

UNIVERZITET U BEOGRADU

FIZIČKI FAKULTET

Aleksandra M. Nina

**DIJAGNOSTIKA PLAZME
JONOSFERSKE D OBLASTI
ELEKTROMAGNETNIM VLF TALASIMA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF PHYSICS

Aleksandra M. Nina

**DIAGNOSTIC OF PLASMA OF
IONOSPHERIC D REGION
BY ELECTROMAGNETIC VLF WAVES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

Informacije o mentoru/članovima komisije

Mentor: dr Vladimir Srećković
naučni saradnik, Institut za fiziku,
Univerzitet u Beogradu

Članovi komisije: dr Luka Popović
naučni savetnik, Astronomska opservatorija

dr Srđan Bukvić
redovni profesor Fizičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

dr Vladimir Milosavljević
vanredni profesor Fizičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

dr Đorđe Spasojević
vanredni profesor Fizičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

dr Vladimir Čadež
naučni savetnik, Astronomska opservatorija

Datum odbrane:

Zahvalnica

Doktorska disertacija "Dijagnostika plazme jonosferske D oblasti elektromagnetnim VLF talasima" je urađena u Laboratoriji za fiziku plazme, Instituta za fiziku u Beogradu u okviru projekata Ministarstva za nauku br. OI 141033 (2006-2010) i Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja br. III 44002 i OI 176002 (2011-2014).

Posebnu zahvalnost dugujem:

- **prof. dr Vladimiru Čadežu** na pomoći i podršci tokom izrade disertacije, kao i na savetima i stručnim razgovorima koji će mi značiti i u nastavku karijere,
- **prof. dr Luki Popoviću** na brojnim korisnim savetima i rukovođenju delom ove disertacije, i
- mentoru, **dr Vladimiru Srećkoviću** na konstantnoj saradnji u prethodnom periodu.

Najiskrenije se zahvaljujem:

- rukovodiocima projekata: **dr Anatoliju Mihajlovu**, **dr Ljubinku Ignjatoviću**, **dr Darku Jevremoviću**, **prof. dr Milanu Dimitrijeviću** i **dr Zoranu Simiću** na pomoći i podršci prilikom izrade ove disertacije,
- **prof. dr Desanki Šulić** na obezbeđenoj eksperimentalnoj postavci na kojoj su dobijeni podaci korišćeni u disertaciji,
- **dr Saši Simiću** na saradnji,
- **Srboljubu Todoroviću** na stručnoj pomoći pri održavanju i analizi eksperimentalne postavke,
- svim kolegama iz Instituta za fiziku, Astronomske opservatorije kao i saradnicima iz drugih institucija koji su brojnim savetima doprineli poboljšanju mog rada.

Posebno želim da se zahvalim nastavnicima Radi Stojanović i profesoru Vladimiru Kovaču koji su mi preneli ljubav prema fizici i koji su najzaslužniji što se bavim ovim zanimanjem.

Za iskazanu podršku i razumevanje zahvalnost dugujem svim članovima moje porodice koji su od početka mog školovanja bili uz mene: majci Mirjani, baki Anki, dedi Vladimiru, supruhu Željku i njegovim roditeljima Mileni i Cvetku i, posebno, sinu Andreju i kćerki Tamari kojima je i posvećena ova disertacija.

sinu Andreju i kćerki Tamari

NASLOV: DIJAGNOSTIKA PLAZME JONOSFERSKE D OBLASTI ELEKTROMAGNETNIM VLF TALASIMA

REZIME: U ovoj disertaciji su prikazani rezultati istraživanja plazme jonosferske D-oblasti zasnovani na kontinuiranoj, simultanoj registraciji elektromagnetnih talasa vrlo niskih frekvencija emitovanih predajnicima lociranim širom sveta i registrovanih prijemnikom koji se od 2008. godine nalazi na Institutu za fiziku u Zemunu. Motivi za izradu ove studije su bili:

1. Analiza dobijene baze podataka kojom je omogućeno višegodišnje kontinuirano praćenje kako periodičnih tako i neperiodičnih poremećaja plazme D-oblasti izazvanih brojnim procesima u svemiru i raznim delovima Zemlje.
2. Ispitivanje mogućnosti detekcije događaja koji slabije perturbuju posmatranu plazmu pomoću eksperimentalne postavke korišćene u disertaciji.

U okviru studije korišćeni su signali emitovani na različitim fiksnim frekvencijama predajnicima lociranim u Nemačkoj, Itaiji, Velikoj Britaniji, Islandu, Sjedinjenim Američkim Državama i Australiji. Posmatrani podaci su upotrebljeni za sledeća istraživanja:

1. Modeliranje elektronske koncentracije tokom poremećaja plazme D-oblasti izazvanih Sunčevim X-flerovima. U ovom istraživanju dobijene su prostorno-vremenske zavisnosti koncentracije elektrona koje su dalje korišćene u teorijskom modelu razvijenom u okviru ove studije i primenljivom tokom relaksacije plazme. Konačni izrazi datog modela daju prostorno-vremenske raspodele brzina proizvodnje i gubitaka elektrona, i koeficijenta koji se odnosi na efektivne gubitke ovog konstituenta plazme. Dobijene vremenske zavisnosti teže ka vrednostima koje karakterišu neperturbovano stanje plazme na posmatranim lokacijama čime se dobija prostorna raspodela posmatranih veličina u mirnoj D-oblasti.
2. Detektovanje linearnih hidrodinamičkih talasa uzrokovanih naglim poremećajima u D-oblasti. Analiza u ovom radu predstavlja proširenje postojećih istraživanja tog fenomena u višim slojevima na posmatranu oblast. Teorijska procedura je primenjena na procese izlaska i zalaska Sunca.
3. Ispitivanje mogućnosti detekcije poremećaja u D-oblasti jonosfere usled upada zračenja koje slabo jonizuje analiziranu plazmu. Konkretno, prikazana je statistička analiza

uticaja bljeskova γ -zraka na D-oblast jonosfere. Pored posmatranja sumarnih rezultata za ceo uzorak od 54 registrovana događaja, ovaj uticaj je razmatran i uzimajući u obzir karakteristike posmatranih γ -bljeskova, karakteristike jonosfere u periodima njihovog upada i pravce upada zraka u odnosu na putanju posmatranog signala.

Osnovni rezultati koji proizilaze iz disertacije su:

1. Razvijanje procedure za kontinuirano praćenje promena elektronske koncentracije u jonosferskoj D-oblasti tokom konkretnih perturbacija.
2. Razvijanje procedure za određivanje brzina proizvodnje i gubitaka elektrona, i koeficijenta koji se odnosi na njihove efektivne gubitke u mirnoj D-oblasti pomoću intenzivnih poremećaja izazvanih npr. Sunčevim X-flerovima.
3. Detekcija linearnih hidrodinamičkih talasa u D-oblasti tokom izlaska i zalaska Sunca.
4. Potvrda detektabilnosti kratkotrajnih promena u analiziranoj jonosferskoj oblasti pod uticajem γ -bljeskova.

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji su otvorila brojne probleme čija će rešavanja biti predmeti budućih studija. To se pre svega odnosi na:

1. Uticaje stanja mirne D-oblasti (razlikuju se tokom dana, sezone, godine, Sunčevog ciklusa) na njene promene izazvane različitim procesima.
2. Prostorno-vremenske raspodele brzina proizvodnje i gubitaka elektrona, i koeficijenta koji se odnosi na njihove efektivne gubitke tokom celog perioda perturbacija posmatrane oblasti.
3. Detekcije hidrodinamičkih talasa u posmatranoj oblasti vezanih za različite događaje.
4. Detektabilnost elektromagnetnog i čestičnog zračenja različitih energija koje slabo jonizuje konstituente u D-oblasti.

Pored značaja navedenih rezultata bitno je naglasiti da se registrovani podaci odnose na delove D-oblasti određene lokacijama posmatranog predajnika i našeg prijemnika. Iz tog razloga analiza tih vrednosti daje originalni doprinos međunarodnim istraživanjima jonosfere, koja pored naučnog značaja u astrofizici i geofizici imaju i praktičnu primenu, npr. u oblasti telekomunikacija.

KLJUČNE REČI: plazma, jonosferska D-oblast, VLF talasi, hidrodinamički talasi, detektabilnost

NAUČNA OBLAST: Fizika

UŽA NAUČNA OBLAST: Fizika jonizovanog gasa i plazme

UDK BROJ: 533.9.1 (043.3)

**TITLE: DIAGNOSTIC OF PLASMA OF IONOSPHERIC D REGION BY
ELECTROMAGNETIC VLF WAVES**

ABSTRACT: This dissertation presents results of studying the ionospheric D-region plasma based on continuous, simultaneous registration of very low frequency electromagnetic waves emitted by transmitters distributed worldwide and recorded by the receiver located at the Institute of Physics in Zemun from 2008. The motives for making this study were:

1. The analysis of the obtained data base which enables perennial continuous monitoring of both periodical and non-periodical disturbances of the D-region plasma induced by numerous processes in space and various parts of the Earth.
2. Investigation of possibility to detect events that weakly perturb the considered plasmas by means of the experimental setup used in the dissertation.

The performed study utilizes signals emitted at different fixed frequencies from transmitters in Germany, Italy, UK, Island, USA, and Australia. The considered data were used in the following fields of investigation:

1. Modeling of the electron concentration in perturbed plasma of the D-region induced by solar X-flares. Space-time variations of the electron concentration are obtained and further used in a theoretical model of plasma in the relaxation period that is developed in this study. The obtained final results for a given model yield space-time distributions of electron gain and loss rates, and the coefficient for the effective electron loss process. The resulting time-dependencies converge to values typical of the unperturbed plasma at considered locations which consequently reveals their spatial distribution in the unperturbed D-region plasma.
2. Detection of linear hydrodynamic waves resulting from sudden disturbances in the D-region. The analysis developed in this work can be treated as an extension to the considered region of the existing studies at much higher altitudes. The theoretical procedure is applied to processes related to the sunrise and sunset.
3. Examining the possibilities to detect disturbances in the ionospheric D-region caused by impacts of radiation that weakly ionizes the analyzed plasma. Specifically, this includes a statistical analysis of the influence of γ -ray bursts on the ionospheric D-region. In addition to the observation of summary results for the entire sample of 54

registered events, this influence is considered to take into account the characteristics of the observed γ -ray bursts, characteristics of the ionosphere during the periods of their impacts and directions of rays impacts in relative to the trajectory of the observed signal.

The main issues resulting from the dissertation are as follows:

1. A procedure is developed for a continuous monitoring the electron concentration variations in the ionospheric D-region during a particular perturbation.
2. A procedure is developed for determining the electron gain and loss rates, and the coefficient related to the electron effective loss in a unperturbed D-region from consequences of intense perturbations such as solar X-flares for example.
3. Detection of linear hydrodynamic waves in the D-region during the sunset and sunrise.
4. Proof of detectability of short living changes in electron concentration induced by γ -ray bursts.

Investigations in this dissertation have opened numerous problems that are going to be subjects of our forthcoming research. This is primarily related to:

1. Influence of the state of the unperturbed D-region (it varies during the day, season, year, and solar cycle) on their changes caused by different processes.
2. Space-time distributions of the electron gain and loss rates, and the coefficient of the effective electron loss process during the entire periods of perturbations in the considered region.
3. Detection of hydrodynamic waves occurring on different occasions in the considered region.
4. Detectability of electromagnetic radiation and particle streams that weakly ionizes the D-region constituents.

In addition to the significance of these results it is important to emphasize that the registered data refer to specific parts of the D-region which are determined by locations of the considered transmitters and our receiver. For this reason, the corresponding data analysis provides an original contribution to the international studies of the ionosphere which, in addition

to the scientific importance in astrophysics and geophysics, has also practical applications, for example in telecommunications.

KEYWORDS: plasma, ionospheric D-region, VLF waves, hydrodynamic waves, detectability

SCIENCE TOPIC: Physics

SPECIAL SCIENCE TOPIC: Physics of ionized gases and plasma

UDK NUMBER: 533.9.1 (043.3)

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Karakteristike i perturbacije plazme jonosferske D-oblasti	5
2.1	Karakteristike jonosferske D-oblasti	8
2.1.1	Sastav	8
2.1.2	Interakcija sa spoljašnjim zračenjem	11
2.1.3	Fizički i hemijski procesi u D-oblasti jonosfere	13
2.2	Perturbacije plazme jonosferske D-oblasti	14
2.2.1	Procesi u poremećajima plazme D-oblasti	14
2.2.2	Izvori poremećaja	15
3	Dijagnostika plazme jonosferske D-oblasti	23
3.1	Osnove teorije prostiranja VLF signala	24
3.1.1	Modeliranje prostiranja VLF signala - LWPC model	25
3.2	Eksperimentalna postavka	26
3.2.1	Globalna postavka	26
3.2.2	AWESOME VLF prijemnik	28
3.3	Detekcija poremećaja plazme jonosferske D-oblasti	33
3.3.1	Pouzdanost detekcije poremećaja plazme D-oblasti konkretnim izvorom	33
3.3.2	Primeri poremećaja signala	34
4	Modeliranje parametara plazme D-oblasti	41
4.1	Motivacija	41
4.2	Dinamika plazme D-oblasti tokom Sunčevog X-flera	42
4.2.1	Proizvodnja elektrona	43
4.2.2	Gubici elektrona	47

4.2.3	Dinamika plazme D-oblasti na kraju relaksacionog perioda nakon Sunčevog X-flera	47
4.3	Modeliranje koncentracije elektrona	49
5	Hidrodinamički talasi u D-oblasti jonosfere	55
5.1	Motivacija	56
5.2	Model atmosfere i linearne perturbacije	56
5.3	Obrada eksperimentalnih podataka	59
6	Ispitivanje detektabilnosti slabih perturbacija D-oblasti pomoću VLF signala	62
6.1	Motivacija	63
6.2	Vremenski intervali posmatranja i detektovanih poremećaja	64
6.3	Klasifikacija uzorka	67
6.4	Metod analize	68
7	Rezultati	71
7.1	Modeliranje parametara plazme D-oblasti	71
7.1.1	Analizirani Sunčevi X-flerovi i eksperimentalni podaci	72
7.1.2	Wait-ovi parametri	74
7.1.3	Modeliranje koncentracije elektrona	78
7.1.4	Parametri plazme D-oblasti na kraju relaksacionog perioda nakon Sunčevog X-flera	82
7.1.5	Poređenje uticaja usled pojačanja X-zračenja i $Ly\alpha$ linije	85
7.2	Hidrodinamički talasi	89
7.2.1	Akustični i gravitacioni talasi u niskoj jonosferi	89
7.2.2	Akustični i gravitacioni talasi izazvani izlaskom i zalaskom Sunca . .	90
7.3	Ispitivanje detektabilnosti γ -bljeskova u D-oblasti	93
7.3.1	Uzorak	94
7.3.2	Ceo uzorak	101
7.3.3	Klasifikacija po ukupnom odbroju fotona na satelitu	107
7.3.4	Klasifikacija po upadnom pravcu γ -bljeska	111
7.3.5	Klasifikacija po osunčanosti putanje signala	114
7.3.6	Sumarni uticaji pre i posle	116

Poglavlje 1

Uvod

Zemljina atmosfera je, kao sloj koji obavija sve ostale delove planete, pod konstantnim uticajem zračenja iz svemira, sa jedne, i brojnih prirodnih i veštački izazvanih procesa koji dolaze sa Zemljine površine i iz njene unutrašnjosti, sa druge strane. Njihovo pojedinačno pristustvo i inteziteti se menjaju u vremenu i prostoru čineći fizičke i hemijske osobine gasa u Zemljinj atmosferi prostorno-vremenski zavisnim. Na taj način oni utiču na klasifikacije delova atmosfere prema različitim karakteristikama.

Jonosfera predstavlja sloj koji se od ostalih delova razlikuje po nezanemarljivom prisustvu naelektrisanih čestica i brojnim procesima koji plazmu izdvajaju od neutralnog gasa. Pored čisto naučnog značaja, istraživanja ove oblasti Zemljine atmosfere imaju i brojne praktične primene. Ona su, pre svega, izuzetno važna u oblasti telekomunikacija. Naime, prilikom prostiranja radio signala na velikim razdaljinama dolazi do njihove refleksije od jonosfere čije stanje utiče na karakteristike signala na mestu prijemnika. Takođe, u savremeno doba veoma zastupljene, komunikacije pomoću satelita zavise od osobina plazme na različitim visinama. Pored toga, istraživanja ukazuju na moguću povezanost promena u jonosferi sa jakim seizmičkim i ciklonskim procesima i to u smislu mogućih predviđanja prirodnih katastrofa, što u budućnosti može predstavljati izuzetno važan doprinos u sprečavanju nesreća velikih razmera.

Posmatranje jonosfere, čija se struktura, idući od površine Zemlje, sastoji od D-, E- i F-oblasti tokom dana, se vrši različitim tehnikama u zavisnosti od visine koja se istražuje. One se baziraju na merenjima sa površine Zemlje radarima i prijemnicima radio signala, na direktnim raketnim merenjima i na merenjima koja uključuju satelite. U ovoj disertaciji pažnja je fokusirana na najnižu jonosfersku oblast - D-oblast, i na metod posmatranja baziran

na prostiranju elektromagnetnih talasa vrlo niskih frekvencija (VLF od engleskog very low frequency).

VLF talasi se reflektuju na donjim slojevima jonosfere, što dozvoljava upotrebu analize karakteristika VLF signala, amplitude i faze, zabeleženih na VLF prijemnicima za istraživanje ove atmosferske oblasti. U tom cilju, širom sveta nalaze se, s jedne strane, mnogobrojni predajnici VLF signala, a sa druge strane, mnogobrojni VLF prijemnici povezani u nekoliko međunarodnih mreža što značajno utiče na široku dostupnost podacima. Na Institutu za fiziku se od 2004. nalazi AbsPAL (Absolute Phase and Amplitude Logger), a od 2008. godine i AWESOME (Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education) VLF prijemni sistem. Izučavanje niske jonosfere ovom metodom ima dve vrlo bitne karakteristike. Prvo, emitovanje i primanje signala je kontinuirano u vremenu, što pored periodičnih i dugotrajnih promena u D-oblasti omogućava praćenje i nepredvidivih i kratkotrajnih uticaja različitih pojava na ovaj deo jonosfere. I drugo, s obzirom na široku rasprostranjenost i brojnost kako predajnika tako i prijemnika, moguće je registrovati lokalne poremećaje i vršiti poređenja uticaja jačih perturbacija u različitim delovima posmatrane atmosferske oblasti.

U cilju kvantitativnih analiza, razvijeni su kako numerički modeli za simulaciju prostiranja VLF signala tako i brojne teorijske procedure kojima se izračunavaju parametri plazme D-oblasti. U ovoj disertaciji su predstavljeni rezultati istraživanja u poslednje tri godine koji su zasnovani na analizi signala registrovanih AWESOME prijemnikom uključenim u Stanford/AWESOME mrežu za globalna VLF istraživanja, modeliranju i razvijanju teorijskih procedura. Prikazana istraživanja predstavljaju rezultat saradnje sa istraživačima iz različitih naučnih oblasti što je rezultiralo u tri različita pravca:

- Modeliranje parametara plazme D-oblasti.
- Proučavanje hidrodinamičkih talasa u ovom delu atmosfere.
- Ispitivanje detektabilnosti događaja koji slabo jonizuju plazmu u D-oblasti primenom statističke analize.

U narednom delu disertacije, Poglavlju 2, dat je kratak pregled strukture atmosfere kako bi se ukazalo na specifičnosti koje jonosferu izdvajaju od ostalih delova Zemljinog vazdušnog omotača. Nakon toga, akcenat je stavljen na fizičke i hemijske osobine plazme D-oblasti i uzročnike varijacija u njenom sastavu i stanju. Dat je pregled mnogobrojnih izvora i me-

hanizama poremećaja koji, s obzirom na položaj u kom se posmatrana oblast nalazi, potiču iz svemira, atmosfere i, kako aktuelna istraživanja nagoveštavaju, najverovatnije i iz litosfere.

U Poglavlju 3 dat je opis eksperimentalne postavke VLF predajnika i AWESOME prijemnika, nakon čega je detaljno analizan uređaj kojim su registrovani korišćeni podaci. U drugom delu ovog poglavlja prikazane su tipične promene u signalima prouzrokovane od strane nekoliko perturbatora, kao i njihova podela koja se odnosi na periodičnost i predvidivost vremenskih varijacija.

U nastavku, Poglavlja 4, 5 i 6 daju procedure koje su razvijene u okviru izrade ove disertacije i korišćene u modeliranju jonosfere i teorijskim analizama.

Proces modeliranja prostornih i vremenskih raspodela elektronske koncentracije, baziran na posebno razvijenoj tehnici upoređivanja registrovanih amplituda i faza sa odgovarajućim vrednostima dobijenim numeričkim modeliranjem prostiranja signala, je objašnjen u Poglavlju 4. Ova procedura je predstavljala osnovu na kojoj su, kao posledica dobre vremenske rezolucije izračunatih podataka, dalje omogućene teorijske analize drugih parametara plazme. U studiji je prikazana metoda u kojoj se intenzivniji poremećaji (u konkretnim slučajevima su razmatrani Sunčevi X-flerovi i raspodele elektronske koncentracije tokom poremećaja koje oni izazivaju) koriste za određivanja karakteristika plazme u periodu njene relaksacije nakon prestanka uticaja i posledično, na osnovu dobijenih saturacionih vrednosti, u periodu mirne jonosfere.

Pored opisanih promena u lokalnim karakteristikama plazme, u delu disertacije, prezentovanom u Poglavlju 5, prikazana je analiza hidrodinamičkih talasa prouzrokovanih naglim poremećajima. U radu je data teorijska procedura kojom se pomoću Fourier-ovih transformacija određuju periodi oscilacija linearnih akustičnih i gravitacionih talasa. Ona je primenjena na procese izlaska i zalaska Sunca.

Pored navedenih razmatranih reakcija plazme D-oblasti na konkretnu perturbaciju, ovaj prostor je konstantno izložen i mnogobrojnim slabijim perturbacijama. Iz tog razloga vršena su istraživanja uticaja slabih perturbacija izazvanih γ -bljeskovima. U Poglavlju 6 predstavljena je statistička analiza kratkotrajnih poremećaja u amplitudi signala nakon početaka posmatranih perturbacija. Konkretna primena ove analize je data na primeru upada visokoenergijskog zračenja koji se odnosi na registrovane γ -bljeskove iz svemira.

Analiza i diskusija rezultata istraživanja u ovoj disertaciji data je u Poglavlju 7, dok su zaključci prikazani u Poglavlju 8.

Spisak korišćene literature naveden je u spisku referenci i sadrži 124 bibliografske jedinice.

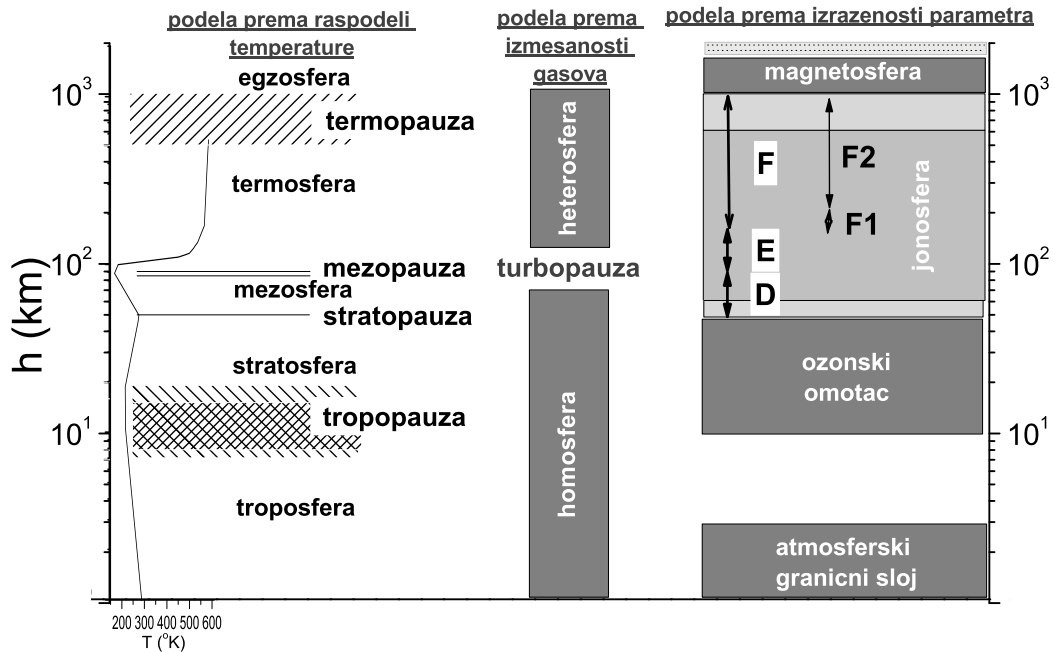
Poglavlje 2

Karakteristike i perturbacije plazme jonosferske D-oblasti

Atmosfera zajedno sa hidrosferom, litosferom i biosferom čini strukturu planete Zemlje. S obzirom da predstavlja omotač oko ostalih slojeva, uticaji koji dolaze iz svemira, pre svega sa Sunca, se najviše manifestuju u ovoj oblasti i utiču na klasifikaciju slojeva unutar nje. Iako je podela samo terminološka i nema jasne granice između slojeva, parametri koji karakterisu gas na određenim visinama se koriste za definisanje oblasti unutar atmosfere (Slika 2.1). Njihovi opisi se mogu naći u velikom broju preglednih studija, između ostalog i na sajtovima kao što su <http://www.wikipedia.org/> i <http://www.windows2universe.org/earth/earth.html> na kojima se prvenstveno bazira prikaz dat u narednom tekstu.

Pre svega, na osnovu temperature, atmosfera se može podeliti na troposferu, stratosferu, mezosferu i termosferu. Naime, zavisnost ovog parametra nije monotona od visine. Idući od površine Zemlje prvo se registruje tendencija pada temperature. Ovaj sloj se naziva troposfera. Sa povećanjem visine zatim sledi njen porast u sloju statosfera, zatim ponovni pad u sloju mezosfera i na kraju porast koji se odnosi na oblast nazvanu termosfera. Prostor iznad ovih slojeva, odakle atomi i molekuli praktično napuštaju atmosferu i odlaze u svemir, se naziva egzosfera. Karakteristike slojeva se menjaju u zavisnosti od brojnih faktora kao što su geografska širina i dužina, doba dana, sezona i aktivnost Sunca. Karakteristične vrednosti za granice su prikazane u Tabeli 2.1. Prelazi između susednih oblasti se, idući ka višim slojevima, nazivaju tropopauza, stratopauza, mezopauza i termopauza.

Unutar opisanih slojeva definisanih prema temperaturnoj raspodeli, postoje i specifične



Slika 2.1: Podele atmosfere prema raspodeli temperature (levi deo grafika), izmešanosti gasova (srednji deo grafika) i dominaciji parametara kao što su magnetno polje, naelektrisanje i koncentracija ozona i prisustvu uticaja površine Zemlje (desni deo grafika). Osenčeni delovi predstavljaju domene visina u kojima fluktuiraju granice oblasti (Tabela 2.1), a prikazana je i podela jonosfere na D-, E- i F-oblast (poslednja se tokom dana deli na F1- i F2-oblast).

oblasti koje se razlikuju od ostalog prostora po nekom drugom parametru. Tako se, pored podele atmosfere u zavisnosti od izmešanosti gasova na homosferu i heterosferu, na osnovu uticaja površine Zemlje, prisustva ozona, naelektrisanja i dominacije magnetnog polja definišu oblasti: atmosferski (planetarni) granični sloj, ozonski omotač, jonosfera i magnetosfera.

Tabela 2.1: Slojevi atmosfere definisani na osnovu vertikalne raspodele temperature. Podaci su preuzeti sa sajta http://www.windows2universe.org/php/tour_test_sqli.php?page=/earth/Atmosphere/layers.html.

sloj	donja granica (km)	gornja granica (km)
troposfera	0	7-20
stratosfera	8-16	oko 50
mezosfera	oko 50	oko 85
termosfera	oko 90	500-1000

Homosfera i heterosfera su slojevi koji se prostiru ispod, odnosno iznad oko 80 km - 100 km i odnose se na oblasti u kojima su gasovi izmešani i u određenoj meri podeljeni,

respektivno. U prvom slučaju svi atomi i molekuli imaju približno istu raspodelu po visinama, dok su u drugom slučaju teži gasovi, kao što su azot i kiseonik skoncentrisaniji na nižim slojevima, a lakši gasovi kao vodonik i helijum povećavaju udeo na većim visinama. Prelaz između ova dva sloja se naziva turbopauza.

Atmosferski (planetarni) granični sloj je u direktnom kontaktu sa površinom planete i reaguje na promene koje se na njoj dešavaju. Fizičke veličine kao što su temperatura, vlažnost i brzina strujanja vazduha su promenljive i intenzivna su vertikalna mešanja. Debljina ovog sloja varira od oko 300 m do oko 3 km ili više u popodnevrim satima na suvim područjima.

Ozonski omotač predstavlja sloj u kome je koncentracija ozona znatno uvećana u odnosu na ostale slojeve. Prostire se na visinama između 15 km - 20 km (donja granica) i 30 km - 35 km (gornja granica) i ima važnu ulogu u zaštiti od ultraljubičastog zračenja.

Jonosfera je oblast u kojoj je značajno prisustvo naelektrisanih čestica. Iako u manjim koncentracijama u odnosu na neutralne čestice oni značajno utiču pre svega na prostiranje elektromagnetnih signala koji se koriste u oblasti telekomunikacija i praktična primena naučnih istraživanja ovog sloja je pre svega zastupljena u toj tehnologiji. Jonosfera je podeljena na tri oblasti (vidi Sliku 2.1):

- D-oblast je najniža i prostire se na visinama između 50 km - 60 km (donja granica) i 85 km - 90 km (gornja granica). Nastaje prilikom jonizacionih procesa izazvanih pre svega $\text{Ly}\alpha$ (121.6 nm) zračenjem sa Sunca što direktno povezuje njegovo postojanje sa dobom dana: formira se tokom izlaska i prisutan je do zalaska Sunca kada iščezava. $\text{Ly}\alpha$ fotoni jonizuju NO molekul tako da je NO^+ najzastupljeniji primarni jon u ovom području. On takođe, kao početno jedinjenje, učestvuje u nizu hemijskih reakcija čiji je proizvod vodeni klaster vodonikovog jona, $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_3$, koji je u donjem delu posmatranog prostora dominantan jon. U ovoj oblasti se reflektuju VLF radio talasi, dok visokofrekventni HF (od engleskog high frequency) signali prolaze kroz njega uz značajno slabljenje.
- E-oblast se prostire na visinama između 85 km - 90 km (donja granica) i oko 120 km - 140 km (gornja granica). Prisutna je samo tokom dana, a dominantni joni su O_2^+ i NO^+ koji nastaju u procesu jonizacije odgovarajućih neutralnih čestica mekim X-zracima. Na ovim visinama mogu da se jave i tanki oblaci sa

velikom koncentracijom elektrona koji traju od nekoliko minuta do nekoliko sati, nezavisno od doba dana. Oni predstavljaju sporadičnu E_s -oblast za koju se pretpostavlja da nastaje kao posledica grmljavina, prolaska meteora ili sunčeve i geomagnetne aktivnosti. Njegovo prisustvo značajno utiče na prostiranje radio talasa koji prodiru do ovih visina.

- Najviši i najveći deo jonosfere je oblast F koja je u toku dana podeljena na dva dela: F1- i F2-oblast. F1 oblast, generisana jonizacijom O_2 i NO molekula zračenjem na talasnim dužinama između 20 nm i 90 nm se prostire od oko 140 km do 200 km i prisutana je samo u toku dana. Celodnevno postojanje F2 oblasti na visinama oko 200 km pa do gornjih granica jonosfere je posledica pre svega prisustva O^+ jona i u manjim količinama jona N^+ nastalih jonizacijom UV fotonima talasnih dužina 10 nm - 100 nm. U F oblasti se reflektuju HF radio talasi.

Magnetosfera predstavlja sloj u kome dominira prisustvo magnetnog polja. Ona kontroliše kretanje naelektrisanih čestica i štiti niže slojeve od njihovog upada iz svemira. S obzirom na prostornu konfiguraciju geomagnetnog polja čije se linije sila savijaju u oblastima magnetnih polova u ovim oblastima naelektrisanja dublje prodiru u jonosferu i njihov uticaj se i na nižim slojevima jonosfere ne može zanemariti. Na oblik magnetnog polja utiče pre svega sunčev vetar koji narušava sfernu simetriju sabijajući udarnim talasom najviši sloj Suncu okrenutog dela magnetosfere na 6 - 10 prečnika Zemlje. Na suprotnoj strani se formira magnetni rep koji se proteže na mnogo većim udaljenostima.

2.1 Karakteristike jonosferske D-oblasti

U ovoj disertaciji predstavljene analize se odnose na istraživanja u jonosferskoj D-oblasti. Iz tog razloga, u narednom delu je pažnja usmerena ka osnovnim karakteristikama i perturbacijama plazme locirane na ovom prostoru.

2.1.1 Sastav

Plazma D-oblasti je slabojonizovana. Procentualni udeo čestica koje je sačinjavaju varira kako periodično (dnevne i sezonske promene i promene tokom Sunčevog ciklusa), tako i pod

uticajem brojnih neperiodičnih uticaja koji menjaju brzine jonizacije, temperature i lokalni sastav plazme čime utiču na dinamiku hemijskih procesa u ovoj oblasti. Pored toga varijacije se javljaju i sa promenom visine i geografske lokacije (geografke dužine i širine) posmatrane oblasti. Svi ovi parametri mogu uticati na razlike u vrednostima i od nekoliko redova veličine čak i u slučaju kada se odnose na istu visinu.

U literaturi postoji nekoliko modela plazme D-oblasti. Pored globalnog International Reference Ionosphere (IRI) modela (*Bilitza, 1992*) koji obuhvata visine od 60 km - 2000 km veoma studiozna analiza plazme u ovom delu atmosfere je data u Sodankyla Ion Chemistry (SIC) modelu (*Turunen et al., 1996*) kao i u analizama pojedinih komponenti datim u npr. *Kull et al. (1997)*; *Thomas (1976)*; *Thomas and Bowman (1985)*. Generalno govoreći, hemijska struktura plazme je u modelima data preko velikog broja neutralnih atoma i molekula, pozitivnih i negativnih jona (uključujući i klastere koji se od njih formiraju) i elektrona.

Neutrali. Prema podacima datim u *Nath and Setty (1976)*, u sastavu D-oblasti dominiraju molekuli (N_2 , O_2 , CO) koncentracija koje imaju tendenciju opadanja sa porastom visine i koje se nalaze u opsegu reda veličine 10^{15} m^{-3} - 10^{23} m^{-3} . Iako su ovi molekuli najzastupljeniji, NO molekul, koncentracije 10^{15} m^{-3} - 10^{17} m^{-3} , ima najznačajniju ulogu u jonizacionim procesima pre svega u periodu neporemećene jonofsere. Njegova fotojonizacija $Ly\alpha$ fotonima praktično najviše doprinosi stvaranju D-oblasti tokom dana. Za proizvodnju elektrona je značajan i ekscitovani molekul $O_2(^1\Delta_g)$ koncentracija 10^{15} m^{-3} - 10^{16} m^{-3} . Manje zastupljeni su i H_2O i O_3 molekuli (10^{11} m^{-3} - 10^{13} m^{-3}). Od atoma značajniji udeo imaju O , H i N (10^{12} m^{-3} - 10^{22} m^{-3}).

Joni. Koncentracije pozitivnih jona su znatno manje od koncentracija dominantnih molekula. U mirnim uslovima NO^+ je najzastupljeniji primarni jon, dok se pri intenzivnim upadima pre svega fotona iz oblasti X elektromagnetnog spektra tokom Sunčevih flerova značajnije povećavaju udeli O_2^+ i N_2^+ jona. Takođe, treba naglasiti da NO^+ jon učestvuje u brojnim hemijskim reakcijama koje kao proizvode daju pozitivne jone klastera kao što su vodeni klasteri jona H^+ i NO^+ , $H^+(H_2O)_n$ i $NO^+(H_2O)_n$, pri čemu koncentracija $H^+(H_2O)_3$ na najnižim visinama prevazilazi koncentraciju primarnih NO^+ jona (*Thomas, 1976*). Pored navedenih klastera postoje i drugi kao što su npr. $NO^+(CO_2)$ i $O_2^+(H_2O)$ (*Kull et al., 1997*).

Udeo negativnih jona je znatno manji u D-oblasti tokom dana nego na ovim visinama noći. Najzastupljeniji su HCO_3^- , CO_3^- , CO_4^- , NO_3^- , NO_2^- , O_2^- , O_3^- i O^- koji

sumarno dostižu koncentracije i do reda 10^9 m^{-3} (Kull *et al.*, 1997). U osunčanom periodu odnos njihove koncentracije i koncentracije elektrona značajno opada sa visinom i pada ispod 1 ($N_{neg.jona}/N_e < 1$) iznad približno 70 km u neporemećenim dnevnim uslovima (McEwan and Phillips, 1978). Kao i generalno eksperimentalni podaci i rezultati numerički i teorjskih analiza, vrednosti prikazane u literaturi se značajno razlikuju na ovim visinama. Ispitivanja data u Thomas and Bowman (1985) pokazuju da je granica na kojoj su koncentracije negativnih jona i elektrona jednake na nešto nižim visinama (oko 67 km) uz nagli pad sa porastom visine (na 70 km iznosi oko 0.1). Približna vrednost na 70 km je dobijena i u Rishbeth and Garriott (1969) tokom flera i u Osepian *et al.* (2009) tokom mirnih uslova (u ovoj studiji pokazano je da se i pri intenzivnim upadima protona emitovanih sa Sunca on ne povećava značajno u smislu da je i dalje znatno manji od 1). Prema navedenim studijama, može se zaključiti da iznad 70 km koncentracija elektrona dominira nad koncentracijom negativnih jona tokom dana što, kao što će u Poglavlju 4.2.2 biti objašnjeno, pojednostavljuje kvantitativni opis dinamike plazme tokom perturbacija. Međutim, prema SIC modelu, izjednačavanje razmatranih koncentracija je na oko 72 km što ukazuje da, prilikom zanemarivanja koncentracije negativnih jona u proračunima treba biti oprezan kod postavljanja donje granice prostora za koju analize važe. Klasteri negativnih jona su takđe prisutni u D-oblasti. Prema shemi datoj u Turunen *et al.* (1996) to su $\text{OH}^-(\text{H}_2\text{O})$, $\text{O}_3^-(\text{H}_2\text{O})$, $\text{O}_2^-(\text{H}_2\text{O})$, $\text{NO}_3^-(\text{H}_2\text{O})$, $\text{CO}_3^-(\text{H}_2\text{O})$ i $\text{Cl}^-(\text{H}_2\text{O})$.

