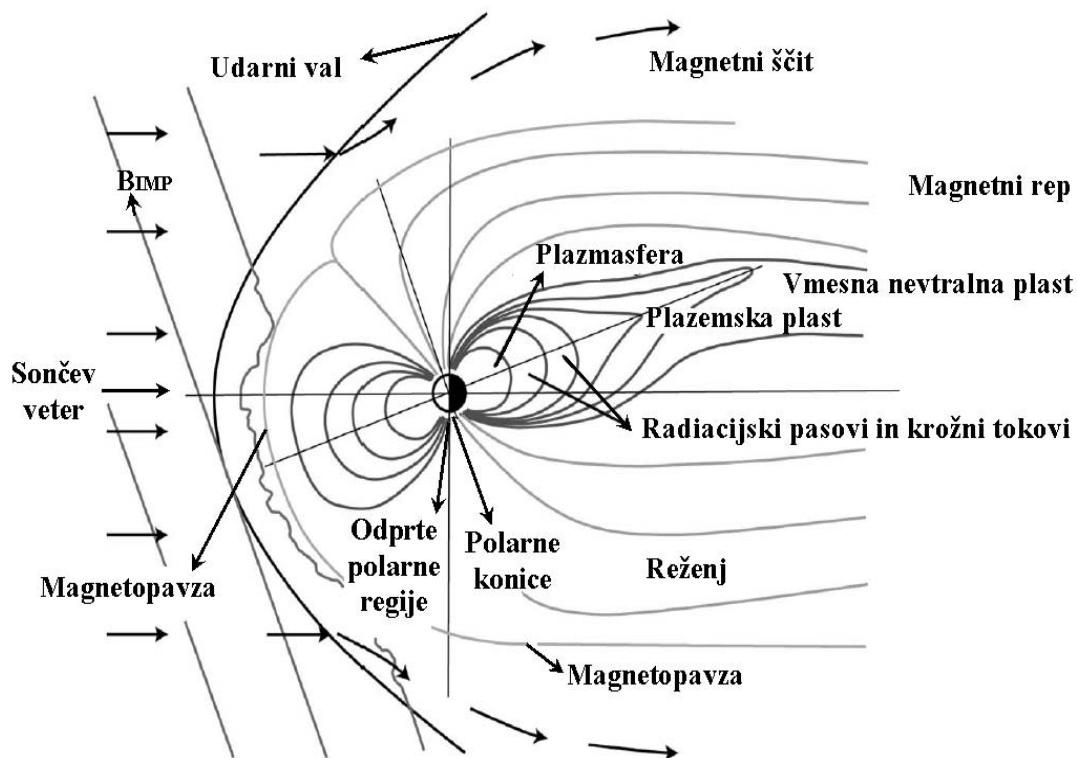
Magnetosfero definiramo kot območje zunanjega Zemljinega plašča, kjer je gibanje električno nabitih delcev v prevladujoči meri določeno z geomagnetnim poljem. To

izhaja iz dejstva, da je v magnetosferi gostota energije magnetnega polja večja od gostote kinetične energije plazemskih delcev, kar prikazuje enačba:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} \geq nk_B T, \quad (5.1)$$

kjer je B gostota magnetnega polja, μ_0 magnetna permeabilnost vakuumu ($1,256 \cdot 10^{-6}$ H/m), n število delcev na volumsko enoto, k_B Boltzmannova konstanta ($1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K), T absolutna temperatura (Pulkkinen, 2007).

Obliko in strukturo magnetosfere v glavnem določa interakcija geomagnetnega polja z IMP. IMP je rezultatno magnetno polje energijskih delcev, ki neprestano prihajajo s Sonca, se ne spreminja v medplanetarnem prostoru in, ker ga nosijo energijski delci, se slikovito opiše kot *zamrznjeno*. Ker se aktivnost Sonca nenehno spreminja, se magnetosfera spreminja dnevno in urno (Pulkkinen, 2007). Meridionalen presek magnetosfere je podan na sliki 4.



Slika 4: Zemljina magnetosfera prikazana v ekvatorialni in poldan-polnoč ravnini (Moldwin, 2008, str. 52)

Mejno območje debeline približno 1 km med geomagnetnim poljem in vpadnim Sončevim vetrom se imenuje magnetopavza (magnetopause). Tu sta tlak magnetnega polja in tlak Sončevega vetra izenačena. Silnice geomagnetnega polja so močno deformirane. S satelitskimi opaznanji je ugotovljeno, da v tem območju hitro upada gostota magnetnega polja. Območje udarnega vala (bow shock) se oblikuje na razdalji od $\sim 15 R_E$ (radijev Zemlje) od Zemlje proti Soncu. Večina energijskih delcev Sončevega vetra se uklanja (odklanja) od območja udarnega vala in odhaja v medplanetarni prostor. Lega območja udarnega vala je odvisna od Sončeve aktivnosti: približa se Zemlji pri večjih hitrostih Sončevega vetra in oddaljuje pri manjših (Moldwin, 2008).

Območje med udarnim valom in magnetopavzo, kjer se delci plazme gibljejo naključno brez vpliva magnetnega polja, se imenuje magnetni ščit (magnetosheath). Teorija predvideva in eksperiment potrjuje, da obstajajo točke v magnetopavzi, kjer konfiguracija magnetnih silnic pripelje do izničenja resultantnega magnetnega polja. V teh točkah vse magnetne silnice polja magnetopavze konvergirajo v dva geomagnetna pola Zemlje (Moldwin, 2008).

Ozka območja med magnetopavzo in Zemljo, omejena s konvergentnimi geomagnetnimi silnicami, se imenujejo polarne konice (polar cusps). Skozi polarne konice energijski delci Sončevega vetra iz magnetnega ščita neposredno prihajajo v magnetosfero in močno vplivajo na procese v ionosferi na visokih zemljepisnih širinah. Prodor delcev se dogaja v prostoru, ki pokriva obseg od 5° okrog polov Zemlje. Ti delci povzročijo pojav *ovala polarne sija*. Čez polarne konice se magnetopavza spušča do Zemljinega površja (Moldwin, 2008). Geomagnetno polje drži skupaj nekaj različnih populacij nabitih delcev:

- Globoko znotraj magnetosfere se nahaja območje plazmasfere (plasmisphere): *notranja magnetosfera*, ki skozi različne procese vstopa v medsebojno delovanje s srednje širinsko ionosfero. Plazmasfera vsebuje elektrone, protone in ione večje mase,
- Na zaprtih silnicah geomagnetnega polja obstajajo ujeti visokoenergijski delci, ki formirajo Van Allenove radiacijske pasove. Kadar zapustijo območje

ujetosti, prihaja do njihove precipitacije (sesedanja) v atmosferi, kjer prispevajo k višanju stopnje ionizacije,

- Znotraj magnetnega repa se nahaja plazemska plast (plasma sheet), ki vsebuje visokoenergijske elektrone. Ti elektroni povzročajo pojave polarnega sija in ostale spremembe visoko širinske ionosfere. Njihove energije imajo vrednosti med energijami delcev v Van Allenovih radiacijskih pasovih in v plazmasferi.

Splošno je sprejeto, da se v magnetosferi za enoto dolžine uporablja radij Zemlje R_E . Določeno silnico geomagnetnega polja zaznamuje tako imenovan *McIlwainov parameter* L , ki je količnik R_{eq}/R_E , kjer je R_{eq} geocentrična razdalja določene silnice geomagnetnega polja v ekvatorialni ravnini (Rozelot, 2006). Plazmasfera je območje plazme nad ionosfero, znotraj katere so silnice geomagnetnega polja nedeformirane in podobne tistim v bližini magnetnega dipola. Koncentracija ionov lahko doseže vrednosti do 10^6 m^{-3} na višinah od $\sim 12000 \text{ km}$ in več. Zunanja meja plazmasfere, od katere koncentracija nabitih delcev upada za več redov velikosti, se imenuje plazmapavza (plasma pause). Hiter upad koncentracije se dogaja vzdolž magnetnih silnic z ekvatorialno projekcijo med $L \sim 4$ in $L \sim 7$. Lega plazmapavze je odvisna od lokalnega časa in motenj magnetosfere (Pulkkinen, 2007).

5.3 Van Allenovi radiacijski pasovi

Van Allenovi radiacijski pasovi tvorijo ločeno območje magnetosfere, v katerem se nabiti visokoenergijski delci kinetičnih energij ($E_k > 30 \text{ keV}$) gibljejo po helikoidalnih tirnicah okrog silnic geomagnetnega polja, v katere so ujeti. Gibanje je posledica delovanja Lorentzove sile v stacionarnem magnetnem polju Zemlje (Rozelot, 2006). Kot, ki ga vektor hitrosti delca oklepa z vektorjem \mathbf{B} , se imenuje naklonski kot α (pitch angle). Notranji pas se razširja od 400 km višine nad Zemljo do 1200 km ekvatorialne oddaljenosti. Zunanji pas se razširja do 60000 km v ekvatorialni ravnini. Na delec z naklonskim kotom α v ekvatorialni ravnini deluje magnetno polje gostote B_{eq} . Delec sledi magnetni silnici in pride v območje, kjer ima magnetno polje vrednost B_m . Če je:

$$\sin \alpha \geq \sqrt{\left(\frac{B_{eq}}{B_m}\right)}, \quad (5.2)$$

se delec ustavi, ker je dosegel odbojno točko in se nato vrača po enaki poti do odbojne točke na drugi hemisferi. Lega odbojne točke ni odvisna od vrste delca in njegove energije, ampak samo od naklonskega kota in konfiguracije geomagnetnega polja. Delci, ki imajo hitrosti usmerjene tako, da je ($\alpha < \alpha_*$), niso ujeti v magnetnem polju. Vse smeri gibanja ($\alpha < \alpha_*$) tvorijo konus izgub (loss cone). Dodatno zaradi nehomogenosti geomagnetnega polja se vijačnica delca (center ciklotronske rotacije delca) počasi premika z ene magnetne silnice na drugo, pravokotno na magnetno polje *usmerjeno gibanje*, proti zahodu se premikajo pozitivno nabiti delci (protoni in ioni) in proti vzhodu elektroni. Na ta način se sproži električni *krožni tok* (ring current) in formira se toroidalna oblika pasov, v katerih so ujeti delci. Visokoenergijski delci v naravnih radiacijskih pasovih so različnega izvora. Delci v notranjem pasu so posledica SEP ali CME. Delci v zunanem pasu izvirajo iz Sončevega vetra in plazme ionosfere (Pulkkinen, 2007).

Magnetna polja in električni tok so fundamentalno povezani skozi Biot-Savartov zakon. Dejstvo, da imamo plazmo in električna polja, omogoča vzpostavljanje sistemov električnega toka v različnih območjih magnetosfere. Tukaj omenimo le tako imenovani krožni tok, ki se oblikuje v območju Van Allenovih radiacijskih pasov in je posledica ločevanja pozitivno in negativno nabitih delcev pri njihovem *usmerjenem gibanju* pravokotno na magnetne silnice v nasprotnih smereh glede na naboj, ionov proti zahodu in elektronov proti vzhodu. Krožni tok poteka okrog Zemlje v smeri od vzhoda proti zahodu na razdaljah $4 R_E$ do $6 R_E$ tako, da njegovo magnetno polje oslabi geomagnetno polje. Slabljenje geomagnetnega polja, vezano na geomagnetne viharje, povzroča krožni tok. Magnetometri na Zemlji zaznajo upadanje geomagnetnega polja, ko se krožni tok poveča. Zmanjšanje (depresija) magnetnega polja na površju od ~ 30 nT se lahko pojasni z generacijo krožnega toka od 10^6 A na geocentrični razdalji $4,5 R_E$ (Hargreaves, 1992).

5.4 Interakcija Sončev veter-magnetosfera

Interakcija EMV in tokov energijskih delcev s Sonca z ioniziranim okoljem geoprostora pripelje v pogojih ojačane Sončeve aktivnosti do motenj magnetosfere Zemlje, tako imenovanih *geomagnetnih viharjev*, in naprej s spremembo plazemskih parametrov geoprostora do *ionosferskih viharjev* (Pulkkinen, 2007).