Elektroni. Kao najpokretljivije, u posmatranoj oblasti značajno zastupljene naelektrisane čestice, elektroni predstavljaju komponentu čije promene utiču na telekomunikacione procese usled čega se istraživanje parametara koji ih opisuju nalazi u fokusu brojnih naučnih studija među kojima je i ova disertacija. Direktna raketna merenja, i proračuni izvedeni iz drugih eksperimentalnih podataka (objašnjeno na primeru VLF talasa u Poglavlju 3) pokazuju da koncentracija elektrona, generalno, ima tendenciju porasta sa visinom uz blaže varijacije koje zavise od slučaja do slučaja. Tokom neporemećenog stanja vrednosti su im reda veličine 10^7 m^{-3} - 10^{10} m^{-3} i kao što je rečeno u opisu negativnih jona, iznad oko 70 km predstavljaju dominantno negativno naelektrisanje. Pri intenzivnim perturbacijama izazvanim povećanjem jonizujućeg zračenja, vrednosti im se mogu povećati i za nekoliko redova veličine.

2.1.2 Interakcija sa spoljašnjim zračenjem

S obzirom na položaj u kom se nalazi, jasno je da plazma D oblasti ne predstavlja izolovan sistem. Ona je pod stalnim uticajem pojava iz svemira i drugih delova atmosfere, kao i procesa koji se dešavaju u litosferi. Podele pristiglog zračenja mogu biti različite. Pre svega postoje uticaji koji su stalno prisutni (npr. vodonikovo $\text{Ly}\alpha$ -zračenje sa Sunca), a postoje i oni čije prisustvo se može registrovati samo u slučaju njegovog značajnog inteziviranja (npr. elektrona iz viših slojeva atmosfere koji u D-oblast pristižu nakon interakcije sa elektromagnetnim zračenjem nastalim tokom munja). Svi ovi uticaji su promenljivi tokom vremena. U Poglavlju 2.2 su detaljno analizirane perturbacije plazme usled promena u pristiglom intenzitetu zračenja nekoliko najznačajnijih uzročnika poremećaja.

Prema lokaciji odakle dolaze perturberi se mogu podeliti na one sa izvorima u svemiru sa posebnim osvrtom na Sunčevo zračenje (dominantno u mirnim uslovima) i na one koji dolaze iz drugih delova atmosfere. Ovde se može reći da postoje nagoveštaji i uticaja jakih poremećaja u litosferi, kao i uticaji veštački izazvanih procesa.

Pristiglo zračenje može prouzrokovati različite promene u D-oblasti kao što su jonizacija, ekscitacija, zagrevanje itd. S obzirom da su studije prikazane u ovoj disertaciji bazirane na promeni elektronske koncentracije akcenat u analizi spoljašnjih uticaja je stavljen na jonizaciju.

Osnovni mehanizam u stvaranju elektrona unutar jednog dela jonosfere je baziran na jonizacionim procesima koji mogu biti izazvani zračenjima u različitim delovima elektromagnetnog spektra (UV-, X- i γ -zračenje) - fotojonizacija, i česticama (pre svega elektronima, protonima, alfa česticama) sa dovoljnim energijama da jonizuju bar jednu vrstu konstituenta u posmatranom prostoru. Dinamika ovih procesa u D-oblasti zavisi kako od karakteristika same lokalne plazme, bitnih za odgovarajući ukupni presek za jonizaciju, tako i od pristiglog intenziteta zračenja konkretne čestice ili fotona sa konkretnom energijom u posmatranu oblast koji zavisi od inicijalnog intenziteta i njegovog slabljenja do posmatrane lokacije. Iz tog razloga potrebno je analizirati više pojava kako bi se mogla odrediti efektivna jonizacija koja potiče od neke čestice odgovarajuće energije. To se može videti i na primerima tvrdog X- i γ -zračenja sa jedne, i dela UV-zračenja sa druge strane. Naime, za prva dva domena slabljenje prilikom prostiranja kroz više atmosferske slojeve je vrlo malo. Međutim, i presek za jonizaciju u D-oblasti je mali tako da i veći upadni fluksevi imaju uglavnom mali uticaj na stvaranje elektrona u donjem delu jonosfere. Do iste konstatacije se

može doći i u slučaju većeg dela UV zračenja s obzirom da je njegovo slabljenje u atmosferi jako. U slučaju mirne jonosfere, istraživanja (npr. *McEwan and Phillips* (1978)) pokazuju da su glavni izvori jonizacije u D-oblasti $\text{Ly}\alpha$ (jonizuje molekul NO; dominantno između 70 km i 80 km), kosmičko (intezivira se sa smanjenjem visine i postaje nezanemarljivo ispod približno 70 km) i zračenje u UV-domenu talasnih dužina između 102.7 i 111.8 nm (jonizuje metastabilni molekul $\text{O}_2(^1\Delta_g)$)).

Tabela 2.2: Granične talasne dužine neophodne za fotojonizaciju osnovnih konstituenata plazme D-oblasti koji učestvuju u ovom procesu. Podaci za $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ su preuzeti iz *Ratcliffe* (1972), a za ostale konstituente iz *Jagtap* (2012).

Konstituent	$\lambda(\text{nm})$
N_2	≤ 79.6
O_2	≤ 102.7
$\text{O}_2(^1\Delta_g)$	$102.7 \leq \lambda \leq 111.8$
NO	≤ 134.0
O	≤ 91.1

Elektromagnetno zračenje u D-oblast pristiže sa Sunca (u svim energijskim domenima), iz svemira (visokoenergijsko γ - i tvrdo X-zračenje nastalo usled npr. eksplozija supernova koje je praćeno i zračenjem na nižim energijama) i iz nižih atmosferskih slojeva kao posledice pražnjenja tokom munja (takođe može da bude u širokom energijskom domenu). Merenje upadnog fluksa se vrši brojnim satelitima (npr. GOES¹, SWIFT², INTEGRAL³), integralno, u različitim energijskim kanalima. Vremenski promenljiv spektar se iz ovih podataka dobija teorijski, različitim modelima kao što su HEASARC⁴ i FISM⁵ programi za analizu spektra tokom dana (*Chamberlin et al.*, 2007) i tokom flerova (*Chamberlin et al.*, 2008). Apsorpcija zračenja zavisi of energije upadnih fotona kao i sastava i dužine dela atmosfere kroz koju prolaze pre dolaska na posmatranu lokaciju. Najdublje prodiru fotoni na vrlo malim talasnim dužinama (X i γ deo spektra) i $\text{Ly}\alpha$ -zračenje (*Ratcliffe*, 1972). U Tabeli 2.2 su date neophodne talasne dužine fotona za fotojonizaciju osnovnih konstituenata plazme D-oblasti.

Visokoenergijsko čestično zračenje koje u Zemljinu atmosferu dolazi iz svemira se naziva

¹Geostationary Operational Environmental Satellite.

²Satelit SWIFT je dobio ime po ptici čiope (engleski swift) koja se nalazi u logu ovog satelita.

³INTERNational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory.

⁴High Energy Astrophysics Science Archive Research Center.

⁵Flare Irradiance Spectral Model.

kosmičko zračenje. U zavisnosti od mesta njihovog nastanka ovo zračenje se deli na⁶: Sunčev vetar (nastaje tokom eksplozija na Suncu), galaktičko kosmičko zračenje (najverovatnije dolazi nakon eksplozija supernovih zvezda, iz okoline crnih rupa i neutronske zvezde koje se nalaze u našoj galaksiji Mlečni put), vangalaktičko kosmičko zračenje (smatra se da dolazi izvan naše galaksije mada mu nije tačno utvrđeno poreklo; pretpostavlja se da može nastati u jezgri aktivnih galaksija ili tokom sudara galaksija) i anomalno kosmičko zračenje (najverovatnije nastaje na obodu heliosfere - granice između oblasti gde je Sunčevo magnetno polje dominantno i međuzvezdanog prostora). U sastavu kosmičkog zračenja najviše ima protona, zatim α čestica, pa jezgara ugljenika, kiseonika, gvožđa i kalcijuma, dok su u malom udelu prisutni i elektroni. Upadni fluksevi pojedinih vrsta čestica u više energijskih kanala se mere satelitima (npr. GOES-15 satelitom). Prodiranje ovih naelektrisanih čestica kroz atmosferu jako zavisi od geografske lokacije. Naime, geomagnetno polje predstavlja štit za njihovo nesmetano kretanje ka površini Zemlje. Najmanje slabljenje intenziteta je na magnetnim polovima zbog zakrivljenosti magnetnih linija sila. U D-oblasti brzina jonizacije koja potiče od kosmičkog zračenja se povećava sa opadanjem visine i, u mirnoj jonosferi, postaje značajna na visini oko 70 km (*McEwan and Phillips*, 1978). Kao i u slučaju elektromagnetnog zračenja, jonizacija u D-oblasti može da nastane i putem sudara sa česticama iz drugih slojeva atmosfere koje se ubrzavaju tokom procesa vezanih za munje (detaljno opisano u Poglavlju 2.2.2).

2.1.3 Fizički i hemijski procesi u D-oblasti jonosfere

Konstituenti D-oblasti učestvuju u velikom broju procesa koji rezultuju u ekscitaciji, deekscitaciji, jonizaciji i drugim promenama stanja i vrsta konstituenta. Hemijski procesi unutar D-oblasti su detaljno analizirani u literaturi (npr. *McEwan and Phillips* (1978); *Turunen et al.* (1996); *Thomas et al.* (1973); *Thomas* (1976); *Thomas and Bowman* (1985); *Osepian et al.* (2009)), gde su pored hemijskih reakcija dati i koeficijenti koji se odnose na njihovu brzinu uključujući i temperaturnu zavisnost za neke od njih. S obzirom na činjenicu da je za ovu disertaciju najvažnija analiza elektronske koncentracije, na ovom mestu, hemijske procese možemo podeliti na one koji uzrokuju povećanje ili smanjenje broja elektrona i na procese u kojim ove čestice ne učestvuju, ni inicijalno ni kao proizvod reakcije.

Iako slobodni elektroni nastaju prvenstveno pod uticajem spoljašnjeg zračenja u proces-

⁶Vidi http://www.windows2universe.org/physical_science/physics/atom_particle/cosmic_rays.html

sima jonizacije, njihov broj se povećava i u reakcijama negativnih jona sa neutralima. S druge strane, smanjenje broja elektrona je primarno posledica procesa unutar D-oblasti. Tu spadaju rekombinacioni procesi pozitivnih jona sa elektronima i zahvati elektrona od strane neutrala. U neporemećenom stanju, efektivne brzine ova dva tipa procesa su izjednačene i elektronska koncentracija se aproksimativno ne menja u posmatranom vremenskom intervalu.

Pored procesa u kojima učestvuju elektroni, postoje i mnogobrojni drugi procesi između pozitivnih jona i neutrala, negativnih jona i neutrala, pozitivnih i negativnih jona (jon - jon rekombinacija), pozitivnih i negativnih jona sa fotonima (fotodisocijacija).

Uloga transportnih procesa u dinamici neperturbovane jonosferske plazme postaje značajna iznad visina od oko 120 - 150 km (*Blaunstein and Christodoulou*, 2006) zbog čega nisu uključeni u modele plazme D-oblasti (*William and Foley*, 1978; *Turunen et al.*, 1992). Međutim, zabeležena su talasna kretanja nastala kao posledica lokalnih perturbacija o kojima će biti reči u Poglavlju 2.2.2.

2.2 Perturbacije plazme jonosferske D-oblasti

Plazma u jonosferi je izložena stalnom uticaju promenljivih spoljašnjih faktora. Kompleksnost procesa nastanka poremećaja, njihovog prostiranja i delovanja na lokalnu plazmu čini teorijska istraživanja i dalje aktuelnim iako su bila tema mnogobrojnih studija tokom prošlog veka (npr. *Mitra* (1977)). U mnogim slučajevima postoje različite teorije, a eksperimentalni rezultati mogu samo kao pretpostavke da se dovedu u vezu sa posmatranim nestabilnostima. Naime, brojnost i napredvidiva vremenska zavisnost intenziteta pojedinačnih poremećaja s jedne i promenljivost sastava i dinamike lokalne plazme u posmatranoj sredini s druge strane uzrokuje praktično neponovljivost relevantnih procesa u potpunosti što isključuje egzaktnu eksperimentalnu analizu u laboratorijskim uslovima.

2.2.1 Procesi u poremećajima plazme D-oblasti

Vremenski zavisni intenziteti pojedinačnih spoljašnjih dejstava za posledicu imaju promene sastava i dinamike fizičkih i hemijskih procesa u plazmi D-oblasti. Varijacije koncentracija pojedinih vrsta čestica nastaju primarno usled promene brzine jonizacije kao posledice intenziviranja ili smanjenja jednog ili više tipova jonizujućeg zračenja. Pored toga, navedene

promene uzrokuju varijacije parametara plazme, kao što je npr. temperatura, i na taj način utiču na brzine hemijskih procesa koje posledično menjaju sastav lokalne sredine. Takođe, mnogobrojni eksperimentalno registrovani poremećaji se objašnjavaju dejstvom hidrodinamičkih talasa čiji se nastanak dovodi u vezu kako sa brojnim prirodnim, tako i veštačkim procesima u nekom lokalnom prostoru izvan ili u D-oblasti.

Navedeni procesi su u prirodi međusobno povezani i nastaju kao reakcija na jedan ili nekoliko izvora perturbacija. U narednom Poglavlju su predstavljeni najznačajniji izvori koji deluju na poremećaje plazme u D-oblasti tokom dana.

2.2.2 Izvori poremećaja

Najznačajniji uticaj na D-oblast, generalno, imaju procesi vezani za Sunčevo zračenje i to kako varijacije u samom zračenju tako i promene njegovog uticaja na lokalni prostor nastale pre svega usled rotacije i revolucije Zemlje. Same varijacije mogu imati, s jedne strane, periodičan karakter uzrokovan Sunčevim 11-godišnjim ciklusom, promenom godišnjih doba i dnevnim promenama i, s druge strane, neperiodičan, prolazan karakter uzrokovan naglim pojačanjem elektromagnetnog (flerovi) i čestičnog (izbacivanje koronalne mase) zračenja. Iz svemira perturbacije mogu izazvati i bljeskovi γ -zračenja nastali pri erupcijama supernova i spajanjima neutronske zvezde. Od pojava sa izvorima u atmosferi i litosferi koji se dovode u vezu sa jonosferskim perturbacijama se izdvajaju munje i zemljotresi, respektivno. Takođe postoje i istraživanja promena u gornjoj atmosferi nakon intenzivnih veštački izazvanih procesa.

- **Bazično elektromagnetno zračenje Sunca.** Ako posmatramo mirno Sunce, bez velikih oscilacija u zračenju, najznačajnije promene u plazmi D-oblasti nastaju usled varijacija u pristiglom $\text{Ly}\alpha$ -zračenju. Naime, iako je dubina prodiranja visokoenergijskih fotona iz X i γ dela spektra veća, njihov upadni fluks i preseki za jonizaciju su znatno manji tako da dominira jonizacija $\text{Ly}\alpha$ fotonima (Swamy, 1991) NO molekula (jedino oni imaju dovoljno malu energiju jonizacije u osnovnom stanju da ih $\text{Ly}\alpha$ fotoni mogu jonizovati). Veliki značaj ovog procesa se ogleda u činjenici da je on najizraženiji u samom formiranju D-oblasti (Nicolet and Aikin, 1960), i suprotno, njegovo odsustvo nakon zalaska Sunca je praćeno iščezavanjem najniže oblasti jonosfere. Oscilacije emisije ove linije sa Sunca imaju period od oko 11 godina koji zavisi od broja Sunčevih pega (Woods et al., 2000; Fröhlich, 2009). Međutim, mnogo dominantniji uticaj

na D-oblast ima geometrija prostiranja zračenja kroz atmosferu koja zavisi od rotacije i revolucije Zemlje (*Correia et al.*, 2011). Pored pomenutih periodičnih varijacija, prolazne promene u pristiglom intenzitetu bazičnog zračenja sa Sunca nastaju usled pomračenja kada Mesec u većoj ili manjoj meri sprečava prodiranje zraka do Zemljine atmosfere (*Singh et al.*, 2011b). Analiza promena u D-oblasti tokom izlazaka i zalazaka Sunca (*Nina and Čadež*, 2013a) i njegovog pomračenja (*Singh et al.*, 2011b) pokazuje prisustvo akustičnih i gravitacionih hidrodinamičkih talasa u D-oblasti nastalih kao posledica pomenutih procesa.

- **Sunčevi flerovi** se definišu kao iznenadne, brze i intenzivne varijacije u osvetljenosti. Nastaju oslobađanjem magnetne energije u Sunčevoj atmosferi, a emitovano zračenje obuhvata radio talase, optičku emisiju i zrake u UV, X i γ oblasti. Intenziviranje jonizacionih procesa u D-oblasti su posledica dejstva pre svega linija emitovanih tokom flerova u oblasti mekih X-zraka⁷. Oni su posledica zakročnog zračenja i mnoštva linija višestruko jonizovanih teških jona u plazmi Sunčeve korone. Klasifikacija ovih flerova se daje na osnovu integralnog fluksa na talasnim dužinama između 0.1 i 0.8 nm, registrovanog GOES satelitom⁸: do 10^{-6} W/m² u piku spadaju u B klasu, između 10^{-6} i 10^{-5} W/m² u C klasu, 10^{-5} i 10^{-4} W/m² u M klasu, dok najveći fluks (veći od 10^{-4} W/m²) u piku imaju flerovi u X klasi. X-flerovi velike jačine mogu izazvati značajne probleme u telekomunikacijama i uzrokovati dugotrajnije (nekoliko sati) pojačanje zračenja. Istraživanje uticaja X-flerova na plazmu jonosferske D-oblasti je tema mnogobronih studija (npr. *McRae and Thomson* (2004); *Kolarski et al.* (2011); *Nina et al.* (2011, 2012a); *Nina and Čadež* (2014)) i biće detaljno analizirani u ovoj disertaciji.

Naglo pojačanje intenziteta Ly α linije (121.6 nm) tokom flera nastaje u oblasti gornje hromosfere. Analize podataka dobijenih posmatranjem D-oblasti tokom simultanog pojačanja ove linije sa pojačanjem X-zračenja (*Nina et al.*, 2011; *Raulin et al.*, 2013) pokazuju da ono nema značajan uticaj u poremećaju niskojonosferske plazme.

Bljesak tvrdih X-zraka, energija od nekoliko desetina keV do nekoliko MeV, se obično javlja par minuta nakon bljeska mekih X-zraka kao posledica sudara elektrona ubrzanih do velikih energija tokom flera i atoma u nižim, gušćim slojevima Sunčeve atmosfere praćeno kontinuumom zakročnog zračenja u oblasti tvrdih X-zraka. Iako je istraživanje

⁷Vidi http://www.windows2universe.org/sun/atmosphere/solar_flares.html.

⁸Vidi <http://spaceweather.com/glossary/flareclasses.html>.

Sunčevih tvrdih X- i γ -bljeskova u toku flerova intezivirano (*Lin et al.*, 2003; *Hurford et al.*, 2003) zahvaljujući satelitskim podacima (RHESSI⁹ satelit), u literaturi nisu zabeležene studije o njihovom uticaju na D-oblast.

- **Izbacivanje koronarne mase** predstavlja naglu erupciju naelektrisanih čestica sa Sunca (*Gopalswamy*, 2009). Njihova učestanost se povećava sa povećanjem broja Sunčevih pega, tj. idući od minimuma ka maksimumu Sunčevog ciklusa. Značajniji uticaj ovih pojava se može registrovati u polarnim oblastima zbog zakrivljenosti magnetnih linija koje dozvoljavaju njihovo dublje prodiranje u jonosferu, što kao posledicu može izazvati intezivnu ekscitaciju azota i kiseonika, čijom se deekscitacijom emituje zračenje u vidljivom delu spektra (zelena, crvena, plava, ljubičasta). Ovo zračenje je vidljivo tokom noći i manifestuje se u vidu izuzetno lepih pojava u jonosferi nazvanih aurora borealis na severnom polu, odnosno aurora australis na južnom polu. Kao posledica ovih procesa javljaju se i hidrodinamički talasi u D-oblasti (*de Larquier et al.*, 2010).

Interesantno je napomenuti da se, za razliku od uticaja Sunčevog, uticaji ostalih vidova kosmičkog zračenja smanjuju idući ka maksimumu Sunčevog ciklusa. To je posledica pojačanja magnetnog polja Sunca koje se intezivira sa porastom broja Sunčevih pega i otežava prodiranje naelektrisanih čestica iz svemira u prostor oko njega koji uključuje i putanju po kojoj se kreće Zemlja.

- **Bljeskovi γ -zračenja.** Prema satelitskim podacima, bljeskovi visokoenergijskog zračenja iz svemira u oblasti γ -domena, praćeni X-zračenjem i zračenjem na manjim energijama, pristižu u Zemljinu atmosferu nekoliko puta mesečno (desava se i više puta u toku dana). Pretpostavlja se da ovi bljeskovi nastaju u burnim procesima u blizini crnih rupa u udaljenim galaksijama. Njihovo trajanje može da bude reda sekunde, ali i više od 1000 s. Smatra se da kratkotrajniji upadi nastaju tokom formiranja crne rupe od dve neutronske zvezde koje kružeći jedna oko druge gube energiju i spajaju se. S druge strane, duži bljeskovi γ -zraka nastaju tokom eksplozija veoma masivnih zvezda - supernovih.

U literaturi je zabeleženo svega nekoliko slučajeva koji pokazuju ili pretpostavljaju reakciju D-oblasti na bljeskove γ -zraka, pri čemu je najjači uticaj zabeležen u slučaju GRB041227 (*Inan et al.*, 2007). Značajan deo ove disertacije se odnosi na ispitivanje

⁹Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager.

kratkotrajnih reakcija plazme posmatrane oblasti na tu pojavu, a detaljna analiza, uz opis postojećih istraživanja, je data u Poglavljima 6 i 7.3.

- **Munje**

Jonosfera, uključujući i njenu najnižu D-oblast, je sastavni deo atmosfere i procesi u ovoj oblasti su prirodno spregnuti sa procesima na ostalim visinama najvišeg Zemljinog omotača (*Singh et al.*, 2011a; *Simões et al.*, 2012).

Najznačajniji proces u nižim slojevima atmosfere koji utiče na jonosfersku plazmu su munje. Njihov nastanak je posledica jonizacije čestica vodene pare koje se dižu sa tla prilikom sudara sa kondenzovanim kapljicama u donjem delu oblaka ili u toku njihovog pada na Zemlju. Razdvajanje elektrona od pozitivno naelektrisanih čestica u samom oblaku stvara električno polje koje može uticati na preraspodelu naelektrisanja na Zemljinoj površini i stvaranju električnog polja između oblaka i površine Zemlje. Kada ono postane dovoljno jako, dolazi do jonizacije čestica u vazduhu pri čemu se povećava provodnost gasa i mogućnost prolaska elektrona kroz prostor između oblaka i tla što uzrokuje munju.

Prilikom pražnjenja emituju se pulsevi elektromagnetnih talasa na frekvenijama od nekoliko Hz do nekoliko MHz koji mogu da se prostiru i nekoliko hiljada kilometara. Takođe, kao posledica razdvajanja naelektrisanja, na visinama koje se prostiru i iznad oblaka javlja se jako kvazi-elektrostatičko polje. Na taj način, u toku ovakvih vremenskih uslova, atmosferske čestice u oblasti od površine Zemlje pa do magnetosfere su izložene dejstvu intenzivnih električnih i elektromagnetnih polja, što dovodi do njihovog ubrzavanja i indukuje sekundarne procese koji opet mogu biti izvor drugih poremećaja.

Efekti koji se kao direktna ili indirektna posledica pražnjenja tokom munja javljaju u D-oblasti su pre svega jonizacija (X- i γ -zracima i česticama ubrzanim do energija dovoljnih za jonizaciju bar jednu vrstu čestica prisutnih u posmatranoj plazmi), zagrevanje, disocijativni zahvat, emisija u optičkom delu spektra i gravito akustični talasi.

- **Visokoenergijski elektroni**, dovoljne energije da jonizuju plazmu u D-oblasti, se dobijaju pod dejstvom jakog električnog polja i prodiranjem elektrona iz magnetosfere nakon interakcije sa emitovanim VLF elektromagnetnim zračenjem.

Prilikom kretanja kroz vazduh slobodni elektroni se sudaraju sa okolnim česticama i pri tome gube energiju. Međutim, kao posledica njihovog ubrzavanja od stane jakog električnog polja, presek za ove sudare sve više opada, elektroni prelaze sve veći put između sudara i time dobijaju sve veću energiju da bi posle neke vrednosti praktično "pobegli" od interakcija sa drugim česticama. Pri tome, moguće je da tako ubrzani elektroni u sudarima sa česticama proizvode i druge elektrone i da nastane lavina relativističkih elektrona (RREA od engleskog Relativistic-runaway-electron avalanche, *Gurevich and Zybin* (2001)) koji mogu doći do jonosfere.

Pored ovog procesa, koncentracija naelektrisanja u niskoj jonosferi raste i prilikom survavanja elektrona iz magnetosfere usled interakcije sa elektromagnetnim VLF zračenjem emitovanim u pražnjenju munje (LEP od engleskog lightning induced electron precipitation). Naime, emitovani VLF talasi prolaze kroz atmosferu i dolaze do magnetosfere gde mogu interagovati sa elektronima koji precesiraju oko magnetnih linija i pri tome im predati dovoljno energije da "pobegnu" od uticaja magnetnog polja i prodru u jonosferu sve do njenih najnižih visina. Pri tome, samo njihovo prisustvo primarno povećava koncentraciju elektrona, dok sekundarni porast koncentracija naelektrisanih čestica nastaje usled jonizacije čestica jonosfere usled sudara sa upadnim elektronima iz magnetosfere. Ovaj efekat se naziva klasičan Trimpf efekat (po M. L. Trimpf-u koji je prvi uočio odgovarajuće promene preko varijacija u karakteristikama VLF signala, *Helliwell et al.* (1973)). Promene u niskoj jonosferi se javljaju oko 1 s nakon munje a vreme relaksacije je nekoliko desetina sekundi (može da bude i do reda 100 s). S obzirom na merljive poremećaje u niskoj jonosferi nastale ovim mehanizmom jonizacije veliki broj njihovih analiza je prisutan u literaturi (*Inan et al.*, 1990; *Clilverd et al.*, 2004; *Šulić et al.*, 2010; *Cotts et al.*, 2011).

- **Visokoenergijski fotoni** u X i γ delu elektromagnetnog spektra nastaju u procesu zakočnog zračenja elektrona sa brzinama bliskim brzini svetlosti tokom sudara sa česticama atmosfere kroz koju prolaze (*McCarthy and Parks*, 1992; *Fishman et al.*, 1994; *Mallick et al.*, 2012). γ -zračenje nastalo ovim procesom se naziva zemaljski bljesak γ -zraka (TGFs od engleskog terrestrial gamma ray flashes). Od ovih γ fotona u procesu kreacije mogu nastati i elektron-pozitron parovi (*Briggs*

et al., 2011).

- **Emisije zračenja u optičkom delu spektra** ili eng. transient luminous events (TLEs) predstavljaju procese kratkotrajnih električnih proboja iznad oblaka tokom munja. U TLE pojave spadaju kupasta pražnjenja (SPRITE od engleskog Stratospheric/mesospheric Perturbations Resulting from Intense Thunderstorm Electrification), mlazevi (eng. jets) i prstenasta pražnjenja (ELVES od engleskog Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources). Oni mogu biti uzrok dodatne jonizacije u niskoj jonosferi. Ove pojave se pre svega povezuju sa ekscitacijom molekula azota N_2 u sudarima sa elektronima (*Heavner et al.*, 2000, 2010) i interakcijom sa elektromagnetnim pulsovima proizvedenim tokom munja (*Taranenko et al.*, 1993b). Sa kupastim i prstenastim pražnjenjima se dovode u vezu jonosferski poremećaji koji nastaju i nakon manje od 50 ms od pojave munje i traju od manje od sekunde do reda sekunde (tzv. rani Trimpf efekat) (*Inan et al.*, 1988; *Haldoupis et al.*, 2006). Iako su prisutne, opisane optičke pojave, zbog jake Sunčeve svetlosti, nisu vidljive tokom dana. Njihovo postojanje se potvrđuje registracijom poremećaja u VLF signalima nakon satelitske detekcije munje sličnim po karakteristikama promenama signala tokom noći koji prate registrovane optičke pojave.

- * **Kupasta pražnjenja.** Postoji više teorijskih pretpostavki kojima se objašnjava nastanak ove optičke pojave. Prema konvencionalnoj teoriji uzrok je jako elektrostatičko polje u mezosferi (*Pasko et al.*, 1997), ali postoje i studije koje kao mogući uzrok navode i proboj relativističkih elektrona (*Rousset-Dupré and Gurevich*, 1996; *Lehtinen et al.*, 1999) kao i elektromagnetne impulse nastale u munjama (*Rowland et al.*, 1996). Javljaju se na visinama od oko 50 km do 90 km iznad površine Zemlje u vrlo kratkom periodu (reda ms do 100 ms) kao dve ili više crvenkasto-narandžaste na vrhu i plave pri dnu emisije svetlosti u obliku šargarepa međusobno udaljenih reda 10 km koje zajedno mogu dostići širinu i do 50 km.
- * **Prstenasta pražnjenja.** Pretpostavlja se da su posledica zagrevanja jonosfere snažnim elektromagnetnim impulsima nastalim tokom električnog pražnjenja u munjama (*Inan et al.*, 1991; *Nagano et al.*, 2003), ali se kao mogući uzrok dodatno navodi i kvazi–elektrostatičko polje (*Veronis et al.*, 1999).

Javlja se na visinama od oko 85 do 90 km i prečnika oko 400 km, crvene su boje i traju reda veličine 1 ms.

- * **Mlazevi.** Traju duže od kupastih i prstenastih pražnjenja (reda sekunde) i mogu se videti golim okom (*Pasko et al.*, 2002). Prostiru se na visinama do 20 km u slučaju plavih startera, 20 km do 40 km u slučaju plavih mlazeva, dok se gigantski mlazevi prostiru i do 70 km. Njihova pojava se dovodi u vezu sa grmljavinama.

– **Gravitacioni i akustični talasi.** Pored elektromagnetnih talasa i električnog polja, uticaj oblaka na jonosferu se manifestuje i mehanički. Naime, konvektivna kretanja u oblaku proizvode gravitacione talase koji krećući se naviše dolaze do jonosfere gde u apsorpcionim procesima predaju česticama svoju energiju i na taj način podstiču TLE događaje (*Rowland et al.*, 1996; *Fadnavis et al.*, 2009). S druge strane, optički fenomeni mogu proizvesti impulse pritiska stvarajući gravitacione ili akustičke talase (*Sentman et al.*, 2003) koji perturbuju gustine naelektrisanja i elektronsku provodnost generišući struje.

- **Poremećaji u litosferi.** Ispitivanje uticaja procesa u litosferi na stanje jonosfere je jedan od veoma značajnih pravaca u geo naukama. Naime, postoje indicije da promene u tlu izazivaju merljive promene u jonosferskim karakteristikama i u periodu pre velikih poremećaja u litosferi kao što su zemljotresi, što istraživanjima ovog atmosferskog sloja daje i ulogu u predviđanjima velikih prirodnih katastrofa i sprečavanju njenih posledica. Tako su npr. zabeležena značajna odstupanja u vremenima registracija minimuma amplituda VLF signala tokom izlaska i, još uočljivije, tokom zalazaka Sunca nekoliko dana pre zemljotresa u Kobeu u Japanu, 17. januara 1995. godine (*Molchanov et al.*, 1998). Takođe, neposredno nakon vulkanske erupcije vulkana Soufriere Hills na Montserrat-u (ostrvo u Karipskom moru u Srednjoj Americi) satelitskim merenjima su zabeležene promene i u jonosferi (*Dautermann et al.*, 2009), dok su cunamiji nastali kao posledica zemljotresa 15. novembra 2006. (Kuril region) i 11. Marta 2011. godine (Tohoku region) dovedeni u vezu sa varijacijama u VLF signalnim karakteristikama (*Rozhnoi et al.*, 2012).

Postoji više mogućih uzroka jonosferske reakcije koje se dovode u vezu sa poremećajima u litosferi. Osnovne pretpostavke su bazirane na inteziviranju hidrodinamičkih talasa koji se sa površine Zemlje prenose u atmosferu, pri čemu im se amplituda povećava

sa visinom (Row, 1967) i isparavanju gasa radona koji uzrokuje povećanje električne provodnosti u višim atmosferskim slojevima (Pierce, 1976).

- **Ljudska delatnost.** Promene jonosferskih parametara ne nastaju samo pod uticajem prirodnih procesa. Naime, razvijanjem tehnologije i ljudska delatnost može izazvati lokalne promene na ovim visinama. U literaturi se prvenstveno mogu naći relevantna istraživanja vezana za lansiranje raketa (Kiryushkin *et al.*, 2008), nuklearne i jake hemijske eksplozije (Drobzheva and Krasnov, 2003; Drobzheva and Krasnov, 2006; Yang *et al.*, 2012). Navedeni procesi inteziviraju hidrodinamičke talase koji, kako se u datim studijama objašnjava, predstavljaju osnovni uzrok perturbacija visoke atmosfere.

Poglavlje 3

Dijagnostika plazme jonosferske D-oblasti

Uopšteno govoreći, metode koje se koriste u dijagnostici atmosferskih slojeva zavise od visina na kojima se oni prostiru. Tehnike koje se najčešće primenjuju za posmatranje niske jonosfere se baziraju na raketnim merenjima i merenjima sa Zemlje. Satelitska merenja i merenja pomoću balona koja se takođe koriste na velikim visinama iznad površine Zemlje u ovom prostoru nisu pogona jer se on nalazi suviše nisko u prvom, odnosno suviše visoko u drugom slučaju.

Dijagnostika raketnim uređajima se može zasnivati na prostiranju radio talasa između instrumenata u raketama i na Zemlji (*Friedrich and Torkar, 2001*) i direktnim merenjima Langmuirovim sondama (*Smith, 1969*). Iako je poslednjom metodom moguće dobiti lokalizovane vrednosti elektronske koncentracije, podaci su ograničeni na period i prostor relevantne za vršena merenja i nisu pogodni za proučavanje neperiodičnih poremećaja. Pored toga, na spovođenje ovih istraživanja značajan uticaj ima i ekonomski faktor.

Merenja sa Zemlje se zasnivaju na posmatranjima elektromagnetnih talasa kao što su nekoherentno rasejani (*Evans, 1969*) i parcijalno reflektovani (*Belrose and Burke, 1964*) radarski signali ili radio signali emitovani predajnicima i registrovani udaljenim prijemnicima nakon refleksije od donjih slojeva jonosfere (*Budden, 1988*). U ovom slučaju je moguće kontinuirano emitovanje i primanje signala što omogućava istraživanja kako u neporemećenim i periodično promenljivim periodima, tako i promene nastale usled kratkotrajnih, neperiodičnih i samim tim teško predvidivih događaja. Osnovni nedostatak ovih metoda je to da

se podaci ne dobijaju direktno na mestu lociranom u jonosferi usled čega se dobijena informacija odnosi na celu putanju i zavisi od lokacija uređaja kojima se talasi emituju, odnosno primaju.

U ovoj disertaciji, dijagnostika jonosferske D-oblasti je zasnovana na prostiranju radio signala vrlo niskih frekvencija (VLF od eng. very low frequency; obuhvataju elektromagnetne signale frekvencija 3 kHz - 30 kHz) zbog čega će u nastavku ta tehnika biti detaljnije objašnjena.

3.1 Osnove teorije prostiranja VLF signala

Emisija VLF signala iz predajnika je prostorna. U zavisnosti od ugla emisije možemo razlikovati površinske, koji brzo atenuiraju, i nebeske talase koji se posle refleksije na visinama niske jonosfere vraćaju na površinu Zemlje, gde se takođe reflektuju i ponovo prostiru ka visokoj atmosferi nakon čega se proces ponavlja. Praktično, nebeski talasi se prostiru hiljadama kilometara u talasovodu koji je sa donje strane ograničen površinom Zemlje, dok gornja granica leži na visinama niske jonosfere. Pri tome, potrebno je naglasiti da pored njihovog slabljenja tokom prostiranja u atmosferi, gubici nastaju i pri samoj refleksiji koja ni na jednoj granici nije potpuna i zavisi od mnogobrojnih prostorno i vremenski promenljivih faktora. Na usložnjavanje analize i modeliranja prostiranja VLF signala utiče i to da je zbog dužine prostiranja signala mnogo realističniji sferni nego planparalelni model talasovoda.

Varijacije sastava i stanja plazme u niskoj jonosferi najviše utiču na karakteristike prostiranja signala. Naime, promene pre svega koncentracije elektrona, indukovane brojnim procesima o kojima je bilo reči u Poglavlju 2, menjaju provodnost jonosfere i tako utiču na slabljenje i refleksivnost (koeficijent i visinu refleksije) VLF talasa menjajući mu intenzitet i geometriju prostiranja. To dalje rezultuje u vremenskim varijacijama amplitude i faze signala registrovanih VLF prijemnicima i omogućava primenu ove metode u dijagnostičke svrhe. Upoređivanjem registrovanih promena sa varijacijama koje se dobijaju modeliranjem jonosfere numeričkim modelima za simulaciju prostiranja talasa, moguće je modelirati nisku jonosferu što će u Poglavlju 4.3 biti detaljnije objašnjeno.

3.1.1 Modeliranje prostiranja VLF signala - LWPC model

Numerički modeli koji se koriste za simulaciju prostiranja VLF talasa u nižim slojevima jonosfere su Long-Wave Propagation Capability (LWPC) (*Ferguson, 1998*) i ModeFinder (*Morfitt and Shellman, 1976*). U ovom radu analize su bazirane na prvom od njih koji je razvijen u Space and Naval Warfare Systems Center u San Diegu, SAD.

LWPC model se sastoji iz četiri povezana programa koji se odnose na model prostiranja dugih talasa (Long Wave Propagation Model - LWPM), opis graničnih karakteristika Zemlja-jonosfera talasovoda - geografski model, modeliranje atmosferskog šuma i programa za crtanje.

Model prostiranja dugih talasa posmatra prostor između površine Zemlje i niske jonosfere kao talasovod. Gornji deo talasovoda se karakteriše konduktivnošću koja je u osnovnoj verziji horizontalno homogena i eksponencijalno raste sa visinom (podaci su bazirani na rezultatima datim u *Ferguson (1980, 1992)* i *Morfitt (1977)*). Vrednosti za parametre koji su na osnovu Wait-ove teorije (*Wait and Spies, 1964*), korišćene u LWPC modelu, karakterišu jonosferu (visina refleksije i "oštrina" koje je povezana sa gradijentom koncentracije elektrona (*Nina et al., 2012a*)) su u osnovnoj verziji usrednjene iz postojećih podataka ali je ostavljena i mogućnost podešavanja od strane korisnika. Pri tome odvojeno se posmatraju dnevna i noćna jonosfera u kojoj je napravljena i razlika u visini refleksije signala u odnosu na geografsku širinu (na polovima je najniža), dok "oštrina" zavisi od frekvencije VLF signala. Karakteristike donjeg dela talasovoda zavise od konduktivnost tla.

Putanja prostiranja signala je automatski izabrana programom na osnovu geografskih lokacija predajnika i prijemnika signala. Podeljena je na serije horizontalno homogenih segmenata čije se raspodele dobijaju na osnovu proračuna parametara (konduktivnost tla, dielektrična konstanta, orijentacija geomagnetnog polja) duž putanje i u zavisnosti od zenitnog ugla Sunca.

Geografski model se odnosi na granice posmatranog talasovoda u kome se prostire signal: površinu Zemlje i jonosferu. Tlo je aproksimirano skupom površina koje imaju istu električnu konduktivnost čije su vrednosti uzete sa mape Westinghouse Geophysics Laboratory (*Morgan, 1968*). S druge strane, jonosfera je opisana parametrima koji se, kao što je već navedeno, razlikuju tokom dana i tokom noći, pri čemu postoji i prelazni

period za zenitne uglove između 90 i 99 stepeni kao i prelaz sa polarnih na srednje geografske širine tokom noći.

U ovoj disertaciji LWPC kod je korišćen isključivo u dnevnim uslovima za celu posmatranu putanju kada su, prema osnovnom modelu, visina refleksije signala i "oštrina" u mirnoj jonosferi konstantni, nezavisno od geografske širine i dužine, i iznose 74 km i 0.3 km^{-1} . Ove vrednosti su uključene u prikazane proračune kao karakteristike neperurbane D-oblasti, dok je za period poremećenog stanja plazme vršeno modeliranje, što je detaljno opisano u Poglavlju 4.3.

Model atmosferskog šuma je uključen u kod zbog značajnog uticaja ove pojave na prijemni signal. Korišćen je model NTIA (National Telecommunications and Information Administration - United States Department of Commerce) prezentovan u CCIR Report 322-3 (CCIR, 1986) koji, na osnovu površinskih merenja u određenom broju gradova daje parametre atmosferskog šuma: srednju vrednost, standardnu devijaciju varijacija i impulsivnost definisanu kao odnos korena usrednjenog kvadrata (rms od engleskog root mean square) i srednje vrednosti šuma izraženog u decibelima dB.

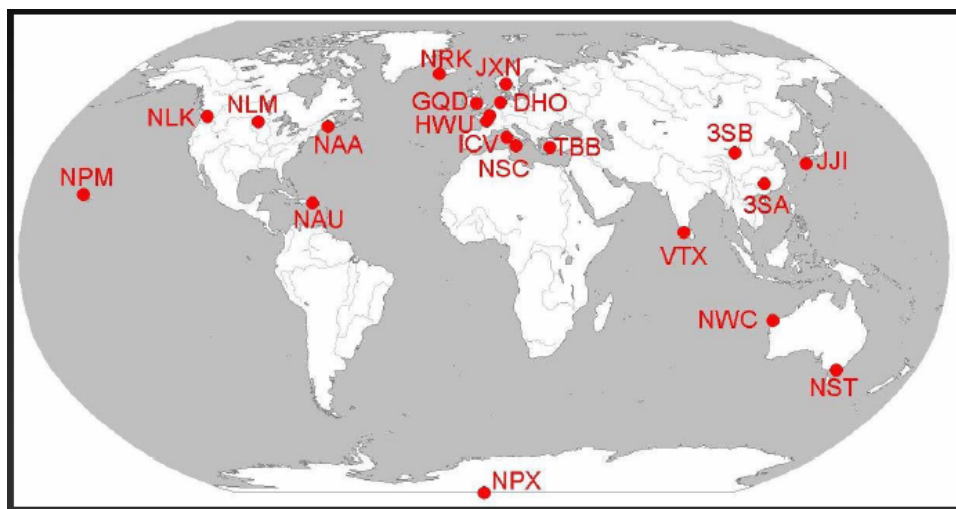
Program za crtanje daje mogućnost grafičkog prikaza putanje posmatranog signala preko izabrane oblasti određene na osnovu geografskog položaja prijemnika. Pored toga, direktno se mogu vizuelizovati i karakteristike signala vezane za njegovu jačinu i šum.

3.2 Eksperimentalna postavka

Dijagnostika D-oblasti pomoću VLF radio talasa je omogućena mnogobrojnim i široko rasprostranjenim emiterima i prijemnicima VLF signala, što, pored kontinuiranog emitovanja i registrovanja, daje mogućnost registrovanja lokalnih poremećaja i poređenja uticaja jačih perturbacija u različitim delovima posmatrane atmosferske oblasti.

3.2.1 Globalna postavka

Veliki broj predajnika radio talasa vrlo niskih (VLF) i niskih (LF) frekvencija su uglavnom raspoređene na severnoj hemisferi (Slika 3.1). Svaki predajnik karakteriše jedinstvena frekvencija emitovanja čime se omogućava analiza konkretnog signala. Snaga predajnika utiče na

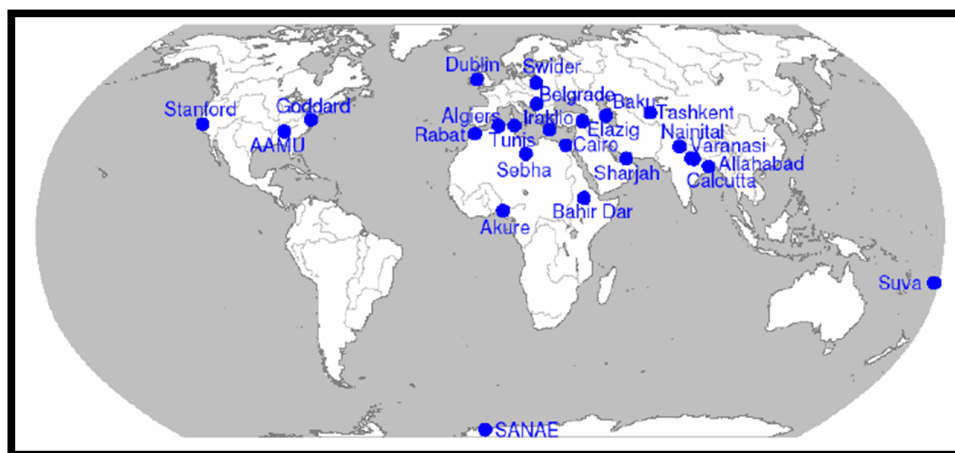


Slika 3.1: Mapa predajnika VLF/LF signala preuzeta iz fajla TransmitterMap.pdf sa sajta http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY_Test/TechDocs/.

prostor u kome je moguće registrovati signal i na sam kvalitet zabeleženih podataka. Naime, šum primljenog signala zavisi od neželjenog uticaja drugih izvora talasa posmatrane frekvencije koji su značajniji u slučaju analiziranog signala manje snage na mestu prijema. U analizama datim u ovom radu razmatrani su signali emitovani predajnicima čije su karakteristike prikazane u Tabeli 3.1. Svi prikazani signali su iz VLF domena, izuzev signala sa Islanda koji spada u LF oblast. S obzirom na karakteristike položaja predajnika ovog signala, u disertaciju je uključen i prikaz njegove analize u Poglavlju 7.3 iako ne spada u VLF talase.

Tabela 3.1: Karakteristike predajnika i dužine trasa analiziranih VLF/LF signala. Podaci za predajnike su uzeti iz fajla AWESOME Transmitters.pdf sa sajta http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY_Test/TechDocs/.

NAZIV	LOKACIJA	FREKVENCIJA (kHz)	SNAGA (kW)	DUZINA (km)
DHO	Rhauderfehn Germany	23.4	800	1304
GQD	Anthorn UK	22.1	200	1935
ICV	Isola di Tavolara Italy	20.27	20	976
NRK	Grindavik Island	37.5	800	3230
NAA	Cutler Maine, USA	24.0	1000	6548
NWC	North West Cape Australia	19.8	1000	11974

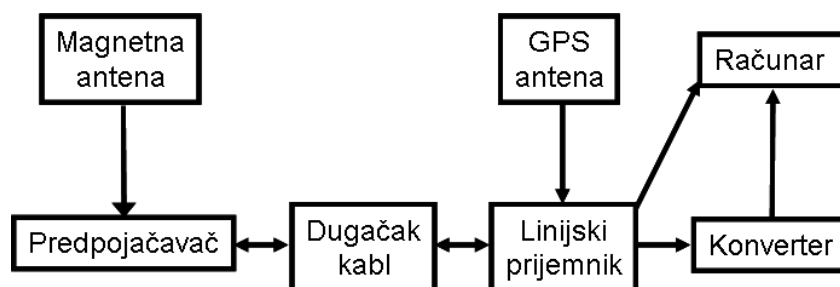


Slika 3.2: Mapa prijemnika grupisanih u AWESOME mrežu za globalna istraživanja VLF talasima (preuzeto sa sajta <http://vlf-engineering.stanford.edu/map/>).

Prijemnici VLF/LF signala su grupisani u nekoliko međunarodnih mreža kao što su Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation Modeling and Education - AWESOME (Scherrer *et al.*, 2008), Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition - VLF Atmospheric Research Konsortium - AARDDVARK (Clilverd *et al.*, 2009) i South America VLF NETwork - SAVNET (Raulin *et al.*, 2009). Prijemnik, lociran na Institutu za fiziku u Beogradu od 2008. godine, kojim su vršena prezentovana merenja je deo Stanford/AWESOME mreže za globalna istraživanja VLF talasima (Slika 3.2). Njegov detaljan prikaz je dat u narednom poglavlju.

3.2.2 AWESOME VLF prijemnik

Na shemi uređaja prikazanog na Slici 3.3 dati su sastavni delovi AWESOME stanice: sistem antena, predpojačavač, dugačak kabl, linijski prijemnik, GPS antena, konverter i računar.



Slika 3.3: Shema AWESOME VLF prijemnika.

- **Sistem antena**, postavljen na krovu zgrade Instituta, se sastoji od dve međusobno normalne magnetne ram-antene postavljene u smerovima sever-jug (NS antena) i istok-zapad (EW antena). Svaka antena ima $N_a = 12$ namotaja provodne žice dužine $l = 75.3$ m koji obrazuju konturu u obliku jednakokrakog trougla sa osnovom dužine 2.60 m, visine 1.30 m i kracima pod uglom od 45° što daje uokvirenu površinu od $P_a = 1.69 \text{ m}^2$. Električne karakteristike su date preko rezistanse $R_a = 1 \Omega$ i induktivnosti $L_a = 1 \text{ mH}$, a signal koji se registruje se može opisati preko šuma, napona indukovano signalom, osetljivosti antene i, konačno, struje koja se u njoj indukuje.

Šum antene. Dominantan izvor šuma antene potiče od termalnog šuma rezistanse žice i može se dati preko spektralne gustine šuma u obliku:

$$U_{suma} = (4kTR_a)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

gde je $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Boltzmann-ova konstanta, a T apsolutna temperatura. Na temperaturi od 290 K ova vrednost iznosi oko $10^{-10} \text{ V} \cdot \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$.

Napon indukovano registrovanim signalom. Magnetno polje $\mathbf{B}(t)$ koje prolazi kroz površinu uokvirenu konturom indukuje električno polje $\mathbf{E}(t)$ duž provodnika. Veza ovih fizičkih velična je data Faradejevim zakonom elektromagnetne indukcije u integralnom obliku:

$$\oint \mathbf{E}(t) \circ d\mathbf{l} = -N \frac{d}{dt} \int \mathbf{B}(t) \circ d\mathbf{P}. \quad (3.2)$$

Ova formula, primenjena na slučaj kada je talasna dužina mnogo veća od dimenzija antene, daje izraz za napon indukovano u anteni magnetnim poljem maksimalne amplitude B_m :

$$U_a = j\omega N_a P_a B_m, \quad (3.3)$$

što npr. za $B_m = 1 \text{ pT}$ i $f = \omega/2\pi = 20 \text{ kHz}$ daje napon oko $6.5 \cdot 10^{-7} \text{ V}$. S obzirom na ovako niske vrednosti, u obradi signala nakon prijema neophodna je upotreba niskošumnog pojačavača.

Osetljivost antene. Osetljivost antene S_a se dobija normalizacijom vrednosti B_m koja daje napon $U_a = U_{suma}$ sa $1/f = 2\pi/\omega$. Korišćenjem izraza 3.1 i 3.3 se dobija:

$$S_a = \frac{(4kTR_a)^{\frac{1}{2}}}{2\pi N_a P_a}. \quad (3.4)$$

Na 290 K S_a iznosi manje od 1 pT·Hz^{1/2}. S obzirom da analizirani signali imaju širinu frekventnog opsega od 200 kHz, antena može da registruje promene koje iznose oko 70 fT. To predstavlja dominantan faktor za osetljivost celog sistema (Paschal, 1980). U poređenju sa atmosferskim šumom on je znatno manji tako da je VLF prijemnikom moguće meriti i vrlo slabe uticaje prirodnih pojava kao što su npr. posledice munja koje mogu dati magnetno polje nešto manje od 1 pT (Cohen et al., 2010).

Indukovana struja. Iako impedansa antene sadrži i rezistansu R_a njena vrednost se za frekvencije dosta veće od $R_a/(2\pi L_a) = 159$ Hz može zanemariti, tako da za posmatrane frekvencije od oko 20 i više kHz, uz primenu formule 3.3, možemo smatrati da je indukovana struja I :

$$I = \frac{j\omega N_a P_a B_m}{j\omega L_a} = N_a P_a B_m L_a. \quad (3.5)$$

Bitno je primetiti da ovaj aproksimativni izraz ne zavisi od ω . Za $B_m = 1$ pT ona iznosi oko 20 nA.

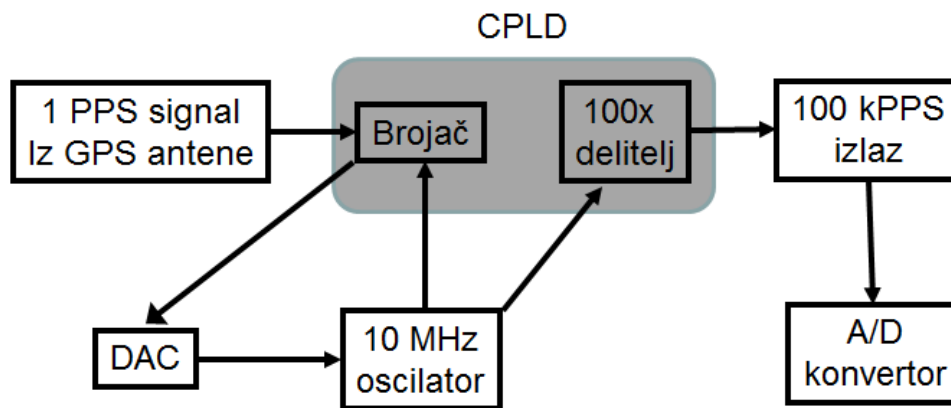
- **Predpojačavač.** Signal iz antene ide u predpojačavač postavljen na otvorenom prostoru (obično 1-2 m od centra baze sistema antena) u aluminijumskoj kutiji otpornoj na vlagu. Na kućištu se nalaze dva odvojena ulaza za kablove sa N/S i E/W antene od kojih se signali, dalje, dovode na odgovarajuće predpojačavačke kartice. Funkcija predpojačavačkih kartica je višestruka. Pre svega, da bi se minimalizovali gubici pri prenosu snage sa strujnog kola sa starne antena na drugo strujno kolo, vrši se prilagođavanje njihovih impedansi pomoću transformatora. Transformator, takođe, ograničava niskofrekventni odgovor prijemnika. Donja granična frekvencija za antene postavljene u naseljenim mestima u koju spada i Beogradski prijemnik iznosi 15 kHz. Pojačanje napona indukovano na anteni i prigušenje šuma se ostvaruje sa niskošumnim Paschalovim pojačavačem, dok se radio frekventna interferencija (RFI) uzrokovana drugim izvorima radio signala prigušuje RFI prigušivačem. Opcioni filter filtrira signale na željene frekvencije, a napajanje predpojačavača strujom iz električne mreže se vrši preko linijskog prijemnika i kabla koji ih povezuje. Ukupna snaga predpojačavača je oko 1

W, tako da za dovedeni napon od ± 15 V struja koja kroz njega protiče i impedanse iznose oko 33 mA i 900 Ω , respektivno. Prilagođavanje ovih impedansi na 75 Ω izlazni kabl se vrši transformatorima.

- **Dugačak kabl.** Predpojačavač i linijski prijemnik povezuje dugačak kabl BELDEN 1217B impedanse $Z = 75 \Omega$ i maksimalne dužine oko 1000 m. Pored sprovođenja signala iz obe ram-antene (nakon prolaska kroz predpojačavač) do linijskog prijemnika, ovim kablom se vrši i napajanje predpojačavača na ± 15 V. Prilagođavanje impedansi dugačkog kabla i linijskog prijemnika (1.75 k Ω) se, kao i na drugom kraju kabla, vrši linijskim transformtorom.
- **Linijski prijemnik** dobija signale iz predpojačavača i GPS antene i, nakon dodatne obrade, ih prosleđuje do računara pomoću dva kabla: prvi je serijski koji nosi GPS signal, dok se drugim prenose informacije o antenama registrovanim signalima i vremenskom signalu. Priključci za ove kablove, kao i za kabl za napajanje strujom iz električne mreže, se nalaze na kućištu. Prekidač za napajanje strujom se nalazi iznad poslednje navedenog priključka.

Obrada signala u linijskom prijemniku se vrši niskopropusnim eliptičnim filterom LTC1562 koji značajno slabi pristigle signale frekvencija iznad 47 kHz (na 55 kHz slabljenje je 90 dB).

U linijskom prijemniku se vrši i sinhronizacija naponski podesivog 10 MHz oscilatorom sa signalom iz GPS antene (1 impuls u sekundi sa tačnošću od 200 ns) u cilju dobijanja 100 kHz signala kojim se obezbeđuje vremenska rezolucija od 10 μ s za podatke u širokofrekventnom opsegu. Na Slici 3.4 je prikazana shema za proizvodnju 100 kHz GPS sinhronizovanog diskretnog vremenskog signala. Potrebna frekvencija izlaznog signala se dobija složenim uređajem CPLD (od engleskog complex programmable logic device) koji se sastoji iz brojača i delitelja. Brojač broji cikluse iz oscilatora između svaka dva impulsa iz GPS antene na osnovu čega se preko AD konvertora u slučaju odstupanja od predviđenog broja ciklusa koriguje napon na oscilatoru i posledično njegova brzina. Signal iz oscilatora sa frekvencijom od 10 MHz ide u delitelj gde mu se frekvencija redukuje na 100 kHz. Vremenska greška ovako dobijenog signala je dovoljno mala (ispod 10 ns) za analizu poremećaja u jonosferi čije su fazne promene često reda 1° ili manje.



Slika 3.4: Shema kola za proizvodnju 100 kHz GPS sinhronizovanog diskretnog vremenskog signala.

- **GPS antena.** Povezivanje registrovanog signala sa realnim vremenom je omogućeno Motorola M12+ OnCore GPS antenom koja obezbeđuje 1 impuls po sekundi (1PPS - puls per second) sa tačnošću od 200 ns. Kao što je već rečeno, ovi pulsevi se koriste kao referentna vremena za kontrolu signala proizvedenih 10 MHz oscilatorom.

- **Ni-DAQ kartica.**

Ni-DAQ (National Instruments Data Acquisition) kartica za digitalizaciju podataka se nalazi unutar samog računara. Zaštićenim kablom sa tri kanala se do nje iz linijskog prijemnika prosleđuju analogni signali registrovani antenama i diskretni 100 kHz vremenski signal.

- **Računar.** Softver za prikazivanje podataka VLF_DAQ su uradili Robb Moore i Eddie Kim. Postoje dva tipa podataka koji se akumuliraju u fajlovima - uskofrekventni i širokofrekventni. Kao što je ranije rečeno, u ovoj disertaciji su prikazane studije uskofrekventnih signala, odnosno praćeni su signali emitovani na fiksnim frekvencijama sa različitih predajnika. Moguće je izabrati maksimalno petnaest predajnika, pri čemu se za svaki od njih prate podaci dobijeni sa dve antene usmerene u pravcima sever-jug i istok-zapad. Podaci relevantni za amplitudu i fazu signala se prikupljaju u dva kontinuirana perioda tokom dana i to za svaki signal u po četiri fajla koji odgovaraju različitim antenama i različitim rezolucijama - maksimalna rezolucija je 50 Hz, dok je lošija 1 Hz.

3.3 Detekcija poremećaja plazme jonosferske D-oblasti

Uticaji različitih događaja na nisku jonosferu zavise od karakteristika izvora poremećaja, parametara sredine kroz koju se perturbacija prostire do D-oblasti i lokalnih obeležja konkretnog prostora koji se posmatra. U najnižoj oblasti dnevne jonosfere dominantne su perturbacije uzrokovane zračenjem iz svemira (pre svega Sunčevim zračenjem) čiji se intenziteti kontinuirano prate brojnim satelitima specijalizovanim za detekciju fotona i različitih vrsta čestica u više energijskih domena. U ovoj studiji korišćeni su podaci dobijeni satelitima GOES-14 i GOES-15 za analizu uticaja Sučevih X-flerova i satelitom SWIFT za analizu uticaja bljeskova γ -zraka.

3.3.1 Pouzdanost detekcije poremećaja plazme D-oblasti konkretnim izvorom

Prilikom dijagnostike reakcije plazme D-oblasti na konkretan izvor poremećaja pre svega se postavlja pitanje pouzdanosti njihovog povezivanja.

Kod intenzivnih i dugotrajnih uticaja, kao što su, na primer, zračenje tokom jakih Sunčevih X-flerova, evidentna je uzročno-posledična veza (*Nina et al.*, 2011). U tom slučaju, obradom primljenih podataka mogu se vršiti studije kako na čestičnom nivou (prostorno-vremenske zavisnosti sastava i parametara plazme kao što su npr. elektronska koncentracija, efektivni rekombinacioni koeficijent, brzina proizvodnje i gubitaka elektrona), tako i analizom prostiranja raznih talasnih moda.

Međutim, u slučaju poremećaja koji nemaju ovako intenzivan uticaj na nisku jonosferu, dovodi se u pitanje mogućnost njihovog detektovanja. Problemi nastaju, pre svega, kao posledica nemogućnosti pouzdane potvrde da je u konkretnom slučaju, ako postoji, konkretan vid poremećaja signala posledica baš posmatranog procesa. Ova nepouzdanost potiče od mnogobrojnih uticaja na jonosfersku plazmu koji se manifestuju u varijacijama njenih parametara različitog intenziteta i dužine trajanja. U takvim slučajevima, neophodno je statističkim metodama utvrditi stepen pouzdanosti detekcije na konkretan izvor poremećaja.

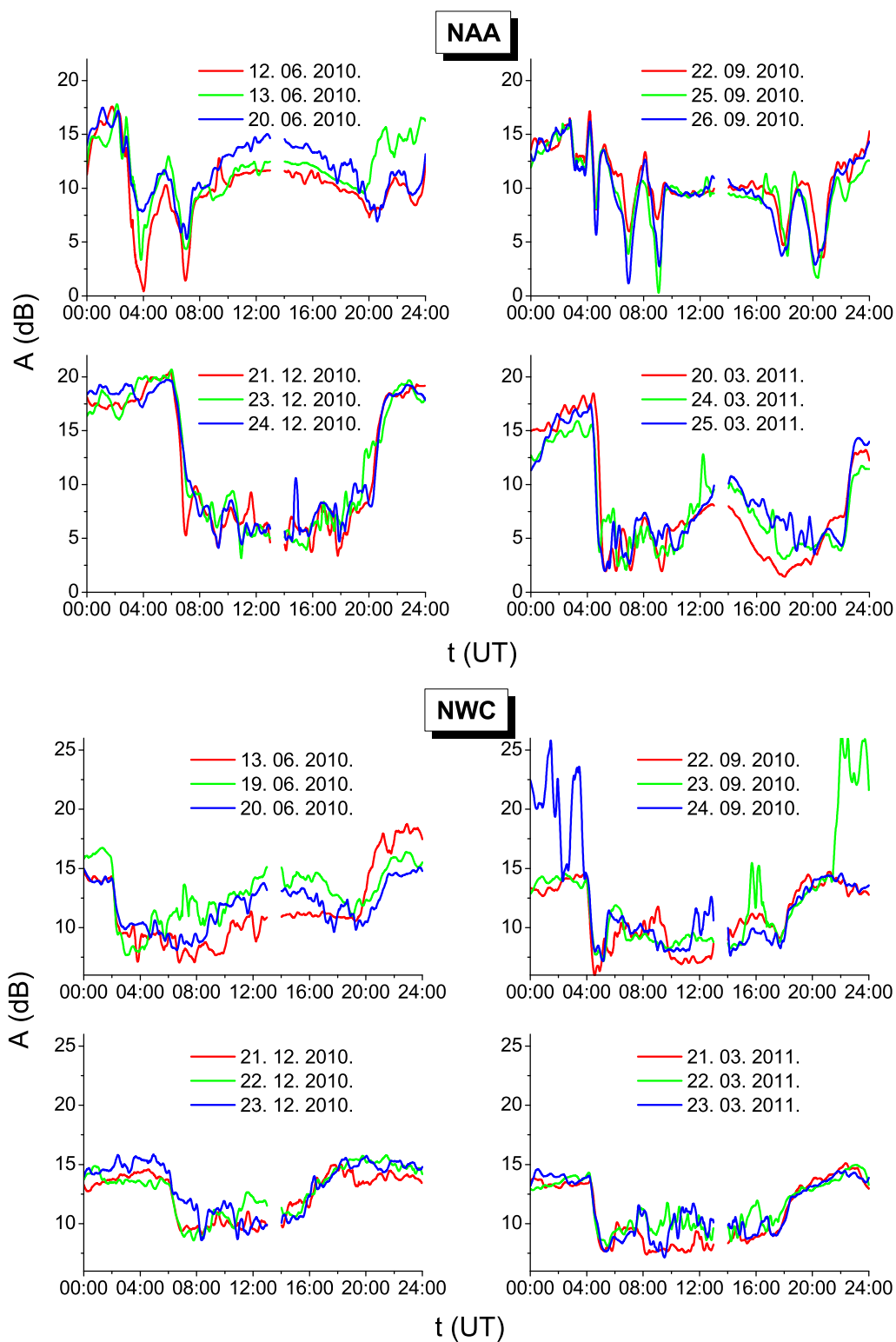
U ovoj disertaciji predstavljene su procedure za čestične i talasne analize u slučajevima Sunčevih X-flerova i izlaska i zalaska Sunca, respektivno, kao i procedura za potvrđivanje prisustva reakcije konkretno primenjena na primeru γ -bljeskova.

3.3.2 Primeri poremećaja signala

Kao što je već rečeno u Poglavlju 2.2.2, najveći uticaj na, isključivo dnevno prisutnu, D-oblast ima Sunčevo zračenje. Ostali poremećaji nisu toliko intenzivni i neki od njih se vrlo teško jasno i sa sigurnošću mogu detektovati (videti Poglavlje 3.3.1). U ovom Poglavlju su dati primeri relevantni za oba slučaja preko vremenskih evolucija amplituda i faza registrovanih VLF signala u periodima intenziviranja odgovarajućih zračenja zabeleženih na satelitima.

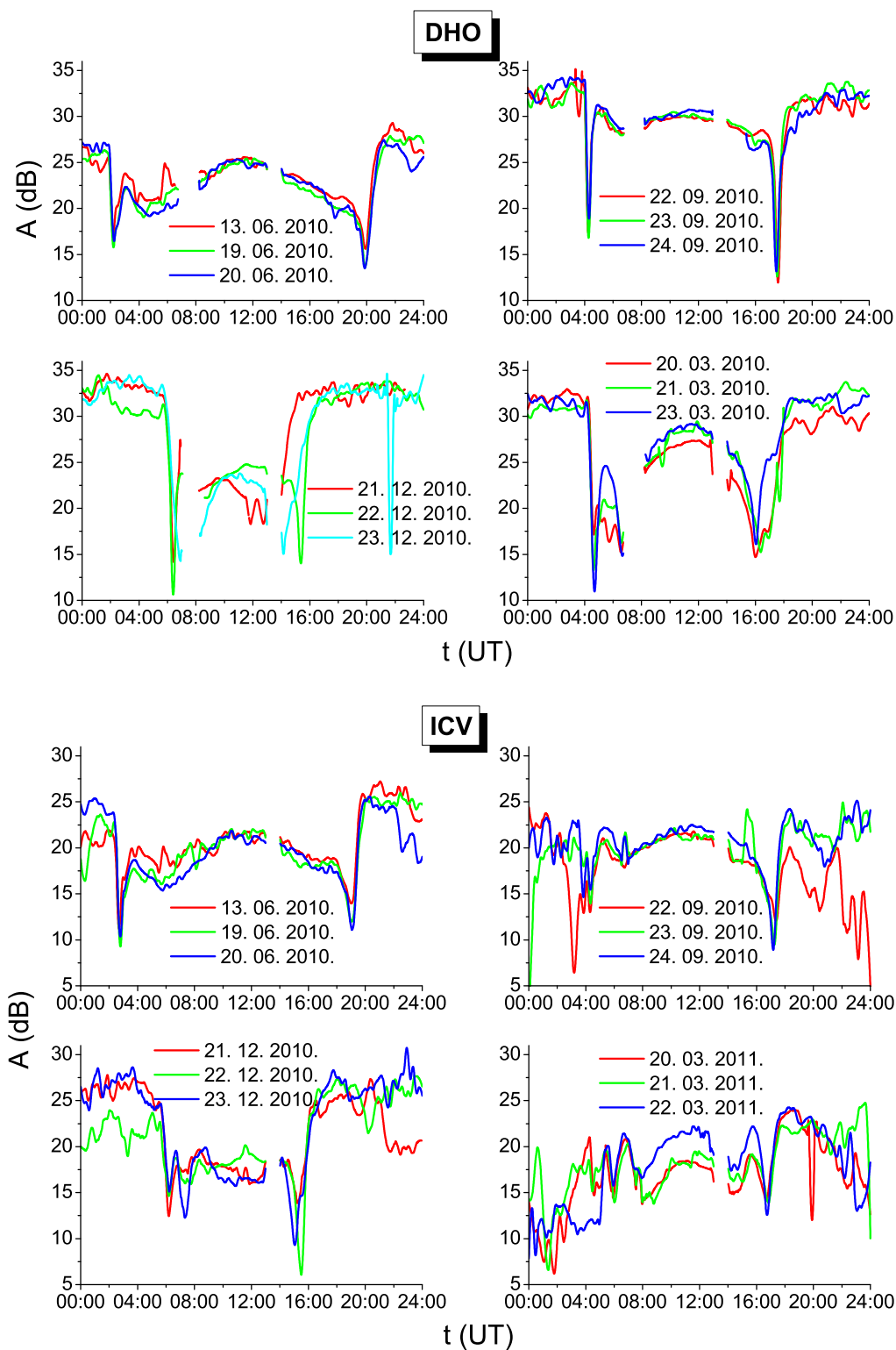
Pouzdana detekcija. Periodične promene niske jonosfere i, posledično, VLF signala su posledica Sunčevog 11-godišnjeg ciklusa, s jedne, i revolucije i rotacije Zemlje, s druge strane, koje prouzrokuju različit intenzitet pristiglog zračenja u lokalnu plazmu, pre svega $Ly\alpha$ fotona. S obzirom na činjenicu da AWESOME prijemnik instaliran u Institutu za Fiziku u Zemunu beleži signale od 2008. godine, još uvek nismo u mogućnosti da analiziramo ni jedan ceo Sunčev ciklus praćen promenom intenziteta zračenja koja je povezana sa varijacijama u broju Sunčevih pega (veći broj pega indukuje intenzivnije zračenje, Woods *et al.* (2000); Fröhlich (2009)). Ostale dve ciklične promene menjaju upadni ugao pristiglog zračenja do posmatrane lokacije uzrokujući promenu njegove putanje kroz više slojeve atmosfere i, posledično, različito slabljenje zračenja pristiglog u prostor kroz koji se prostire signal. Kombinacija ovih promena sa odgovarajućim periodičnim promenama u sastavu atmosfere jasno ostavljaju karakteristične tragove na signalima (Slike 3.5 i 3.6).

Dnevne promene signala su posledica promena u elektronskim koncentracijama plazme niske jonosfere. Tokom noći značajno se smanjuje jonizacija i VLF signali prodiru do većih visina (do oko 87 km), dok se u toku dana visine refleksije smanjuju na oko 74 km u slučaju izostanka intenzivnih neperiodičnih uticaja. Odsustvo intenzivnog Sunčevog uticaja omogućava detekciju slabijih uticaja, što se reflektuje u varijacijama noćnog signala. U relativno mirnim uslovima ove promene nisu jake i VLF signali su praktično kvazistacionarni. U dnevnim uslovima su različiti intenziteti i oblici signala u zavisnosti od doba godine i trase. Vidljive su manje oscilacije i, u nekim slučajevima, višestruko povećanje i pad amplitude sa maksimumom u periodu najjače osunčanosti putanje. Velike razlike se javljaju u periodima prelaza između noći i dana čije trajanje zavisi od lokacija predajnika i prijemnika. Naime, usled velikih dužina trasa VLF signala, izlazak i zalazak Sunca se ne javlja u istim trenucima duž putanje signala (i hori-



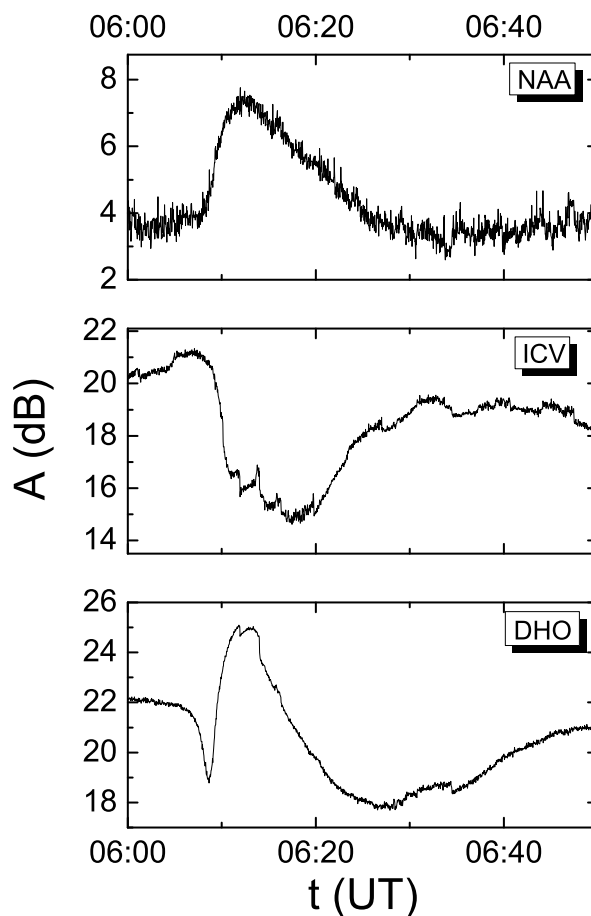
Slika 3.5: Sezonske promene prekookeanskih signala iz SAD (gornja četiri panela) i Australije (donja četiri panela).

zonalne i vertikalne neistovremenosti) što značajno menja geometriju prostiranja signala. Promene amplituda tokom prelaska iz dana u noć i obratno su detaljno analizirane



Slika 3.6: Sezonske promene kontinentalnih signala iz Nemačke (gornja četiri panela) i Italije (donja četiri panela).

u literaturi (*Carpenter and Whitson, 1965; Clilverd et al., 1999*). Sezonske promene su posledica revolucije Zemlje. Signali prikazani na Slikama 3.5 i 3.6 pokazuju jasno

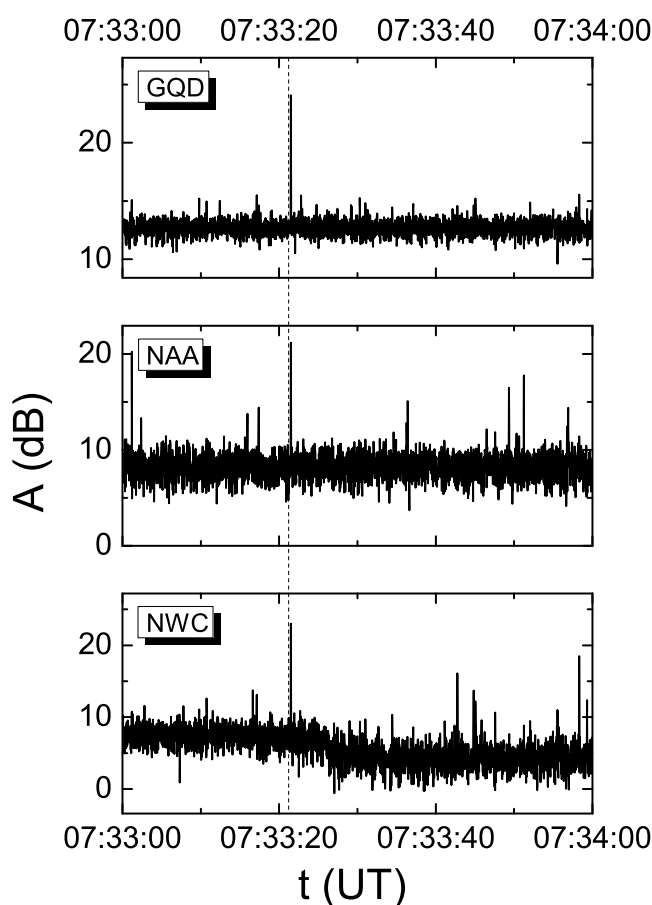


Slika 3.7: Prikaz reakcija signala emitovanih VLF predajnicima iz SAD (NAA), Italije (ICV) i Nemačke (DHO) na Sunčev X-fler koji se desio 25. marta 2011. godine.

vidljive promene u dužinama dnevnih i noćnih perioda i različito slabljenje signala tokom godine.