EM sevanje ni v direktni interakciji z geomagnetnim poljem, ampak Sončevi blišči fotoionizirajo konstituente atmosfere v področju rentgenskega sevanja. To povzroči absorpcijo energije radijskih valov v nižji ionosferi na osončeni strani Zemlje. Z viharjem pognani Sončevi protoni, ki so odklonjeni v smeri Zemljinih polarnih območij, lahko sprožijo absorpcijo energije radijskih valov v območju polarnih kap (*Polar Cap Absorption PCA*). PCA lahko pripelje do poškodb letal pri poletih čez polarna območja (NOAA, 2009).

Sončev veter nizkih hitrosti, ki prehaja skozi magnetopavzo, ne moti topologije magnetosfere. Kot odsev mirnih in regularnih pogojev okrog geomagnetnih polov obstajajo mesta precipitacije (sesedanja) SEP, ki vzbujajo konstituente atmosfere. Eden od učinkov je svetlobno sevanje pri deekscitaciji konstituentov atmosfere, znano kot oval polarnega sija. Ob visoki aktivnosti Sončevih peg Sončev veter velikih hitrosti, ki se sproža istočasno kot Sončevi blišči, iz aktivnih območij na Soncu moti meje magnetosfere in plazemske ovojnice znotraj magnetnega repa. S tem se poveča verjetnost aktivnosti ovala polarnega sija, razširitve in preboja ovala polarnega sija zaradi spremembe konfiguracije magnetnega in električnega polja v okolici polov. Danes je sprejeta razlaga, da se pojav polarnega sija *aurore* (vidnega, infrardečega, pulzirajočega) sproži kot odsev geomagnetnih podviharjev polarnega sija oziroma geomagnetnih viharjev (Pulkkinen, 2007).

Pojav in širitev koronalnih lukenj skupaj z izbruhi koronalne mase ali CME so glavni vir Sončevega vetra velikih hitrosti. Koronalne luknje so lahko minljive, toda pogosto imajo dolgo življenjsko dobo in se pojavijo tudi v času minimuma Sončevega cikla. To pojasnjuje ionsferske motnje tudi v odsotnosti kakršnekoli Sončeve aktivnosti, ki bi bila določena s številom Sončevih peg (Pulkkinen, 2007).

Pojem geomagnetnega podviharja se veže za motnje magnetnega polja v območju ovala polarnega sija kot posebnost splošnega bolj razširjenega geomagnetnega viharja. Odločilni dejavnik v nastajanju energije geomagnetnega podviharja je orientacija medplanetarnega magnetnega polja IMP vzdolž osi dipola magnetnega polja Zemlje, saj namreč magnetopavza ni popolna zapora za Sončev veter. Topologija polja magnetosfere je določena z medsebojno ponovno vezavo (reconnection) z IMP (Pulkkinen, 2007).

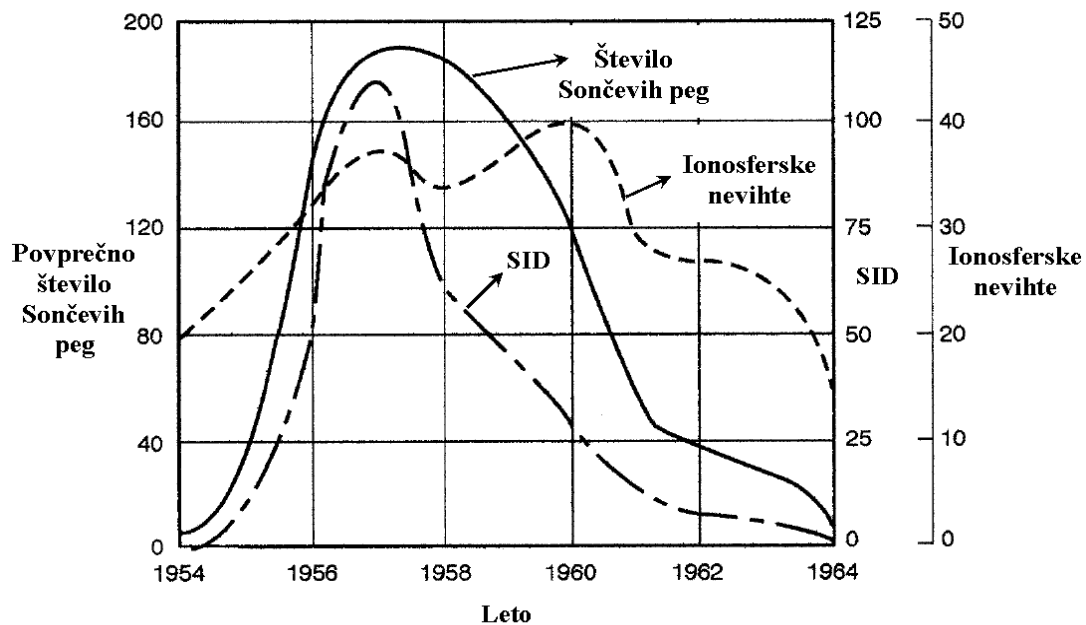
IMP usmerjeno proti severu, paralelno Zemljinemu dipolnemu polju v ekvatorialni ravnini proizvaja zaprto magnetosfero. Sončev veter obteka magnetosfero podobno kot viskozni fluid trdno oviro v toku. Izmenjava energije in energijskih delcev čez magnetopavzo je minimalna. Južno usmerjeno IMP, nasprotno paralelno Zemljinemu dipolnemu polju v ekvatorialni ravnini, proizvaja odprto magnetno konfiguracijo s poljem polarnih regij povezanim z IMP. V tem primeru imajo energijsko nabiti delci iz medplanetarnega prostora dostop do polarnih regij vzdolž silnic medplanetarnega polja. Električno polje, povezano s konvekcijo Sončevega vetra, prodre vzdolž odprtih magnetnih silnic v polarna območja in poganja močno magnetosfersko in ionosfersko cirkulacijo (Pulkkinen, 2007).

Fluks silnic geomagnetnega polja je usmerjen od dnevne k nočni strani magnetosfere, kar zvišuje potencialno energijo sistema. Druga povezava magnetnih polj v magnetnem repu povrne odprte magnetne silnice nazaj v njihovo *originalno* zaprto stanje tako, da celotno magnetno polje Zemlje ni trajno odprto zaradi ponovne vezave (rekonekcije) na dnevni strani (Pulkkinen, 2007).

Kadar se odprte magnetne silnice v magnetnem repu ponovno povežejo (rekonekcija), omejujejo zaprto plazemsko območje (trapping region) proti Zemlji. Gostota energije magnetnega polja v tako omejenem prostoru močno narašča. Nakopičena energija se sprošča z izstreljevanjem energijskih delcev vzdolž magnetnih silnic dipolne konfiguracije proti Zemljinemu polarnemu območju. Na ta način se sistem povrne v ravnovesno stanje. Proces spremlja pojav severnega polarnega sija (Aurore Borealis) v severnih polarnih območjih in pojav južnega polarnega sija (Aurore Australis) v južnih polarnih območjih. V primeru zelo močnih geomagnetnih podviharjev se aktivnost polarnega sija spusti tudi do osrednjih zemljepisnih širin. Podviharji se pojavljajo v zaporedju, ki sledi fluktuacijam južno usmerjene komponente IMP. Fluktuacije so posledica spremenljive dinamike združevanja magnetnih silnic IMP s silnicami geomagnetnega polja na dnevni in nočni strani Zemlje. Geomagnetni vihar je rezultat superpozicije geomagnetnih podviharjev v zaporedju (Pulkkinen, 2007). Pri opažanju geomagnetnega viharja v celoti se lahko razločita dve obliki sprememb:

- Začetna pozitivna faza kratke življenjske dobe, v kateri se zvišuje horizontalna komponenta magnetnega polja, ki jo spremlja kratkotrajni polarni sij,
- Glavna negativna faza, ki lahko traja nekaj dni, v katerih intenziteta horizontalne komponente doseže izrazit minimum.

Z začetno fazo je povezano kratkotrajno povečanje koncentracije elektronov v ionosferi, medtem ko v obdobju glavne faze prihaja do značilnega upadanja koncentracije elektronov v ionosferi. Takšne spremembe v ionosferi imenujemo *ionosferske nevihte*. Potrebno je omeniti, da ionosferski odziv na geomagnetne nevihte ni vedno enak. Obstajajo razlike v odzivu glede na zemljepisno širino in tudi odvisnosti od sezonskih pogojev in letnih časov (Moldwin, 2008). O povezavah med omenjenimi pojavi najboljše pričajo meritve. Slika 5 vzporedno prikaže spremembe števila Sončevih peg, Sončevih bliščev, rentgenskih žarkov (skozi zabeležene efekte SID) in zaznanih ionosferskih neviht tekom 19. Sončevega cikla. Opaža se, da ne obstaja direktna povezava med številom Sončevih peg in ionosferskim odzivom. Pri Sončevih bliščih (ki so del SID) je povezanost bolj očitna, kar nakazuje, da so slednji pogosti spremljevalci CME (Goodman, 2005).



Slika 5: Primerjava števila Sončevih peg, ionosferskih neviht in SID v obdobju 19. Sončevega cikla (leta 1954-1964) (Goodman, 2005, str. 52)

6 IONOSFERA ZEMLJE

Ionosfera je ionizirani del zgornje atmosfere Zemlje. Definira se tudi kot območje atmosfere, kjer nabiti delci elektroni obstajajo v dovolj velikem številu, da vplivajo na razširjanje radijskih valov (Goodman, 2005).

Po splošno sprejetem soglasju ionosfera leži v razponu višin 60-1000 km. Ionosfera ima lastnosti šibko ionizirane, nizko temperaturne plazme. Sestavni deli ionosfere so enkrat ionizirani ioni tako, da se v ionosferi nahaja približno enako število prostih elektronov in pozitivnih ionov. Koncentracija elektronov in temperatura sta parametra, ki zaznamujeta stanje ionosfere in določata pojave v njej. Na porazdelitev ioniziranih sestavin ionosfere po višini in po območjih vpliva magnetno polje Zemlje (Goodman, 2005). Odvisnost koncentracije elektronov od višine z v ionosferi se prikaže čez *profil* koncentracije $N(z)$, ki se spreminja s časom in z višino. Čeprav opažanja kažejo na zapletenost te odvisnosti, za dojetanje osnovnih značilnosti ionosfere lahko ustvarimo poenostavljeno sliko. Ionosfero delimo na horizontalne plasti z določeno minimalno koncentracijo na spodnji meji. Znano je, da se profil koncentracije elektronov spreminja dnevno, tekom 24 ur, in v odvisnosti od Sončeve aktivnosti (Hargreaves, 1992).

Kot ioniziran (prevodni) medij v magnetnem polju z nevtralno atmosfero v ozadju, ionosfera podpira razširjanje radijskega valovanja. Anizotropna in nehomogena struktura ionosfere povzroča množico učinkov, ki spremljajo propagiranje valovanja: odboj, lom, disperzijo, sipanje, uklon, zvečanje fazne poti, absorpcijo, Dopplerjev premik, Faradayevo rotacijo (NOAA, 2009).

S stališča razširjanja radijskih valov, dnevno ionosfero tvorijo tri refraktivne (lomne) plasti: plast E, plast F1 in plast F2. Ionosfera ima tudi (absorpcijsko) območje, ki se imenuje plast D, v kateri se absorbirajo kratki valovi. Območje D se razširja od 50 km nad Zemljo do spodnje meje območja E. Nominalna višina maksimalne stopnje ionizacije posameznih plasti je: območje D-60 km, območje E s sporadično plastjo Es-100 km, plast F1-200 km in plast F2-300 km. Medtem se lahko pojavijo značilna odstopanja, še posebej v primeru plasti F. Čez noč plasti E in F1 izgine zaradi procesa rekombinacije, ki ni kompenziran s fotoionizacijskimi procesi po prekinitvi osončenosti. Po prekinitvi insolacije elektronska koncentracija plasti F2 upada skozi

proces *pripajanja* (attachment) elektronov ionom, ampak ker so preseki za proces relativno majhni, se plast vzdržuje tudi ponoči. Na splošno je stopnja ionizacije ionosfere večja čez dan (Goodman, 2005).