Od prolaznih, neperiodičnih uticaja, najznačajniji za plazmu D-oblasti su Sunčevi X-flerovi. Iako je tokom ovih pojava (u slučaju jasno definisanog jednog maksimuma u fluksu registrovanog X-zračenja na satelitu) prvobitan porast, a zatim pad elektronske koncentracije globalan, reakcije VLF signala, kao posledica sumarnog efekta brojnih parametara u njegovom prostiranju između predajnika i prijemnika, mogu imati različite vremenske raspodele. Nemonotone zavisnosti signalnih karakteristika od parametara preko kojih se izračunava elektronska koncentracija će u Poglavlju 4.3 biti detaljnije opisane, a na ovom mestu (Slika 3.7) su prikazana različita ponašanja amplituda signala emitovanih predajnicima NAA (SAD), ICV (Italija) i DHO (Nemačka) na isti fler 25. marta 2011. godine.

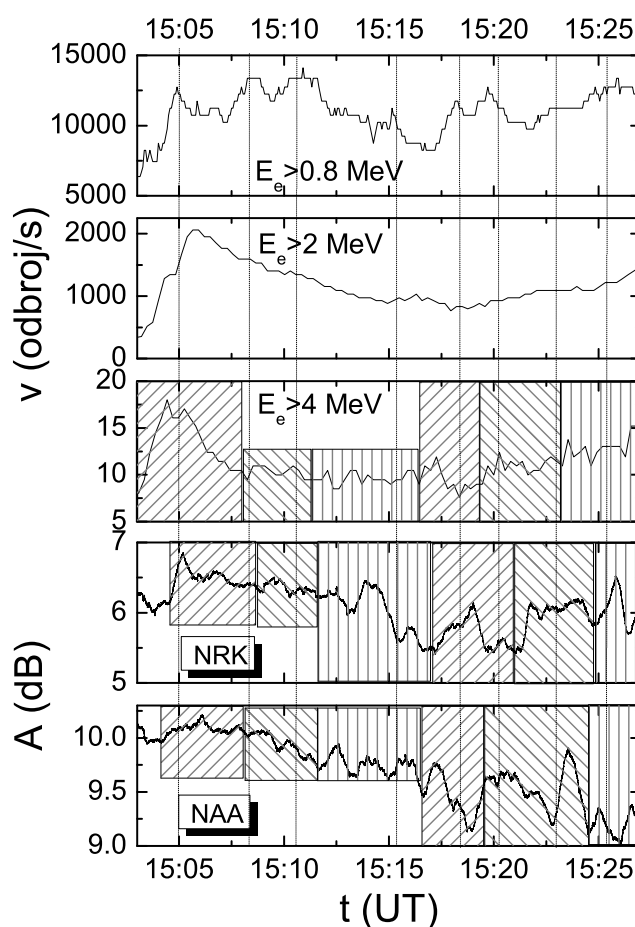
Potencijalna detekcija. Pored $\text{Ly}\alpha$ i mekog X-zračenja, jonizaciju u D-oblasti mogu, između ostalog, izvršiti i fotoni većih energija (iz tvrdog X i γ elektromagnetnog dela spektra), kao i čestice sa Sunca čiji se fluks intenzivira usled procesa izbacivanja koronalne mase. Međutim vrlo mali jonizacioni preseki za prvi slučaj i jaka zaštita od prodora ka nižim slojevima atmosfere od strane magnetnog polja za područja udaljena od magnetnih polova u drugom slučaju utiču na vrlo slabe poremećaje pri čemu se postavlja pitanje da li uopšte mogu da se detektuju.



Slika 3.8: Prikaz amplituda VLF signala emitovanih predajnicima iz Velike Britanije (GQD), SAD (NAA) i Australije (NWC) sa pikom manje od 1 s nakon registracije γ -bljeska 12. aprila 2011. godine (isprekidana linija).

Reakcije jonosfere koje se sa sigurnošću mogu dovesti u vezu sa upadom intenzivnog visokoenergijskog zračenja iz svemira su eksperimentalno zabeležene i publikovane za svega nekoliko slučajeva: GRB830801 (*Fishman and Inan*, 1988), GRB041227 (*Inan et al.*, 2007), GRB060124 (*Hudec et al.*, 2010) i GRB090122 (*Tanaka et al.*, 2010). Pored toga, prezentovani su i poremećaji u periodima nakon registracija satelita (*Hudec*

et al., 2010) za koje postoji pretpostavka da bi mogli biti reakcija na GRB080319D i GRB080320A. AWESOME prijemnik lociran na Institutu za fiziku nije zabeležio ni jedan poremećaj za koji se može pouzdano tvrditi da je reakcija na posmatrane bljeskove. U nekim slučajevima, međutim, postoji indicija da je detekcija ipak dobijena. Na Slici 3.8 je dat primer gde se vide jaki poremećaji 7 signala manje od 1 s nakon početka registracije bljeska GRB110412A na SWIFT satelitu i to u relativno mirnom periodu. Uočene perturbacije signala na Beogradskom AWESOME VLF



Slika 3.9: Prikaz moguće reakcije VLF signala, emitovanih predajnicima sa Islanda (NRK) i SAD (NAA) 24. januara 2012. godine, na upad elektrona emitovanih tokom procesa izbacivanja koronarne mase prethodnog dana. Na gornja tri panela date su vremenske evolucije zabeleženih brzina odbroja elektrona na GOES-15 satelitu u tri energijska kanala. Išrafirani domeni pokazuju sličnosti u oblicima vremenskih evolucija odgovarajućih amplituda VLF signala (donja dva panela) i brzina odbroja elektrona najvećih energija (treći panel).

prijemniku su uglavnom kratkotrajne i vidljive pri prikazima amplituda sa maksimalnom vremenskom rezolucijom. S obzirom da u literaturi nisu nađene analize ovakvih, kratkotrajnih, reakcija D-oblasti na γ -bljeskove, deo ove disertacije je posvećen upra-

vo statističkoj analizi poremećaja nižih slojeva jonosfere usled γ -bljeskova. Dobijeni rezultati, prikazani u Poglavlju 7.3, pokazuju porast broja amplitudnih skokova nakon satelitske registracije početka bljeska, što ide u prilog mogućnosti detekcije reakcija niske jonosfere na upade intenzivnog visokoenergijskog zračenja.

Kao što je već objašnjeno u Poglavlju 2.1.2, uticaj čestičnih upada je u D-oblasti najznačajniji na polovima zbog zakrivljenosti magnetnih linija sila i, posledično, dubljeg prodiranja naelektrisanja u atmosferu. Iz tog razloga i proces izbacivanja koronarne mase više perturbuje plazmu u ovim predelima. S obzirom na lokacije predajnika, najveća verovatnoća za detekciju promena u niskoj jonosferi nastalih kao posledica ove pojave na Beogradskoj VLF stanici je kod signala emitovanog iz Islanda (predajnik NRK). Na Slici 3.9 prikazane su vremenske varijacije amplitude ovog signala 24. januara 2012 posle oko 15 UT kada je Zemlju pogodio intenzivno čestično zračenje (registrovano je satelitima i to kako u promeni fluksa naelektrisanih čestica tako i u vremenskim varijacijama geomagnetnog polja) nakon izbacivanja koronarne mase prethodnog dana oko 4 UT. Pošto je u tom periodu bila osunčana strana zapadno od Beograda gde je tada počinjao sumrak, pored signala iz Islanda, posmatran je signal iz SAD (od predajnika NAA). Vremenske promene amplitude signala su upoređene sa vremenskim evolucijama brzina odbroja upadnih čestica: elektrona, protona i α čestica. Jedina sličnost u krivama je vidljiva u slučaju elektrona (Slika 3.9) i to u kanalu sa najvećim energijama. S obzirom da je posmatran samo jedan primer, neophodno je izvršiti više analiza za sigurnije potvrde odziva registrovanih signala na datu pojavu i ova problematika će biti u fokusu predstojećih istraživanja.

Poglavlje 4

Modeliranje parametara plazme D-oblasti

Procesi u atmosferi su izuzetno kompleksni što njihovu egzaktnu naučnu studiju čini praktično nemogućom. Iz tog razloga, modeli koji analiziraju čestičnu strukturu plazme niske jonosfere, kao Sodankyla Ion Chemistry (SIC) model (*Turunen et al.*, 1992) i International Reference Ionosphere (IRI) model (*Bilitza*, 1992), postaju neophodni u istraživanjima ovih fenomena. Modeliranja parametara niskojonosferske plazme, pre svega koncentracije elektrona, kako u mirnim tako i u poremećenim uslovima, su predmet istraživanja u brojnim eksperimentalnim i teorijskim studijama. Iako neki od njih datiraju iz prošlog veka (*Wait and Spies*, 1964; *Belrose and Burke*, 1964), značaj proučavanja strukture i dinamike ove oblasti čini ih aktuelnim i u savremenim istraživanjima, kako iz čisto naučnih, tako i iz praktičnih razloga (vidi npr. *Belenkiy et al.* (2006); *McKinnell and Friedrich* (2007); *Barabash et al.* (2012)). U ovoj disertaciji, kao reprezentativne veličine koje opisuju plazmu, razmatrani su koncentracija elektrona, brzine procesa proizvodnje i gubitaka elektrona i koeficijent koji se odnosi na njihove efektivne gubitke.

4.1 Motivacija

Jedan od glavnih problema u istraživanju procesa unutar lokalno poremećene jonosferske D-oblasti i njihove evolucije u vremenu je nedovoljno poznavanje karakteristika kao što su relevantni fizički i hemijski parametri lokalne sredine, osobine izvora poremećaja i osobine sredine između izvora poremećaja i lokacije posmatranih procesa. Problem je, takođe, i ne-

dostatak egzaktne izmerne prosorno i vremenski promenljivih vrednosti parametara neophodnih u analizama. Iz tog razloga, odgovarajuće vrednosti korišćene u modelima ne opisuju najbolje uslove u konkretnim studijama koje zavise od dnevnih i sezonskih varijacija, varijacija tokom Sunčevog ciklusa, Sunčeve i geomagnetne aktivnosti i mnogobrojnih drugih faktora. Ovi nedostaci su bili motivacija za razvijanje teorijske procedure kojom se opisuje prostorno-vremenska reakcija plazme D-oblasti na najznačajniji izvor njenog poremećaja, Sučev X-fler, korišćenjem dostupnih eksperimentalnih podataka dovoljno dobre vremenske rezolucije.

4.2 Dinamika plazme D-oblasti tokom Sunčevog X-flera

Kompleksan sastav jonosfere i veliki broj spoljašnjih faktora koji proizvode brojne fizičke i hemijske procese u plazmi ovog atmosferskog sloja, čine njegovu dinamiku veoma komplikovanu za razmatranje. Vremenske zavisnosti koncentracija naelektrisanih čestica u određenoj lokaciji su posledica promenljivih procesa kao što su jonizacija, zahvat elektrona, rekombinacija i transportni procesi čestica. Smatrajući poslednje procese zanemarljivim unutar D-oblasti (postaju značajni na visinama iznad 120 km - 150 km (*Blaunstein and Christodoulou*, 2006; *McEwan and Phillips*, 1978) i, generalno, nisu uključeni u modele plazme D-oblasti (*Turunen et al.*, 1992; *William and Foley*, 1978)), promene elektronske koncentracije se mogu opisati izrazom:

$$\frac{dN(\vec{r}, t)}{dt} = \mathcal{G}(\vec{r}, t) - \mathcal{L}(\vec{r}, t), \quad (4.1)$$

gde su $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$ i $\mathcal{L}(\vec{r}, t)$ brzine proizvodnje i gubitka elektrona na lokaciji $\vec{r}$ u trenutku t . Ove veličine su prostorno i vremenski zavisne i u slučaju neporemećene jonosfere. Razlog tome su vremenski periodične promene, pre svega usled dugotrajnih varijacija u pristiglom Sunčevom zračenju u posmatranu sredinu tokom Sunčevog ciklusa, godine i dana, kao i prostorne razlike uzrokovane, u prvom redu, geomagnetnom topologijom koja u polarnim regionima dozvoljava intenzivniji prodor naelektrisanih čestica u niže slojeve atmosfere. Kratkotrajne perturbacije, pre svega one lokalne prirode, još više utiču na kompleksnost termova $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$ i $\mathcal{L}(\vec{r}, t)$, što jednačinu (4.1) čini veoma komplikovanom u njenoj opštoj formi. Iz tog razloga će, u nastavku teksta, pažnja prvo biti usmerena na njihovu detaljnu analizu.

4.2.1 Proizvodnja elektrona

Dominantni procesi proizvodnje elektrona u D-oblasti su fotojonizacija fotonima pristiglim iz svemira i jonizacija kosmičkim zračenjem, pri čemu postoji, uglavnom manje značajno, prisustvo uticaja i drugih uzročnika. Brzina proizvodnje elektrona $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$ se stoga može predstaviti kao suma parcijalnih brzina za fotojonizaciju $\mathcal{P}(\vec{r}, t)$ i za jonizaciju kosmičkim zračenjem i drugim uzročnicima $\mathcal{C}(\vec{r}, t)$:

$$\mathcal{G}(\vec{r}, t) = \mathcal{P}(\vec{r}, t) + \mathcal{C}(\vec{r}, t). \quad (4.2)$$

Brzina fotojonizacije $\mathcal{P}(\vec{r}, t)$ zavisi od spektra zračenja u lokaciji $\vec{r}$ i lokalnih karakteristika sredine. Ako se sa λ_{max} označi maksimalna talasna dužina koja može izvršiti fotojonizaciju u lokalnoj plazmi i sa $N_f(\lambda, \vec{r}, t)$ gustina fluksa fotona tj. broj fotona talasne dužine λ koji prodru do položaja $\vec{r}$ u jedinici vremena po jedinici površine, jednačina za brzinu fotojonizacije fotonima talasne dužine λ se može napisati u obliku:

$$\mathcal{P}(\vec{r}, t) = \int_0^{\lambda_{max}} \sum_p N_f(\lambda, \vec{r}, t) n_p(\vec{r}, t) \sigma_p(\lambda) d\lambda, \quad (4.3)$$

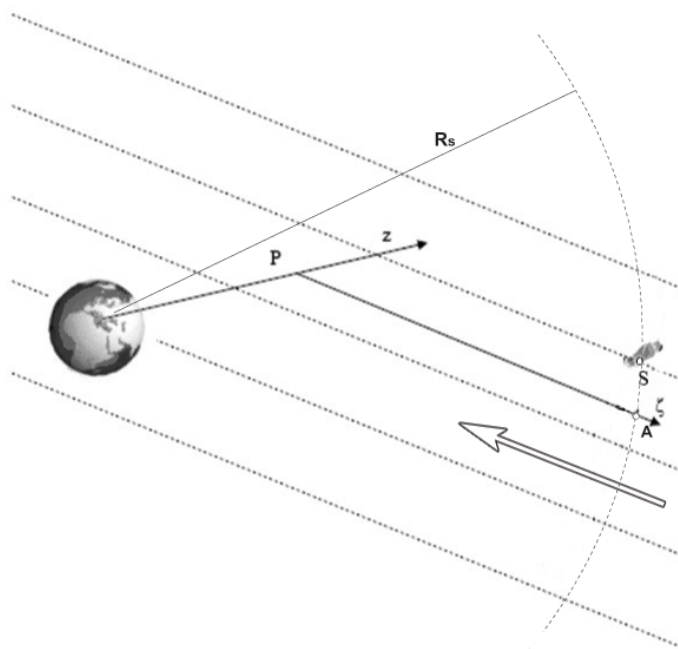
gde je $n_p(\vec{r}, t)$ koncentracija čestica tipa p , $\sigma_p(\lambda)$ odgovarajući presek za fotojonizaciju čestica tipa p i fotona talasne dužine λ .

Gustina fluksa fotona, $N_f(\lambda, \vec{r}, t)$, je povezana sa snagom zračenja po jedinici površine na talasnoj dužini λ , tj. spektralnom gustinom snage $J(\lambda, \vec{r}, t)$, sledećim izrazom:

$$N_f(\lambda, \vec{r}, t) = \frac{J(\lambda, \vec{r}, t)\lambda}{h_p c}, \quad (4.4)$$

gde su h_p i c Planck-ova konstanta i brzina svetlosti, respektivno.

Pri tome, potrebno je uočiti da se ova jednačina odnosi na vrednosti datih fizičkih veličina u tački $\vec{r}$ (tačka P na Slici 4.1), dok su registrovani podaci o Sunčevom zračenju vezani za lokaciju satelita (tačka S na Slici 4.1). Tako, na primer, trajektorija GOES-15 satelita je između 35,806.8 km i 35,892.8 km iznad površine Zemlje dok analizirane visine ne prelaze 80 km. Iz tog razloga neophodno je transformisati izraz 4.4 u oblik koji sadrži merene vrednosti, odnosno spektralnu gustinu snage na posmatranoj lokaciji izraziti preko vrednosti izmerenih na mestu satelita. Ovaj prelaz se ostvaruje analizom slabljenja veličine J tokom prostiranja zračenja koje može da se predstavi izrazom:



Slika 4.1: Shematski prikaz prostiranja Sunčevog zračenja blizu Zemlje sa karakterističnim tačkama P, S i A opisanim u tekstu.

$$\frac{dJ(\lambda, \vec{r}_\zeta, t)}{d\zeta} = -\kappa_J(\lambda, \vec{r}_\zeta, t)J(\lambda, \vec{r}_\zeta, t), \quad (4.5)$$

gde $\kappa_J(\lambda, \vec{r}_\zeta, t)$ predstavlja koeficijent slabljenja spektralne gustine snage na talasnoj dužini λ u položaju $\vec{r}_\zeta$ duž ζ ose. Zavisnosti od $\vec{r}_\zeta$ i t veličina u izrazu (4.5) potiču od prostornih i vremenskih varijacija koncentracija čestica i sastava sredine duž ζ ose čiji se pravac menja tokom vremena usled prividnog kretanja Sunca u odnosu na Zemlju. Integracija izraza (4.5) u negativnom smeru ζ ose daje spektralnu gustinu snage u tački P:

$$J_f(\lambda, \vec{r}, t) = \mu(\lambda, \vec{r}, t)J(\lambda, \vec{r}_A, t). \quad (4.6)$$

gde je:

$$\mu(\lambda, \vec{r}, t) \equiv e^{-\int_{\zeta_A}^0 \kappa_J(\lambda, \vec{r}_\zeta, t) d\zeta} \quad (4.7)$$

faktor ukupnog slabljenja spektralne gustine snage na talasnoj dužini λ između položaja A i P. Kombinacijom jednačina (4.4) i (4.6) dobija se izraz:

$$N_f(\lambda, \vec{r}, t) = \frac{\mu(\lambda, \vec{r}, t)J(\lambda, \vec{r}_A, t)\lambda}{h_P c}, \quad (4.8)$$

čijim se ubacivanjem u izraz (4.3) dobija brzina fotojonizacije u položaju P izražena preko upadne spektralne gustine $J(\lambda, \vec{r}_A, t)$ u domenu talasnih dužina između 0 i λ_{max} :

$$\mathcal{P}(\vec{r}, t) = \int_0^{\lambda_{max}} \sum_p J(\lambda, \vec{r}_A, t) \frac{\mu(\lambda, \vec{r}, t) n_p(\vec{r}, t) \sigma_p(\lambda) \lambda}{h_p c} d\lambda. \quad (4.9)$$

S obzirom da je akcenat u ovoj analizi na uticaju Sunčevih X-flerova, prethodni izraz je konstruktivno podeliti na dva sabirka sa desne strane: prvi, koji se odnosi na zračenje u X-domenu, i drugi, koji se odnosi na ostatak fotojonizujućeg zračenja:

$$\mathcal{P}(\vec{r}, t) = \int_{\{\lambda_x\}} \sum_p J(\lambda, \vec{r}_A, t) \frac{\mu(\lambda, \vec{r}, t) n_p(\vec{r}, t) \sigma_p(\lambda) \lambda}{h_p c} d\lambda + \mathcal{P}_r(\vec{r}, t). \quad (4.10)$$

Uvrštavanje satelitski registrovanih podataka za integralni intenzitet zračenja se u ovoj jednačini može izvršiti preko veličine $J(\lambda, \vec{r}_A, t)$ u dva koraka. Prvo, neophodno je uspostaviti vezu između ove veličine sa integralnim intenzitetom zračenja u tački A u oblasti talasnih dužina relevantnih za određeni energijski kanal na satelitu sa koga se dobijaju analizirani podaci. Pošto se pored ukupnog intanziteta tokom evolucije flera menja i sam spektar X-zračenja, nije moguće razbiti spektralnu gustinu fluksa na proizvod dve funkcije zavisne od vremena i talasne dužine, respektivno. Zbog toga se uvodi nova funkcija $\chi(\lambda, \vec{r}_A, t)$ preko izraza:

$$J(\lambda, \vec{r}_A, t) = \chi(\lambda, \vec{r}_A, t) \int_{\lambda_1^{sat}}^{\lambda_2^{sat}} J(\lambda', \vec{r}_A, t) d\lambda' = \chi(\lambda, \vec{r}_A, t) I(\vec{r}_A, t), \quad (4.11)$$

gde su λ_1^{sat} i λ_2^{sat} granične talasne dužine posmatranog domena. Drugo, potrebno je povezati intenzitete zračenja $I(\vec{r}_A, t)$ u tački A, povezane sa tačkom P trajektorijom zračenja, i tački S gde se nalazi satelit $I^{sat}(t)$. S obzirom na činjenicu da je okolina oko satelita veoma razređena i da su, shodno tome, efekti slabljenja Sunčevog zračenja praktično zanemarljivi, intenzitet zračenja na svim osunčanim tačkama koje se nalaze na istoj visini kao i satelit se može smatrati istim, odnosno približno jednakim zabeleženoj vrednosti na satelitu. To znači da se intenzitet zračenja u tački A može aproksimativno izraziti preko njegove satelitski izmerene vrednosti:

$$I(\vec{r}_A, t) \approx I^{sat}(t), \quad (4.12)$$

usled čega se izraz (4.11) može napisati u obliku:

$$J(\lambda, \vec{r}_A, t) = \chi(\lambda, \vec{r}_A, t) I^{sat}(t), \quad (4.13)$$

i, posledično, brzina fotojonizacionih procesa, data jednačinom (4.10), kao:

$$\mathcal{P}(\vec{r}, t) = \kappa(\vec{r}, t) I^{sat}(t) + \mathcal{P}_r(\vec{r}, t). \quad (4.14)$$

gde je

$$\kappa(\vec{r}, t) = \int_{\{\lambda_x\}} \sum_p \chi(\lambda, \vec{r}_A, t) \frac{\mu(\lambda, \vec{r}, t) n_p(\vec{r}, t) \sigma_p(\lambda) \lambda}{h_p c} d\lambda. \quad (4.15)$$

Ukupna brzina proizvodnje elektrona se sada, kombinacijom izraza (4.2) i (4.14), može izraziti u formi:

$$\mathcal{G}(\vec{r}, t) = \kappa(\vec{r}, t) I^{sat}(t) + \mathcal{P}_r(\vec{r}, t) + \mathcal{C}(\vec{r}, t), \quad (4.16)$$

odnosno, njenoj uprošćenoj varijanti, pogodnijoj za dalje proračune:

$$\mathcal{G}(\vec{r}, t) = K(\vec{r}, t) I^{sat}(t), \quad (4.17)$$

gde je:

$$K(\vec{r}, t) = \kappa(\vec{r}, t) + \frac{\mathcal{P}_r(\vec{r}, t) + \mathcal{C}(\vec{r}, t)}{I^{sat}(t)}. \quad (4.18)$$

Prostorno-vremenski zavisna veličina $K(h, t)$, dakle, sadrži u sebi informacije o slabljenju zračenja, koncentracijama čestica od koji se sastoji plazma na posmatranoj lokaciji, preseca za njihovu jonizaciju fotonima različitih talasnih dužina, spektru X-zračenja, brzinama jonizacije drugim izvorima i konačno intenzitetu zračenja registrovanog na satelitu koji implicitno govori i o energijskom kanalu čiji se podaci uzimaju u razmatranje. Ove veličine na različitim lokacijama i u različitim vremenskim trenucima nisu poznate i koeficijent $K(\vec{r}, t)$ se praktično određuje teorijski, procedurama baziranim na analizama jednačine 4.1.

Izraz 4.16 je dat u opštoj formi. U pojedinim fazama flera moguće je izvršiti odgovarajuće aproksimacije koje znatno pojednostavljaju proračune. Tako se npr. pri većim promenama u intenzitetu linija i kontinuuma u okviru X-domena mogu zanemariti vremenske zavisnosti veličina $\mathcal{P}_r$ i $\mathcal{C}$ i, u kratkom periodu u kome se javlja maksimum intenziteta zračenja zabeleženog na satelitu, veličina K se može smatrati konstantnom. Dalje, kod jakih flerova ove prve dve veličine se praktično mogu zanemariti tokom perioda najintenzivnijeg zračenja.

S druge strane, na početku i kraju flera, kao i nakon njega, u periodu kada jonosferska plazma relaksira ka početnom, neperturbovanom stanju, treći član sa desne strane jednačine 4.16 postaje mali, dok dominantnost vrednosti i njihovih promena veličina $\mathcal{P}_r$ i $\mathcal{C}$ zavisi od lokacije posmatrane plazme (videti Poglavlje 2.1.2). Detaljno ispitivanje opšteg oblika pomenute jednačine je predmet naših aktuelnih istraživanja. U ovoj disertaciji biće predstavljena kvantitativna analiza vremenskih evolucija parametara plazme D-oblasti na kraju relaksacionog perioda, tj. perioda nakon dejstva pojačanog X-zračenja.

4.2.2 Gubici elektrona

U jonosferi se odigrava veliki broj procesa koji kao rezultat imaju smanjenje koncentracije elektrona. Brzine ovih procesa zavise od strukture i stanja plazme u posmatranom prostoru i menjaju se u vremenu i prostoru. Iz tog razloga teorijske studije zahtevaju poznavanje koncentracija pojedinih vrsta i koeficijente brzina (generalno, vremenski zavisnih) za različite procese. Kompleksnost ovih karakteristika plazme, njihova prostorno-vremenska promenljivost uzrokovana brojnim spoljašnjim uticajima i nedostatak eksperimentalnih podataka neophodnih za relevantne prostorne i vremenske raspodele ima za posledicu praktično nemoguće egzaktno određivanje pojedinačne i, posledično, ukupne brzine gubitaka elektrona. Uzimajući u obzir da veoma značajnu ulogu u ovim procesima imaju rekombinacije elektron - jon, jon - jon i tročestične rekombinacije brzina gubitaka jona može biti izražena kao (Mitra, 1977; Žigman *et al.*, 2007):

$$\mathcal{L}(\vec{r}, t) = \xi_L(\vec{r}, t) N^2(\vec{r}, t). \quad (4.19)$$

gde skalirajuća funkcija $\xi_L(\vec{r}, t)$ u slučaju zanemarivanja ostalih, nerekombinacionih, procesa predstavlja efektivni rekombinacioni koeficijent unutar prostora gde je koncentracija negativnih jona znatno manja od elektronske koncentracije (videti Poglavlje 2.1.2).

4.2.3 Dinamika plazme D-oblasti na kraju relaksacionog perioda nakon Sunčevog X-flera

U Poglavljima 4.2.1 i 4.2.2 je predložena složenost brzina proizvodnje $\mathcal{P}(\vec{r}, t)$ i gubitaka $\mathcal{L}(\vec{r}, t)$ elektrona. Njihove vrednosti se mogu odrediti daljom analizom uvrštavajući izraze 4.16 i 4.19 u jednačinu 4.1:

$$\frac{dN(\vec{r}, t)}{dt} = \kappa(\vec{r}, t)I^{sat}(t) + \mathcal{P}_r(\vec{r}, t) + \mathcal{C}(\vec{r}, t) - \xi_L(\vec{r}, t)N^2(\vec{r}, t). \quad (4.20)$$

Veličine iz ove jednačine se određuju na različite načine. Tako se prostorno-vremenska raspodela elektronske koncentracije i , posledično, njenog izvoda po vremenu može dobiti eksperimentalnim i numeričkim metodama uz primenu teorijskih modela (objašnjeno u Poglavlju 4.3), dok se evolucija intenziteta zračenja registrovanog na satelitu dobija uvrštavanjem odbroja zabeleženog na satelitskom detektoru u relevantne izraze. U slučaju određivanja koeficijenata $\kappa(\vec{r}, t)$ i $\xi_L(\vec{r}, t)$ i brzina $\mathcal{G}_r(\vec{r}, t)$ i $\mathcal{C}(\vec{r}, t)$, zavisnih i od visine i od vremena, neophodno je uvođenje aproksimacija. S obzirom da se aproksimacije, ako su uopšte moguće, menjaju tokom različitih faza flara, njihova primena dovodi do sužavanja vremenskog intervala na koji se konkretna metoda odnosi. Kao primer, može se navesti određivanje rekombinacionog koeficijenta u trenutku maksimalnog intenziteta zračenja prikazanom u *Žigman et al.* (2007). U ovoj disertaciji analiza je fokusirana na završnu fazu poremećaja parametara plazme kada su zavisnosti pomenutih veličina od vremena vrlo slabe. Pri tome, u opštem slučaju je, zbog uprošćavanja proračuna, korišćena ukupna brzina proizvodnje elektrona $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$, tako da početna jednačina u ovoj proceduri ima oblik:

$$\frac{dN(\vec{r}, t)}{dt} = \mathcal{G}(\vec{r}, t) - \xi_L(\vec{r}, t)N^2(\vec{r}, t), \quad (4.21)$$

Slaba vremenska zavisnost $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$ i $\xi_L(\vec{r}, t)$ omogućava uvođenje aproksimacije njihove konstantnosti unutar kratkog vremenskog intervala Δt :

$$\mathcal{G}(\vec{r}, t - \Delta t) \approx \mathcal{G}(\vec{r}, t) \equiv \overline{\mathcal{G}}(\vec{r}, t),$$

$$\xi_L(\vec{r}, t - \Delta t) \approx \xi_L(\vec{r}, t) \equiv \overline{\xi}_L(\vec{r}, t).$$

Kada se jednačina 4.21 primeni na krajnje trenutke intervala $t_1 = t - \Delta t$ and $t_2 = t$ dobija se sistem dve jednačine sa dve nepoznate, $\overline{\mathcal{G}}(\vec{r}, t)$ i $\overline{\xi}_L(\vec{r}, t)$, za svako $\vec{r}$ i t :

$$\begin{aligned} \left. \frac{dN}{dt} \right|_{\vec{r}, t - \Delta t} &= \overline{\mathcal{G}}(\vec{r}, t) - \overline{\xi}_L(\vec{r}, t)N^2(\vec{r}, t - \Delta t) \\ \left. \frac{dN}{dt} \right|_{\vec{r}, t} &= \overline{\mathcal{G}}(\vec{r}, t) - \overline{\xi}_L(\vec{r}, t)N^2(\vec{r}, t) \end{aligned} \quad (4.22)$$

što, konačno daje izraze za $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$ i $\xi_L(\vec{r}, t)$:

$$\mathcal{G}(\vec{r}, t) = \frac{N^2(\vec{r}, t) \frac{dN}{dt} \Big|_{\vec{r}, t - \Delta t} - N^2(\vec{r}, t - \Delta t) \frac{dN}{dt} \Big|_{\vec{r}, t}}{N^2(\vec{r}, t) - N^2(\vec{r}, t - \Delta t)} . \quad (4.23)$$

$$\xi_L(\vec{r}, t) = \frac{\frac{dN}{dt} \Big|_{\vec{r}, t} - \frac{dN}{dt} \Big|_{\vec{r}, t - \Delta t}}{N^2(\vec{r}, t) - N^2(\vec{r}, t - \Delta t)} . \quad (4.24)$$

Vrednosti ovih veličina, u slučaju da u posmatranom periodu nema jačih prolaznih perturbacija (posmatra se period koji ne uključuje intervale u kojima je primetan uticaj izlaska i zalaska Sunca), teže ka odgovarajućim vrednostima neperturbovane jonosfere i, praktično, predstavljaju saturacione vrednosti njihovih vremenskih evolucija. Interesantno je reći da se, s obzirom na činjenicu da je u opsegu visina između 70 km i 80 km dominantan uticaj vodonikove $\text{Ly}\alpha$ linije emitovane sa Sunca (videti 2.1.2), može sproksimativno napisati:

$$\mathcal{G}_{\text{Ly}\alpha}(\vec{r}, t) = \mathcal{G}(\vec{r}, t), \quad 70 \text{ km} \leq h \leq 80 \text{ km}, \quad (4.25)$$

gde je $\mathcal{G}_{\text{Ly}\alpha}(\vec{r}, t)$ brzina proizvodnje elektrona $\text{Ly}\alpha$ fotonima.

4.3 Modeliranje koncentracije elektrona

Osnove procedure za određivanje elektronske koncentracije u nekom trenutku tokom flera na određenoj visini date su u *Grubor et al.* (2008) i zasnivaju se na upoređivanju eksperimentalno zabeleženih promena amplitude A_{exp} i faze P_{exp} u datom trenutku u odnosu na relevantne vrednosti tokom neporemećenog perioda, A_{exp0} i P_{exp0} , sa odgovarajućim promenama koje predviđa LWPC model za simulaciju prostiranja VLF talasa, ΔA_{LWPC} i ΔP_{LWPC} , respektivno:

$$\Delta A_{LWPC} = \Delta A_{exp} \quad (4.26)$$

i

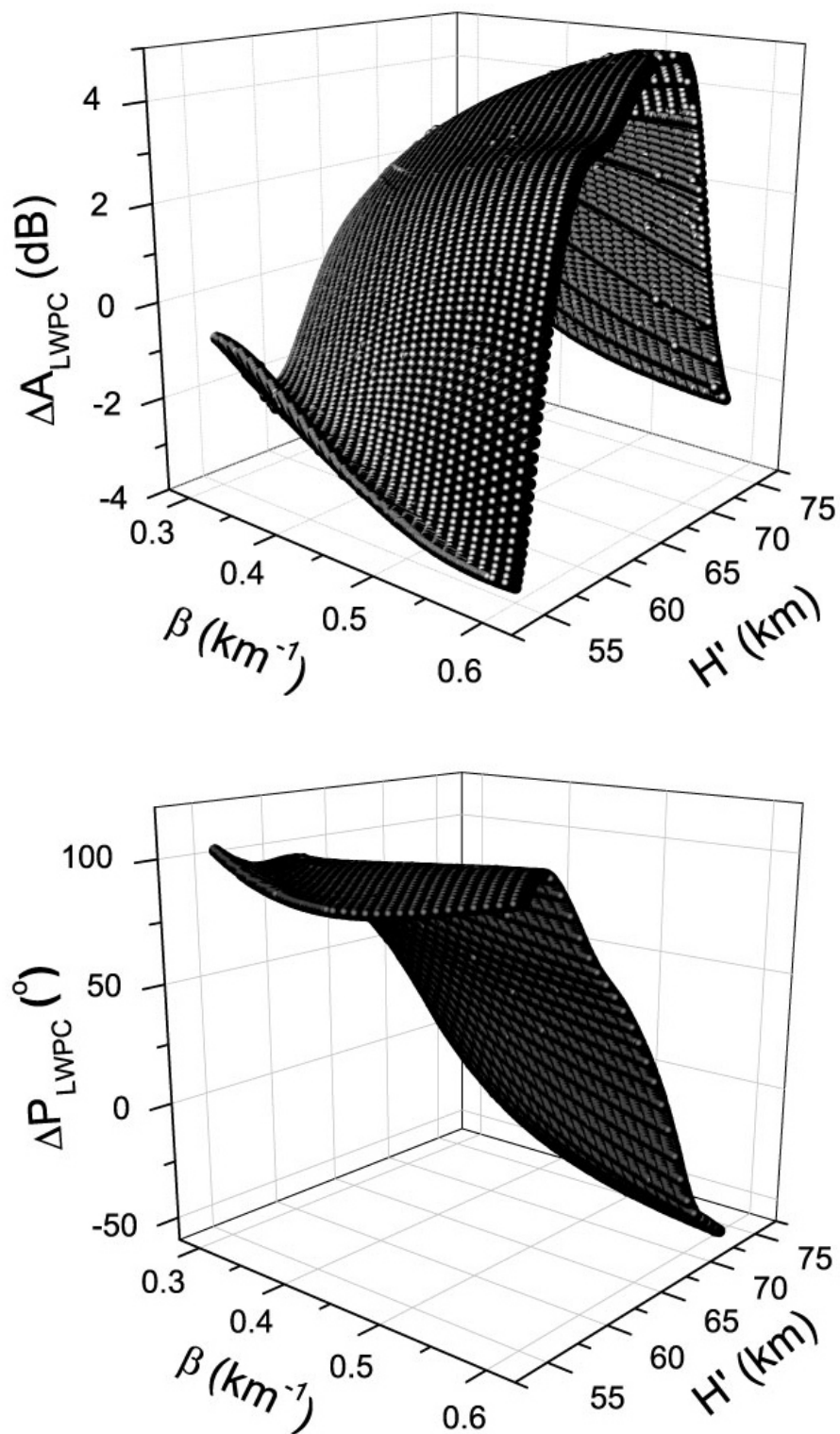
$$\Delta P_{LWPC} = \Delta P_{exp}, \quad (4.27)$$

gde je $\Delta A_{exp} = A_{exp} - A_{exp0}$, $\Delta P_{exp} = P_{exp} - P_{exp0}$, $\Delta A_{LWPC} = A_{LWPC} - A_{LWPC0}$, $\Delta P_{LWPC} = P_{LWPC} - P_{LWPC0}$. Vrednosti A_{exp0} i P_{exp0} se uzimaju jedinstvene za određivanje promena u svakom trenutku tokom flerom izazvanih varijacija signalnih karakteristika i predstavljaju zabeležene vrednosti u nekom trenutku unutar vremenskog perioda nepore-

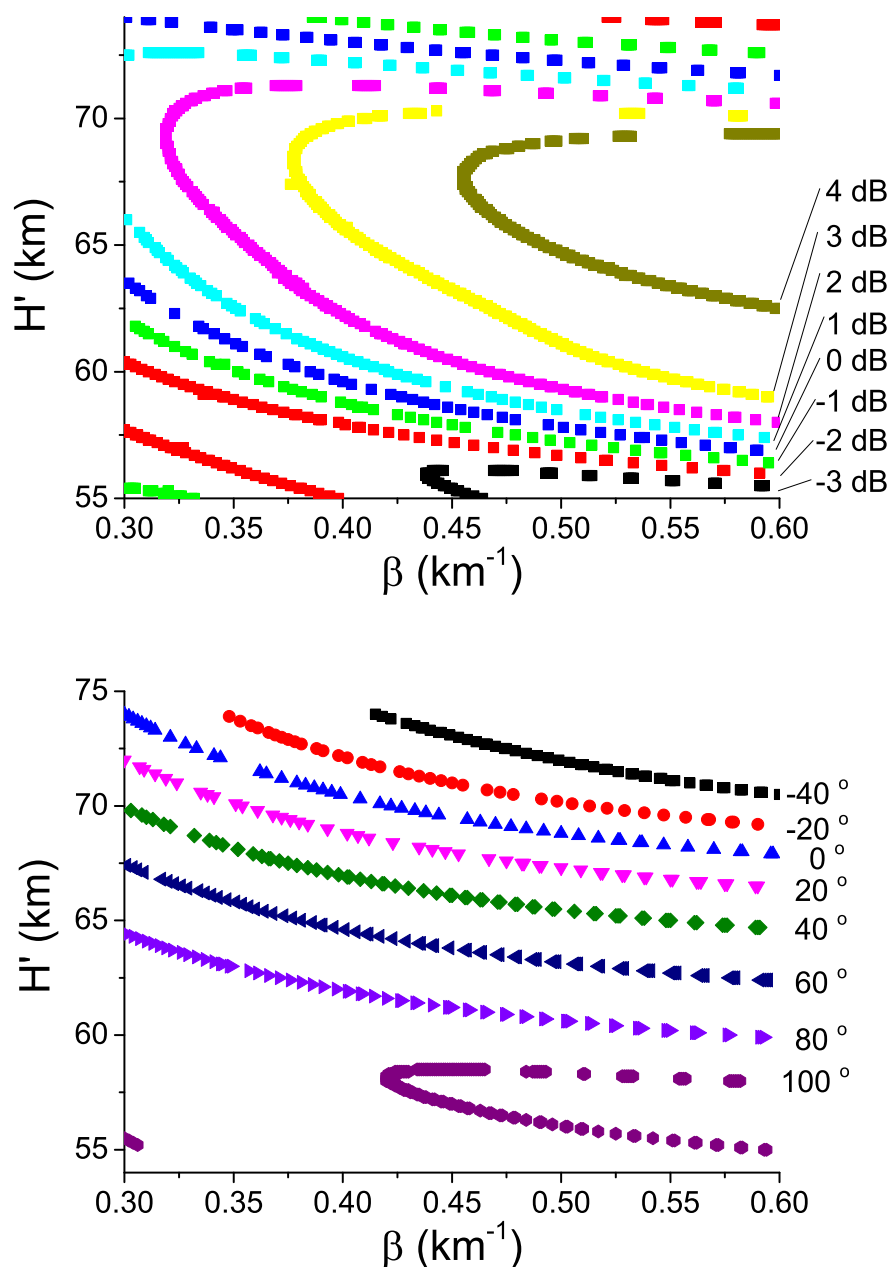
mećene jonosfere. Simulirane vrednosti amplitude i faze se dobijaju modeliranjem jonosfere varijacijama nezavisnih parametara "oštrine" β i visine refleksije VLF signala H' koji karakterišu Wait-ov model jonosfere (*Wait and Spies*, 1964). Na ovom mestu treba naglasiti da su za parametre β i H' relevantne za mirnu jonosferu uzete vrednosti 0.3 km^{-1} i 74 km . To su aproksimativne vrednosti korišćene kao bazične u LWPC modelu i u mnogim studijama uključujući i *Grubor et al.* (2008). Uzimanje ove aproksimacije u različitim uslovima dovodi u pitanje upoređivanje dobijenih vrednosti i zahteva, u najmanju ruku, detaljnu analizu njenog uticaja na rezultate pre pouzdane statistike. U daljem istraživanju jedan od osnovnih zadataka je utvrđivanje procedure za računanje datih parametara u konkretnom neporemećenom stanju jonosfere od strane intenzivnih prolaznih izvora perturbacija. Iako su ovakva istraživanja za pojedine konkretne situacije (konkretni signali, trenutni uslovi vezani za geomagnetno polje, dugotrajne periodične promene, geografske širine i dužine i drugo) prikazana u *Han et al.* (2011); *McRae and Thomson* (2000); *Friedrich and Torkar* (2001), primena tih rezultata je diskutabilna za proizvoljnu situaciju i ovo pitanje je i dalje otvoreno. Iz tog razloga su procedure za računanje mikroskopskih parametara plazme D-oblasti, odnosno modeliranje plazme locirane u njoj, u ovoj disertaciji primenjeni na pojedinačnim X-flerovima i nije rađena statistika niti poređenja različitih slučajeva. Ta problematika, kao što je rečeno, biće predmet budućih istraživanja. Pri tome, urađeno je poređenje korišćenih vrednosti sa vrednostima koje za konkretne zenitne uglove (relevantne za predajnik i prijemnik u datom trenutku) predviđaju pomenute studije.