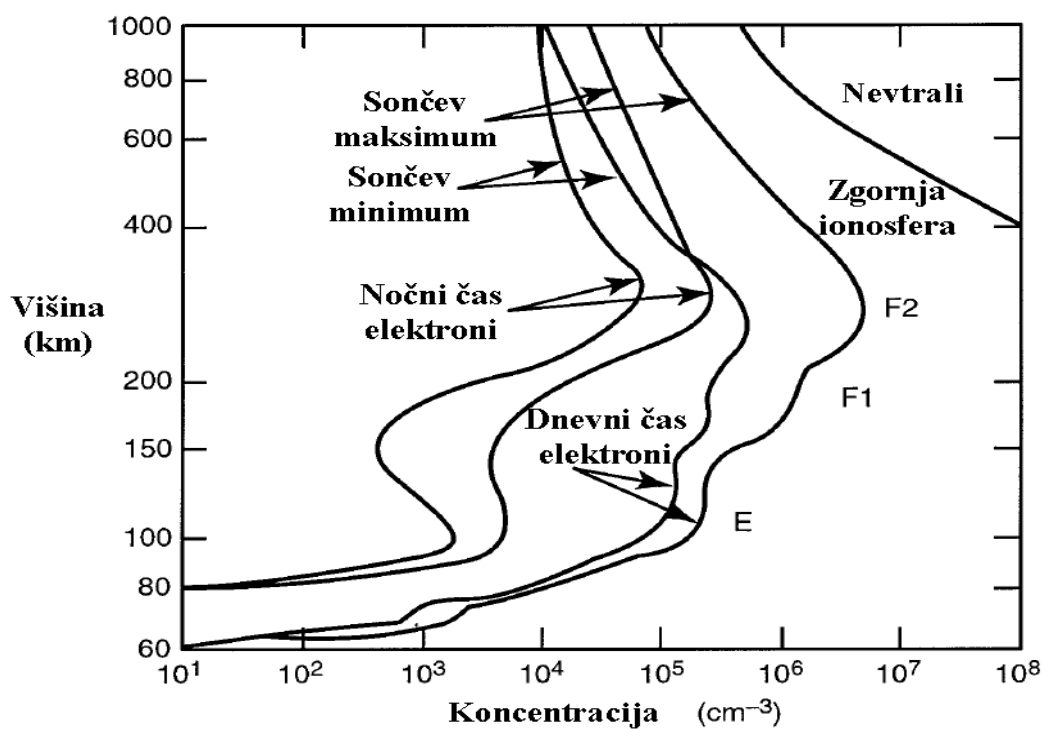
Atmosfera tvorijo troposfera (0-10 km), stratosfera (10-45 km), mezosfera (45-90 km), termosfera (95-500 km) in egzosfera (> 500 km). Molekule N_2 in O_2 naseljujejo nižjo atmosfero kot prevladujoče sestavine, čeprav je prisotnost vodne pare, CO_2 in NO tudi pomembna za procese, ki potekajo v tem območju. V višji atmosferi pod vplivom Sončevega sevanja prihaja do fotodisociacije molekul na atomarne komponente (Goodman, 2005).

Razpon ionosferske plasti D se nahaja v mezosferi. Zaščitni ozonski plašč leži znotraj stratosfere. Pod 200 km višine prevladujejo težje molekule, kar je ugodno za procese rekombinacije in vpliva na življenjsko dobo ion-elektronskih parov. Med 200-600 km v območju F prevladuje atomarni kisik. Z večanjem višine nastopa območje, kjer prevladuje vodik, to je že *protonosfera* (1000-2000 km), tako imenovana zaradi prisotnosti vodikovih ionov-protonov (Goodman, 2005).

Naseljenost s prostimi elektroni in ioni se močno poveča na višini približno 100 km (osrednja višina plasti E). Na tej višini se sprememba profila koncentracije odvija čez dva mehanizma. Prvi je fotodisociacija molekul kisika čez absorpcijo UV sevanja. Turbulentna gibanja, ki so zelo učinkovita pod 100 km višine, hitro pojemajo, tako da se to območje imenuje turbopavza. Proces fotodisociacije je tako učinkovit, da se nad 200 km lahko govori o porazdelitvi atomarnega plina po višini. Nad turbopavzo trki med posameznimi sestavinami atmosfere, ki so dominantni v nizki ionosferi, pojenjajo in je osnovni mehanizem pri porazdelitvi ionov difuzija. V protonosferi skoraj ni trkov, ki bi vplivali na profil koncentracije elektronov. Na teh višinah (800-2000 km) je gibanje delcev že določeno s konfiguracijo magnetnega polja Zemlje in tokovnih sistemov, tako da se ta del geoprostora že uvršča v Zemlji najbližje območje magnetosfere in plazmasfere (Goodman, 2005).

Porazdelitev koncentracije elektronov v ionosferi in protonosferi je spremenljiva. Med območjema tudi ni ostre meje in je le-ta odvisna od dejavnikov, kot so doba dneva, letni čas in Sončeva aktivnost. Poudarimo, da je ionosferska plazma šibko ionizirana: koncentracija nevtralov je za nekoliko redov velikosti večja od

koncentracije ionov, celo na višinah maksimalne stopnje ionizacije posameznih plasti (Goodman, 2005). Tekom nočnih ur nastane izrazit upad stopnje ionizacije med območjem E in F, še posebej opazen v obdobju minimuma Sončevega cikla, kot je prikazano na sliki 6.



Slika 6: Profili dnevne in nočne koncentracije elektronov na srednjih zemljepisnih širinah v pogojih minimuma in maksimuma Sončevega cikla (Goodman, 2005, str. 86)

V tabeli 3 so povzete plasti ionosfere, razponi višin, glavne sestavine in mehanizmi njihovega nastajanja.

Tabela 3: Karakteristike plasti ionosfere
(Goodman, 2005, str. 88)

Območje	Višinski razpon (km)	Razpon N_{\max} maksimalne koncentracije elektronov (m^{-3})	Elektronska plazemska frekvenca (MHz)	Poglavitna sestava	Osnovni procesi za tvorbo območja
D	70-90	10^8-10^9		O_2^+ , NO^+	Lyman α in rentgensko sevanje.
E	90-130	$\sim 10^{11}$ (dan) $\sim 10^{10}$ (noč) Enakomerna dnevna variacija.	~ 3 (dan) $\sim 0,30$ (noč)	O_2^+ , NO^+	Rentgensko sevanje.
Es	90-130	$\sim 10^{12}$ Visoka variacija.		Ioni kovin.	Sončev veter, mikrometeoriti, ekvatorialni in elektrocurki polarnega sija.
F1	130-210	$\sim 2 \cdot 10^{11}$ (dan) ~ 0 (noč) Enakomerna dnevna variacija.	$\sim 3-6$ (dan) Plast spojena z F2 plastjo čez noč.	O^+ , NO^+	UV sevanje.
F2	200-1000	$\sim 10^{12}$ (dan) $\sim 2 \cdot 10^{11}$ (noč) Asimetrična dnevna variacija.	$\sim 5-15$ (dan) $\sim 3-6$ (noč) Minimum pred Sončevim vzhodom.	O^+	Dvigajoča difuzija iz plasti F1 in ionizacija.

Meritve, osnovane na vertikalnem in poševnem zaznavanju ionosfere s sondami na Zemlji, so podale množico podatkov o strukturi ionosfere. Preko učinkov interakcije radijskih valov z ionosferskimi plastmi posamezni ionosferski observatoriji pridobivajo podatke o vertikalni porazdelitvi koncentracije elektronov do višine maksimuma plasti F2 (300-400 km). Mreža ionosferskih observatorijev po celem svetu je omogočila izdelavo kart ionosferskih parametrov skoraj za celotno Zemljo. Mejne zmogljivosti teh meritev se opažajo pri nezadostnem opisu upada koncentracije na meji med plastmi E in F. Tudi ni dovolj podatkov nad oceanskimi območji. Zaznavanje ionosfere navzdol s sateliti in z *in situ* raketnimi meritvami nad oceani je to nepopolnost delno odpravilo. Raziskave z nekoherentnim radarskim sipanjem (*Incoherent Scatter Radar ISR*) in *sipanjem nazaj* (backscatter) so močno pripomogle k natančnejšemu določanju profila koncentracije in temperature elektronov v termosferi (Pulkkinen, 2007).

Razvoj satelitskih tehnologij je omogočil meritve elektronske koncentracije vzdolž poti satelitskega signala na osnovi pojava Faradayeve rotacije ravnine polarizacije signala in preračuna na vertikalni profil skupne vsebine elektronov (*Total Electron Content TEC*). V ta namen se uporabljajo signali frekvenc 1,2 GHz in 1,5 GHz satelitskih sistemov GPS, ki krožijo na višini ~ 20000 km nad Zemljo in od nedavno tudi novi evropski sistem *Galileo*. Obsežne podatkovne baze in rezultati dolgoročnih teoretičnih raziskav so omogočili, da se pridobi približno dobra slika o formiranju in lastnostih tako mirne visoke ionosfere kot tudi ionosferskih motenj izzvanih z motnjami IMP in vpadom visokoenergijskega sevanja s Sonca (NOAA, 2009).

6.1 Plast D

Iz tabele 3 je razvidno, da se območje D nahaja med 70-90 km višine, toda kot vsi podatki, ki se nanašajo na povezave Sonce-Zemlja, so tudi ti le približni in niso natančno določeni. Obstaja več virov ionizacije, ki prispevajo k porazdelitvi elektronov v tem območju. Vpad visokoenergijskih delcev Sončevega vetra tudi povzroča ionizacijo območja D, predvsem pri visokih geomagnetnih širinah. Pri motnjah, povzročenih z močno aktivnostjo Sonca, se vpliv občuti tudi v območju D na osrednjih geomagnetnih širinah. Pod 50 km višine ionizacijo proizvajajo galaktični kozmični žarki (Goodman, 2005).

V območju D se največji del energije kratkovalovnih (1-100 MHz) signalov, ki se prenašajo čez višje plasti ionosfere, absorbira. Raven absorpcije v plasti D je značilen podatek za določanje najvišje uporabne frekvence (*Maximum Usable Frequency MUF*), ki se uporablja za razširjanje radijskih valov na določeni trasi (NOAA, 2009). Metoda vertikalnega in poševnega zaznavanja ni ustrezna za območje D zaradi relativno nizke koncentracije elektronov. To je vzrok, da je območje D nezadostno preučeno glede na ostala območja ionosfere, čeprav je najbližje Zemlji. Podatki dostopni za določanje profila koncentracije elektronov v območju D zadostujejo samo za grobi oris v primerjavi z informacijami pridobljenimi z radijskimi diagnostičnimi metodami, ki so na voljo za območja E in F (Goodman, 2005).

Zato je modeliranje območja D na osnovi aeronomskih raziskav, ki zajemajo tako rezultate *in situ* meritev kot teorijske obravnave številnih interakcij nevtralov in ionov, še vedno težavno. *In situ* meritve na primer, raketni poskusi so časovno omejeni in zelo dragi (Žigman in drugi, 2007). Teoretični pristop k preučevanju približno sto vrst interakcij ionov in nevtralov kot tudi interakcija val-delec zahteva dobro poznavanje kvantno mehanskih presekov za posamezne interakcije in zahteva zapleten matematični aparat.

Z druge strani območje D podpira razširjanje valov dolgih valovnih dolžin, oziroma nizkih frekvenc (*Low Frequency LF*) (30-300 kHz), zelo nizkih frekvenc VLF (3-30 kHz) in izjemno nizkih frekvenc (*Extra Low Frequency ELF*) reda 1 kHz in nižje. Območje D kot medij za razširjanje valovanj uporabljajo zanesljivi navigacijski in raziskovalni sistemi. Mehanizem radijskega propagiranja izklicno v območjih spektra LF, VLF in ELF je zasnovan na valovodu Zemlja-ionosfera (Žigman in drugi, 2007). Prav ta značilnost območja D se uporablja za zaznavanje Sončevih blišcev, kot je prikazano v diplomskem delu.

7 VPLIVI VESOLJSKEGA VREMENA NA TEHNOLOŠKE SISTEME

Dinamični procesi, ki izvirajo iz povezave med Sončevim vetrom, magnetosfero in ionosfero, lahko imajo pomembne posledice na okolje v bližini Zemlje, atmosfero in Zemljino površje *litosfero* (Pulkkinen, 2007).

V sodobni družbi smo razvili odvisnost od visokotehnoloških sistemov, ki so ranljivi za EM motnje in visokoenergijske delce. Razumevanje medsebojnega delovanja tehnološke infrastrukture in vesoljskega vremena je pomembno za projektiranje novih in vzdrževanje že obstoječih tehnoloških sistemov (Graham, 2008). V tem poglavju smo na kratko prikazali osnovne vplive na tehnološko infrastrukturo v Zemljinem vesoljskem okolju in na Zemlji.

7.1 Vplivi na vesoljsko tehnologijo

Nekateri vplivi visokoenergijskih delcev in sevanja povzročajo napake v delovanju vesoljskih tehnoloških sistemov, ki se razlikujejo glede na tip orbite satelita in njegovo umeščenost v heliosferi in magnetosferi. Vplivi škodujejo tudi astronautom (Pulkkinen, 2007). Da bi ublažili ali celo odpravili negativne vplive vesoljskega okolja, pri snovanju vesoljskih plovil iščemo ravnovesje med robustnostjo, težo, stroški izdelave, izstrelitve in utirjenja satelita. Novi modeli imajo lažjo in učinkovitejšo zaščito in močnejše izhodne signale (Daglis, 2004).

Sateliti so razvrščeni v skupine glede na značilnosti tirnice. Sateliti v nizko krožni zemeljski tirnici (*Low Earth Orbit LEO*, 850-2000 km nad Zemljo) so najbolj občutljivi na atmosfersko trenje, ki se močno zveča ob zvišani geomagnetni aktivnosti in segrevanju atmosfere (Matko, 1996). Opremljeni so z lastnim pogonom za dvig orbitalne višine. Sateliti v visoki eliptični tirnici (*High Elliptical Orbit HEO*) in v geostacionarni krožni tirnici (*Geostationary Earth Orbit GEO*) so izpostavljeni škodljivim vplivom energijskih delcev.

Sateliti HEO in GEO so izpostavljeni drugim škodljivim vplivom visokoenergijskih delcev. GEO so skoraj vedno zaščiteni z magnetosfero, razen ob kompresijskem premiku magnetopavze proti Zemlji do razdalje $4 R_E$ (Moldwin, 2008). Normalna višina Mednarodne vesoljske postaje (*International Space Station ISS*) je 280-460

km. NASA je ugotovila, da med maksimumom Sončevega cikla ISS izgublja 400 m/dan, 147 km/leto. Med Sončevim minimumom pa je izguba samo 80 m/dan, 28 km/leto (Moldwin, 2008).

Površine različnih materialov izpostavljenih vesoljskemu okolju se zaradi vpadnih energijskih delcev, sekundarnih fotoelektronov in izbitih elektronov nabijejo z negativnim potencialom glede na okoliško plazmo, kar privede do tokovnega neravnovesja in razelektritve (Scherer in drugi, 2005).

Predvsem v zunanjem Van Allenovem radiacijskem pasu globoko dielektrično naelektritev povzročajo visokoenergijski relativistični elektroni, ki prodrejo zaščito in kopičijo negativno elektrino (naboj) v dielektrikih. Čas trajanja izpostavljenosti in intenziteta toka energijskih delcev določata vrednost presežka akumuliranega naboja, dviga razlike potencialov, kar vodi do razelektritve. Razelektritve so škodljive in povzročajo visoke tokovne impulze s časom nekaj mikrosekund. Razelektritve in nenadni prehodni porasti napetosti in tokov so vzrok za napačen tokovni preklop, napačen ukaz, spremembe prevodnosti, termičnih in kemičnih lastnosti materialov, segrevanje plašča, napake v delovanju sončnih celic, senzorjih, pogonskih in energijskih sistemih. To lahko pripelje do spremembe ali izgube spomina na računalniških komponentah ali pa jih delno ali trajno poškoduje. Vplive razelektritve skušamo ublažiti z zaščitnimi aluminijevimi folijami in odvodom naboja v prostor (Pulkkinen, 2007). Elektroni in težki ioni, ki prodrejo skozi plašč plovila, kaskadno ionizirajo vse na svoji poti in sproščajo rentgensko sevanje. Binarni spomin procesorja pod vplivom enega visokoenergijskega iona lahko preskoči iz stanja 0 v stanje 1, kar posreduje napačen signal za delovanje sistema in lahko pripelje do napačnega ukaza, spremembe ali izgube spomina in lahko fizično poškoduje računalniške komponente. Strokovni izraz za ta pojav je učinek posamičnega dogodka (*Single Event Effects SEE*) (Scherer in drugi, 2005).

7.2 Vplivi na letalsko tehnologijo

Upoštevanje vplivov vesoljskega vremena pri planetarjih in osebju letalskih družb zahteva razvoj in avtomatizacijo letalskih sistemov in obdelavo podatkov v realnem času. Timi z interdisciplinarnih področij in letalske družbe izvajajo analize vplivov

sevanja sekundarnih energijskih delcev. ESA je leta 2003 začela z aplikacijsko osnovanim pilotskim projektom s ciljem določanja vplivov na letalsko industrijo (ESA, 2009). Komercialni leti so prisiljeni prilagoditi vozni red napovedi vesoljskega vremena. V času geomagnetnih neviht je nujno polete čez polarni tečaj preusmeriti na nižje zemljepisne širine, kar poveča stroške. Doze sevanja pri nadzvočni poletih čez polarni tečaj so večje kot pri običajnih poletih. Višina nadzvočnega leta je približno 16 km, kar pomeni, da je glede na običajen let na višini 10 km za 50 % bližje višini maksimuma jakosti sevanja sekundarnih kozmičnih energijskih delcev na višini ~ 20 km nad Zemljo. V prihodnosti se načrtujejo konvencionalni letalski poleti nad 16 km višine (Jansen in drugi, 2000).

Nadzor izpostavljenosti sevanju pri komercialnih poletih in analize izvaja Mednarodna komisija za radiološko zaščito (*International Commission for Radiological Protection ICRP*). Analizirajo se absorbirane, ekvivalentne in efektivne doze. Prejete doze so zakonsko omejene in teži se k minimizaciji doz (Daglis, 2004). Ideja je uporaba aktivnih monitorjev na letalih za izračun sevanja. Postavljamo si vprašanja: kakšne so posledice vesoljskega vremena na hitro rastočo letalsko tehnologijo? Kakšna je obveščenost med načrtovanjem leta z informacijami v realnem času? (Jansen in drugi, 2000).

7.3 Vplivi na Zemeljsko tehnologijo

Po Faradayevem indukcijskem zakonu, časovno spreminjajoče se magnetno polje inducira električno polje na površju Zemlje, ki v prevodniških sistemih povzroči geomagnetne inducirane tokove (*Geomagnetically Induced Currents GIC*). Inducirano električno polje in geomagnetne motnje so odvisni od stanja motene magnetosfere in ionosfere. Jakost GIC je odvisna od upornosti tal, konfiguracije, upornosti in impedance tehnološkega omrežja. Primerjati je potrebno vodeno statistiko motenj z geomagnetno aktivnostjo. GIC se pogosto širijo skozi vrhnje plasti tal nezaznavno, izrazitejši so na območjih ovala polarnega sija in na območjih, ki ležijo nad vulkanskimi kameninami z nizko električno prevodnostjo, kar je vzrok za preusmeritev GIC v prevodnike. Zaznani so bili tudi na ekvatorialnih območjih. Pri modeliranju prevodnosti uporabljamo modele prevodnosti tal, ki prikazujejo upornost glede na globino in sestavo. Hitri izračuni inducirane električnega polja,

računalniško modeliranje in statistika v časovni periodi enega Sončevega cikla so osnova za napovedi GIC (Pulkkinen, 2007).

Proizvodnja, prenos in distribucija električne energije postajajo celinsko povezane, kar povečuje občutljivost energetskega sistema. GIC vodijo v preobremenitev električnih omrežij, fluktuacijo napetosti in izpad električnega toka in lahko presežejo načrtovane kapacitete transformatorjev, ki delujejo v področju nizkih električnih tokov. Transformatorji locirani na začetnih, končnih točkah in stičiščih sistema so deležni največjih obremenitev, ki so odvisne od modela transformatorja in detajlov energetskega sistema. Operaterji energetskega sistema morajo biti seznanjeni z napovedjo vesoljskega vremena v realnem času za potrebno zmanjšanje obremenitve. V času obremenitev sprožajo postopke planiranih delnih izklopov električne energije, da preprečijo potencialen uničujoč izpad na širšem področju energetskega sistema (Poppe, 1996).

Ob indukciji električnega toka v cevovodih pride do elektrokemičnega procesa korozije na točkah, kjer električni tokovi tečejo iz kovine v okoliška tla. Zato se plinovodi in cevovodi (zlasti naftni) nadzorujejo, saj bi iztekanje nafte ali plina iz odprtih, nastalih s korozijo, lahko sprožilo ekološko katastrofo. Na jakost GIC vplivajo geofizične razmere in detajli v cevovodnem omrežju. Da bi preprečili odtok elektrona iz kovine v tla, se cevovodi zaščitijo s plaščem nizke prevodnosti in se vzdržujejo na nekoliko negativnem potencialu približno (-1 V) glede na Zemljo (Jansen in drugi, 2000).

Z metodami modeliranja skušamo razumeti vplive in izboljšati zaščito in v ta namen je bila ustanovljena korporacija *Pipeline GIC* v Kanadi (Jansen in drugi, 2000).

Leta 1982 je bila na Švedskem napetostna fluktuacija vzrok za slabo delovanje železniških signalov. Na Norveškem se je leta 2000 pripetila železniška nesreča; vzrok je bila motnja v preklopu delovanja signala »proga prosta«. Leta 1990 je začel obratovati nemški hitri vlak (*Inter City Express ICE*), na katerem so opazili izgube v moči gonilnega sistema. GIC povzročajo negativne učinke na elektronske komponente naprav ter sprožijo motnje signalov tudi v delovanju električnih prometnih omrežij (Jansen in drugi, 2000).

7.4 Vplivi na radijsko komunikacijo in navigacijsko tehnologijo

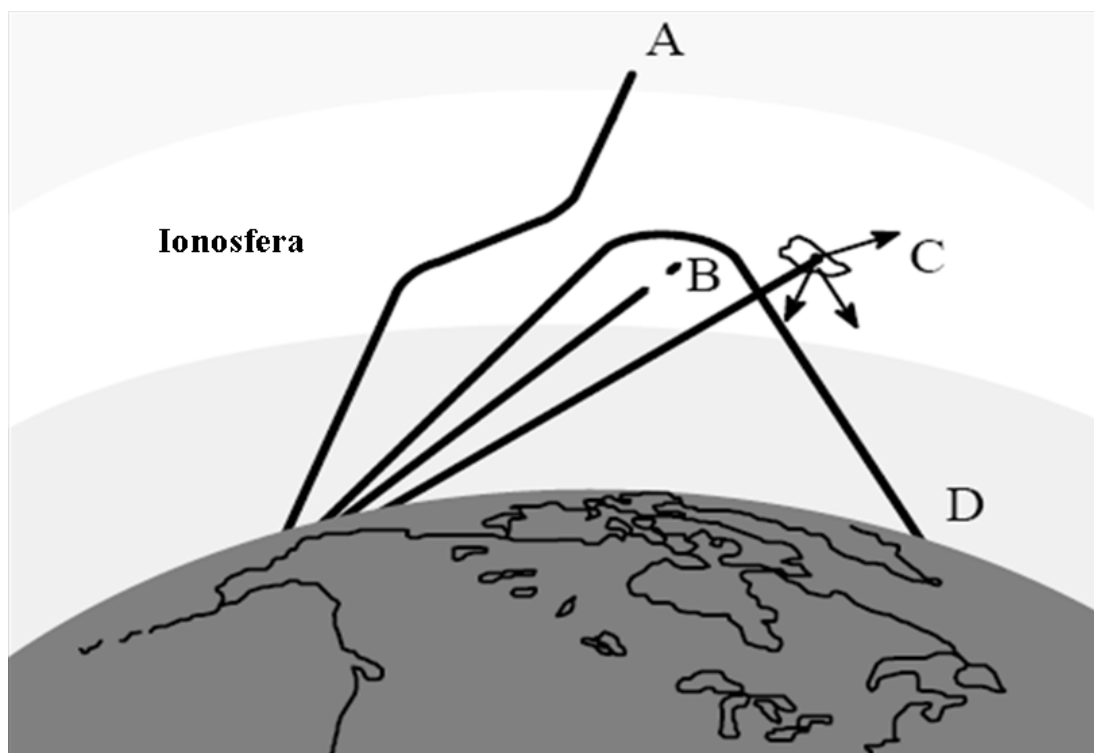
EMV s Sonca ima kontinuiran spekter, ki zajema radijske valove, infrardeče valovanje, vidno svetlobo, UV svetlobo, rentgenske in gama žarke. Umetno proizvedeni radijski valovi so osnova komunikacije v sodobni družbi, od fiksne in mobilne telefonije in radiodifuzije, do satelitske navigacije in računalniških omrežij (Moldwin, 2008). Območje radijskih valov je po Mednarodni telekomunikacijski zvezi (*International Telecommunication Union ITU*) razdeljeno na pasovna območja, ki so prikazana v tabeli 4 (ITU, 2010).