U ovoj disertaciji je predložena metoda bazirana na određivanju zavisnosti promena amplitude i faza koje predviđa LWPC model od svih očekivanih vrednosti parametara β i H' i procedure za određivanje kombinacije ovih parametara koja daje najbolje slaganje simuliranih i registrovanih promena signala. Na taj način omogućeno je brzo i automatsko praćenje evolucije elektronske gustine u D-oblasti tokom celog flera, i, posledično, evolucije ostalih veličina datih u izrazu (4.21). Ovo je unapređenje analize odgovora plazme na Sunčeve X-flerove u odnosu na ranije studije, gde su vrednosti određivane sa slabijom vremenskom rezolucijom, obično u svega nekoliko momenata.

Na Slici 4.2 date su zavisnosti ΔA_{LWPC} i ΔP_{LWPC} od β i H' sa rezolucijama 0.001 km^{-1} i 0.1 km , respektivno, za slučaj signala emitovanog DHO predajnikom lociranim u Nemačkoj na frekvenciji 23.4 kHz i registrovanim prijemnikom na Institutu za fiziku u Zemunu. Ovaj signal je analiziran u studijama zbog dobrog prijema i relativno kratke putanje što je značajno



Slika 4.2: 3D prikaz modeliranih promena amplitude (gornji grafik) i faze (donji grafik) u zavisnosti od kombinacije parametara β i $H'(t)$ za signal emitovan predajnikom DHO (Nemačka) na mestu prijemnika u Zemunu.

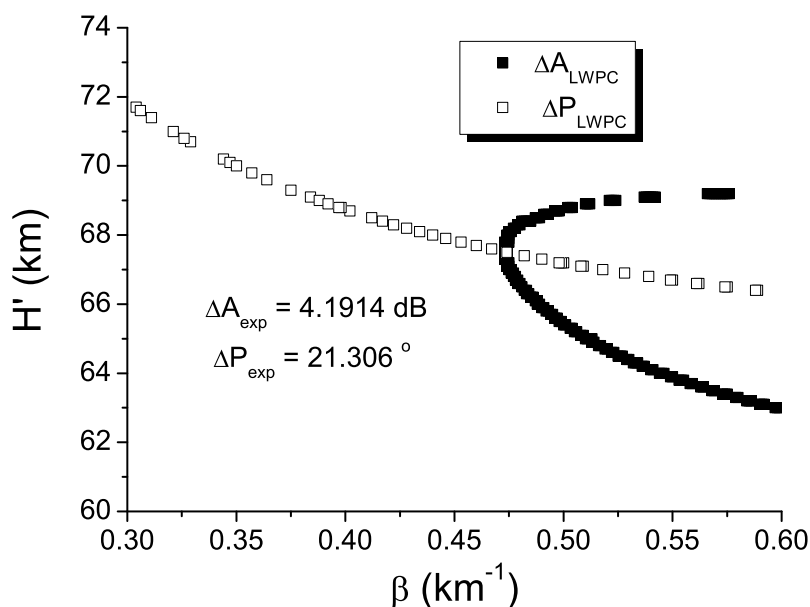


Slika 4.3: 2D prikaz modeliranih podataka datih na Slici 4.2

zbog aproksimacije horizontalno uniformne niske jonosfere. Sa ovih grafika, kao i sa njihovih 2D projekcija (Slika 4.3) vidi se da zavisnosti nisu monotone funkcije i da je komplikovanija analiza u slučaju amplituda. To ustvari znači da porast parametara ne izaziva nužno porast amplitude i faze, i obratno, što je u skladu sa prikazom datim u Poglavlju 3.3.2.

Kao što se sa prethodne dve slike vidi, ni amplitudna, ni fazna promena ne daju jednoznačno određenu kombinaciju β i H' , nego, unutar vrednosti $|\Delta A_{LWPC} - \Delta A_{exp}| \leq \delta_A$, odnosno $|\Delta P_{LWPC} - \Delta P_{exp}| \leq \delta_P$ skup parova. Vrednosti δ_A i δ_P se zadaju u programu

i predstavljaju, u konkretnom slučaju procenjeno, maksimalno zadovoljavajuće odstupanje mernih od simuliranih promena odgovarajućih vrednosti koji zavise od registrovanih promena. Da bi se izabrala najbolja kombinacija upoređuju se parovi za oba slučaja. Sa Slike 4.4 se vidi da je tražena kombinacija praktično presečna tačka skupa tačaka koji se odnose na promene amplitude, odnosno faze.



Slika 4.4: Grafički prikaz određivanja parametara za zadate vrednosti promena amplitude i faze signala.

Primenom date procedure na vrednosti tokom flera sa proizvoljno izabranom rezolucijom dobijaju se vremenske zavisnosti $\beta(t)$ i $H'(t)$ tokom reakcije plazme D-oblasti na X-fler, odakle se pomoću formule (Wait and Spies, 1964):

$$N(t, h) = 1.43 \cdot 10^{13} e^{-\beta(t)H'(t)} e^{(\beta(t)-0.15)h}, \quad (4.28)$$

dobija vremenska evolucija elektronske koncentracije na visinama h unutar D-oblasti. U ovom izrazu parametar β se unosi u jedinicama km^{-1} , parametar H' i visina h u km, a koncentracija elektrona se dobija u m^{-3} . Vrednosti koje daje ova teorija se dobro slažu sa raketno izmerenim vrednostima i to pre svega na visinama bliskim visini refleksije H' . Na visinama bliskim gornjoj granici D-oblasti Wait-ova teorija predviđa nešto više vrednosti od merenih zbog čega će u ovoj studiji biti razmatrane visine ispod 80 km.

Na osnovu vrednosti $N(t, h)$ može se dobiti i promena elektronske koncentracije u vre-

menu $\frac{dN(h,t)}{dt}$ prisutna u izrazu 4.21. Pri tome je neophodno fitovati dobijene vrednosti $N(t, h)$ sa glatkom krivom. Na taj način se, od vrednosti koje nepravilno odstupaju od fitovane krive i daju vrlo haotičan izvod po vremenu, dobija globalna tendencija elektronske koncentracije iz koje se određuje vremenski izvod primenljiv u proračunima. Ovde treba napomenuti da se umesto fitovanja vrednosti $N(t, h)$ potpuno ravnopravno može izvršiti fitovanje $\beta(t)$ i $H'(t)$ nakon čega se primenom jednačine 4.28 dobija ista kriva kao u prvoj varijanti.

Poglavlje 5

Hidrodinamički talasi u D-oblasti jonosfere

U prethodnom poglavlju plazma D-oblasti je analizirana na čestičnom nivou. U nastavku, pažnja će biti usmerena na hidrodinamiku plazme sa osvrtom na hidrodinamičke talase i njihov uticaj na prostiranje VLF signala. U ovom poglavlju biće predstavljena opšta analiza talasnog ponašanja sredine, a dobijeni izrazi će u Poglavlju 7.2 biti primenjeni na vremenske intervale oko izlaska i zalaska Sunca koje karakterišu nagle promene termalnog zagrevanja i jonizacije.

Relevantnost analize VLF talasa u detekciji hidrodinamičkih talasa u niskoj jonosferi se bazira na činjenici da varijacije VLF talasa izražavaju nestacionarne fizičke i hemijske uslove sredine u kojoj se prostire i reflektuje signal. Naime, visina refleksije signala zavisi od lokalne koncentracije elektrona koja u prisustvu poremećaja postaje vremenski zavisna. To dalje uzrokuje vremenske promene trajektorije signala i posledično registrovane amplitude i faze. Iz tog razloga, analizom spektralne kompozicije varijacija VLF signala u realnom vremenu možemo izvesti zaključke o oscilacijama koje odgovaraju fizičkim karakteristikama posmatranog dela atmosfere. U studiji je spektralna analiza urađena primenom brzih Fourier-ovih transformacija (eng. Fast Fourier Transformations - FFT) na vremensku evoluciju amplitude VLF signala, što predstavlja novu metodu za analizu hidrodinamičkih talasa u D-oblasti.

5.1 Motivacija

Ispitivanje prisustva hidrodinamičkih talasa u jonosferi izazvanih naglim promenama u intenzitetu jonizacionog Sunčevog zračenja tokom izlaska i zalaska sunca je u literaturi publikovano za jonosferske visine iznad 90 km. Analize su bazirane na podacima dobijenim kako satelitskim tako i uređajima postavljenim na površini Zemlje pri čemu su primenjivane različite procedure: računanje ukupnog prisustva elektrona (eng. total electron contents - TEC) duž određene putanje signala na osnovu podataka dobijenih GPS-om (*Afraimovich*, 2008), analizama nekoherentnog rasejanja radarskog signala (*Galushko et al.*, 1998) i Doplerovog efekta (*Sindelarova et al.*, 2012). Motivacija za istraživanje prezentovano u ovoj disertaciji i publikovano u *Nina and Čadež* (2013a) je bila proširenje istraživanja ovog efekta na visine ispod 90 km, ispitivanje globalnosti hidrodinamičkih talasa u širokom domenu visina poređenjem dobijenih rezultata sa postojećim u višim atmosferskim slojevima i konačno ispitivanje mogućnosti primene tehnike VLF radio signala na istraživanja u ovoj oblasti.

5.2 Model atmosfere i linearne perturbacije

Na visinama ispod 90 km, gde se VLF radio signali reflektuju, hidrodinamički talasi su dominantan vid oscilacija. Naime, tipični model atmosfere predviđa koncentraciju neutralnih čestica od $n_n \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ dok proračuni koncentracija naelektrisanih čestica daju vrednosti od samo $n_p \sim 10^8 \text{ m}^{-3}$. Na osnovu toga može se zaključiti da električni i magnetni efekti imaju zanemarljivu ulogu u dinamici lokalne plazme i da se u ovoj oblasti mogu primeniti hidrodinamičke jednačine za idealni neutralni gas. S obzirom na kvazineutralnost plazme uz pretpostavku da su poremećaji adijabatski i dovoljno malog intenziteta (omogućava zanemarivanje promene količine toplote u posmatranoj sredini) u literaturi se teorijska analiza ovih talasa zasniva na skupu odgovarajućih hidrodinamičkih jednačina (*Yeh and Liu*, 1972):

- jednačina stanja:

$$p = \rho R_a T, \quad (5.1)$$

- jednačina kontinuiteta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0, \quad (5.2)$$

- jednačina kretanja:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g}, \quad (5.3)$$

- jednačina energije:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)p = \gamma \frac{p}{\rho} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)\rho \right]. \quad (5.4)$$

U ovim izrazima $\gamma = c_p/c_v = (i + 2)/i$ predstavlja odnos specifičnih toplota za gas sa i stepeni slobode ($i = 3$ i 5 za jednoatomske i dvoatomske molekule, respektivno), $k = 1.3807 \times 10^{-23}$ [J/K] je Boltzmann-ova konstanta, $R_a = k/m_a = R/M_a$ gasna konstanta za molekule mase m_a ili molarne mase M_a , dok je $R = 8.3145$ [J/K/mol] univerzalna gasna konstanta.

Dalje pojednostavljenje datog sistema jednačina će se bazirati na činjenici da su prostorne dimenzije posmatrane sredine dovoljno male u poređenju sa radiusom Zemlje $R_E = 6371$ km. To dozvoljava primenu planparelne geometrije sa konstantnim gravitacionim ubrzanjem $\vec{g} = -g\hat{e}_z$ u lokalnoj izotermnoj sredini čime se atmosfera u početnom, neper-turbovanom, stanju posmatra kao skup horizontalno homogenih slojeva čije se karakteris-tike menjaju u vertikalnom pravcu. S obzirom da se, kao što je već rečeno, u analizi raz-matraju slabi poremećaji sistem jednačina 5.1-5.4 se može linearizovati uzimajući svaku promenljivu $\Psi(x, y, z, t)$ kao sumu njenog osnovnog stanja $\Psi_0(z)$ i male perturbacije prvog reda $\Psi_1(x, y, z, t)$ uzrokovane talasima:

$$\Psi(x, y, z, t) = \Psi_0(z) + \Psi_1(x, y, z, t), \quad (5.5)$$

pri čemu je:

$$|\Psi_1(x, y, z, t)| \ll |\Psi_0(x, y, z, t)| \quad (5.6)$$

i

$$\Psi_1(x, y, z, t) = \hat{\Psi}_1(z) e^{-i\omega t + i(k_x x + k_y y)}, \quad (5.7)$$

gde $k_{x,y,z}$ predstavljaju talasne brojeve duž odgovarajućih osa.

U nastavku će biti pretpostavljena lokalna izotermonost sredine ($T \approx \text{const}$), što uz aproksimaciju horizontalno uniformne izotermalne atmosfere, uslovljava ograničenje modela na talasne dužine $\vec{\lambda} \equiv 2\pi(1/k_x, 1/k_y, 1/k_z)$ koje zadovoljavaju uslove:

$$\lambda_x, \lambda_y \ll R_E, \quad \lambda_z \ll \mathcal{L}_T. \quad (5.8)$$

gde je $\mathcal{L}_T$ dužina temperature nehomogenosti koja se iz postojećih temperaturnih profila može dobiti pomoću izraza $T \approx \mathcal{L}_T \frac{\partial T}{\partial z}$.

Jednačine 5.1-5.4, linearizovane perturbacijama datim jednačinom (5.5) daju disperzionu relaciju (detaljna izvedba je data u *Yeh and Liu (1972)*):

$$\omega^4 - \left(k_0^2 + k_z^2 + \frac{1}{4H^2} \right) v_s^2 \omega^2 + k_0^2 v_s^2 N_{BV}^2 = 0, \quad (5.9)$$

gde su horizontalni talasni broj k_0 , adijabatska brzina zvuka v_s , karakteristična visina izotermalne atmosfere H i Brunt-Väisälä frekvencija N_{BV} respektivno dati sledećim izrazima:

$$k_0^2 \equiv k_x^2 + k_y^2 \quad (5.10)$$

$$v_s^2 \equiv \gamma \frac{p_0}{\rho_0} = \gamma R_a T_0 = \text{const}, \quad (5.11)$$

$$H \equiv \frac{p_0(0)}{\rho_0(0)g} = \frac{v_s^2}{\gamma g}, \quad (5.12)$$

$$N_{BV}^2 = (\gamma - 1) \frac{g^2}{v_s^2}. \quad (5.13)$$

Disperziona relacija (5.9) je kvadratna po ω^2 što indukuje postojanje dve talasne mode u posmatranoj sredini poznate pod nazivima akustična i gravitaciona moda. S obzirom na uslove (5.8), pogodno ju je izraziti u termovima talasnih dužina i perioda:

$$\lambda_0^2(\tau) = \mathcal{D}_0(\tau) \left[1 + \frac{\mathcal{D}_2(\tau)}{\lambda_z^2 - \mathcal{D}_2(\tau)} \right] \quad (5.14)$$

sa:

$$\mathcal{D}_0(\tau) = \frac{v_s^2 \tau_0^2 (\tau_{BV}^2 - \tau^2)}{\tau_{BV}^2 (\tau_0^2 - \tau^2)} \tau^2, \quad \mathcal{D}_2(\tau) = \frac{v_s^2 \tau_0^2}{\tau_0^2 - \tau^2} \tau^2, \quad (5.15)$$

i:

$$\tau_0 = \frac{4\pi v_s}{\gamma g}, \quad \tau_{BV} = \frac{2\pi}{N_{BV}}, \quad \lambda_{0,z} = \frac{2\pi}{k_{0,z}}, \quad (5.16)$$

gde τ_0 and τ_{BV} odgovaraju prekidnom akustičnom i Brunt-Väisäläa periodu oscilacija, respektivno.

Disperziona relacija (5.14) reprezentuje familiju hiperbola na (λ_0, λ_z) grafiku sa τ kao parametrom. Ove hiperbole imaju dva seta asimptota, horizontalni i vertikalni, koji zavise od τ . Horizontalne asimptote $\lambda_0 \equiv \lambda_H(\tau)$ određene na osnovi izraza:

$$\lambda_H^2(\tau) = A_0(\tau) = \frac{v_s^2 \tau_0^2}{\tau_{BV}^2} \frac{\tau_{BV}^2 - \tau^2}{\tau_0^2 - \tau^2} \tau^2 > 0, \quad (5.17)$$

postoje u slučaju obeju moda i vrednosti im se povećavaju sa porastom τ . One teže nuli za $\tau \rightarrow 0$ i $\tau \rightarrow \tau_{BV}$ u slučaju akustičnih, odnosno gravitacionih moda, respektivno. Vertikalne asimptote, $\lambda_z \equiv \lambda_V(\tau)$, su svojstvene akustičnim modama. Definisane su izrazom:

$$\lambda_V^2(\tau) = A_1(\tau) = v_s^2 \frac{\tau_0^2 \tau^2}{\tau_0^2 - \tau^2} > 0, \quad (5.18)$$

a vrednosti im se kreću između $\lambda_z = 0$ i $\lambda_z = \infty$ za $\tau = 0$ and $\tau = \tau_0$, respektivno.

Na osnovu izraza 5.14 mogu se odrediti kombinacije horizontalnih i vertikalnih talasnih dužina koje odgovaraju vrednostima perioda hidrodinamičkih talasa. U sledećem poglavlju je detaljno opisana procedura za određivanje perioda ekscitovanih talasa na osnovu eksperimentalnih podataka zabeleženih VLF prijemnikom.

5.3 Obrada eksperimentalnih podataka

Ispitivanje poremećaja u plazmi jonosferske D-oblasti nakon naglih promena u uslovima prostranja VLF talasa se može izvršiti primenom Fourier-ovoih transformacija na amplitude VLF signala $A(t)$ zabeležene u realnom vremenu koja daje oscilatorni spektar $A_F(\omega)$:

$$A_F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i\omega t} A(t) dt, \quad (5.19)$$

gde su $\omega \equiv 2\pi/\tau$ and τ frekvencija i period oscilacija, respektivno. Ovi spektri sadrže sumarnu informaciju o brojnim vremenski promenljivim uticajima na jonosfersku plazmu. Neke od njih su neregularne i njihovi efekti nisu prisutni periodično. Neki su regularniji kao npr. Sunčevo zračenje koje je dominantno tokom dana i kosmičko zračenje koje je znatno izraženije noću. Svi ovi uticaji zajedno čine spektar kompleksnim i različitim za svaki vremenski interval. Uočavanje talasa ekscitovanih posmatranom perturbacijom se može izvršiti

na osnovu tri kriterijuma. Prvo, u periodu P_B neposredno nakon perturbacije očekuje se ekscitacija talasa u odnosu na period P_A pre perturbacije. Drugo, ako su ekscitovani talasi posledica upravo posmatrane promene koja je već završena, njihova amplituda nakon dovoljno dugo vremena u periodu P_C treba da slabi. Na kraju, da bi se izbegli mogući drugi uticaji koji se mogu nasumično javiti, neophodno je da se za istu pojavu odgovarajući periodi ponove u više slučajeva, što statistiku uključuje kao treći uslov u izolovanju perioda relevantnih za talase indukovane određenom pojavom. Pri tome, neophodno je voditi računa da se u analizi linearnih hidrodinamičkih talasa uzimaju vremenski intervali u kojima je "bazični signal" na koga su superponirane oscilacije kvazistacionaran i da je intenzitet oscilacija dovoljno mali kako bi se mogao primeniti model linearnih perturbacija. U toku perioda kada su prisutne intenzivne perturbacije, kao npr. Sunčevi X-flerovi, moguća je primena navedene procedure obrade signala (*Nina and Čadež*, 2012), ali se u tom slučaju ne može govoriti o linearnim harmonijskim talasima.

Vizualizacija efekta indukovane perturbacijom je dobijena računanjem odgovarajućih odnosa Fourier-ovih amplituda za vremenske intervale P_A , P_B i P_C .

$$\alpha_{BA}(\tau) \equiv \frac{A_F(\tau; P_B)}{A_F(\tau; P_A)} \quad (5.20)$$

i

$$\alpha_{BC}(\tau) \equiv \frac{A_F(\tau; P_B)}{A_F(\tau; P_C)}. \quad (5.21)$$

Pikovi u ovim spektrima predstavljaju odgovarajuću ekscitaciju, odnosno odgovarajuće slabljenje talasa.

Na ovom mestu treba ukazati na ograničenja analize zbog primene Fourier-ovih transformacija. Naime, prilikom prelaska iz vremenskog u spektralni domen razlaganje se vrši po bazisnim periodima koji su određeni deljenjem dužine izabranog vremenskog intervala sa celim brojem $n = 1, 2, 3, \dots, N$ gde je N određen brojem tačaka kojima je opisan signal u realnom vremenu. Na taj način, talasi sa periodima koji se ne poklapaju sa nekom od bazisnih vrednosti se predstavljaju kao suma talasa čija se amplituda povećava sa približavanjem relevantnog bazisnog perioda periodu datog talasa. S obzirom da je u realnom slučaju prisutan veoma veliki broj perioda njihovo razlaganje utiče na povećanje Fourier-ovih amplituda za veće periode jer su tu znatno ređe raspoređene bazisne vrednosti. Smanjenjem perioda spektar se sve više zgušnjava i odgovarajuće Fourier-ove amplitude dobijaju poje-

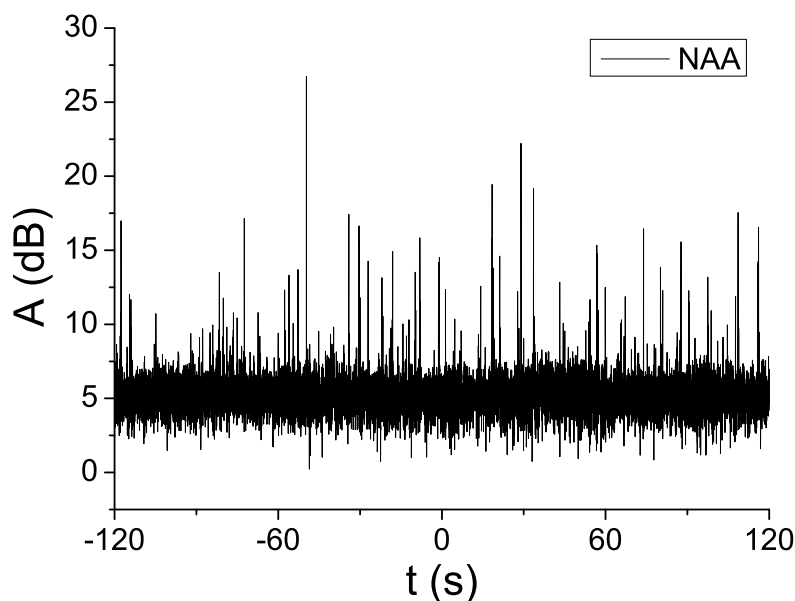
dinačno manje doprinose realnih talasa. Iz tog razloga posmatranje pojedinačnog spektra ne daje realnu sliku. Uvođenje odnosa Fourier-ove amplituda za različite intervale realnog vremena istog trajanja je znatno realniji. Pri tome, ovom metodom, praktično, nije moguće izolovati tačan period pojedinačnog talasa, već se može govoriti o intervalima oko odgovarajućeg bazisnog perioda. Međutim, s obzirom na veoma veliki broj prostorno i vremenski promenljivih uticaja kojima je jonosferska plazma izložena, tačno određivanje frekvencije je praktično besmisleno i prikazana analiza bazirana na Fourier-ovim transformacijama daje sasvim zadovoljavajuću studiju kojom se detektuje potencijalno prisustvo hidrodinamičkih talasa u D-oblasti izazvano nekim poremećajem.

Poglavlje 6

Ispitivanje detektabilnosti slabih perturbacija D-oblasti pomoću VLF signala

U ovom poglavlju pažnja će biti posvećena ispitivanju mogućnosti detektovanja promena u plazmi D-oblasti uzrokovanih bljeskovima γ -zraka i ehoa koji ga prate. Kao što je u Poglavlju 3.3.2 rečeno, ovo visokoenergijsko zračenje ima dovoljnu energiju za jonizaciju čestica u jonosferi, ali su preseki za taj proces mnogo manji nego u slučaju fotona većih talasnih dužina. To dovodi u pitanje detektabilnost promena koncentracije elektrona pogotovo kada se ima u vidu prisustvo mnogobrojnih drugih uzročnika jonizacije čije konstantne varijacije u intenzitetu uzrokuju promenljiv sastav plazme i, posledično, promene u karakteristikama VLF signala. Prikazana analiza je bazirana na statističkom prilazu koji je u slučaju bljeskova γ -zraka moguć zbog učestalosti pojavljivanja (sateliti ih detektuju nekoliko puta mesečno). Akcenat je stavljen na kratkotrajne poremećaje ispod 1 s, što, uz statistički pristup, predstavlja novinu u istraživanjima s obzirom da se dosadašnje studije odnose na poremećaje trajanja od najmanje nekoliko sekundi pa do više od jednog sata.

Na ovom mestu je važno napomenuti da, iako se predstojeća analiza odnosi konkretno na γ -bljeskove, sama procedura ima opšti karakter u pogledu slabog izvora perturbacija. Iz tog razloga moguće ju je primeniti i na druge pojave sa sličnim uticajem na D-oblast, što će i biti predmet predstojećih istraživanja.



Slika 6.1: Prikaz učestalih poremećaja amplitude VLF signala emitovanog predajnikom NAA u SAD 26. jula 2009. godine u periodu oko vremena registracije bljeska GRB090726 kome odgovara 0 s na grafiku.

6.1 Motivacija

Studija eksperimentalno registrovanih vremenskih varijacija niske jonosfere tokom perioda upada intenzivnog γ -zračenja zasnovana na uspostavljanju veze između ove dve pojave je izuzetno kompleksna. To se može videti i iz činjenice da je svega nekoliko slučajeva prikazano u literaturi. Problemi u analizi su pre svega posledica nemogućnosti pouzdane potvrde da je u konkretnom slučaju, ako postoji, poremećaj posledica posmatranog procesa. Ova nepouzdanost potiče od mnogobrojnih uticaja na jonosfersku plazmu koji se manifestuju u varijacijama njenih parametara različitog intenziteta i dužine trajanja. Na Slici 6.1 dat je primer perioda 2 minute pre i posle registrovanog bljeska GRB090726 kada je jonosfera bila učestalo izložena perturbacijama uzrokovanim od strane nekog drugog izvora ili više njih. Iz prikazane vremenske evolucije amplitude $A(t)$ je jasno da se ne može sa sigurnošću tvrditi ništa o eventualnom prisustvu ili odsustvu merljive promene uzrokovane reakcijom na pomenuti γ -bljesak (dalje GB). Čak i u slučaju kada sigurno postoji, nema mogućnosti da se ona izdvoji.

Upravo ovaj problem nam je bio motivacija da napravimo studiju o mogućnostima predviđanja reakcija (početak i vreme trajanja kao i mogućnost poremećaja usled sekundarnih

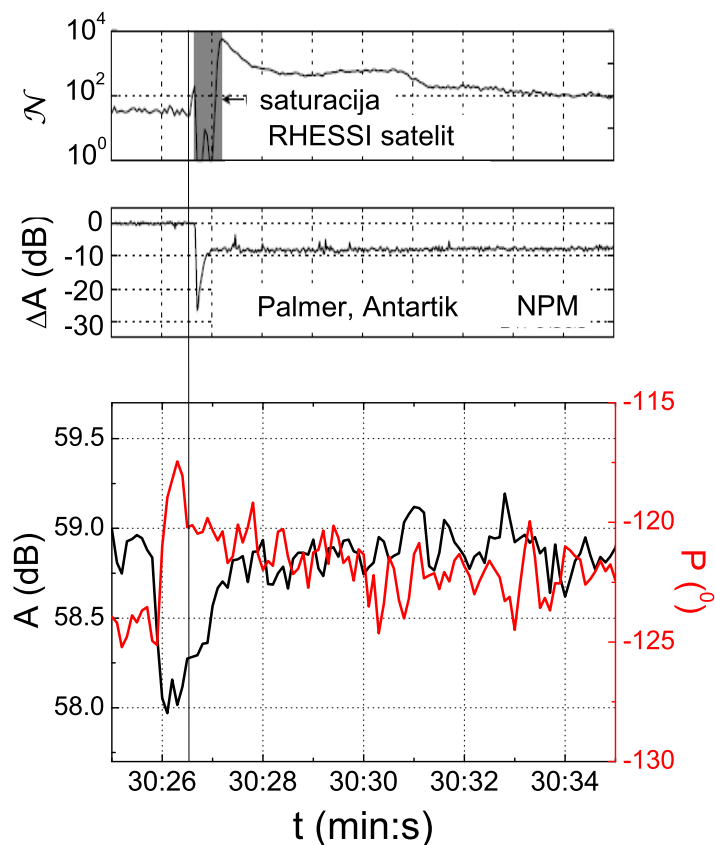
posledica GB-ova) niske jonosfere na osnovu karakteristika konkretnog GB-a (ukupan odbroj fotona odgovarajućih energija i vreme trajanja), posmatrane oblasti niske jonosfere (pre svega doba dana) i njihovog uzajamnog odnosa (geografski položaj centralne upadne tačke u odnosu na analiziranu oblast). Pri tome treba naglasiti da, s obzirom na nedostatak eksperimentalnih podataka za parametre plazme i inicijalni spektar zračenja sa dovoljno dobrom vremenskom i prostornom rezolucijom, predviđanja poremećaja pri određenim uslovima baziranim na registrovanim podacima daje veliki značaj u proveru teorijskih studija i numeričkih simulacija.

6.2 Vremenski intervali posmatranja i detektovanih poremećaja

Izbor posmatranog vremenskog intervala i dužine trajanja izdvajanih poremećaja je zasnovan na sledećoj analizi do sada obrađenih (evidentnih i potencijalnih) reakcija na nekoliko GB-ova:

- **Posmatrani vremenski interval.** U slučaju reakcije niske jonosfere na skok zračenja zabeleženog usled X-flerova, eksperimentalno je zabeležena činjenica da početak promene signalnih karakteristika počinje sa izvesnim zakašnjenjem u odnosu na satelitski zabeležen skok u intenzitetu zračenja (*Valníček and Ranzinger, 1972*). Pored toga, i maksimalna perturbacija se javlja nakon maksimalno zabeleženog intenziteta. Ova kašnjenja mogu biti i do reda minuta. Na osnovu te činjenice, realna je pretpostavka da se početak direktnog odgovora na GB može očekivati u određenom intervalu nakon vremena zabeleženog na satelitu, tj. da postoji izvesna inertnost jonosferske plazme. Ovo je i praktično potvrđeno najbolje zabeleženim publikovanim odgovorom jonosfere na GB (*Inan et al., 2007*) (gornji i srednji panel na Slici 6.2)

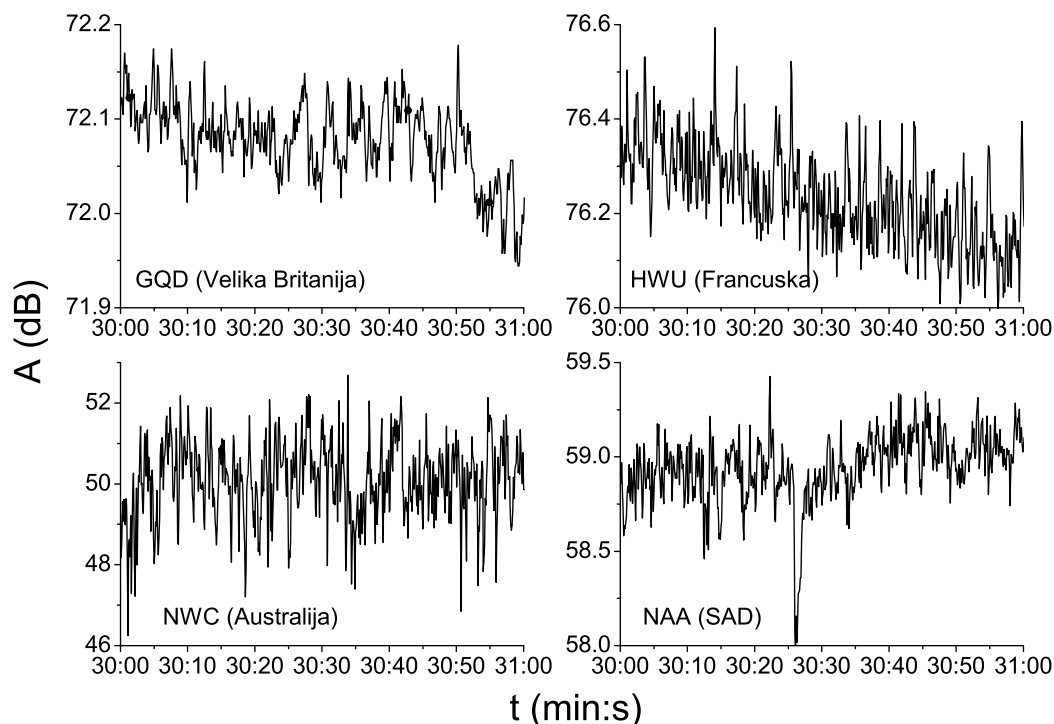
Međutim, upravo ovaj primer otvara pitanje mogućnosti početka reakcije niske jonosfere u određenoj oblasti neposredno pre nego što je zabeležen skok na satelitu i delovima posmatranog atmosferskog sloja na drugim geografskim širinama i dužinama. Naime, na donjem panelu Slike 6.2 se vidi signal emitovan NAA predajnikom (Cutler, Maine, USA) i registrovan AbsPAL VLF prijemnikom lociranim u Beogradu. Ovo je jedini zabeleženi signal pomenutim prijemnikom koji se prostirao u delu atmosfere izloženom dejstvom GB (u delu putanje iznad Atlanskog okeana) čija se centralna



Slika 6.2: Registracije poremećaja 27. decembra 2004. godine izazvanih γ -bljeskom GRB041227 (gornji panel - podaci sa RHESSI satelita, srednji panel - amplituda signala na trasi NPM-Palmer, donji panel - amplituda (crna linija) i faza (crvena linija) signala na trasi NAA-Beograd). Prva dva panela su preuzeta iz rada *Inan et al.* (2007), dok vertikalna linija označava početak uvećanja zračenja registrovanog na satelitu.

upadna tačka nalazila u Pacifičkom okeanu. Evidentno je da je poremećaj na toj trasi registrovan oko pola sekunde pre registracije na RHESSI satelitu, ali, s obzirom da je najverovatnije posledica perturbacija iznad Atlantika (nemamo registrovane velike promene amplituda na drugim trasama (Slika 6.3)), mogućnost da je upravo posmatrani GB izazvao vremenske promene u signalu ne bi trebalo a priori odbaciti.