Tabela 4: Območja spektra radijskih valov po Mednarodni telekomunikacijski zvezi (ITU, 2010)

Ime pasu	Kratica	Pas ITU	Frekvenca	Valovna dolžina
			< 3 Hz	> 100000 km
Ekstremno nizke frekvence	ELF	1	3-30 Hz	100000-10000 km
Super nizke frekvence	SLF	2	30-300 Hz	10000-1000 km
Ultra nizke frekvence	ULF	3	300-3000 Hz	1000-100 km
Zelo nizke frekvence	VLF	4	3-30 kHz	100-10 km
Nizke frekvence	LF	5	30-300 kHz	10-1 km
Srednje frekvence	MF	6	300-3000 kHz	1 km-100 m
Visoke frekvence	HF	7	3-30 MHz	100-10 m
Zelo visoke frekvence	VHF	8	30-300 MHz	10-1 m
Ultra visoke frekvence	UHF	9	300-3000 MHz	1 m-100 mm
Super visoke frekvence	SHF	10	3-30 GHz	100-10 mm
Ekstremno visoke frekvence	EHF	11	30-300 GHz	10-1 mm
			> 300 GHz	< 1 mm

Ionosfera vpliva na razširjanje radijskih valov v odvisnosti od njihove frekvence. Čez ionosfero se ustvarja komunikacija na razdaljah od več tisoč km, kratkih valov v razponu frekvenc 3-30 MHz, oziroma valovnih dolžin 100-10 m, ki se učinkovito odbijajo od ioniziranega krogelnega plašča, ki obdaja Zemljo. Radijski signali nad 30 MHz prodirajo v ionosfero in se zato uporabljajo za komunikacijo med vesoljem in

Zemljo. Slika 7 prikazuje različne učinke ionosfere na razširjanje radijskih valov (NOAA, 2009).



Slika 7: Vpliv ionosfere na razširjanje radijskih valov: A ($f > 30$ MHz) signal prodira v ionosfero, B ($2 < f < 30$ MHz) absorpcija v ionosferi, C ($30 < f < 100$ MHz) naključno sipanje signala na nehomogenostih, D ($f < 30$ MHz) odboj signala od ionosferske plasti (NOAA, 2009, str. 2)

Pri razširjanju valovanja skozi ionosfero pride do loma, disperzije in odboja. Tako pri komunikacijah kot pri vertikalnem ali poševnem zaznavanju ionosfere z valovi na območju HF se uporablja pojav totalnega notranjega odboja (Moldwin, 2008). Plazemska frekvenca je osnovni parameter plazme kot globalno nevtralnega medija. To je frekvenca, s katero se v plazmi sprožijo plazemska nihanja, kadar se razruši električna nevtralnost sistema. Plazemska frekvenca je odvisna od koncentracije plazme oziroma elektronov N :

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{e^2 N}{\epsilon_0 m_e}}, \quad (7.1)$$

Ostale količine v (7.1) so: e elementarni naboj ($1,602 \cdot 10^{-19}$ As), m_e masa elektrona ($9,109 \cdot 10^{-31}$ kg), ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma ($8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m) (Moldwin, 2008).

Plazma podpira prenos valovanja frekvenc večjih od elektronske plazemske frekvence, pri manjših pa pride do absorpcije in oslabitve valovanja. Kadar krožna frekvenca valovanja ω izpolnjuje pogoj ($\omega = \omega_{pe}$), pride do refleksije valovanja. S pošiljanjem radijskih valov različnih frekvenc lahko pri zaznavanju odboja ugotovimo koncentracijo plazme (Lilensten in Bornarel, 2006).

Na tej metodi in v območju frekvenc reda velikosti MHz delujejo ionosferske sonde za zaznavanje višjih ionosferskih plasti E in F. Za plast D metoda zaznavanja s ionosondami ni primerna, ker je elektronska koncentracija plasti D znatno nižja od kritične, potrebne za odboj. Kot najbližja Zemlji ima plast D tudi večjo gostoto in visoko frekvenco trkov med elektroni in nevtrali. Za njeno zaznavanje z radijskimi valovi so uporabne le nižje frekvence iz območja VLF. VLF signali, ki se razširjajo med Zemljo in spodnjo mejo plasti D, skozi tako imenovan valovod Zemlja-ionosfera, so neprecenljivo orodje v raziskavah nizke ionosfere, zlasti v pogojih zvečane Sončeve aktivnosti (NOAA, 2009).

Motnje ionosfere, sprožene z močno Sončevo aktivnostjo, predvsem Sončevi blišči, vplivajo na razširjanje radijskih valov na vseh zemljepisnih širinah. Povečuje se absorpcija signala v območju 2-30 MHz in pri višjih frekvencah (30-100 MHz) prihaja do nezaželenega odboja, ki pripelje do interference (NOAA, 2009). Sipanje na nehomogenostih elektronske koncentracije povzroči fluktuacijo signalov, tako imenovano *scintilacijo*, ki ovira predvsem HF komunikacije.

Zvišana elektronska koncentracija nizke ionosfere, sprožena s fotoionizacijskim dejstvom Sončevih blišcev v področju rentgenskega sevanja, je vzrok nenadnih ionosferskih motenj SID, naglega zvišanja jakosti VLF signala in perturbacije faze. V območju HF in območju zelo visokih frekvenc (*Very High Frequency VHF*), SID lahko povzroči upad ali prekinitve signala, ki lahko traja od nekoliko minut do nekaj ur odvisno od jakosti Sončevega blišča. Sončevi blišči povzročijo tudi široki spekter

radijskega šuma, ki stopa v interferenco z komunikacijskim signalom in ga poslabša (Goodman, 2005).

Za razliko od Sončevih blišcev, SEP in geomagnetni viharji v večji meri vplivajo na komunikacije na višjih zemljepisnih širinah. Vzrok je tudi v zvišani elektronski koncentraciji, h kateri pripomore *precipitacija* (sesedanje) visokoenergijskih delcev iz magnetosfere, ki povzročijo dodatno ionizacijo. Posledično pride do močne absorpcije signalov HF in VHF, ki ji pravimo absorpcija v polarnih kapah PCA (Pulkkinen, 2007).

Satelitski navigacijski sistemi, kot so GPS in *Galileo*, delujejo tako, da oddajajo radijske signale od satelita do sprejemnika na Zemlji. Signali z več satelitov se koristijo za izračun pozicije oziroma koordinat sprejemnika z veliko natančnostjo. V regularnih pogojih GPS omogoča skoraj trenutno ugotavljanje položaja, hitrosti in lege uporabniškega sprejemnika (Lilensten in Bornarel, 2006). V perturbirani ionosferi, posebej ko gre skozi območja električnih tokov ovala polarnega sija, se signal na poti do Zemlje sipa, lomi in upočasnjuje, kar povzroči zakasnitev. Prostorno nehomogena ionosfera lahko močno poslabša ali celo prekine komunikacije med satelitom in Zemljo. Zakasnitev signala je mogoče odpraviti z uporabo nosilnih signalov dveh frekvenc. Pri izbiri ustrezne frekvence, ki je odvisna od napovedi stanja ionosfere in je pogoj za dober signal, uporabljamo ionosferske mape posodobljene v realnem času (Pulkkinen, 2007).

Prav tako se lahko komunikacija na komercialnih poletih, ki je zasnovana na HF signalu, popolnoma izgubi ali močno poslabša pri poletih čez območje polarnih tečajev (Pulkkinen, 2007).

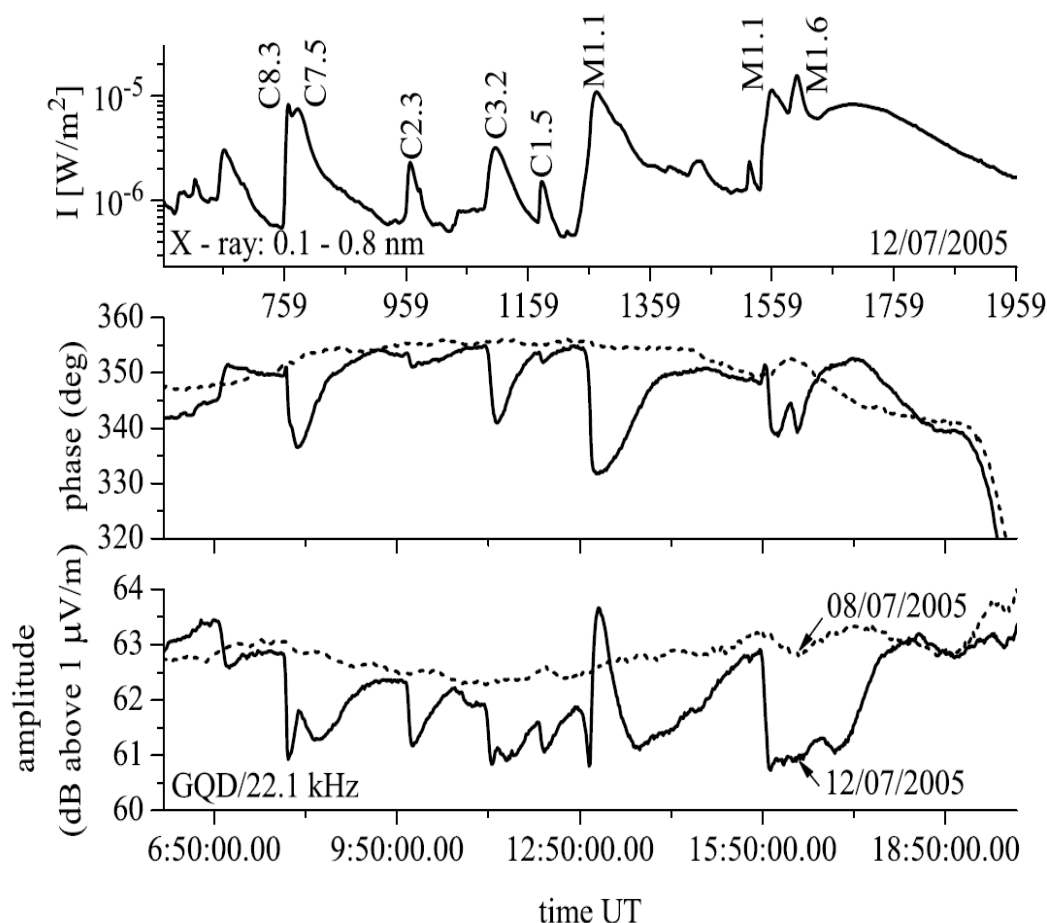
8 ZAZNAVANJE SONČEVIH BLIŠČEV Z RADIJSKIMI VALOVI

Obstajajo modeli ionosfere v regularnih pogojih, toda motnje ionosfere, ki jih sprožajo različni dejavniki, predvsem erupcije na Soncu, še vedno niso ustrezno opisane. Kadar gre za aktivnost Sonca, so najpomembnejši dejavniki Sončevi blišči, SEP in CME. Sončevi blišči kot izbruhi EMV so pojavi, ki prispejo do Zemlje najhitreje in so istočasno opozorilo o možnostih sprožanja še drugih dogodkov SEP in CME, ki so počasnejši in hkrati tudi bolj škodljivi (Grubor in drugi, 2008).