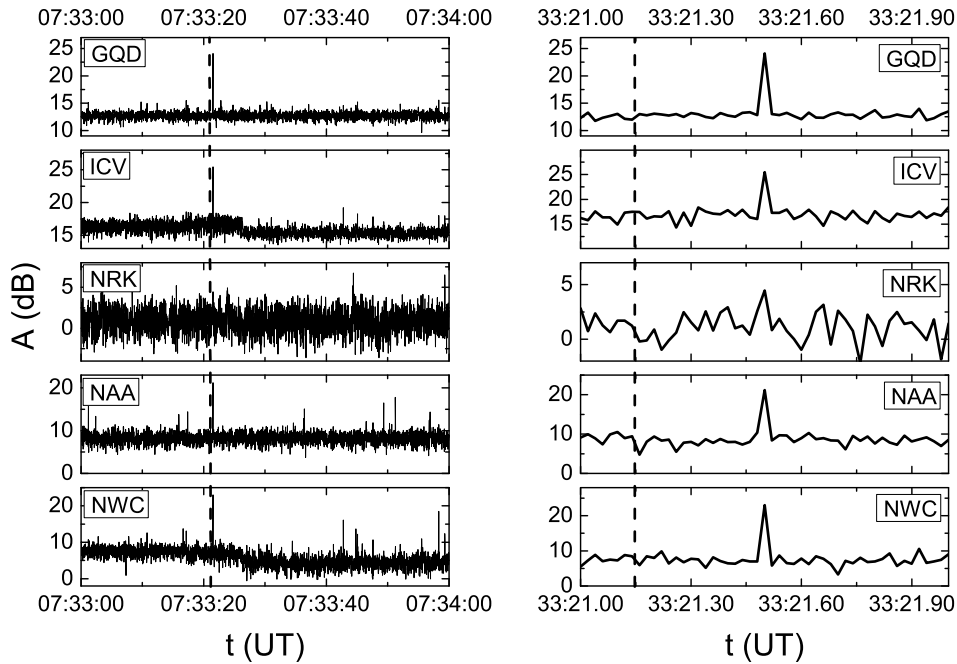
U *Hudec et al.* (2010) prikazane su moguće reakcije na satelitski registrovane GB-ove GRB080319D i GRB080320A koje su zabeležene SID VLF monitorom oko 44 s, odnosno 100 s nakon registracije GB-ova na satelitu SWIFT. To nagoveštava moguće reakcije jonosfere na efekte proizvedne direktno ili indirektno upadom intenzivnog visokoenergijskog zračenja.



Slika 6.3: Upoređivanje signala registrovanih u Beogradu i emitovanih sa različitim lokacija 27. decembra 2004. godine u periodu koji obuhvata vreme registracije bljeska GRB041227.

Na osnovu datih primera, u ovoj studiji, analizirali smo interval 2 min pre i 2 min posle pojedinačno zabeleženog GB-a na SWIFT satelitu. Na taj način smo ostavili mogućnost detekcije reakcije i neposredno pre i neposredno posle zabeleženog početka intenzivnog upada γ -zraka, kao i eventualnu sekundarnu reakciju na primarno izazvane poremećaje visokoenergijskim zračenjem. Duže vreme pre satelitske detekcije ima ulogu referentnog stanja jonosferske plazme koje nije neperturbovano ovim izvorom.

- **Vremenski interval poremećaja.** Na osnovu Slike 6.2 može se pretpostaviti da trajanje reakcije jonosfere na GB zavisi od geografskog položaja prostora kroz koji prolazi signal u odnosu na upadni pravac γ -zraka. S obzirom da je posmatrani slučaj izazvao ekstremno jaku i dugu reakciju jonosfere za razliku od npr. bljeska GRB090424 (*Chakrabarti et al.*, 2010) kada su poremećaji trajali reda nekoliko sekundi, realno je pretpostaviti da reakcije na manje intenzivne GB-ove sa energijama čiji su preseki za jonizaciju manji nego u posmatranom slučaju mogu izazvati i znatno kraće poremećaje jonosferske plazme. Zbog toga smo u analizu uključili sve poremećaje koji mogu da



Slika 6.4: Prikaz kratkotrajnog izraženog skoka amplituda signala emitovanih sa različitih lokacija (mapa predajnika je data na Slici 3.1) i zabeleženih u Beogradu manje od 1 s nakon registrovanog bljeska GRB110412A 12. aprila 2011. godine u 7:33:21.15 UT (levo - posmatrani period od 1 min, desno - zumirani skokovi amplitude). Vertikalne isprekidane linije označavaju vreme satelitske registracije γ -bljeska.

se detektuju sa rezolucijom VLF prijemnika od 0.02 s. Primer jednog kratkotrajnog poremećaja zabeleženog AWESOME prijemnikom lociranim u Beogradu manje od 1 s nakon registrovanog bljeska GRB110412A je dat na Slici 6.4.

6.3 Klasifikacija uzorka

Uticaj snopa visokoenergijskih fotona (tvrdih X i γ) na jonizacione procese u atmosferi je znatno kompleksniji od uticaja snopa fotona energija bliskih pragu za jonizaciju čestica jonsferske plazme. Naime, u posmatranom energijskom domenu, dominantan proces jonizacije je Komptonovo rasejanje (*Sagar, 2012*) pri kome se, kao i u slučaju fotoelektričnog efekta, ne gubi foton nego se samo smanjuje njegova energija što utiče na povećanje preseka za narednu jonizaciju (*Berger et al., 1998*). Pored toga, promeni elektronske koncentracije doprinose visokoenergijski elektroni, nastali kao proizvod interakcije foton-čestica, tokom sekundarne jonizacije u čestičnim sudarima, proces proizvodnje elektron-pozitron para od fotona energije veće od $2m_e c^2$, gde je m_e masa elektrona i pozitrona, i anihilacija nastalog pozitrona

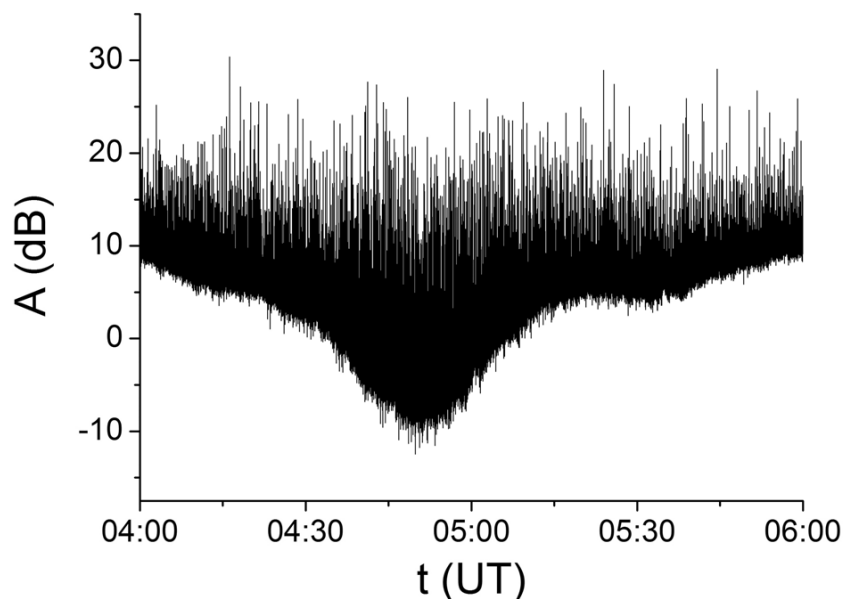
sa nekim prisutnim elektronom (za razliku od prva dva, u ovom slučaju se smanjuje koncentracija naelektrisanja). Sekundani fotoni i elektroni mogu dalje ponovo interagovati sa česticama pre dolaska u posmatranu oblast (u našem slučaju je to niska jonosfera kroz koju prolazi signal) i cela analiza se, teorijski, može ponoviti više puta. Na taj način se menja inicijalni spektar elektromagnetnog zračenja pri čemu, takođe, treba primetiti da, pored inicijalnog, fotoni usled rasejanja dolaze i iz drugih pravaca u posmatrani prostor. Postojanje uticaja inicijalnog upadnog pravca zračenja na promene u analiziranim oblastima je prikazano u *Tanaka et al.* (2010) gde se jasno uočavaju razlike u konačnoj dužini trajanja merljivih perturbacija amplituda za signale sa različitih trasa.

Dakle, kada posmatramo konkretnu oblast, jonizaciju možemo podeliti na primarnu, uzrokovanu fotonima koji bez interakcije stignu do analizirane lokacije, i sekundarnu, od fotona i elektrona nastalih nakon jedne ili više interakcija sa česticama atmosfere. Određivanje pojedinačne dominacije i sumarnog uticaja ovih faktora zahteva kompleksnu teorijsku analizu pri čemu treba voditi računa i o prostorno-vremenskim karakteristikama atmosferske plazme u konkretnom slučaju. U ovoj studiji klasifikacija događaja je izvršena prema karakteristikama upadnog zračenja (posmatran je ukupan odbroj koji registruje satelit), upadnog pravca zraka u odnosu na putanju posmatranog VLF signala i osunčanosti posmatranog regiona kroz koji se prostire. Takođe, prikazani su rezultati za više signala čije se trase razlikuju po dužini (uključeni su i kontinentalni i prekookeanski signali) i jačini emitovanog talasa čime se analizira i uloga izbora trase u detekciji poremećaja stepena jonizacije niske jonosfere izazvanih upadima visokoenergijskih zraka u atmosferu.

6.4 Metod analize

Analiza poremećaja signala je bazirana na registrovanju vremena pojava amplitudnih pikova izdvojenih iz šuma i njihovoj klasifikaciji. Određivanje bazične krive i definisanje amplitude šuma A_{sum} je urađeno nezavisno za svaki slučaj. Pošto su, u intervalima od nekoliko minuta, moguće različite globalne tendencije amplitude signala usled npr. promene u intenzitetu pristiglog zračenja sa Sunca tokom svitanja (Slika 6.5) i sumraka, određivanje vremenski zavisne bazične krive $A_B(t)$ oko koje variraju registrovane vrednosti $A(t)$ je u ovom radu urađeno na osnovu sledeće procedure:

1. **Podela intervala.** Posmatrani period u intervalu 2 minute pre vremena početka GB-a



Slika 6.5: Nestacionarne tendencije amplitude signala emitovanog iz SAD predajnikom NAA posmatrane tokom svitanja 26. jula 2009. godine. U prikazanom vremenskom intervalu od 4 UT do 6 UT SWIFT satelit je registrovao 3 GB-a (u 04:58:11.05 UT, 05:44:19.05 UT i 05:51:07.05 UT).

registrovanog na SWIFT satelitu i 2 minute posle je podeljen na intervale $n = 1, \dots, 12$ trajanja $T = 20s$.

2. **Pomoćna bazična kriva.** Usrednjene vrednosti amplituda signala u n -tim intervalima su pridružene njihovim sredinama i na osnovu tih vrednosti interpolacijom je dobijena pomoćna bazična kriva.
3. **Finalna bazična kriva.** Da bi se izbegli uticaji poremećaja usled perturbacija u određivanju bazične krive, u svakom intervalu je odbačeno po p^1 procenata najviših i najnižih razlika registrovanih amplituda u odnosu na pomoćnu bazičnu krivu i od onih preostalih $100 - 2p$ procenata napravljene su nove usrednjene vrednosti. Kao i u slučaju pomoćne bazične krive, ove vrednosti su pridružene sredinama odgovarajućih intervala i dalje ponovnom interpolacijom na rezoluciju 0.02 s dobijena je finalna bazična kriva.

U odnosu na finalnu bazičnu krivu su, dalje, izračunata odstupanja vrednosti registrovanih amplituda i, nakon odbacivanja po p procenata najviših i najnižih dobijenih vrednosti na

¹U analizama prikazanim u Poglavlju 7.3 uzeto je $p = 2\%$, pri čemu je uticaj izbora vrednosti p na histograme urađen za $p = 2\%, 5\%$ i 10% .

celokupnom intervalu od 4 min, maksimalna apsolutna vrednost izračunatih razlika je definisana kao amplituda šuma A_{sum} .

Klasifikacija pikova je kvantitativno određenja preko odnosa odstupanja registrovane amplitude $A(t)$ od amplitude bazične krive $A_B(t)$ u trenutku t i amplitude šuma A_{sum} . U analizi su izdvajani pikovi za koje važi relacija:

$$\frac{A(t) - A_B(t)}{A_{sum}} \geq r, \quad (6.1)$$

gde r ima vrednosti 2,3,4 i 5.

Poglavlje 7

Rezultati

U ovom delu disertacije predstavljeni su rezultati primene teorijskih modela opisanih u Poglavljima 4, 5 i 6. Prvo, za izabrane Sunčeve X-flerove, u Poglavlju 7.1 određene su vremenske i visinske raspodele parametara plazme čije se varijacije mogu jasno dovesti u vezu sa pomenutim događajima. U ovom delu prikazana je i reakcija D-oblasti, reprezentovana promenama u koncentraciji elektrona, u slučaju kombinacije intenziviranja Sunčevog X-zračenja i vodonikove $Ly\alpha$ linije. Na osnovu oblika njihovih vremenskih evolucija ukazano je na veći uticaj spektralnih linija i kontinuuma u X-domenu na perurbacije plazme. U nastavku, u Poglavlju 7.2, na primerima izlaska i zalaska Sunca tokom pet dana određeni su periodi akustičnih i gravitacionih talasa ekscitovanih naglim promenama u fotojonizacionim procesima. I na kraju, analizirajući VLF signale emitovane sa 6 predajnika neposredno pre, tokom i neposredno posle 54 γ -bljeska registrovana SWIFT satelitom, potvrđena je mogućnost detekcije intenzivnog upada ovih visokoenergijskih fotona tehnikom koja se u ovoj studiji koristila za posmatranje niske jonosfere.

7.1 Modeliranje parametara plazme D-oblasti

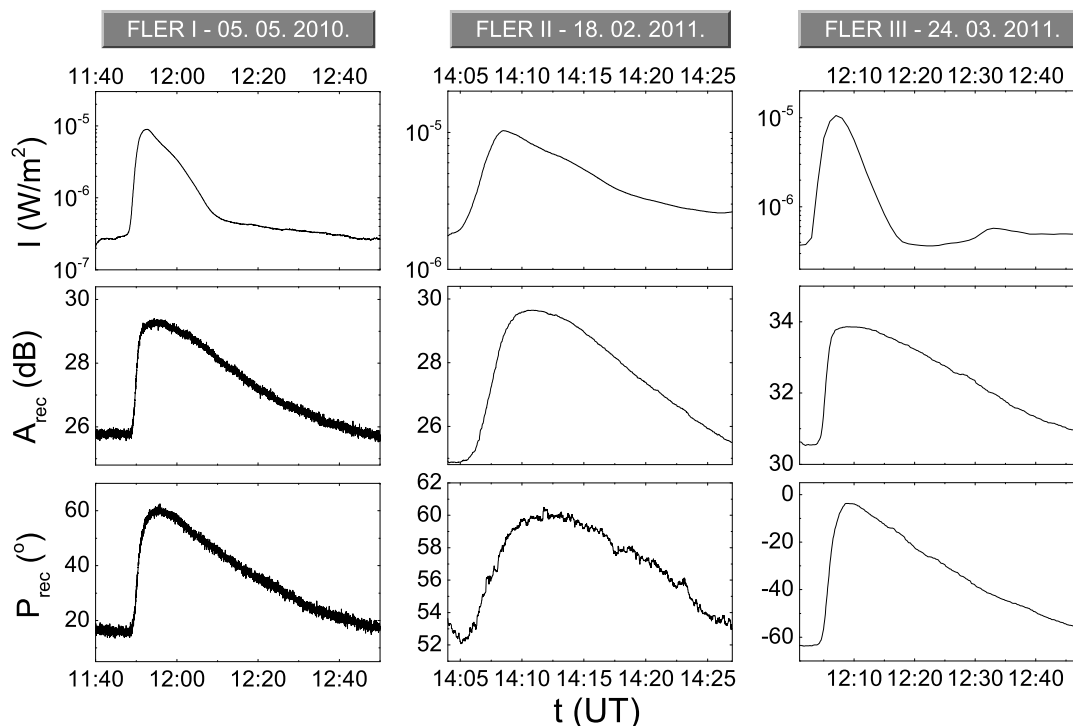
U slučaju modeliranja parametara plazme D-oblasti tokom njene reakcije na Sunčeve X-flerove, prikazane su analize koje se odnose na koncentraciju elektrona, i procese proizvodnje i gubitaka ove vrsta čestica na tri primera. Dobijeni rezultati su publikovani u radovima *Nina et al.* (2012a,b), *Nina and Čadež* (2013b), *Nina* (2013) i *Nina et al.* (2013). Pri tome, flerovi su posmatrani pojedinačno i nisu vršena poređenja rezultata za ova tri događaja.

Naime, kompleksnost stanja, procesa i brojnih uticaja na plazmu D-oblasti praktično uzrokuje neponovljivost istog skupa vrednosti parametara koji je karakterišu i nemogućnost simulacije konkretnog događaja u kontrolisanim, laboratorijskim, uslovima. Iz tog razloga osnovni ciljevi istraživanja u ovoj multidisciplinarnoj oblasti, se odnose na utvrđivanja tendencija ponašanja parametara plazme i procena njihovih vrednosti, što je u ovoj disertaciji i urađeno. Poređenja se mogu raditi samo okvirno i za izvođenje zaključaka je neophodan veliki broj uzoraka što prevazilazi okvire ove studije. Međutim, bitno je reći da će prikazane procedure i rezultati predstavljati osnovu za proširenje ispitivanja u narednom periodu, koje, između ostalog, uključuje i pomenuti statistički pristup. Ovde treba naglasiti da je pre početka ovakvih istraživanja, u cilju povećanja pouzdanosti dobijenih zaključaka, neophodno detaljnije ispitati aproksimacije vezane za neporemećeno stanje plazme. Naime, kao što je naglašeno u 4.3, karakteristike parametara koji opisuju ovaj period su uzete aproksimativno i ne razlikuju se tokom Sunčevog ciklusa, godine i osunčanog dela dana. U Poglavlju 7.1.2 je data analiza njihovog uticaja na proračune parametara na kraju relaksacionog perioda nakon flera. Međutim, uticaj na preciznost dobijenih rezultata relevantnih za ceo period perturbacije još uvek nije ispitan.

7.1.1 Analizirani Sunčevi X-flerovi i eksperimentalni podaci

Finalni izrazi za parametre plazme, dati u Poglavlju 4, su u okviru ove studije primenjeni na tri Sunčeva X-flera koja su se desila 5. maja 2010. godine (fler I), 18. februara 2011. godine (fler II) i 24. marta 2011. godine (fler III). Ovi flerovi su zabeleženi u periodu kada je cela posmatrana trasa VLF signala osunčana i kada nisu izražene varijacije signalnih karakteristika usled svitanja ili sumraka. Takođe, nisu zabeležene intenzivne varijacije usled drugih izvora perturbacije. Iz tih razloga ovi događaji su izabrani kao primeri analize uticaja X-flerova na plazmu D-oblasti. Na osnovu intenziteta zračenja zabeleženih u opsegu talasnih dužina između 0.1 nm i 0.8 nm na satelitima GOES-14 u prvom i GOES-15 u drugom i trećem slučaju ovi flerovi, prema klasifikaciji objašnjenjnoj u Poglavlju 2.2.2, spadaju u C8.8, M1.0 i M1.0 klasu, respektivno. Na gornjim panelima Slike 7.1 prikazane su odgovarajuće vremenske evolucije intenziteta zračenja u pomenutom domenu talasnih dužina.

Pri izračunavanju parametara plazme, u ovoj disertaciji i odgovarajućim radovima koji su publikovani tokom njene izrade, korišćeni su podaci za amplitudu i fazu signala emitovanog predajnikom DHO, lociranim u Rhauderfehn-u u Nemačkoj i registrovanog AWESOME VLF



Slika 7.1: Vremenske zavisnosti intenziteta X-zračenja registrovanog satelitom u domenu talasnih dužina između 0.1 nm i 0.8 nm (gornji paneli), i amplitude (srednji paneli) i faze (donji paneli) signala emitovanog predajnikom DHO (Nemačka) i registrovanog AWESOME VLF prijemnikom u Beogradu tokom tri Sunčeva X-flera koja su se desila 5. maja 2010. (fler I), 18. februara 2011. (fler II) i 24. marta 2011. (fler III).

prijemnikom u Beogradu. Izbor pomenutog signala je baziran na njegovoj stabilnijoj registraciji u odnosu na druge signale što je posledica ne tako duge putanje (bitno zbog aproksimacije horizontalno uniformne jonosfere), jake emisione snage (800 kW) i frekvencije od 23.4 kHz koja je unutar domena relevantnog za analize prijemnicima lociranim u gradskoj sredini (15 kHz - 30 kHz, *Cohen et al.* (2010)). Poslednje dve tehničke karakteristike predajnika, odnosno prijemnika čine prostiranje i prijem signala emitovanih bližim predajnicima kao što su ICV (20 kW) i NSC (45.9 kHz) podložnim jačim neželjenim uticajima. To je i bio razlog za razmatranje signala nešto duže putanje (maksimalno samo oko 300 km) umesto navedenih. Na srednjim i donjim panelima Slike 7.1 prikazane su vremenske evolucije amplitude, odnosno faze za posmatrana tri slučaja, izražene u dB (iznad $1 \mu\text{V/m}$) i stepenima, respektivno. Iz poređenja sa gornjim panelima evidentno je da su se te varijacije javile kao posledica reakcije na posmatrane događaje.

7.1.2 Wait-ovi parametri

Primenom procedure opisane u Poglavlju 4.3 na prikazane registrovane podatke relevantne za VLF signal mogu se dobiti vremenske evolucije visine refleksije $H'(t)$ i "oštrine" $\beta(t)$ i na osnovu njih direktno izračunati vremenske i visinske raspodele koncentracije elektrona.

Pre nego što budu prikazani dobijeni rezultati, u ovom poglavlju će pažnja biti posvećena analizi uzetih aproksimacija za parametre u početnim uslovima. Naime, kao što je već rečeno, oni su vremenski zavisne veličine čak i u odsustvu perturbacija, što je posledica dugotrajnijih periodičnih varijacija u strukturi atmosfere i promena u pristiglom zračenju tokom dana, godine i Sunčevog ciklusa. Zavisnosti H' i β od geografske lokacije zbog razlika u lokalnom zenitnom uglu su prikazane u literaturi za različite periode Sunčevog ciklusa. Proračuni su bazirani na detekciji VLF radio atmosfera posmatranjima VLF signala u širokom frekventnom opsegu (*Han et al.*, 2011), i na poređenju karakteristika VLF signala određene frekvencije sa simuliranim vrednostima putem LWPC numeričkog modela (*Thomson*, 1993; *McRae and Thomson*, 2000). S obzirom na brojne uticaje na D-oblast, dobijeni rezultati se nalaze unutar vrednosti 70 km - 75 km i 0.2 km^{-1} - 0.5 km^{-1} za $H'(t)$ i $\beta(t)$, respektivno (*Ferguson*, 1998). Dodatni razlog za ove razlike leži u činjenici da je u proračunima korišćeno više modela kao što su IRI¹ (*Bilitza*, 1992) i FIRI² (*Friedrich and Torkar*, 2001).

Navedene analize pokazuju da su zavisnosti od zenitnog ugla znatno izraženije kada je njegova vrednost veća. Nasuprot tome, u slučaju manjih zenitnih uglova, varijacije parametara nisu toliko velike i, za signale koji nemaju previše dugu trasu, u relativno kratkom vremenskom intervalu moguće ih je smatrati konstantnim, što je i urađeno u proračunima prikazanim u disertaciji.

U konkretnim, razmatranim slučajevima, zenitni uglovi na lokacijama predajnika, A, (53.1 N, 7.6E) i prijemnika, B, (44.8 N, 20.4 E) na kraju perioda relaksacije nakon Sunčevog X-flera (ovo je period za koji se u Poglavlju 7.1.4 vrši analiza) su prema podacima dobijenim LWPC numeričkim modelom: 40.5 i 40.3, 54.0 i 51.4, i 66.4 i 62.4 za flerove I, II i III, respektivno. Zavisnosti date u *Han et al.* (2011), *McRae and Thomson* (2000) i *Friedrich and Torkar* (2001) za ove uglove predviđaju veoma male razlike u parametrima i elektronskim koncentracijama koje se iz njih dobijaju primenom Wait-ove formule za visine 70 km, 75 km i 80 km. Vrednosti date u Tabeli 7.1, gde su podaci dobijeni različitim metodama razmatrani odvojeno, pokazuju da su maksimalna odstupanja od srednjih vrednosti relevantne za

¹International Reference Ionosphere.

²Faraday International Reference Ionosphere.

Tabela 7.1: Wait-ovi parametri i koncentracije elektrona na visinama 70 km, 75 km i 80 km dobijeni na osnovu podataka datih u *Han et al.* (2011), *McRae and Thomson* (2000) i *Friedrich and Torkar* (2001) za zenitne uglove koji se odnose na lokacije predajnika (A) i prijenika (B) VLF signala u posmatranim slučajevima. $\Delta\%$ pokazuje procentualna odstupanja ovih od njihovih usrednjenih vrednosti.

IZVOR	FLER		H' (km)	β (km ⁻¹)	N (m ⁻³)		
					70 km	75 km	80 km
<i>Han et al.</i> (2011)	I	A	73.2	0.385	$1.15 \cdot 10^8$	$3.72 \cdot 10^8$	$1.20 \cdot 10^9$
		B	73.1	0.385	$1.19 \cdot 10^8$	$3.87 \cdot 10^8$	$1.25 \cdot 10^9$
		$\Delta\%$	0.07 %	0.00 %	1.92 %	1.92 %	1.92 %
	II	A	74.8	0.381	$6.32 \cdot 10^7$	$2.01 \cdot 10^8$	$6.37 \cdot 10^8$
		B	75.2	0.377	$5.54 \cdot 10^7$	$1.72 \cdot 10^8$	$5.37 \cdot 10^8$
		$\Delta\%$	0.27 %	0.53 %	6.57 %	7.57 %	8.56 %
	III	A	73.9	0.374	$9.16 \cdot 10^7$	$2.81 \cdot 10^8$	$8.60 \cdot 10^8$
		B	74.1	0.378	$8.36 \cdot 10^7$	$2.61 \cdot 10^8$	$8.17 \cdot 10^8$
		$\Delta\%$	0.14 %	0.53 %	4.56 %	3.56 %	2.56 %
<i>McRae and Thomson</i> (2000)	I	A	71.6	0.377	$2.15 \cdot 10^8$	$6.70 \cdot 10^8$	$2.09 \cdot 10^9$
		B	71.6	0.376	$2.16 \cdot 10^8$	$6.68 \cdot 10^8$	$2.07 \cdot 10^9$
		$\Delta\%$	0 %	0.13 %	0.08 %	0.17 %	0.42 %
	II	A	74.1	0.324	$1.04 \cdot 10^8$	$2.49 \cdot 10^8$	$5.94 \cdot 10^8$
		B	74.8	0.311	$8.85 \cdot 10^7$	$1.98 \cdot 10^8$	$4.43 \cdot 10^8$
		$\Delta\%$	0.47 %	2.05 %	8.20 %	11.42 %	14.61 %
	III	A	72.7	0.355	$1.51 \cdot 10^8$	$4.21 \cdot 10^8$	$1.17 \cdot 10^9$
		B	72.9	0.351	$1.42 \cdot 10^8$	$3.89 \cdot 10^8$	$1.06 \cdot 10^9$
		$\Delta\%$	0.14 %	0.57 %	2.97 %	3.97 %	4.97 %
<i>Friedrich and Torkar</i> (2001)	I	A	71.0	0.263	$3.03 \cdot 10^8$	$5.33 \cdot 10^8$	$9.37 \cdot 10^8$
		B	71.0	0.263	$3.03 \cdot 10^8$	$5.33 \cdot 10^8$	$9.37 \cdot 10^8$
		$\Delta\%$	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	II	A	75.2	0.226	$1.22 \cdot 10^8$	$1.78 \cdot 10^8$	$2.60 \cdot 10^8$
		B	77	0.217	$8.62 \cdot 10^7$	$1.21 \cdot 10^8$	$1.68 \cdot 10^8$
		$\Delta\%$	1.18 %	2.03 %	17.02 %	19.20 %	21.36 %
	III	A	72.4	0.245	$2.19 \cdot 10^8$	$3.52 \cdot 10^8$	$5.66 \cdot 10^8$
		B	72.9	0.241	$1.96 \cdot 10^8$	$3.09 \cdot 10^8$	$4.86 \cdot 10^8$
		$\Delta\%$	0.34 %	0.82 %	5.54 %	6.54 %	7.53 %

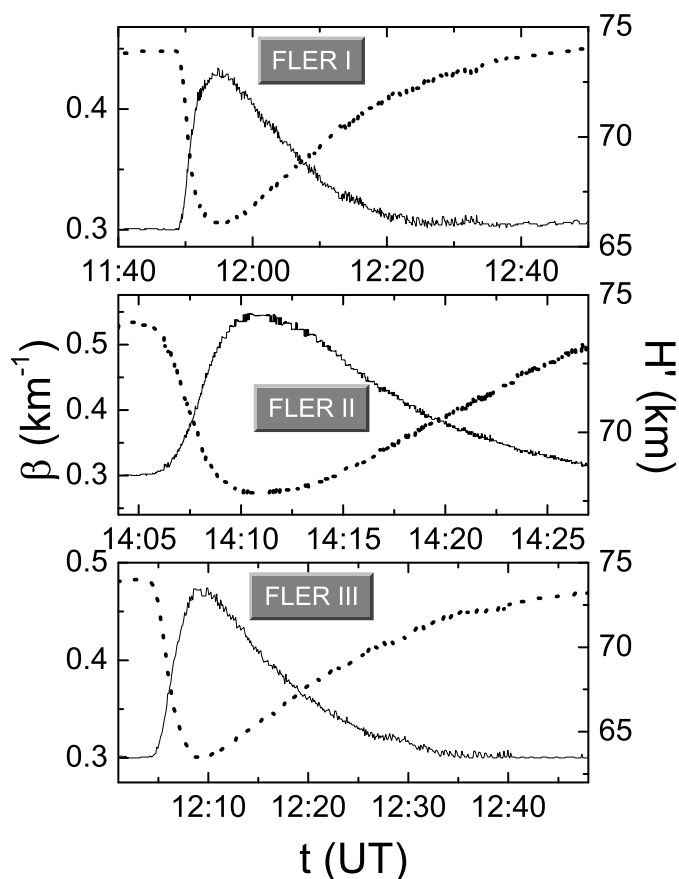
Tabela 7.2: Odnosi EF elektronskih koncentracija dobijenih na osnovu podataka datih u *Han et al.* (2011), *McRae and Thomson* (2000) i *Friedrich and Torkar* (2001) i procedurom primenjenom u ovoj disertaciji.

IZVOR	FLER		EF		
			70 km	75 km	80 km
<i>Han et al.</i> (2011)	I	A	1.01	1.54	2.35
		B	0.97	1.48	2.27
	II	A	0.53	0.80	1.20
		B	0.47	0.69	1.01
	III	A	0.77	1.12	1.62
		B	0.70	1.04	1.54
<i>McRae and Thomson</i> (2000)	I	A	1.82	2.67	3.92
		B	1.82	2.66	3.89
	II	A	0.88	1.00	1.12
		B	0.75	0.79	0.83
	III	A	1.27	1.68	2.21
		B	1.20	1.55	2.00
<i>Friedrich and Torkar</i> (2001)	I	A	2.55	2.12	1.76
		B	2.55	2.12	1.76
	II	A	1.03	0.71	0.49
		B	0.73	0.48	0.32
	III	A	1.84	1.40	1.06
		B	1.65	1.23	0.91

podatke na lokacijama A i B manje od oko 1% za β , 2% za H' i 20% za N . Imajući u vidu da se koncentracije elektrona prikazane u različitim studijama razlikuju čak i za nekoliko redova veličina, dobijeni rezultati dozvoljavaju aproksimaciju konstantnih Wait-ovih parametara u neperturbovanoj jonosferi. Na taj način se dobijaju jedinstvene referentne vrednosti u odnosu na koje se određuju vremenske zavisnosti parametara tokom perturbacija. U ovoj disertaciji je uzeto 0.3 km^{-1} za β i 74 km za H' , što je u skladu sa analizama datim u *Žigman et al.* (2007) i *Grubor et al.* (2008). Kao što se može videti iz Tabele 7.1, one se nalaze unutar intervala koji obuhvataju prikazane relevantne vrednosti za sve razmatrane uglove.

U Tabeli 7.2 su prikazana odstupanja koncentracija elektrona dobijenih na osnovu Wait-ovih parametara zavisnih od zenitnog ugla $N'(h)$ prema *Han et al.* (2011), *McRae and Thomson* (2000) i *Friedrich and Torkar* (2001) i primenom navedene aproksimacije $N(h)$ definisana njihovim odnosom EF :

$$EF \equiv \frac{N'(h)}{N(h)}. \quad (7.1)$$



Slika 7.2: Vremenske evolucije Wait-ovih parametara tokom posmatranih X-flerova. Pune i isprekidane linije se odnose na $\beta(t)$ i $H'(t)$, respektivno.

Dobijene vrednosti za EF pokazuju da je odstupanje odgovarajućih elektronskih koncentracija manje od 50% u oko 60% slučajeva. Imajući u vidu malopredložni komentar o slaganju podataka u literaturi, to ukazuje na male razlike u izračunatim koncentracijama elektrona od odgovarajućih vrednosti koje predviđaju navedena istraživanja drugih autora.

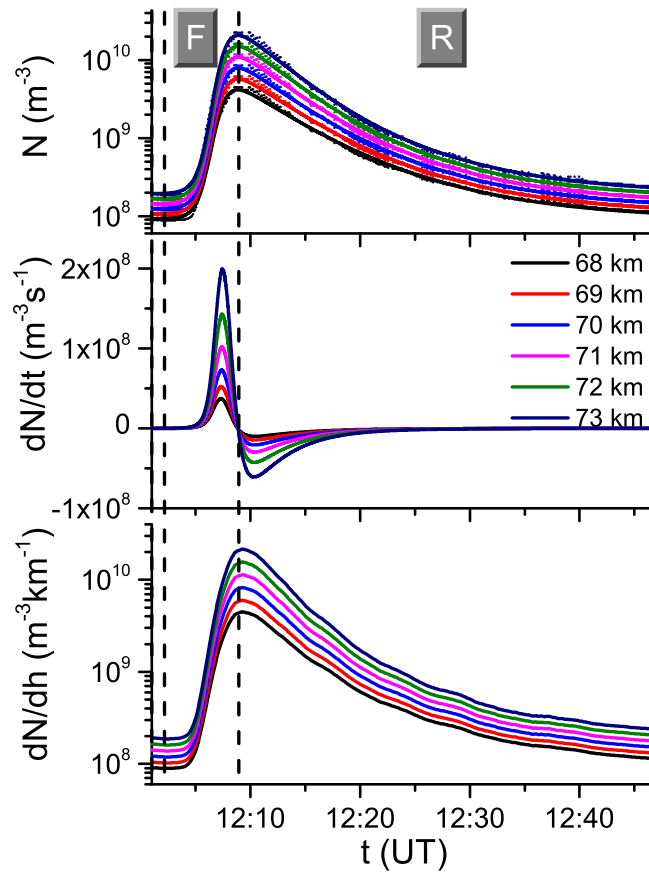
Poznavajući Wait-ove parametre u mirnoj jonosferi, primenom procedure date u Poglavlju 4.3 dobijaju se njihove evolucije u vremenu tokom celog perioda perturbacije detektovane promenama amplitude i faze VLF signala. Sa Slike 7.2 se vidi da visina refleksije signala prvo opada do minimalne vrednosti nakon čega počinje da raste, odnosno da povećanje intenziteta zračenja praćeno porastom koncentracije elektrona spušta gornju granicu talasovoda unutar koga se prostire signal. Ponašanje "oštrine" ima suprotan tok, odnosno porast u njenim vrednostima je praćen padom. Dobijene vrednosti u trenucima maksimalnog intenziteta zračenja su u saglasnosti sa podacima datim u Thomson *et al.* (2005); Grubor *et al.* (2008).

7.1.3 Modeliranje koncentracije elektrona

Prikazi vremenskih (Slika 7.3) i visinskih (Slika 7.4) raspodela koncentracija elektrona, $N(h, t)$, njenih brzina promena u vremenu, $dN/dt(h, t)$, i gradijenata, $dN/dh(h, t)$, su, u ovoj disertaciji, dati na primeru flera zabeleženog 24. marta 2011. godine (FLER III). Koncentracija elektrona je dobijena primenom Wait-ove formule 4.28 za visine od 68 km do 73 km i parametre $\beta(t)$ i $H'(t)$ date na Slici 7.2. Prikazane vremenske zavisnosti na odgovarajućim slikama pokazuju da se minimum visine refleksije signala i maksimumi "oštrine" i koncentracija elektrona javljaju u istom vremenskom trenutku $t_m \approx 12 : 09$ UT. Kašnjenje maksimuma elektronske koncentracije u odnosu na maksimum intenziteta zračenja zabeleženog na GOES-15 satelitu (oko 12:07 UT) je oko 2 minuta i predstavlja vreme kašnjenja. Na ovom mestu treba naglaiti da se u određivanju vremena kašnjenja koristi vreme maksimalne koncentracije elektrona, a ne maksimalne vrednosti amplitude ili faze koji ne moraju da se poklapaju. Naime, u Poglavlju 3.3.2 je prikazana mogućnost nemonotone zavisnosti signalnih karakteristika od koncentracije elektrona. U nekim slučajevima se dešava da npr. amplituda naglo prelazi iz rasta u pad, ili obratno pri monotonom povećanju ili padu elektronske koncentracije, ili da amplituda ima saturaciju određenog vremenskog perioda. Ovakvi efekti su posledice prostiranja pojedinačnog VLF signala i uključeni su u modele za simulaciju prostiranja VLF talasa koji se koriste za određivanje koncentracije elektrona.

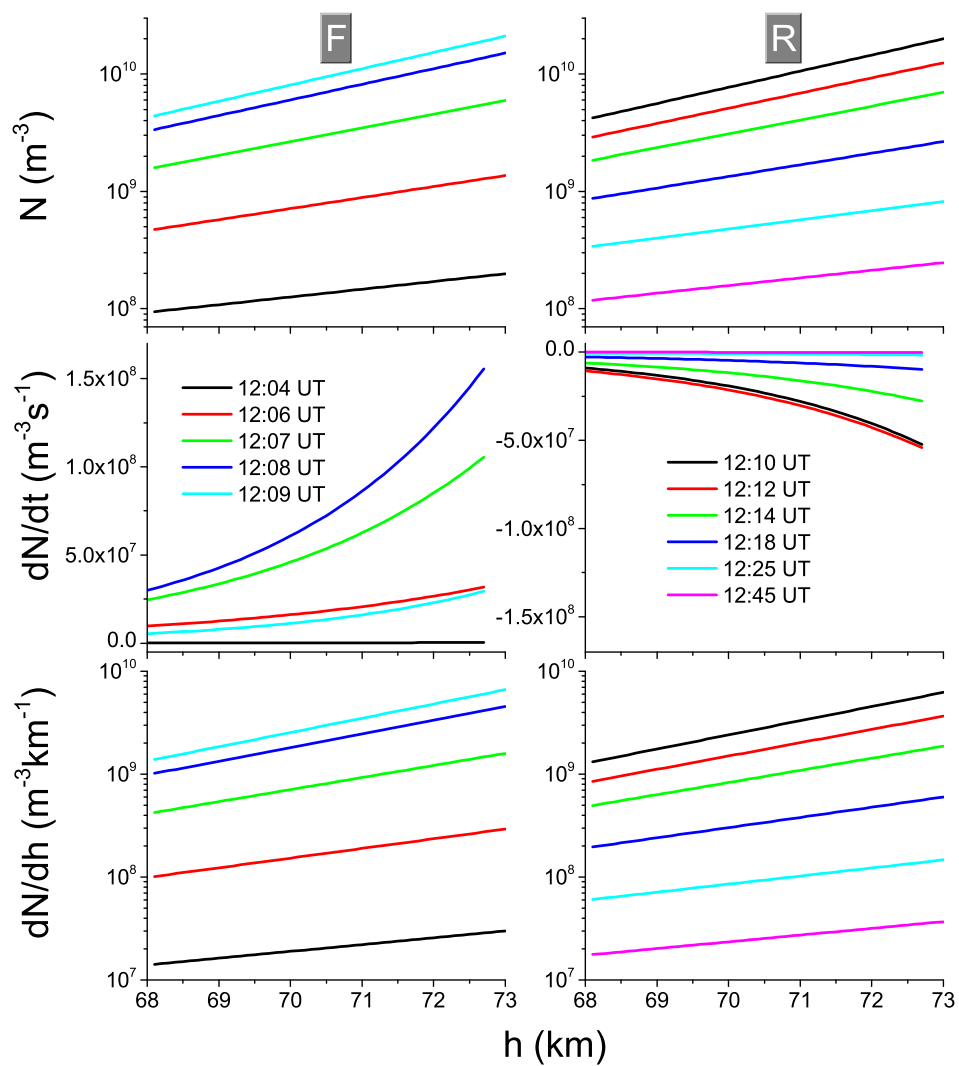
Trenutak maksimuma koncentracije elektrona t_m praktično predstavlja granicu između porasta i opadanja koncentracije elektrona. S obzirom da su ova dva perioda karakterizovana dominacijom fotojonizacionih, odnosno rekombinacionih procesa, respektivno, mogu se definisati dva režima: fotojonizacioni za $t \leq t_m$ i rekombinacioni režim za $t \geq t_m$, na predstojećim slikama označeni kao "F" i "R" režimi. S obzirom na trajanje ovih režima jasno je da se relaksacija plazme dešava znatno sporije od njene pobude. Početak porasta $N(h, t)$ i samim tim fotojonizacionog režima se javlja oko 1.5 min nakon početka pojačanja zračenja registrovanog na satelitu (oko 12:02 UT).

Ponašanja brzine promene $dN/dt(h, t)$ i gradijenta $dN/dh(h, t)$ koncentracije elektrona u toku vremena i sa visinom su prikazana na Slikama 7.3 i 7.4. U trenutku maksimuma $N(h, t)$ (isti je za sve visine) izvod $N(h, t)$ menja znak. U fotojonizacionom režimu on je pozitivan sa maksimalnom vrednošću oko 12:07:30 UT, dok je u rekombinacionom režimu negativan sa minimumom oko 12:10:20 UT. U prvom periodu varijacije $dN/dt(h, t)$ su intenzivnije, što je i očekivano s obzirom da se iste apsolutne vrednosti promene koncentracije

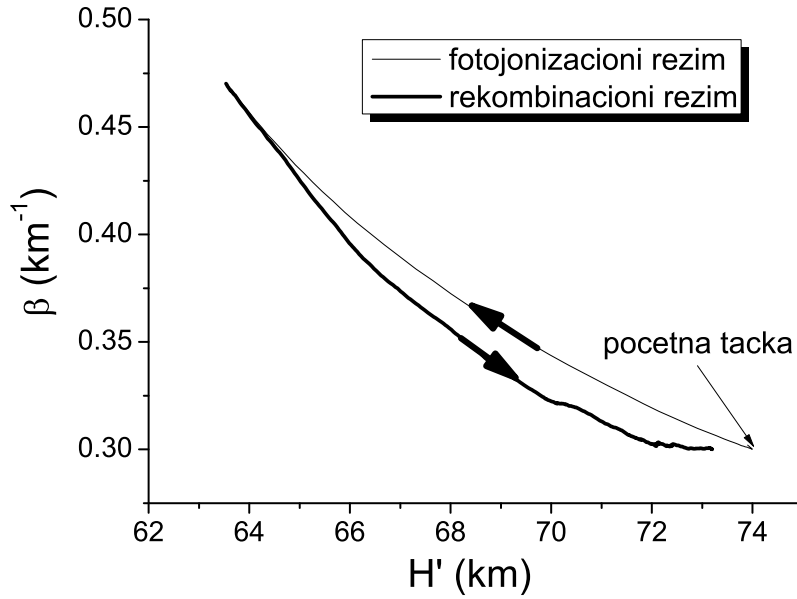


Slika 7.3: Vremenska evolucija elektronske koncentracije, njenog izvoda po vremenu i gradijenta tokom celog perioda perturbacije plazme D-oblasti.

$N(h, t)$ monotonno menjaju u oba režima, ali sa porastom u znatno kraćem periodu. S druge strane, vremenska evolucija gradijenta $dN/dh(h, t)$ ima isti oblik kao i varijacija sa približno istim vremenom za maksimalnu vrednost. Naravno, s obzirom na male varijacije u raspodeli $N(h, t)$ i njeno fitovanje precizno određivanje oba pomenuta izvoda nije moguće i samim tim relevantna vremena se mogu samo aproksimativno odrediti. Tokom drugog perioda uočljiva je tendencija vraćanja na vrednosti pre uticaja flera za $N(h, t)$ i $dN/dh(h, t)$, dok $dN/dt(h, t)$ teži nuli. Na obe slike, 7.3 i 7.4, evidentno je pojačanje reakcije na X-fler sa povećanjem visine. Na visini od 73 km koncentracije elektrona je oko 100 puta veća nego u neporemećenoj jonosferi, dok je za 68 km ovaj odnos oko 45. S ozirom na izračunavanje koncentracije elektrona po Wait-ovom izrazu (4.28), njena zavisnost od visine je eksponencijalna. Vremenske promene ove veličine (srednji paneli Slike 7.4) odslikavaju pomenutu činjenicu o znatno intenzivnijim promenama tokom fotojonizacionog režima, dok se kod zavisnosti gradijenta $dN/dh(h, t)$ od visine (donji paneli Slike 7.4) ova razlika ne uočava. To



Slika 7.4: Visinska raspodela elektronske koncentracije, njenog izvoda po vremenu i gradijenta tokom celog perioda perturbacije plazme D-oblasti.



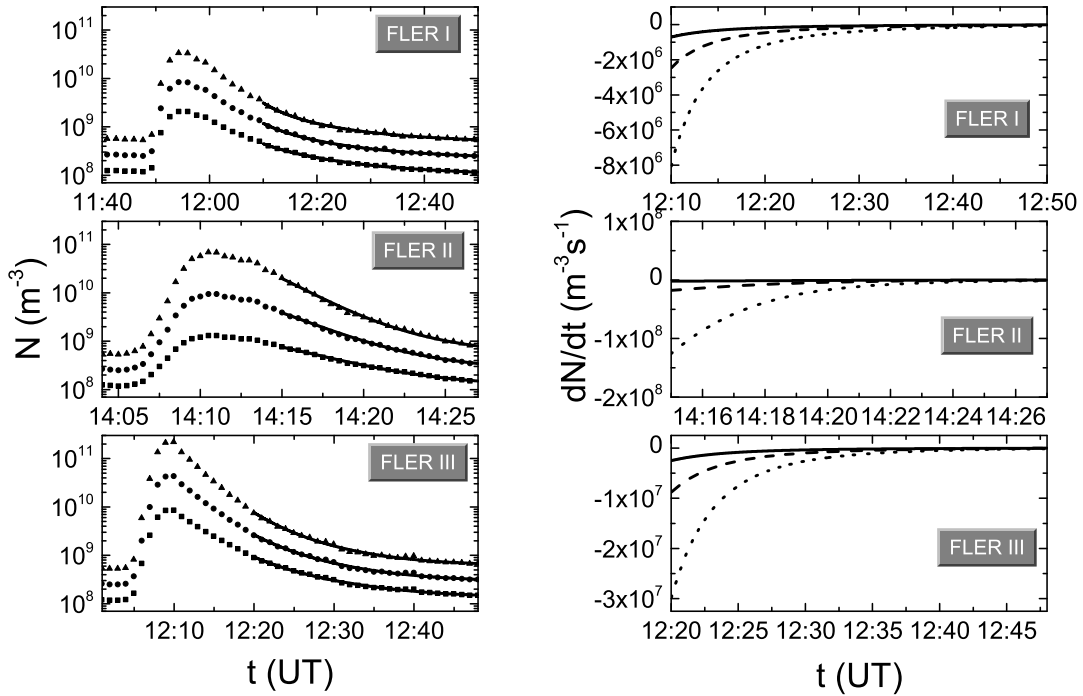
Slika 7.5: Veza Wait-ovih parametara u fotojonizacionom i rekombinacionom režimu.

se može objasniti činjenicom da koncentracije elektrona u fotojonizacionom režimu u nekom trenutku imaju iste odgovarajuće vrednosti i u rekombinacionom režimu i to u istom trenutku za sve visine (na osnovu korišćene Wait-ove formule). Kao i u slučaju vremenske zavisnosti i kod visinskih raspodela jedine negativne vrednosti su za vremenski izvod koncentracije elektrona u rekombinacionom režimu, pri čemu krive, za razliku od vremenske evolucije u kojoj su prisutni ekstremi u oba režima, imaju monoton pad. U oba režima $dN/dh(h, t)$ je takođe monotona sa vednostima koje se povećavaju sa visinom.

Kao dodatak prethodnoj analizi, interesantno je prikazati i međusobnu zavisnost Wait-ovih parametara za oba režima (Slika 7.5). Početna tačka $H'(t) = 74$ km i $\beta(t) = 0.3$ km⁻¹ se odnosi na neporemećeno stanje plazme D-oblasti pre početka reakcije na analizirani fler. Vidi se da zavisnosti tokom fotojonizacionog i rekombinacionog režima imaju različite profile, tj. da izgledaju kao histerezisna kriva između početne i krajnje tačke. U principu, ove tačke ne moraju da se poklapaju zbog različitih neperturbovanih stanja. Naime, iako se uzima da je jonosfera neperturbovana i u periodu pre X-flera i u periodu nakon dovoljno duge relaksacije nakon prestanka njegovog uticaja, ova dva stanja ne moraju biti identična zbog uticaja drugih faktora kao što je npr. rotacija Zemlje. Prema Slici 7.5, evidentno je da je na datoj visini refleksije signala $H'(t)$ u D-oblasti parametar $\beta(t)$, veći tokom fotojonizacionog nego u periodu rekombinacionog režima.

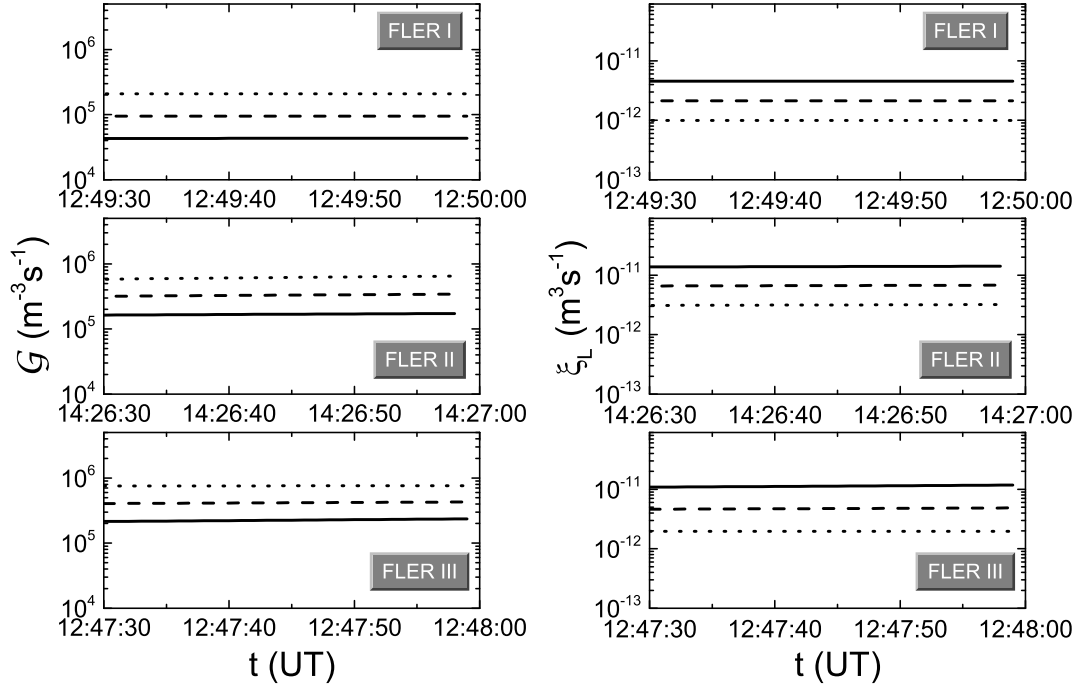
7.1.4 Parametri plazme D-oblasti na kraju relaksacionog perioda nakon Sunčevog X-flera

Teorijska analiza brzine proizvodnje elektrona $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$ i koeficijenta $\xi_L(\vec{r}, t)$ (odnosi na procese gubitaka elektrona) u relaksacionoj fazi nakon Sunčevog flera je data u Poglavlju 4.2.3. Brzina gubitaka elektrona $\mathcal{L}(\vec{r}, t)$ u ovom periodu je praktično jednaka $\mathcal{G}(\vec{r}, t)$ i iz tog razloga je pomenuti koeficijent uzet kao reprezentativna veličina za opis efektivnog smanjenja elektronske koncentracije. U ovoj disertaciji, navedena procedura je primenjena na sva tri flera za koje su eksperimentalni podaci registrovani satelitom i VLF prijemnikom i dobijene vremenske evolucije Wait-ovih parametara prikazani u Poglavljima 7.1.1 i 7.1.2.



Slika 7.6: Vremenske evolucije elektronskih koncentracija tokom analiziranih Sunčevih X-flerova (levi paneli) i njihovih vremenskih izvoda u relaksacionom periodu (desni paneli) na visinama 70 km, 75 km i 80 km.

U formulama (4.23) i (4.24) koncentracija elektrona i njen izvod u vremenu predstavljaju ulazne podatke. Odgovarajuće vremenske zavisnosti (dobijene na osnovu Wait-ovog izraza (4.28) i vremenskih raspodela parametara $\beta(t)$ i $H'(t)$ datih na Slici 7.2) su prikazane na Slici 7.6 za visine 70 km, 75 km i 80 km. Redukcija prostorne zavisnosti korišćenih veličina na visinsku je na ovom mestu urađena zbog aproksimacije horizontalne uniformnosti jonosfere



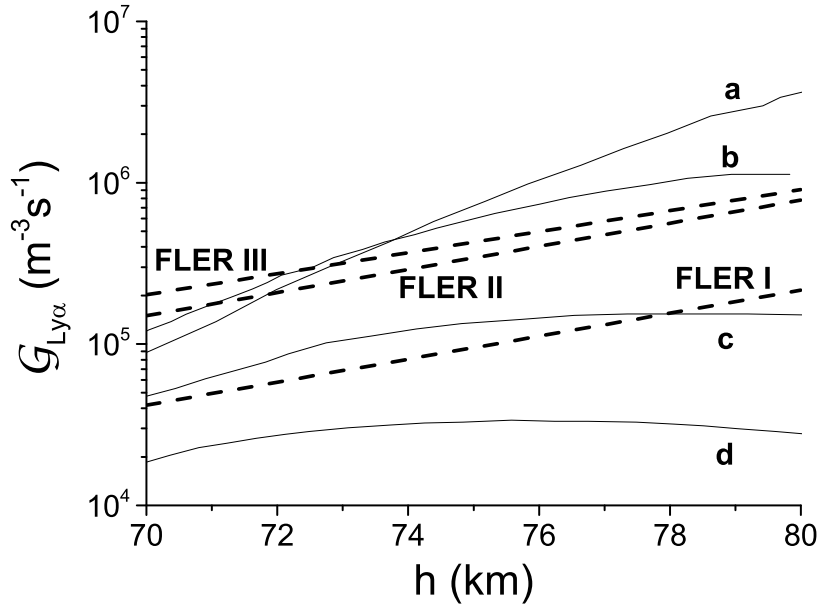
Slika 7.7: Vremenske evolucije brzina jonizacije (levi paneli) i koeficijenata ξ_L (desni paneli) na visinama 70 km, 75 km i 80 km na kraju relaksacionog perioda nakon analiziranih Sunčevih X-flerova.

u Wait-ovoj teoriji primenjene u izračunavanju elektronske koncentracije. Dobijene brzine proizvodnje elektrona, reda veličina $10^4 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$ i $10^5 \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$, su, kao što se sa levog panela Slike 7.7 može videti, praktično konstantne u intervalu od oko 30 s na kraju posmatranog perioda. To praktično pokazuje saturaciju ka vrednostima koje odgovaraju neperturbovanoj jonosferi. Do istog zaključka se dolazi i sličnom analizom koeficijenta $\xi_L(h, t)$ (Slika 7.7, desni paneli) koji dostiže vrednosti reda veličina $10^{-13} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ do $10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Visinska raspodela $\mathcal{G}(h, t)$ može biti dobijena primenom Wait-ovog izraza za koncentraciju elektrona 4.28. Naime, prema njemu, odnosi koncentracija elektrona za $N(h_1, t)$ i $N(h_2, t)$ na visinama h_1 i h_2 , respektivno, su:

$$\frac{N(t, h_1)}{N(t, h_2)} = e^{(\beta(t) - 0.15)(h_1 - h_2)}. \quad (7.2)$$

Ako se, dalje, posmatra odnos brzina jonizacija $\mathcal{G}(t, h_1)$ and $\mathcal{G}(t, h_2)$, uzimajući u obzir da je $\beta(t)$ praktično konstantna u posmatranom periodu, jednačine (4.23) i (7.2) daju:



Slika 7.8: Visinske raspodele brzine fotojonizacije $Ly\alpha$ fotonima, $G_{Ly\alpha}(h)$, u neperturbovanim uslovima nakon uticaja Sunčevih X-flerova I, II i III, i poređenje sa podacima datim u Mitra (1977) (a), Rowe (1972) (b), Aikin et al. (1964) (c) i Bourdeau et al. (1965) (d).

$$\frac{\mathcal{G}(t, h_1)}{\mathcal{G}(t, h_2)} \approx \frac{N(t, h_1)}{N(t, h_2)} = e^{(\beta(t)-0.15)(h_1-h_2)}. \quad (7.3)$$

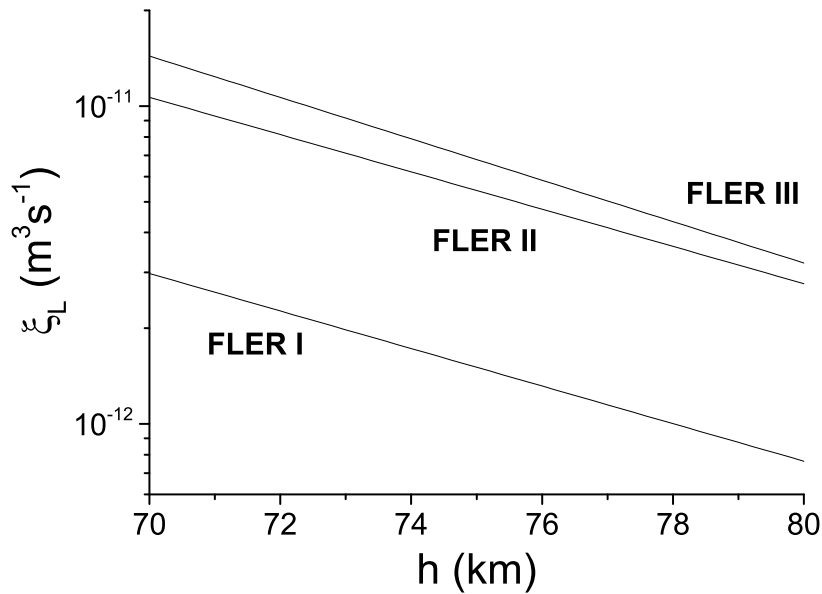
Ubacivanjem vrednosti za $\mathcal{G}(75\text{km})$ i $\beta(t)$ na kraju posmatranog intervala u jednačinu (7.3) dobija se visinska raspodela brzine proizvodnje elektrona koja, zbog činjenice da je u posmatranom domenu visina dominantna jonizacija vodonikovom $Ly\alpha$ linijom, predstavlja brzinu fotojonizacije ovim fotonima ($\mathcal{G}(\vec{r}) = \mathcal{G}_{Ly\alpha}(\vec{r})$ - videti Poglavlje 4.2.3). Sa Slike 7.8 može se videti da se dobijeni rezultati nalaze unutar domena vrednost prezentovanim u Mitra (1977); Rowe (1972); Aikin et al. (1964) and Bourdeau et al. (1965).

Visinska raspodela koeficijenta $\xi_L(h)$ u neperturbovanoj plazmi D-oblasti (Slika 7.9) se dobija iz izraza:

$$\xi_L(h) = \frac{\mathcal{G}(h)}{N^2(h)}, \quad (7.4)$$

koji proizilazi iz izraza (4.21) za $dN/dt = 0$.

Dobijene raspodele pokazuju da, za razliku od $\mathcal{G}_{Ly\alpha}$ koja raste sa visinom, ξ_L opada idući ka višim slojevima. I za ovu veličinu, dobijene vrednosti se nalaze u intervalima koji obu-



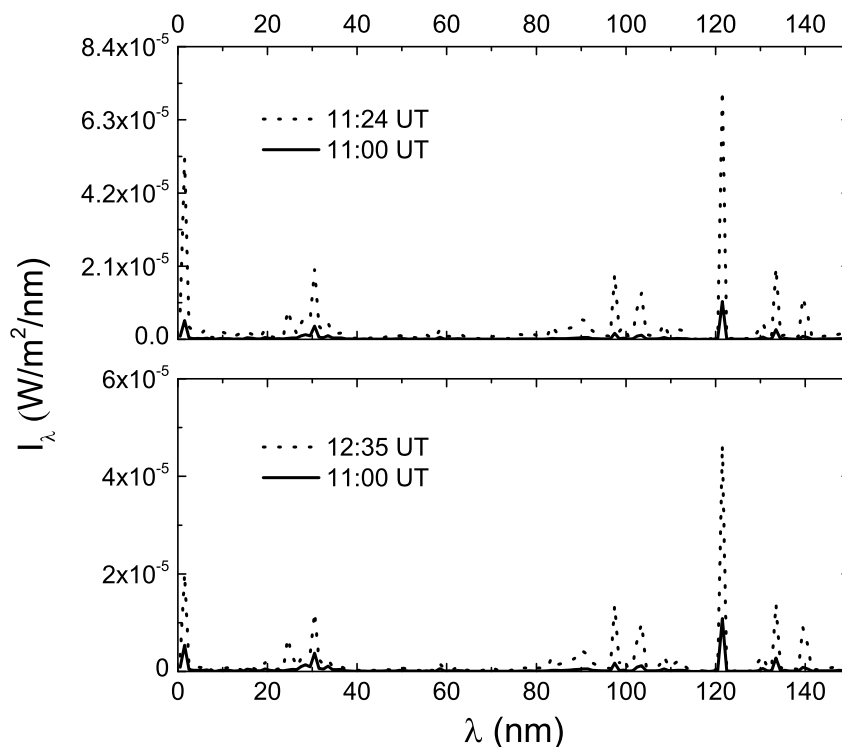
Slika 7.9: Visinske raspodele koeficijenta ξ_L u neperturbovanim uslovima nakon uticaja Sunčevih X-flerova I, II i III.

hvataju rezultate prikazane u literaturi (*Mitra (1977), Hargreaves (2005)* i reference u njemu).

7.1.5 Poređenje uticaja usled pojačanja X-zračenja i $Ly\alpha$ linije

U prethodnom tekstu prikazane su varijacije parametara plazme uzrokovane Sunčevim X-flerovima. Za vreme ovih izabranih događaja nisu zabeležene značajnije promene u uticajima drugih perturbera. Međutim, postoje i periodi kada se simultano menja dejstvo više izvora perturbacija, što svakako zahteva detaljnu analizu u smeru utvrđivanja njihovih međusobnih uticaja, dominacija i načina na koji se mogu povezati reakcije jonosfere pod takvim uslovima sa reakcijama na uticaj njihovog pojedinačnog dejstva. Imajući u vidu činjenicu da zračenje u X-domenu predstavlja dominantan izvor perturbacija u periodu uticaja Sunčevih X-flerova, i da $Ly\alpha$ linija dominira u jonizacionim procesima tokom mirnog perioda, u ovoj disertaciji akcenat je stavljen na analizu reakcije plazme D-oblasti tokom istovremenog inteziviranja njihovih uticaja.

Ispitivanja u okviru ove studije su urađena na primeru dva uzastopna X-flera registrovana 22. aprila 2011. godine. Procesuiranje satelitskih podataka u periodu između 10:40 UT i 13:00 UT metodom datom u *Chamberlin et al. (2008)* pokazalo je značajno pojačanje zračenja unutar više domena talasnih dužina sa maksimumima u 11:24 UT i 11:35 UT.

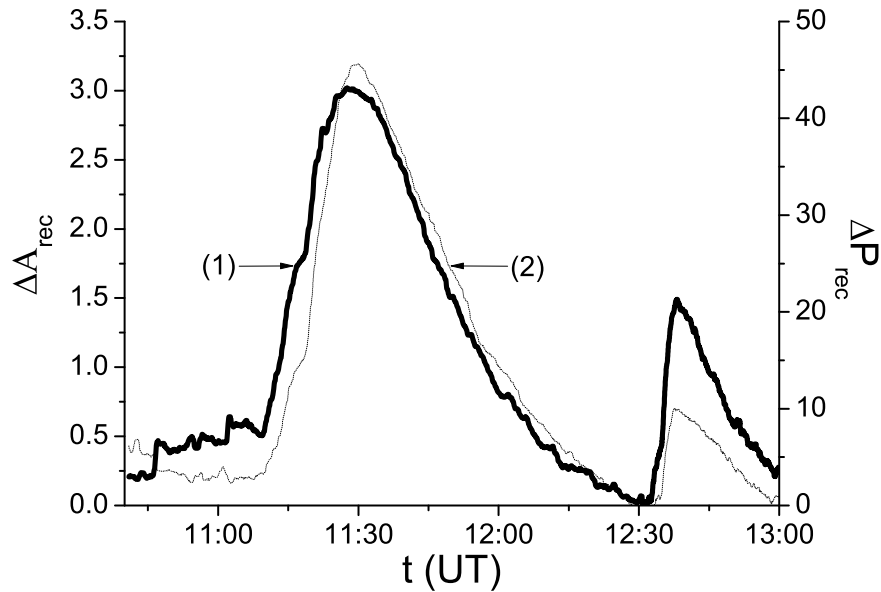


Slika 7.10: Poređenja spektara Sunčevog zračenja u maksimumu intenziteta prvog (gornji panel) i drugog (donji panel) flera (tačkaste linije) sa odgovarajućim spektrom u periodu neporemećene jonosfere (pune linije).

Vizuelizacija ovih promena je na Slici 7.10 prikazana preko spektara zračenja tokom mirnog perioda i za navedena dva trenutka. Kao što se može videti, pored X-domena i $\text{Ly}\alpha$ linije, značajne razlike karakterišu i nekoliko drugih delova UV spektra. Međutim, kao što je u Poglavlju 2.1.2 objašnjeno, uticaj ovih delova spektra nije značajan za jonizacione procese u D-oblasti zbog znatnog slabljenja u višim atmosferskim slojevima. Iz tog razloga, u daljoj analizi, posmatranja spektra će biti redukovana na naznačene dve oblasti.

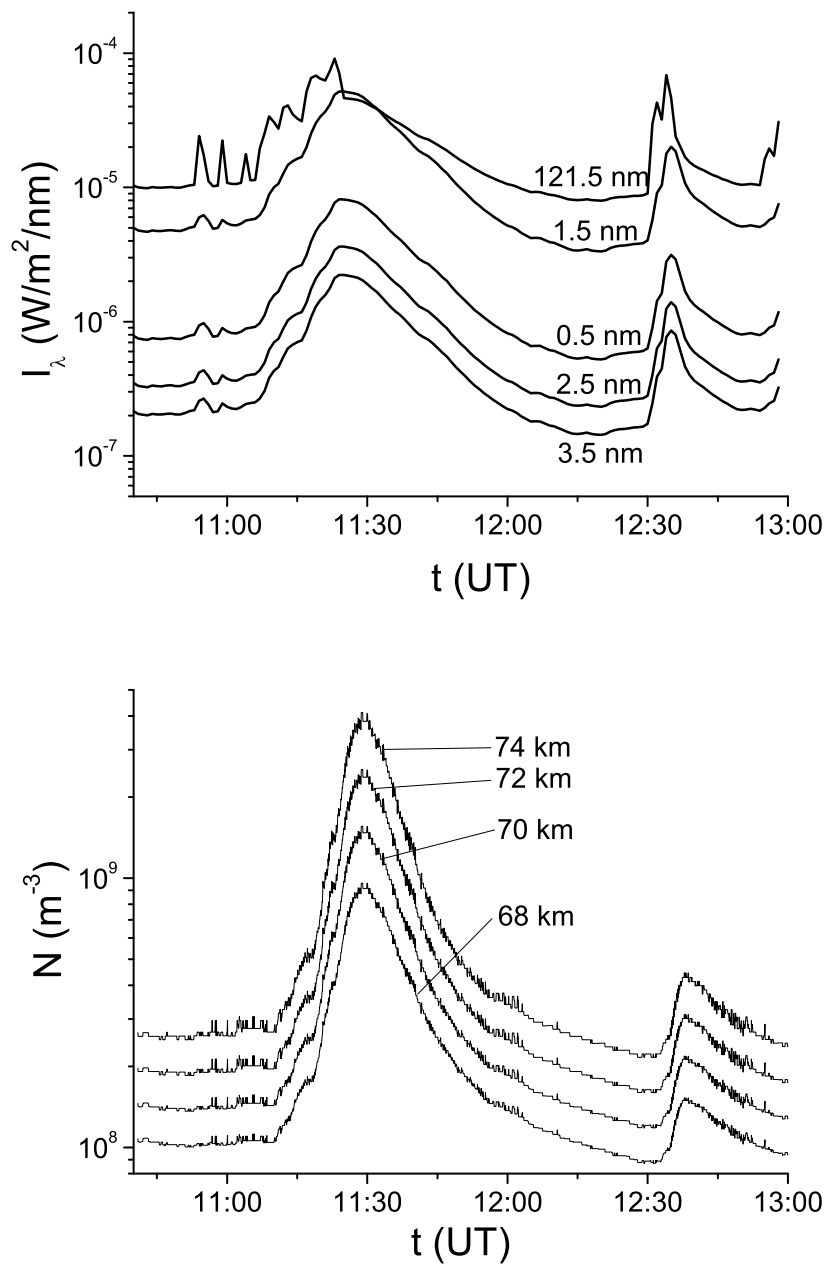
Kao posledica opisanih promena, u posmatranom periodu je došlo do perturbacija plazme u D-oblasti koje se mogu videti preko varijacija karateristika registrovanog VLF signala prikazanim na Slici 7.11. Kao i u prethodnim analizama posmatran je signal emitovan DHO predajnikom i registrovan AWESOME VLF prijemnikom u Beogradu.

Da bi se ispitala dominacija uticaja fotona različitih energija na Slici 7.12 su prikazane odgovarajuće evolucije u vremenu. Na gornjem grafiku to su četiri linije za talasne dužine ispod četiri nanometra i linija koja odgovara binu talasnih dužina sa sredinom u 121.5 nm unutar kojeg se nalazi $\text{Ly}\alpha$ spektralna linija (121.6 nm). Kao što se može videti, korišćeni



Slika 7.11: Vremenske evolucije amplitude (1) i faze (2) VLF signala emitovanog predajnikom DHO (Nemačka) tokom posmatranih flerova.

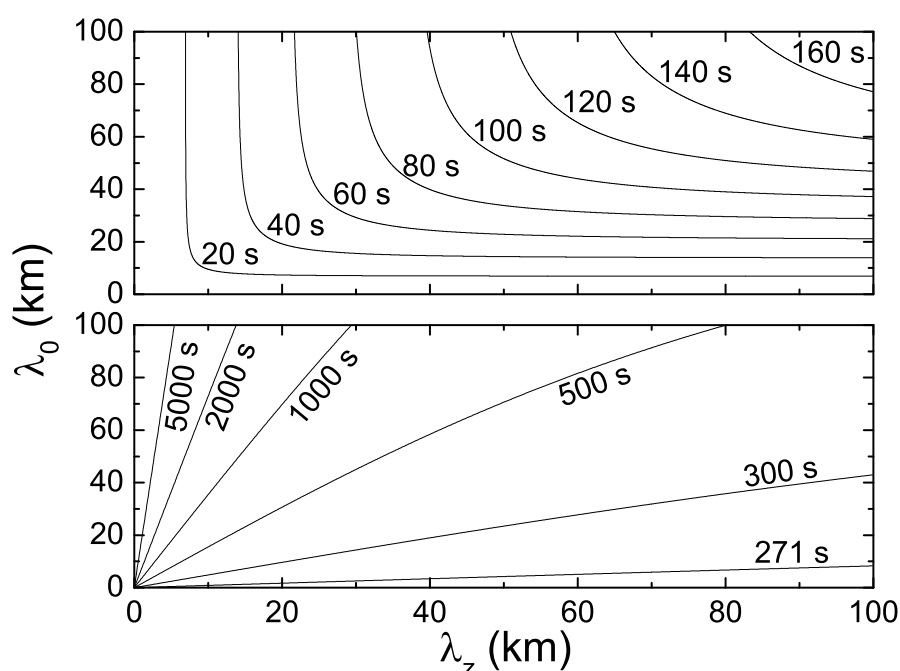
model daje praktično isti oblik za prvi set linija. Za razliku od njih, u poslednjem slučaju se uočavaju pikovi u periodima pre maksimuma za odgovarajuća dva skoka. Ovi pikovi nisu vidljivi ni u vremenskim evolucijama signalnih karakteristika (Slika 7.11) i, posledično, ni u vremenskim evolucijama koncentracija elektrona prikazanim na donjem grafiku Slike 7.12 za 68 km, 70 km, 72 km i 74 km. Te razlike i činjenica da, sa druge strane, oblici raspodela elektronske koncentracije u velikoj meri liče na krive koje odgovaraju domenima relevantnim za X-zračenje navodi na zaključak da na promene u plazme D-oblasti prvenstveno utiče intenziviranje kontinuuma i spektralnih linija u X oblasti. Ovo zapažanje je potvrđeno i sličnom analizom drugih slučajeva u *Raulin et al.* (2013), a teorijsko objašnjenje će biti predmet daljih istraživanja.



Slika 7.12: Vremenske evolucije intenziteta zračenja u domenima koji imaju dominantnu ulogu u perturbaciji plazme D-oblasti (gornji grafik) i koncentracije elektrona na različitim visinama tokom posmatranih flerova (donji grafik).

7.2 Hidrodinamički talasi

Teorijska analiza hidrodinamičkih (akustičnih i gravitacionih) talasa, data u Poglavlju 5, je primenjena na uslove plazme niske jonofere i na konkretnim primerima od pet dana određene su talasne mode ekscitovane poremećajima izazvanim izlascima i zalascima Sunca. Dobijeni rezultati su publikovani u *Nina and Čadež* (2013a) i predstavljaju prvu analizu akustičnih i gravitacionih talasa u niskoj jonosferi uzrokovanih ovim pojavama. Slaganje dobijenih vrednosti za periode ekscitovanih talasa sa postojećim vrednostima u literaturi, relevantnim za visine iznad D-oblasti koja je razmatrana u ovoj disertaciji, ukazuju na globalnu prirodu posmatranih talasa u atmosferi.