Pri Sončevih bliščih, ki dejansko zajemajo izbruhe EMV od žarkov gama do radijskih valov, le rentgensko sevanje valovnih dolžin od nekaj stotink nm do 1 nm prispe do najnižje plasti D ionosfere. V njej sproži hitro in močno fotoionizacijo in zvišanje elektronske koncentracije N (Žigman in drugi, 2007). Po drugi strani je ionosfera medij za razširjanje EMV, spremembe njenih lastnosti pa določilno vplivajo na pogoje radijskega propagiranja. Praktična radio diagnostika ionosfere se je razvila tekom 20. stoletja in je omogočila pojasnitev veliko učinkov, znanih pod skupnim imenom nenadne ionosferske motnje SID. Najbolj znano je slabljenje kratkih valov (*Short Wave Fade SWF*), ki vpliva na kratkovalovne visokofrekvenčne HF komunikacije čez srednjo in visoko ionosfero. Pri signalih nizkih frekvenc LF in zelo nizkih frekvenc VLF ($VLF < 30$ kHz) se SID učinki kažejo skozi spremembe faze P in amplitude A signala, ki potuje skozi valovod, ki ga tvorita Zemlja in spodnji rob plasti D (NOAA, 2009). Sondiranje ionosfere z VLF signali je na ta način orodje za raziskovanje najnižje ionosfere in njenega stanja ionizacije, zlasti v pogojih eruptivne Sončeve aktivnosti. Dejansko je Zemljina obla obdana z oddajniki VLF, ki so bili prvotno mišljeni za strateške namene in navigacijo podmornic, danes pa se intenzivno uporabljajo tudi za raziskovalne namene. VLF oddajniki so razporejeni po celotni Zemlji od Arktike do Antarktike in tvorijo VLF omrežja, ki združujejo raziskovalna prizadevanja na mednarodni ravni in so pod pokroviteljstvom mednarodnih organizacij, kot so URSI in Mednarodno združenje geomagnetizma in aeronomije (*International Association of Geomagnetism and Aeronomy IAGA*) (Žigman in drugi, 2007).

Kontinuirano merjene in zabeležene spremembe faze in amplitude VLF signalov tvorijo eksperimentalno osnovo za določanje značilnosti ionosfere v mirnih in zlasti

v motenih pogojih (Žigman in drugi, 2007). Na Sončeve blišče se ionosfera odziva s hitrim zvišanjem elektronske koncentracije, ki se odraža v hitrih spremembah faze in amplitudne karakteristike VLF signala. Značilnosti meritev jakosti sevanja s Sonca v področju 0,1-0,8 nm (GOES 12) in vzporednih meritev faze in amplitude signala VLF na Zemlji, so ponazorjene na sliki 8.



Slika 8: Zgornji graf: Sprememba gostote energijskega toka s Sonca (0,1-0,8 nm) posneta s satelitom GOES 12; srednji in spodnji graf: Spremembe faze in amplitude VLF signala oddajnika GQD/22,1 kHz, Skelton (54,72 N; 2,88 W) zabeležene z (*Absolute Phase and Amplitude Logger AbsPAL*) sprejemnikom Beograd (44,85 N; 20,38 E) na aktiven dan 12.07.2005 (polni črti) in na miren dan 08.07.2005 (prekinjeni črti) (Grubor in drugi, 2008)

Kot kaže slika 8 je celotni dan 12.07.2005 z AbsPAL sprejemnikom zabeležen kot izrazito aktiven z vidnimi perturbacijami faze in amplitude signala GQD/22,1 kHz

oddajnika Skelton. Če dnevni potek sprememb faze in amplitude (časovna os v univerzalnem času) (*Universal Time UT*) primerjamo z meritvami gostote energijskega toka s Sonca (GOES 12) v področju rentgenskega sevanja 0,1-0,8 nm (glej zgornji graf na sliki 8), ugotavljamo korelacijo, skoraj sovpadanje med maksimumi I in ekstremnimi vrednostmi faze in amplitude signala VLF (Grubor in drugi, 2008).

Registrirane motnje faze in amplitude VLF signala so bile osnova za tradicionalni program (*Long Wavelength Propagation Capability LWPC*), ki ga je razvil Pomorski oceanski sistemski center (*Naval Ocean System Centre NOSC*) iz NOAA v ZDA (Ferguson, 1998). To je paket programov za simuliranje radijskega propagiranja skozi ionosfero. Program računa celotni nabor parametrov za razširjanje valovanja, koeficient refleksije, absorpcije itd., ter predvideva VLF faze in amplitude vzdolž celotne trase od oddajnika do sprejemnika povzete vzdolž velikega kroga (*Great Circle Path GCP*).

Vhodni podatki so koordinate oddajnikov in sprejemnikov, univerzalni čas, električna prevodnost in kot magnetne deklinacije. Izhodni podatki pa so VLF faza in amplituda vzdolž celotne poti GCP. Program je zasnovan na tako imenovanem Waitovem dvoparameterskem modelu ionosfere, ki stanje ionosfere opiše z *ionosfersko ostrino* (ionospheric sharpness β) (1/km) in *višino refleksije* (reflection height H') (km) (Wait in Spies, 1964).

Kadar se obravnava motena ionosfera, program deluje v načinu s postopkom sistematičnega poskušanja *trial and error*. Potrebno je dobro izbrati začetne vrednosti β in H' , nakar program opravlja iteracije, dokler se ne doseže soglasnost med merjenimi in simuliranimi vrednostmi faze in amplitude VLF signala (Grubor in drugi, 2008). To soglasje določa vrednost para (β, H') , s katerim je podana elektronska koncentracija $N(z)$ (m^{-3}) v funkciji višine z ($50 < z < 90$ km) v določenem trenutku izračunana z enačbo:

$$N(z, \beta, H') = 1,43 \cdot 10^{13} \exp(0,15 H') \exp[(\beta - 0,15)(z - H')], \quad (8.1)$$

Rekonstrukcija višinskega profila koncentracije $N(z)$ je seveda mogoča v vsakem posameznem trenutku, kot je ta zaznamovan s pripadajočimi vrednostmi faze in amplitude. Torej v enačbi (8.1) čas nastopa kot parameter (Grubor in drugi, 2008).

Drugi alternativni model za določanje *časovnega* poteka elektronske koncentracije plasti D v času Sončevih bliščev je izdelan na podlagi vzporednih analiz meritev faze in amplitude, teorije kontinuuma in aeronomije z ene strani, in irradiance s Sonca v področju rentgenskega sevanja z druge strani. Motnje faze in amplitude VLF signalov registrirane z AbsPAL sprejemnikom so povezane z gostoto energijskega toka s Sonca I (W/m^2) v področju valovnih dolžin 0,1-0,8 nm, ki ga meri satelit GOES 12. Ugotovljeno je, da v 90 % analiziranih dogodkov, ekstremna vrednost amplitude zamuja za maksimumom gostote moči rentgenskih žarkov s Sonca. Časovni interval, ki jasno loči ekstrem amplitude od maksimuma gostote energijskega toka rentgenskega sevanja, je definiran kot *časovni zamik* Δt . Identifikacija *časovnega zamika* in meritev le-tega je podala *nov* pomemben parameter za karakterizacijo motene ionosfere. Δt namreč omogoča določanje efektivnega rekombinacijskega koeficienta plasti D med časom Sončevih bliščev, količine, ki je pomanjkljivo znana (Žigman in drugi, 2007). Model poimenovan $N(t)$ model je zgrajen na dveh osnovnih predpostavkah:

- Odziv VLF amplitude na učinek Sončevega blišča v področju rentgenskih žarkov je istoveten in istočasen z odzivom elektronske koncentracije plasti D,
- Izmerjen zakasnitveni čas variira v intervalu 1-7 min, medtem ko Sončev blišč povprečno traja $\sim 40-60$ min. Na osnovi teh značilnosti lahko sklepamo, da je vrednost elektronske koncentracije pri I_{\max} , to je $N(I_{\max})$, blizu maksimalne vrednosti N_{\max} , ki jo sproži učinek Sončevega blišča.

V plasti D z zanemarljivo difuzijo, tri komponentni (elektroni, pozitivni in negativni ioni) hidrodinamični model z upoštevanjem globalne električne nevtralnosti plazme pripelje do kontinuitetne enačbe za elektrone, ki opiše časovni razvoj elektronske koncentracije N na višini z , ki jo sproži pojav Sončevega blišča:

$$\frac{dN}{dt} = q(t) - \alpha N^2, \quad (8.2)$$

Osnovna vhodna podatka sta hitrost nastajanja elektronov $q(t)$ in efektivni elektronski koeficient rekombinacije α (m^3/s). Med časom Sončevih bliščev zvečano sevanje v področju rentgenskih žarkov prevladuje nad vsemi ostalimi viri ionizacije (Lyman α in kozmični žarki) tako, da je $q(t)$ sorazmerno z $I(t)$:

$$q(t) = \left(\frac{CI(t)}{eH} \right) \cos \chi, \quad (8.3)$$

kjer je C število nastalih elektronov na enoto energije ali učinkovitost ionizacije, e osnova naravnega logaritma, H debelina homogene plasti in χ Sončev zenitni kot (Budden, 1988).

Začetna elektronska koncentracija potrebna za integracijo enačbe (8.2) se določi z LWPC programom posamezno za vsak obravnavan Sončev blišč, v odvisnosti od specifičnih ionosferskih pogojev pred Sončevim bliščem. Na višini odboja v mirnih opoldanskih pogojih, to je na 74 km višine, začetna $N(t = 0)$ variira od $2 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$ do $8 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$. Efektivni koeficient rekombinacije ob Sončevih bliščih je slabo znan za nižjo ionosfero, ki se določa znotraj samega modela upoštevajoč, da so vrednosti $N(I_{\max})$ in N_{\max} nizke in na časovni skali ločene s časovnim zamikom Δt . Z določenim α in specificiranimi ostalimi parametri, se kontinuitetna enačba (8.2) reši s časovno odvisno iradianco rentgenskih žarkov $I(t)$, kot jo pri vsakem posameznem Sončevem blišču nameri satelit GOES 12. Na ta način pridobimo *časovni* profil elektronske koncentracije $N(t)$ na določeni višini v direktni povezavi z naraščanjem do maksimuma in nato upadanjem iradiance rentgenskih žarkov (Žigman in drugi, 2007).

Tako pridobljeni rezultati so v soglasnosti z eksperimentalnimi ocenami. Za ovrednotenje algoritma je uporabljen program LWPC, ki poda naraščanje elektronske koncentracije z višino $N(z)$ v določenem trenutku. Napovedi dveh modelov se ujemata in nakazujeta možnost združenega opisa $N(t, z)$ (Grubor in drugi, 2008).

8.1 VLF zaznavanje Sončevih bliščev

V diplomskem delu smo analizirali podatke o zaznanih spremembah faze in amplitude signala VLF za posamezne dogodke Sončevega blišča tekom upadajočega obdobja 23. Sončevega cikla v letih 2004-2006 (Žigman in drugi, 2007).

Metodo detekcije Sončevih bliščev v področju rentgenskega sevanja z radijskimi valovi VLF smo uveljavili na podatkih, ki jih beleži sprejemnik AbsPAL, instaliran v Institutu za fiziko v Beogradu (44,85 N; 20,38 E). Sprejemnik AbsPAL je razvila skupina za radio fiziko in vesolje (Radio and Space Physics Group) na Univerzi Otago v Novi Zelandiji in spada v novo generacijo radijskih sprejemnikov (Žigman in drugi, 2007).

AbsPAL VLF sprejemnik lahko sprejema hkrati do šest oddajnikov in pri tem beleži fazo in amplitudo s časovno ločljivostjo v razponu 0,05-60 s. V diplomskem delu smo uporabili podatke dveh oddajnikov: NAA/24,0 kHz nameščenega v Maineu (44,65 N; 67,3 W) ZDA, katerega signal potuje po GCP dolžine 6548 km, ter GQD/22,1 kHz v Skeltonu (54,72 N; 02,88 W) Velika Britanija. Signal slednjega potuje do AbsPAL sprejemnika po GCP dolžine 1982 km (Žigman in drugi, 2007).

Za vsak dogodek smo določili ekstremne vrednosti faze, amplitude in časovni zamik, torej ga povezali neposredno z meritvami gostote energijskega toka sevanja rentgenskih žarkov, kot jih zaznava satelit GOES 12 (Žigman in drugi, 2007). Uporabljene podatkovne baze tako za VLF fazo in amplitudo kot za jakost sevanja s Sonca imajo časovno ločljivost 1 minute. Na ta način smo priredili vhodne podatke za aplikacijo tako LWPC kot $N(t)$ programa (tabela 5).

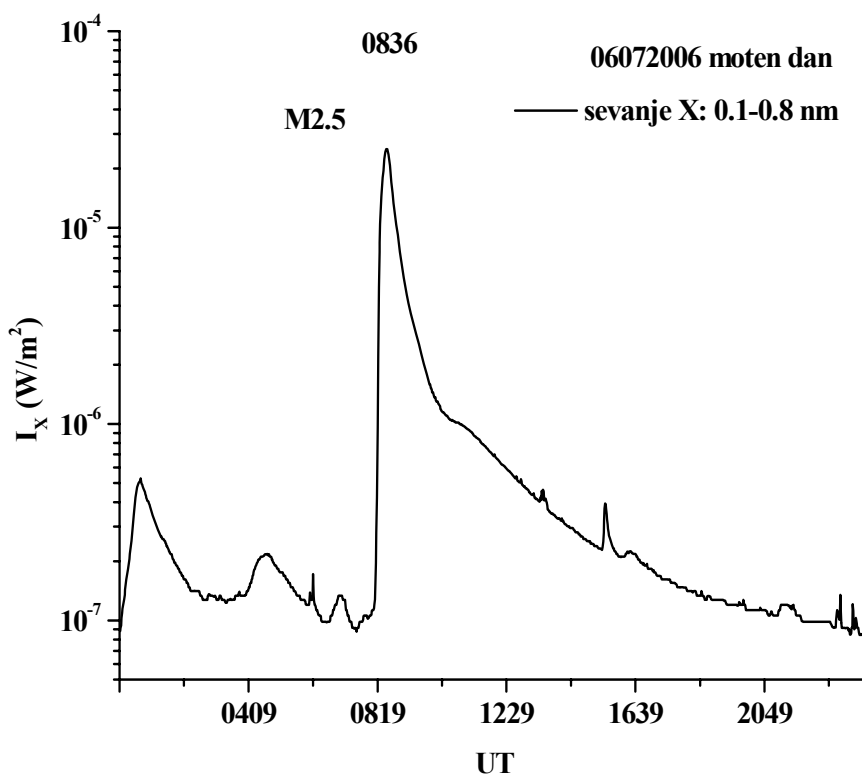
V naslednjih podpoglavjih je podrobno ilustriran potek faze in amplitude signala VLF ob Sončevih bliščih v področju rentgenskega sevanja za dan s posamičnim dogodkom Sončevega blišča in za celostno moten dan s skupino Sončevih bliščev v zaporedju.

Tabela 5: Karakteristični parametri Sončevih blišcev zaznanih z VLF signalom dveh oddajnikov NAA in GQD

Tx	Datum	tI_{\max} (UT)	I_{\max} (W/m ²)	tA_{\max} (UT)	Δt (min)	A_{\max} (dB)	IA_{\max} (W/m ²)	AI_{\max} (dB)	tA_{\min} (UT)	A_{\min} (dB)	tP_{\max} (UT)	P_{\max} (°)	tP_{\min} (UT)	P_{\min} (°)
NAA 24 kHz	130804	09:43	2,45 E - 6	09:45	2	59,69	2,41 E - 6	59,61	--	--	09:45	70,09	--	--
--	130804	12:09	1,13 E - 5	12:11	2	61,52	7,69 E - 6	61,09	--	--	12:11	92,94	--	--
--	130804	13:26	2,79 E - 6	13:28	2	59,52	2,71 E - 6	59,49	--	--	13:27	71,69	--	--
--	130804	15:16	8,69 E - 6	15:19	3	61,06	6,45 E - 6	60,56	--	--	15:19	96,53	--	--
--	130804	18:12	1,09 E - 4	18:13	1	60,07	9,57 E - 5	59,87	--	--	18:14	111,54	--	--
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
NAA 24 kHz	050406	13:07	2,68 E - 6	13:10	3	59,88	1,87 E - 6	58,55	--	--	13:10	-25,11	--	--
--	050406	15:21	8,11 E - 6	15:23	2	61,39	4,49 E - 6	60,70	--	--	15:23	-4,02	--	--
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
NAA 24 kHz	070406	08:03	9,74 E - 6	08:04	1	59,32	7,80 E - 6	59,10	--	--	08:05	239,05	--	--
GQD 22,1 kHz	070406	08:03	--	08:05	2	61,42	4,37 E - 6	61,10	08:02	60,82	08:01	258,41	08:05	249,35
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
NAA 24 kHz	260406	12:26	1,27 E - 6	12:30	4	58,49	1,11 E - 6	58,33	--	--	12:30	-27,01	--	--
--	260406	13:56	7,74 E - 6	13:58	2	61,74	7,38 E - 6	61,63	--	--	13:58	10,18	--	--
--	260406	14:53	9,18 E - 6	14:53	0	61,86	9,18 E - 6	61,86	--	--	14:53	15,70	--	--
--	260406	17:02	1,33 E - 5	17:03	1	59,45	1,30 E - 5	59,37	--	--	17:03	3,02	--	--
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
NAA 24 kHz	060706	08:36	2,51 E - 5	08:37	1	61,35	2,51 E - 5	61,31	--	--	08:37	168,88	--	--
GQD 22,1 kHz	060706	08:36	2,51 E - 5	08:37	1	63,60	2,51 E - 5	63,56	08:24	60,82	08:22	6,90	08:34	-12,23

8.1.1 Učinek Sončevega blišča dne 06.07.2006

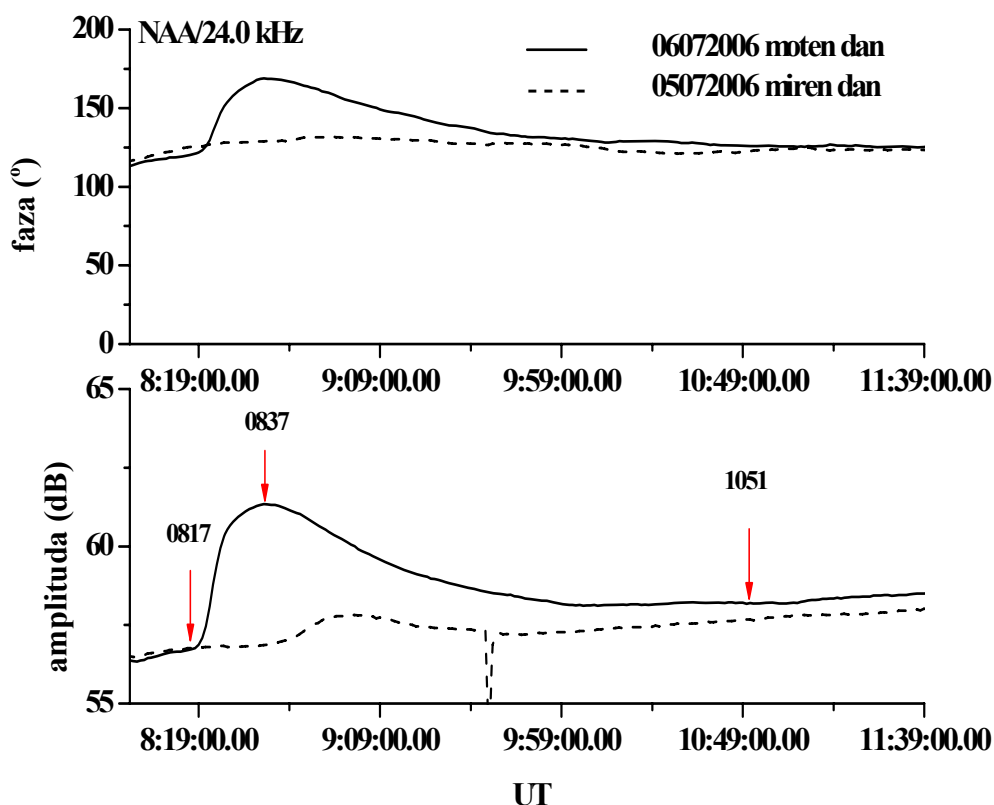
Dne 06.07.2006 se je po podatkih satelita GOES 12 zgodil osamljen Sončev blišč razreda M 2,5 in maksimalne jakosti $I_{\max} = 2,51 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$ ob 0836 UT, kot je prikazano na sliki 9. Prejšnji dan, 05.07.2006, je bil miren.



Slika 9: Gostota energijskega toka v področju (0,1-0,8 nm), dne 06.07.2006 s satelita GOES 12 (NOAA, 2009)

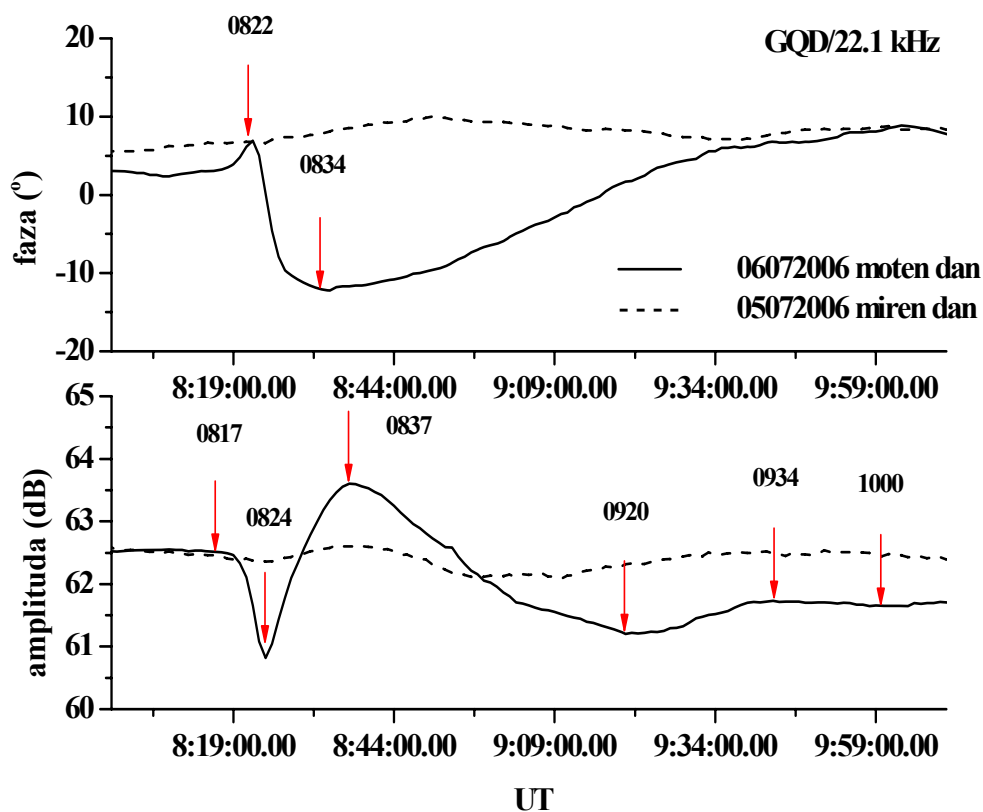
Spremembe faze in amplitude signala NAA/24,0 kHz v obdobju naraščanja in upadanja Sončevega blišča so detajlno prikazane na sliki 10. Vzporedno je prikazan potek faze in amplitude na najbližji miren dan, 05.07.2006. V tabeli 5 so povzeti rezultati opazanj. Sončev blišč razreda M 2,5 z maksimumom ob 0836 UT sproža naraščanje faze in amplitude glede na mirne pogoje. Interval zvišane vrednosti tako faze, kakor amplitude je dokaj širok z jasno izraženim maksimumom ob 0837 UT, nakar signal relaksira proti regularnim in nemotenim vrednostim. Maksimalna

vrednost spremembe faze znaša $\Delta P = + 40,01^\circ$, maksimalna vrednost spremembe amplitude $\Delta A = + 4,49$ dB.



Slika 10: Motnje faze in amplitude signala NAA/24,0 kHz med časom Sončevega blišča razreda M 2,5 (polni krivulji) dne 06.07.2006 in na miren dan 05.07.2006 (črtasti krivulji). Označene so karakteristične točke naraščanja, upadanja in relaksacije

Na trasi signala GQD/22,1 kHz so spremembe faze in amplitude sprožene s Sončevim bliščem razreda M 2,5 ob 0836 UT razločevalno drugačne. Faza upada z minimumom ob 0834 UT $\Delta P = - 20,34^\circ$, nakar se počasi vrača v nemoteno stanje ob 1000 UT. Amplituda kaže oscilacijsko obnašanje ozki minimum ob 0824 UT $\Delta A = - 1,54$ dB, kateremu sledi bolj počasno naraščanje do maksimuma ob 0837 UT $\Delta A = + 1$ dB in nato razpotegnjen minimum, nakar se amplituda počasi stabilizira sledeč krivulji na miren dan, sicer na ravni za približno 1 dB nižji (slika 11). Maksimum amplitude za oba signala kaže časovni zamik $\Delta t = 1$ min.



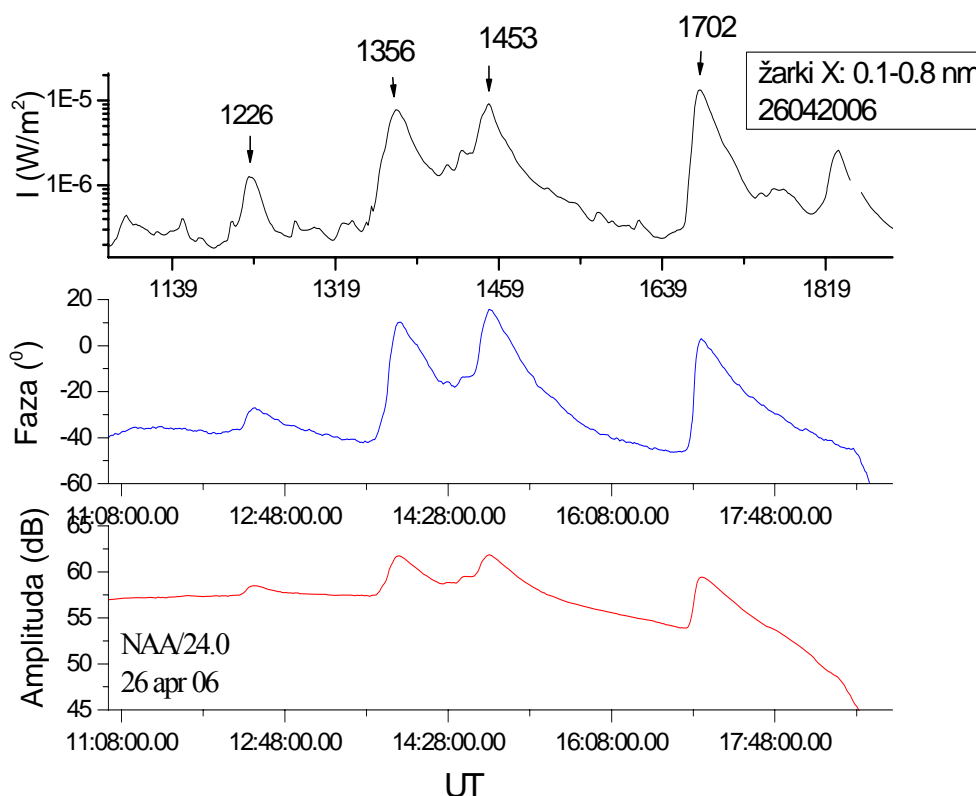
Slika 11: Motnje faze in amplitude signala GQD/22,1 kHz med časom Sončevega blišča razreda M 2,5 (polni krivulji) dne 06.07.2006 in na miren dan 05.07.2006 (črtasti krivulji)

8.1.2 Učinki Sončevih bliščev dne 26.04.2006

Kadar se v enem dnevu sproži več Sončevih bliščev, pravimo, da gre za *moten dan*. Takšen dan je tudi 26.04.2006. Takrat je smotrno opazovati in analizirati VLF parametre v celotnem dnevnem obdobju, saj če se Sončevi blišči dogajajo v zaporedju, se spreminja tudi (začetno) stanje ionosfere pred izbruhom naslednjega. Na sliki 12 je prikazan vzporedni potek jakosti sevanja s Sonca *I* (GOES 12), faza in amplituda signala VLF oddajnika NAA/24,0 kHz, zaznana s sprejemnikom AbsPAL, tekom motenega dne 26.04.2006.

Od poldneva do poznih popoldanskih ur so se zgodili v zaporedju štirje Sončevi blišči, ki jih je sprejemnik AbsPAL nedvomno zaznal. Prvi trije Sončevi blišči (ob

1226 UT, 1356 UT, 1453 UT) so razreda C, četrti ob 1702 UT pa razreda M (glej tabelo 5). Slednji vseeno ne sproži največjega naraščanja amplitude, kar je posledica poznih popoldanskih ur, ko osončenost na lokaciji sprejemnika že pojema in plast D počasi izginja. Zakasnitveni časi so razločno merljivi in sovpadajo, kadar se merijo glede na maksimum jakosti sevanja po zakasnitvi maksimuma faze ali amplitude (glej tabelo 5). Visoka jakost rentgenskega sevanja v obdobju med dvema osrednjima Sončevima bliščema (1356 UT in 1453 UT), ki se ne spusti pod vrednost $\sim 1,40 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$, kar bi lahko ustrezalo prikitem Sončevem blišču razreda C, sproži dovolj visoko ionizacijo, da se faza in amplituda naslednjega naraščanja jakosti do $9,18 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$ odzoveta brez časovnega zamika oziroma za Sončev blišč visokega razreda C 9,2 ob 1453 UT je $\Delta t = 0$ (slika 12).



Slika 12: Zgornji graf: Sprememba gostote energijskega toka s Sonca (0,1-0,8 nm) posneta s satelitom GOES 12; srednji in spodnji graf: Spremembe faze in amplitude VLF signala oddajnika NAA/24,0 kHz zabeležene z AbsPAL sprejemnikom v Beogradu (44,85 N; 20,38 E) na aktiven dan 26.04.2006

9 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu so predstavljeni pojavi, ki se preučujejo v kontekstu povezav Sonce-Zemlja pod skupnim imenom vesoljsko vreme. Na ustrezni ravni in v soglasju s sodobnimi znanji so opisani pojavi, ki se sprožijo na Soncu in se širijo skozi medplanetarni prostor do Zemlje. Posebno je poudarjen vpliv vesoljskega vremena na tehnološke sisteme na Zemlji in na njeno vesoljsko okolje.

Prikazana so prizadevanja nove discipline vesoljskega vremena, ki je nova veja aplikativne astronomije in se nahaja v vrhu sodobnih raziskav geoprostora. Pojasnjeno je, kako se raziskave povezujejo in dopolnjujejo na evropski in svetovni ravni.

Podrobno je prikazana metoda detekcije Sončevih blišcev v področju rentgenskega sevanja z radijskimi valovi zelo nizkih frekvenc ($VLF < 30\text{kHz}$). Podana je analiza motenj faze in amplitude radijskih signalov, ki jih zaznava sprejemnik na Zemlji, vzporedno z analizo meritev jakosti sevanja s Sonca, ki jih poda satelit GOES za nekoliko karakterističnih dogodkov v času 23. Sončevega cikla. Iz datotek so izluščeni parametri, ki so karakteristični za vsak posamezen Sončev blišč, ekstremne vrednosti faze in amplitude VLF signala in časovni zamik Δt glede na maksimum gostote energijskega toka rentgenskega sevanja s Sonca. Ti podatki so vhodni parametri za modeliranje naraščanja elektronske koncentracije v času Sončevih blišcev in bodo uporabljeni v modelih LWPC in $N(t)$, ki so opisani v diplomskem delu.

Metoda je posebej pomembna v pogojih izredno močnih Sončevih erupcij, ko se lahko zgodi izpad ali preobremenitev satelitskega sistema in njegovih merilnih naprav. Tako so na primer med časom izbruha 6. novembra 2003, ki je pripeljal do preobremenitev merilnikov rentgenskega sevanja na GOES satelitih, maksimumi jakosti sevanja s Sonca v področju rentgenskih žarkov rekonstruirani na osnovi zemeljskih VLF meritev (Thomson in drugi, 2005).

10 LITERATURA

Avsec, F., Prosen, M. (1971). *Astronomija*. Ljubljana: Državna založba Slovenije.

Baker, D. N. (2002). How to cope with space weather. *Science*, 297, str. 1486-1487.

Budden, K. G. (1988). *The propagation of radio waves*. Cambridge University Press.

CCMC. Community Coordinated Modeling Center. Pridobljeno 19. 11. 2009 s svetovnega spleta: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/>

Chapman, S., Ferraro, V. C. A. (1931). A new history of magnetic storms. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 36, str. 171-186.

Daglis, I. A. (ur.) (2004). *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. Amsterdam: IOS Press and NATO Science Series.

ESA. European Space Agency. Pridobljeno 21.9.2009 s svetovnega spleta: <http://www.esa.int/esaCP/index.html>

Ferguson, J. A. (1998). *Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0*, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego CA.

Goodman, J. M. (2005). *Space Weather & Telecommunications*. New York: Springer Science + Business Media, Inc.

Graham, S. J. (ur.) (2008). Severe Space Weather Events. Pridobljeno 17.6.2009 s svetovnega spleta: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12507#toc

Grubor, D., Šulić, D., Žigman, V. (2008). Classification of X-ray solar flares regarding their effects on the lower ionosphere electron density profile. *Ann. Geophys*, 26 (7), str. 1731-1740.

Hanslmeier, A. (ur.) (2002). *The Sun and Space Weather*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Hargreaves, J. K. (1992). The Solar-Terrestrial Environment. Cambridge: University Press, Cambridge.

ITU. International Telecommunication Union. Pridobljeno 26.2.2010 s svetovnega spleta: http://sl.wikipedia.org/wiki/Radijski_valovi

Jansen, F., Pirjola, R., Favre, R. (2000). Space Weather. Hazard to the Earth? Zurich: Swiss Reinsurance Company.

Karalič, A., Galičič, M., Jejčič, S., Klemenčič, R., Varšek, A. (2000). Nekaj astronomskih tem. Ljubljana: Zveza za tehnično kulturo Slovenije za astronomske krožke in tabore.

Lilensten, J., Bornarel, J. (2006). Space Weather, Environment and Societies. Dordrecht: Springer.

Matko, D. (ur.) (1996). Uporaba vesoljskih tehnologij. Radovljica: Didakta.

Moldwin, M. (2008). An Introduction to Space Weather. New York: Cambridge University Press, USA.

MVZT. Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo. Pridobljeno 17.11.2009 s svetovnega spleta: <http://www.mvzt.gov.si/>

NASA. National Aeronautics and Space Administration. Pridobljeno 21.5.2009 s svetovnega spleta: http://www.nasa.gov/worldbook/sun_worldbook.html

NICT. National Institute of Information and Communications Technology. Space Environment Information Service. Pridobljeno 19.2.2010 s svetovnega spleta: <http://hirweb.nict.go.jp/>

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. Pridobljeno 27.6.2009 s svetovnega spleta: <http://www.swpc.noaa.gov/>, http://www.swpc.noaa.gov/Curric_7-12/Chapter_2.pdf, http://www.swpc.noaa.gov/Curric_7-12/Chapter_3.pdf, <http://www.swpc.noaa.gov/info/Radio.pdf>

Parker, E. N. (1958). Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields. Astrophysical Journal, 128, str. 664-676.

Poppe, B. B. (ur.) (1996). Solar Physics and Terrestrial Effects. Second edition. Space environment center. Boulder, Colorado, USA. Pridobljeno 10.6.2009 s svetovnega spleta: http://www.swpc.noaa.gov/Curric_7-12/index.html

Pulkkinen, T. (2007). Space Weather: Terrestrial Perspective. Helsinki: Meteorological Institute.

Rozelot, J. P. (ur.) (2006). Solar and Heliospheric Origins of Space Weather Phenomena. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Scherer, K., Fichtner, H., Heber, B., Mall, U. (2005). Space Weather. Physics Behind a Slogan. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Schwenn, R. (2006). Space Weather: The Solar Perspective. Pridobljeno 1.5.2009 s svetovnega spleta: <http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2006-2/>

Space Weather. European Space Weather portal. Pridobljeno 22.9.2009 s svetovnega spleta: <http://www.spaceweather.eu/sl>

Thomson, N. R., Rodger, C. J., Clilverd, M. A. (2005). Large solar flares and their ionospheric D region enhancements. Journal of Geophysical Research, 110, A06306.

Wait, J. R., Spies, K. P. (1964). Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves. NBS Technical Note 300.

Zwitter, T. (2002). Pot skozi vesolje. Prva izdaja. Ljubljana: Modrijan, str. 19-30.

Žigman, V., Grubor, D., Šulić, D. (2007). D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 69 (7), str. 775-792.