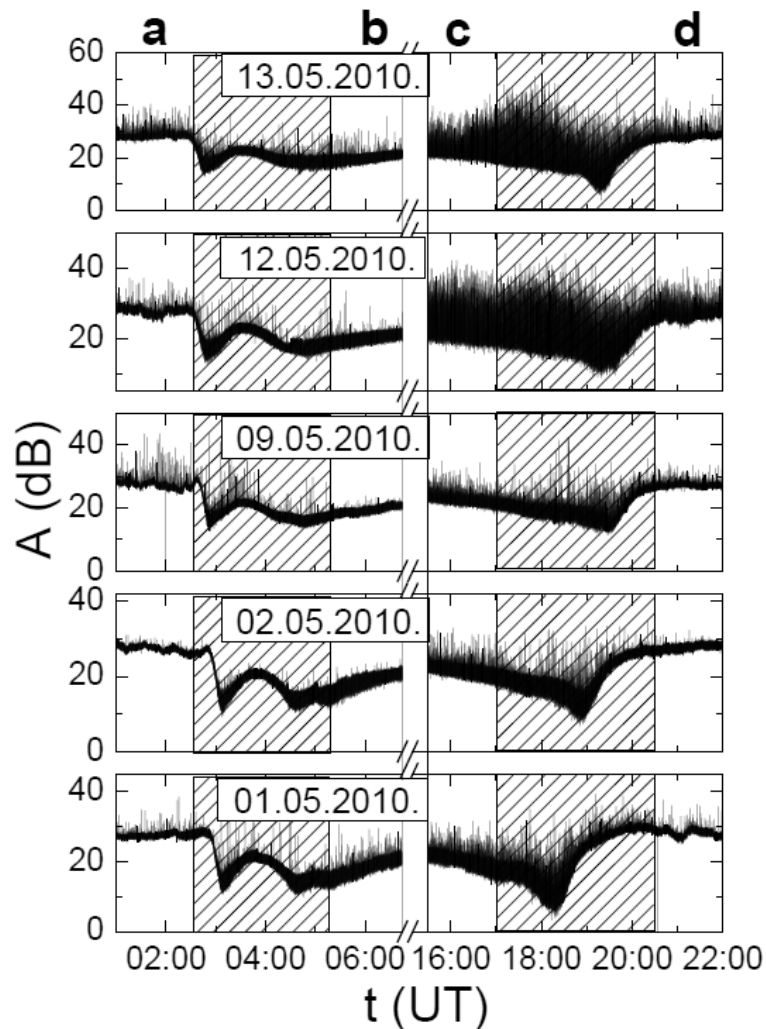
Slika 7.13: Akustične i gravitacione mode (gornji i donji panel, respektivno) disperzione relacije (5.14) za razmatranu izotermalnu atmosferu sa $T_0 = 250$ K.

7.2.1 Akustični i gravitacioni talasi u niskoj jonosferi

Zavisnost horizontalne od vertikalne talasne dužine kod gravitacionih i akustičnih talasa je data izrazima (5.14) - (5.16). Vrednosti veličina u njima zavise od brzine v_s koja je funkcija temperature posmatrane sredine (vidi se iz izraza (5.11)). U sučaju niske jonofere je uzeto da je njena vrednost oko 250 K što daje zavisnosti odgovarajućih talasnih dužina u formi prikazanoj na Slici 7.13. Na gornjem panelu su prikazane akustične, a na donjem gravitacione mode.

7.2.2 Akustični i gravitacioni talasi izazvani izlaskom i zalaskom Sunca

Metoda određivanja perioda akustičnih i gravitacionih talasa u plazmi jonosferske D-oblasti, prezentovana u Poglavlju 5, je primenjena na slučajeve perturbacija izazvanih izlaskom i zalaskom Sunca. Analiza se bazira na podacima registrovanih amplituda DHO signala tokom



Slika 7.14: Zabeležene amplitudne varijacije VLF signala iz Nemačke u realnom vremenu za pet dana tokom perioda kvazistacionarnog (koji prethode (a) i prate (b) izlazak Sunca i koji prethode (c) i prate (d) zalazak Sunca) i nestacionarnog (išrafirana oblast) osnovnog stanja.

pet dana: 1., 2., 9., 12. i 13. maja 2010. godine. Kriterijum pri izboru ovih dana je bio relativno miran period, bez značajnih prolaznih jonosferskih poremećaja uzrokovanih npr. munjama i Sunčevim X-flerovima.

Na Slici 7.14 su prikazane zabeležene amplitude $A(t)$ u realnom vremenu za četiri intervala od po 90 minuta pre i posle izlaska i zalaska Sunca kada je uslov kvazistacionarnosti bazičnog stanja zadovoljen (domeni a i b, i c i d, respektivno). Takav izbor omogućava anali-

zu malih perturbacija amplitude. Išrafirani vremenski intervali koji dele kvazistacionarne domene odgovaraju periodima kompleksnih procesa izazvanim izlaskom, odnosno zalaskom Sunca. U tim periodima atmosferski slojevi se znatno perturbuju što utiče na refleksiju VLF signala i sredinu u kojoj se on prostire i rezultuje u izrazito nestacionarnim osobinama zabeleženih amplituda. Razlozi za ovakvo ponašanje su objašnjeni u literaturi (*Carpenter and Whitson, 1965; Clilverd et al., 1999*), a u ovoj studiji su uzeti kao prelazni periodi između kvazistacionarnih domena pre i posle intenzivnih promena koje uzrokuju hidrodinamičke talase.

Kao što je u Poglavlju 5.3 rečeno, registrovani signali u realnom vremenu, i dalje, spektralne karakteristike dobijene njihovim procesuiranjem nose sumarne informacije o mnogobrojnim prostorno-vremenski zavisnim uticajima. U slučaju perturbacija izazvanih izlaskom i zalaskom Sunca dodatne razlike u posmatranim vremenskim domenima se javljaju i kao posledica značajne promene u visini refleksije, koja je noću više od 10 km viša nego danju u odsustvu prolaznih intenzivnih perturbacija. Da bi izolovali uticaje izlazaka i zalazaka Sunca, izrazi 5.20 i 5.21 se primenjuju pojedinačno na ova dva procesa tokom posmatranih pet dana. U slučaju ekscitacija oni su:

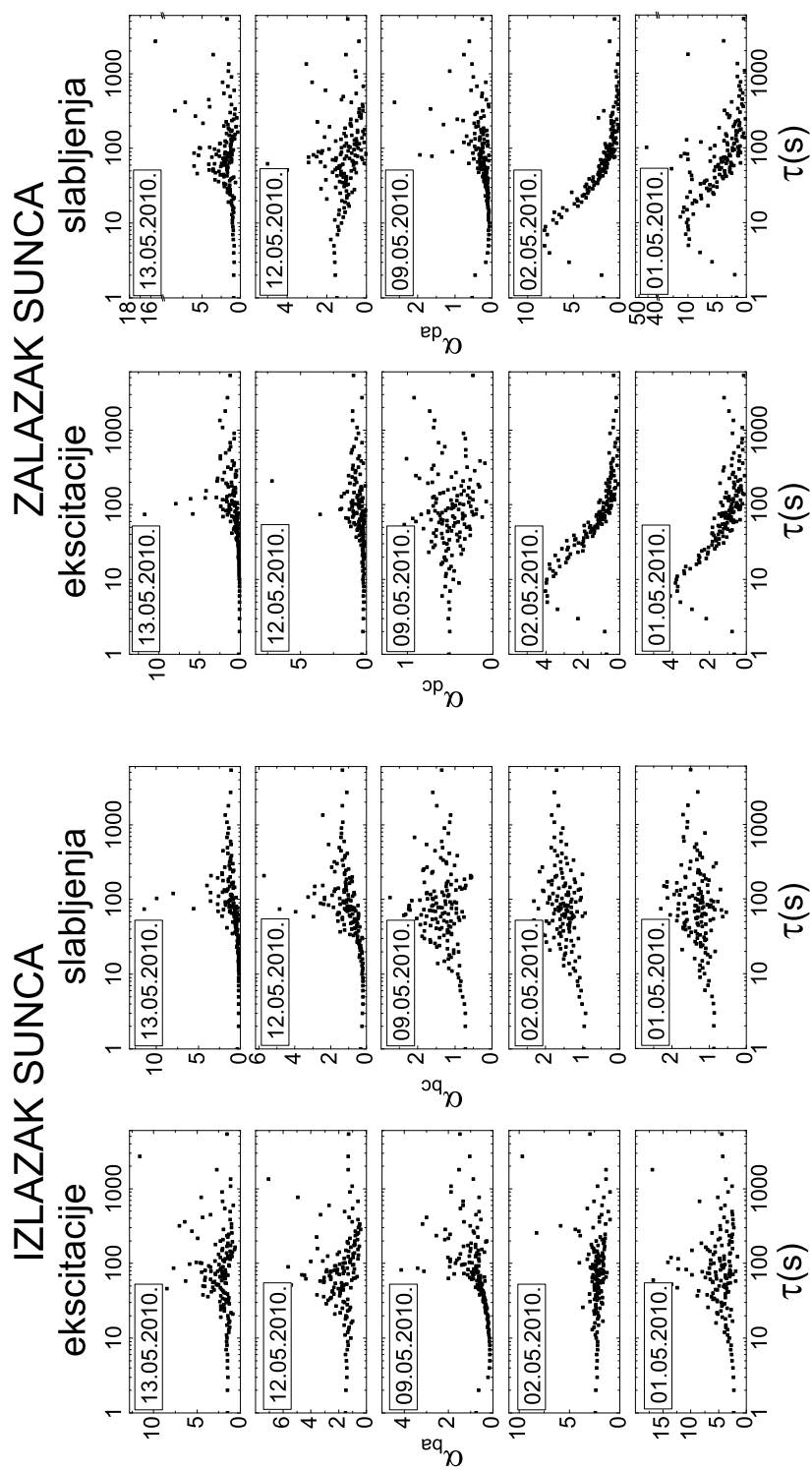
$$\alpha_{ba}(\tau) \equiv \frac{A_F(\tau; b)}{A_F(\tau; a)}, \quad \alpha_{dc}(\tau) \equiv \frac{A_F(\tau; d)}{A_F(\tau; c)}, \quad (7.5)$$

dok kod slabljenja imaju oblik:

$$\alpha_{bc}(\tau) \equiv \frac{A_F(\tau; b)}{A_F(\tau; c)}, \quad \alpha_{da}(\tau) \equiv \frac{A_F(\tau; d)}{A_F(\tau; a)}. \quad (7.6)$$

Dobijene vrednosti su prikazane na grafiku 7.15. Treba napomenuti, da je u slučaju malih perioda, zbog velikog rasipanja dobijenih vrednosti usled vrlo male razlike u susednim bazničnim periodima, izvršeno usrednjavanje dobijenih Fourier-ovih amplituda unutar 1 s i te vrednosti su deljene.

Pikovi na panelima označenim sa "ekscitacije" pokazuju periode talasa čija se amplituda pojačava neposredno nakon posmatrane pojave, dok pikovi na panelima označenim sa "slabljenje" pokazuju periode na kojima se amplituda talasa smanjuje od početka do kraja posmatranog dela dana. Oni pikovi koji se poklapaju u oba slučaja i koji se, uprkos neminovno različitim uslovima, ponavljaju iz dana u dan označavaju jasan uticaj posmatranih procesa na talasno ponašanje sredine u D-oblasti. Sa Slike 7.15 se vidi da se ovi pikovi



Slika 7.15: Odnosi spektralnih amplituda $\alpha_{ba}(\tau)$ i $\alpha_{bc}(\tau)$ relevantnih za izlazak i $\alpha_{da}(\tau)$ i $\alpha_{dc}(\tau)$ relevantnih za zalazak Sunca.

javljaju unutar nekoliko odvojenih oscilatornih perioda unutar posmatranih vrednosti $\tau = 1 - 5400$ s. Najizraženije harmonijske perturbacije se javljaju na periodima $\tau \approx 60 - 100$ s. Slika 7.13 pokazuje da ovi periodi odgovaraju akustičnim modama sa mogućom horizontalnom talasnom dužinom $\lambda_0 \approx 20 - 40$ km za bilo koju vrednost $\lambda_z > 20$ km, ili za bilo koju horizontalnu talasnu dužinu $\lambda_0 > 20$ km pri $\lambda_z \approx 20 - 40$ km. Druge oblasti pikova prisutnih i tokom izlaska i tokom zalaska Sunca se javljaju za $\tau \approx 300 - 400$ s i na većim periodima kod $\tau \approx 1000 - 3000$ s. Ove perturbacije se odnose na gravitacione mode sa odgovarajućim talasnim dužinama koje se mogu videti na Slici 7.13.

Kao dodatak opisanim amplitudnim pikovima, uočavaju se i oblasti njihovog prisustva samo tokom pojedinih dana kao što su pikovi oko $\tau \approx 7 - 10$ s i to 1. i 2. maja nakon zalaska Sunca. S obzirom da kod ostalih dana nisu vidljivi, ne mogu se dovesti u vezu sa posmatranom pojavom. Takođe, interesantno je primetiti ekscitacije gravitacionih moda na periodima $\tau \approx 700 - 900$ s prisutnim nakon izlaska Sunca i njihov izostanak u većini dana nakon zalaska Sunca. Slično, intenzivnije prisustvo talasa u jutarnjim satima, primećeno je i na visinama iznad 100 km (*Afraimovich*, 2008).

Naši rezultati relevantni za nisku jonosferu su veoma slični vrednostima dobijenim na većim visinama. Naime, ekscitacije akustičnih i gravitacionih talasa sa periodima $\tau < 1200$ s su registrovane kao glavni izvor jonosferskih poremećaja srednjih vremenskih intervala trajanja u E i F slojevima (*Hernández-Pajares et al.*, 2006). Takođe, oscilacije ukupnog broja elektrona na nekoj putanji signala prezentovane u *Afraimovich* (2008) ukazuju na talase perioda oko 15 min i oko 1h. Slične fluktuacije u formi magnetohidrodinamičkih talasa su nađene i u visokim oblastima magnetosfere kao eksterno izazvane mode tipičnih perioda od nekoliko sekundi do više od 1000 s (*De Keyser and Čadež*, 2001a,b). Iz ovih sličnosti može se zaključiti da su perturbacije u vidu akustičnih i gravitacionih talasa registrovane na većim visinama prisutne i u niskoj jonosferi, odnosno da posmatrano talasno kretanje u atmosferi ima globalni karakter u smislu da talasne mode na nekim periodima postoje pod različitim fizičkim uslovima koji odgovaraju relevantnim delovima atmosfere.

7.3 Ispitivanje detektabilnosti γ -bljeskova u D-oblasti

Procedura za ispitivanje detektabilnosti kratkotrajnih reakcija niske jonosfere na bljeskove γ -zraka, data u Poglavlju 5, je u okviru ove disertacije primenjena na konkretan skup regi-

strovanih upada tog visokoenergijskog zračenja. Urađene su detaljne analize za različite trase signala, a za signal iz SAD je izvršena klasifikacija događaja na osnovu ukupnog odbroja posmatranih fotona na satelitu, osunčanosti trase VLF signala i upadnog pravca γ -zraka u odnosu na nju. Kao što se iz nastavka teksta može videti, dobijeni statistički rezultati idu u prilog mogućnosti odgovarajuće detekcije pri čemu se uočavaju razlike u predodčenim slučajevima (Nina et al., rad u pripremi).

7.3.1 Uzorak

U ovoj studiji predstavljena je analiza 54 GB-a registrovana u opsegu energija između 15 eV i 150 eV SWIFT-ovim uređajem Burst Alert Telescope (BAT) u periodu između 31. avgusta 2009. i 25. novembra 2012. godine, čije su karakteristike (datum i vreme registracije, ukupan obroj fotona $\mathcal{N}_f$, dužina trajanja t_{GB} , geografska širina GS i dužina GD centralne upade tačke) dati u Tabeli 7.3. Osnovni kriterijum pri izboru je bio postojanje registrovanog VLF signala AWESOME prijemnikom lociranim u Beogradu u periodima 2 min pre i posle satelitski registrovanih početaka inteziviranja odgovarajućeg upadnog zračenja. Pri tome su eliminisani slučajevi u kojima su zabeležene značajne perturbacije amplituda VLF signala i kod kojih je ukupno vreme trajanja γ -bljeska (GB) veće od 1 min. Poslednji uslov je uveden da bi se mogao analizirati i period nakon GB, s obzirom da je posmatrano vreme nakon početka njegove registracije 2 min. Na osnovu dobijenih podataka maksimalno vreme trajanja u uzetom uzorku je bilo 50 s. U poslednje dve kolone su date veličine koje su relevantne za analizu signala emitovanog predajnikom NAA (SAD) i registrovanog u Beogradu: visina α_{GB} , tj. ugao pod kojim se iz tačke na sredini rastojanja između predajnika i prijemnika vidi "tačka" u beskonačnosti odakle dolazi GB i osunčanost trase kojom se prostire posmatrani signal s .

Tabela 7.3: Karakteristike analiziranih GB-ova. $\mathcal{N}_f$ označava ukupan odbroj fotona na satelitu, t_{GB} vreme trajanja GB, GD i GS geografsku dužinu i geografsku širinu upadne tačke GB, α_{GB} visinu tj. ugao pod kojim se vidi vizura iz tačke na sredini rastojanja između našeg prijemnika i transmitera NAA lociranim u SAD, a s osunčanost trase signala emitovanog ovim predajnikom.

No	datum	vreme (UT)	$\mathcal{N}_f$ ($\cdot 10^6$)	t_{GB} (s)	GD (°)	GS (°)	α_{GB} (°)	s
1	2009/08/31	21:30:25.92	1.17	22	165.48	-25.10	-69.07	0.5
2	2009/08/31	18:01:14.95	1.07	22	113.26	27.97	-7.27	0.5
3	2009/10/18	20:48:19.58	1.62	7	52.66	-57.53	-30.15	0.5
4	2009/10/20	21:36:44.66	1.46	20	-177.94	50.97	8.23	0

5	2009/10/29	03:53:22.59	1.26	50	-35.78	-55.99	-11.27	0
6	2009/11/04	07:24:10.76	1.31	20	119.95	-17.09	-48.75	0.5
7	2009/12/21	20:52:52.29	1.43	40	11.98	23.21	54.03	0
8	2010/02/05	04:18:43.07	1.51	38	-58.49	31.74	59.87	0
9	2010/05/04	07:28:34.23	1.75	25	124.02	9.16	-28.63	0.5
10	2010/05/04	19:20:59.51	1.26	22	102.76	-35.60	-48.67	0.5
11	2010/05/08	09:20:42.22	1.20	35	69.98	-20.72	-16.78	1
12	2010/05/14	18:53:58.17	1.23	30	172.92	29.17	-14.60	1
13	2010/06/25	18:32:28.37	1.34	1	-176.13	-39.08	-69.01	1
14	2010/07/02	01:03:47.20	1.24	1	-50.21	-56.54	-13.74	0
15	2010/07/19	03:30:57.93	1.60	28	122.70	-5.84	-41.18	0.5
16	2010/08/23	17:25:35.71	1.27	30	147.41	5.84	-38.76	1
17	2010/09/12	04:49:05.83	1.19	22	-20.72	-2.20	43.00	0.5
18	2010/09/17	05:03:25.78	1.28	35	-142.62	-17.10	-32.54	0.5
19	2010/09/28	02:19:52.75	1.47	20	-178.69	-28.56	-64.56	0
20	2010/10/20	23:40:41.70	1.39	21	165.07	23.16	-21.65	0
21	2010/12/19	16:27:53.51	1.01	30	37.12	-34.53	-6.40	0.5
22	2010/12/19	02:31:29.52	1.76	1.5	-50.85	-2.53	36.79	0
23	2011/01/06	21:26:17.01	0.944	22	66.52	47.00	31.00	1
24	2011/01/06	15:25:16.21	0.955	30	102.11	64.18	26.99	0
25	2011/02/12	01:09:08.73	1.31	10	-89.98	43.70	43.70	0
26	2011/02/13	05:17:29.53	1.27	20	-179.27	49.29	6.37	0
27	2011/02/23	21:25:48.05	1.37	20	35.41	-68.33	-31.23	0.5
28	2011/02/23	20:56:59.22	1.29	22	-122.05	87.57	44.33	0.5
29	2011/03/05	06:38:01.21	1.59	20	-1.30	-15.79	26.20	0.5
30	2011/03/19	02:16:41.61	1.25	30	145.94	-66.02	-67.96	0
31	2011/03/24	01:56:57.21	1.39	25	58.20	-26.31	-12.68	0
32	2011/03/29	18:26:25.19	1.24	25	147.77	57.59	12.60	0.5
33	2011/04/03	02:38:09.18	1.18	23	-53.69	-61.94	-19.42	0
34	2011/04/12	07:33:21.15	1.48	40	179.99	13.52	-27.98	0.5
35	2011/04/22	15:41:55.87	1.33	20	26.16	75.11	52.99	1 1
36	2012/06/27	23:45:03.63	1.01	30	-143.80	-43.20	-48.03	0.5
37	2012/07/11	03:11:02.58	1.27	25	-5.53	60.02	71.34	0.5
38	2012/07/11	05:06:38.58	1.61	30	122.77	-43.18	-65.81	0.5
39	2012/07/15	04:31:08.33	1.23	25	-80.87	-4.96	18.68	0.5
40	2012/07/16	20:59:50.56	1.25	25	16.95	-24.75	11.34	0.5
41	2012/07/29	07:13:42.52	1.51	35	-128.12	-5.70	-14.41	0.5
42	2012/08/04	00:54:14.18	1.51	2	-92.63	-28.76	-6.74	0
43	2012/08/06	17:33:31.86	1.52	27	-163.72	40.93	2.78	1
44	2012/08/11	02:35:18.92	1.58	40	-101.61	-22.74	-7.91	0
45	2012/08/11	04:43:53.80	1.48	32	-124.77	-28.85	-27.50	0.5
46	2012/08/15	02:13:58.78	1.27	22	-83.43	-52.13	-19.73	0
47	2012/09/07	00:24:23.08	2.30	10	82.1561	-9.31	-17.61	0
48	2012/09/09	01:42:03.23	1.51	20	-98.34	-59.43	-30.79	0
49	2012/09/09	23:34:14.36	1.85	35	-78.15	-30.40	-0.13	0
50	2012/09/17	16:09:02.33	3.82	50	27.05	-26.40	5.26	1
51	2012/09/18	11:58:06.33	2.59	40	168.37	-39.72	-79.92	1
52	2012/09/18	11:16:10.62	2.16	35	14.23	-32.76	5.27	1
53	2012/09/23	05:16:06.25	2.41	50	-137.691	6.24	-12.32	0.5
54	2012/11/25	08:32:27.27	2.24	50	35.72	55.32	51.81	1

Na ovom mestu treba napomenuti da su satelitski podaci³ za koordinate upadnog zraka

³Dostupni su na sajtovima http://gc.gsfc.nasa.gov/swift2009_grbs.html, http://gc.gsfc.nasa.gov/swift2010_grbs.html, http://gc.gsfc.nasa.gov/swift2011_grbs.html i http://gc.gsfc.nasa.gov/swift2012_grbs.html).

dati u nebeskom ekvatorskom koordinatnom sistemu preko rektascenzije, RA, i deklinacije, DEC. Ovi uglovi su definisani pomoću γ tačke (odgovara položaju Sunca u trenutku prolećne ravnodnevice), nebeskog ekvatora (veliki krug po kojem ravan upravna na zamišljeni produžetak Zemljine obrtne osovine, tj. svetsku osu, seče nebesku sferu), deklinacionog kruga (veliki krug koji sadrži svetsku osu) kroz vizuru, tj. "tačku" u beskonačnosti odakle dolazi zrak. RA se meri u ravni nebeskog ekvatora od γ tačke do preseka deklinacionog kruga kroz vizuru sa ravni nebeskog ekvatora, u retrogradnom smeru. Ima vrednosti od 0° do 360° i ne menja se u vremenu. DEC je ugao u ravni deklinacijskog kruga nebeskog tela od ravni ekvatora do vizure. Iznad ekvatora ima vrednosti od 0° do 90° , a ispod od 0° do -90° . Transformacija ovih veličina u geografsku širinu i dužinu zahteva poznavanje tačnog vremena i datuma kada je događaj registrovan i data je izrazima:

$$GS = RA - GMST \quad (7.7)$$

i

$$GD = DEC. \quad (7.8)$$

GMST predstavlja Griničko srednje zvezdano vreme (od engleskog Greenwich Mean Sidereal Time) koje se može izraziti preko univerzalnog vremena UT i datuma pomoću izraza⁴:

$$GMST = \text{mod}(280.46061837 + 360.98564736629d, 360), \quad (7.9)$$

gde je mod funkcija koja daje ostatak deljenja prve sa drugom vrednosti u argumentu, a d redni broj dana počev od 2000. godine koji se može dobiti na osnovu izraza

$$\begin{aligned} d = & 367 * \text{godina} - \text{int}(7 * (\text{godina} + \text{int}((\text{mesec} + 9)/12))/4) \\ & + \text{int}(275 * \text{mesec}/9) + \text{dan} - 730531.5 \\ & + (\text{sat} + \text{minut}/60 + \text{sekund}/3600)/24. \end{aligned} \quad (7.10)$$

Vidljivost vizure iz posmatrane tačke X na površini Zemlje se određuje preko visine α_{GB} koja, kao koordinata u horizontskom koordinatnom sistemu, predstavlja ugao u vertikalnoj ravni od ravni horizonta do vizure. Dobija se iz jednačine:

$$\sin(\alpha_{GB}) = \sin(DEC) * \sin(GS) + \cos(DEC) * \cos(GS) * \cos(HA). \quad (7.11)$$

⁴Preuzeto sa sajta <http://www2.arnes.si/~gljsentvid10/sidereal.htm>.

U ovom izrazu veličina HA predstavlja časovni ugao koji se može izraziti pomoću relacije:

$$HA = LST - RA, \quad (7.12)$$

gde se lokalno zvezdano vreme LST (od engleskog Local Sidereal Time) dobija iz izraza⁵:

$$LST = 100.46 + 0.985647d + GD + 15UT. \quad (7.13)$$

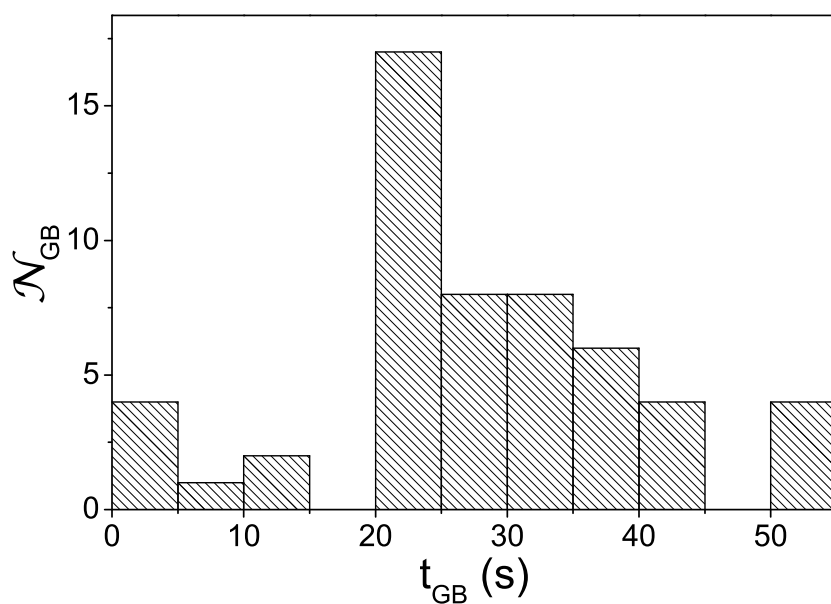
U cilju analize uticaja vremena trajnja GB-a, odbroja fotona na satelitu, upadnih pravaca visokoenergijskih zraka i osunčanosti trase kojom prolazi signal u posmatranim periodima, na Slikama 7.16 - 7.19 prikazane su odgovarajuće raspodele uzoraka. Pri podelama u prva tri slučaja, prikazanim vertikalnim isprekidanim linijama, je vođeno računa o kompaktnosti prisutnih pikova pri čemu se nije pravila velika razlika u brojevima događaja na relevantnim višim i nižim vrednostima. Podela po osunčanosti odslikava činjenično stanje i nije podložna proizvoljnim pomeranjima.

U slučaju raspodele po dužini trajanja (Slika 7.16) najveći broj uzoraka se nalazi u intervalu 20 s - 25 s. Takođe, nije uočljivo značajnije grupisanje u više perioda (praktično najveći broj GB-a traje 20 s - 45 s) zbog čega u daljoj analizi nije rađena klasifikacija po razmatranom parametru.

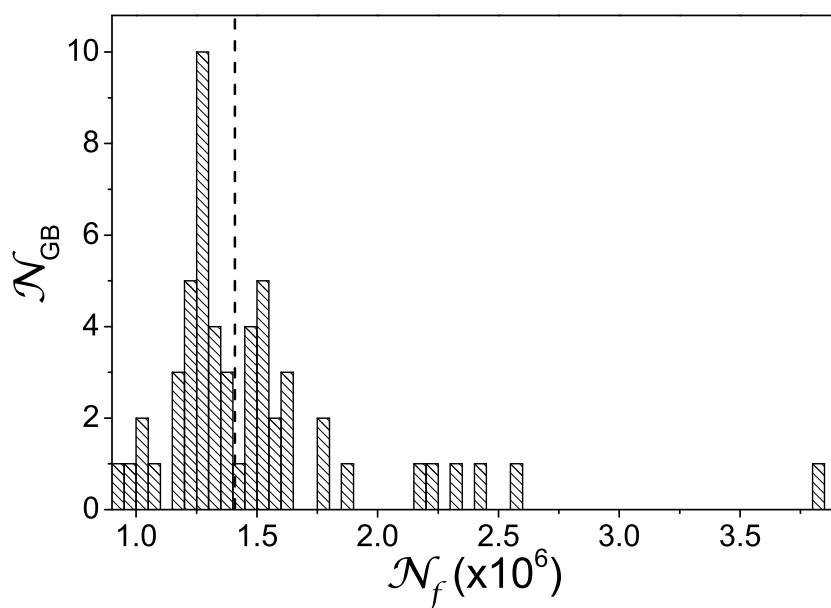
Ukupan odbroj fotona energija 15 keV - 350 keV koje registruje uređaj BAT na SWIFT satelitu je vršen integracijom svetlosnih krivih (predstavlja odbroj po jedinici vremena) u toku celog vremenskog intervala trajanja GB-a. U raspodeli prikazanoj na Slici 7.17 uočavaju se nagomilavanja oko dve vrednosti ukupnog odbroja (oko $1.3 \cdot 10^6$ i $1.5 \cdot 10^6$). Za graničnu vrednost koja deli GB-ove je uzeto $1.4 \cdot 10^6$, a broj uzraka je 30 i 24 za niže, odnosno više vrednosti ukupnog odbroja fotona, respektivno.

Uticaj GB-a na deo atmosfere kroz koju se prostire posmatrani VLF signal zavisi od upadnog pravca zraka koji se može definisati preko centralne upadne tačke na površini Zemlje (Slika 7.18). S obzirom na veliku dužinu putanje signala uz činjenicu da se prostire do visina koje mogu preći i 80 km, širenje snopa upadnih fotona usled Komptonovog rasejanja i konačno prisustvo sekundarnih fotona i čestica ubzranih primarnim snopom do energija dovoljnih za jonizaciju plazme u niskoj jonosferi, određivanje izloženosti zračenju prostora kroz koji se prostire VLF signal je vrlo kompleksno. U ovom radu je napravljena raspodela po visinama

⁵Preuzeto sa sajta <http://www.stargazing.net/kepler/altaz.html#twig04>.

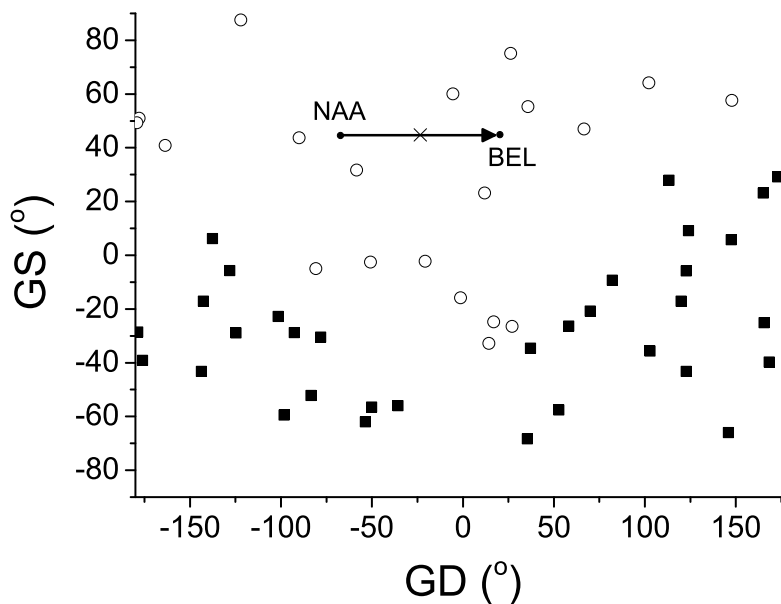


Slika 7.16: Histogram broja GB-ova po intervalima vremena trajanja.



Slika 7.17: Histogram broja GB-ova po intervalima ukupnog odbroja.

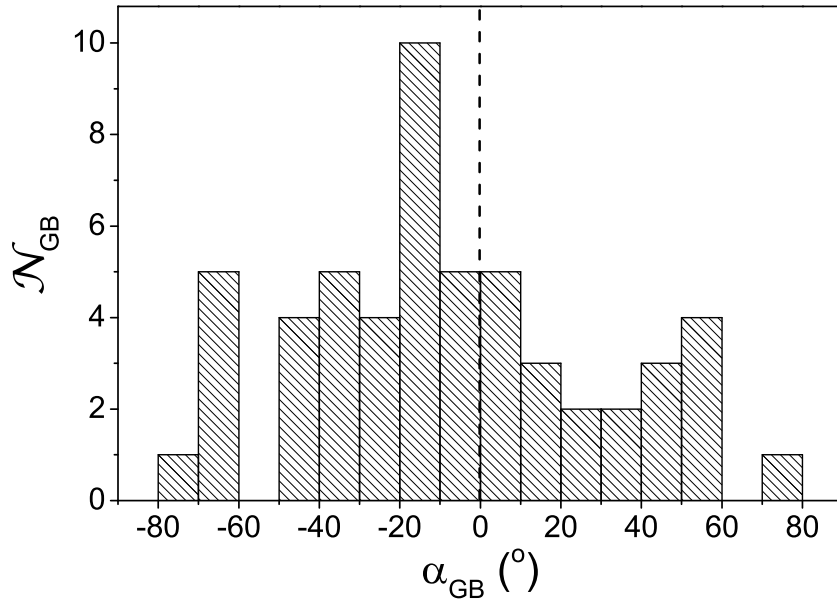
α_{GB} izraženim u uglovima pod kojima se vidi "tačka" u beskonačnosti odakle dolazi GB u sistemu vezanom za tačku "X" na sredini rastojanja između predajnika i prijemnika. Na Slici 7.19 prikazane su upadne tačke analiziranih GB-ova i putanja signala emitovanog iz



Slika 7.18: Prikaz položaja centralnih upadnih tačaka snopova visokoenergijskog zračenja na površini Zemlje i trase VLF signala iz SAD. Centralne upadne tačke koje se vide iz sredine putanje, označena sa "X", su prikazane belim kružićima, dok su tačke koje se iz ovog položaja ne vide date crnim kvadratićima.

SAD predajnikom NAA. Podelom raspodele na 0° izvršena je klasifikacija GB-ova koji se vide i ne vide iz posmatrane tačke. Ovde treba naglasiti da drugi slučaj ne znači da signal nije izložen dejstvu GB-a. Naime, izloženost je različita na različitim delovima putanje i u zavisnosti od njihove geografske širine i dužine i u zavisnosti od njihove visine. Prikazanom podelom je, dakle, samo data klasifikacija vidljivosti iz jedne, reprezentativne tačke, a ne klasifikacija na osnovu prisustva dejstva zračenja na signal. Podela uzorka je u razmatranoj studiji dala 20 GB-ova koji se vide iz tačke "X" i 34 koji se ne vide.

Reakcija jonosfere na spoljašnje promene zavisi od stanja plazme. Osnovne razlike se javljaju kod dnevne i noćne jonosfere i iz tog razloga smo uveli i klasifikaciju GB-ova u odnosu na osunčanost trase tokom njihovog upada u atmosferu. Pri tome je, zbog velike dužine trase i intervala od nekoliko sati kada je samo deo trase osunčan podela izvršena u tri kategorije okarakterisane parametrom s : dnevna trasa ($s = 1$), delimično osuncana trasa ($s = 0.5$) i noćna trasa ($s = 0$). Ovde treba napomenuti da se vrednost 0.5 odnosi i na početni period kada je trasa u potpunosti osunčana ali još nije došlo do uspostavljanja kvazistacionarnog signala. Date vrednosti za pojedinačne GB-ove su prikazane u poslednjoj koloni Tabele 7.2. odakle se dobija da 20, 23 i 11 slučajeva odgovara vrednostima $s = 0, 0.5$



Slika 7.19: Histogram broja GB-ova u zavisnosti od visine centralne upadne tačke snopa visokoenergijskog zračenja merene u sistemu vezanom za tačku na površini Zemlje koja se nalazi na sredini putanje VLF signala.

i 1, respektivno.

Predstojeća studija, vizuelizovana histogramima sa binovima od 5 i 30 s, je zasnovana na analizi vremena relevantnih amplitudnih pikova i data preko ukupnog broja skokova amplituda $\mathcal{N}_A$ i broja GB-ova $\mathcal{N}_{GB}$ koji imaju bar jedan amplitudni skok intenziteta $r = 2, 3, 4$ i 5 puta veći od amplitude šuma (dobijena je postupkom opisanim u Poglavlju 6.4) u odgovarajućim binovima. Dobijene vrednosti su predstavljene na odgovarajućim panelima pri čemu su na donjim panelima dati histogrami njihovih zbrova kojima se većim pikovima daje veća težina.

Značajnost dobijenih pikova σ_i u histogramima je određena relativnim odstupanjima odgovarajućih odbroja x_i u binovima i od usrednjenih vrednosti $\bar{X}$ svih N posmatranih binova:

$$\sigma_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\bar{X}} \cdot 100\%, \quad (7.14)$$

gde je:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_i x_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (7.15)$$

Pri tome su na graficima kvadratićima obeležene samo vrednosti (prikazane na desnim vertikalnim osama) veće od 15% u slučaju binova od 30 s i veće od 100% u slučaju binova od 5 s. Ovde treba napomenuti da je u pojedinim slučajevima broj GB-ova koji zadovoljavaju date uslove vrlo mali što dovodi u pitanje relevantnost dobijenih značajnosti. Iz tog razloga su paneli u kojima je maksimalan broj GB-ova sa odgovarajućom reakcijom manji od 20% svih GB-ova razmatranih karakteristika zatamnjeni i nisu uzeti u analizu kao ni odgovarajući paneli amplitunih pikova. Ovo ograničenje će se u daljem tekstu označavati kao z uslov.

Pre analize uticaja parametara datih u prethodnom razmatranju, na celom uzorku su urađena ispitivanja za signale emitovane sa različitih lokacija kao i ispitivanje uticaja vrednosti parametra p za određivanje amplitude šuma.

Na kraju analize dati su podaci za procentualni porast $\delta\%$ vrednosti $\mathcal{N}_A$ i $\mathcal{N}_{GB}$ 2 minute nakon početka registracije GB-a u odnosu na dvominutni period pre koji je definisan izrazom:

$$\delta\% = \frac{N_{posle} - N_{pre}}{N_{pre}} \cdot 100\% \quad (7.16)$$

gde su N_{pre} i N_{posle} odgovarajući odbroji u prvoj, odnosno drugoj polovini posmatranog perioda.

7.3.2 Ceo uzorak

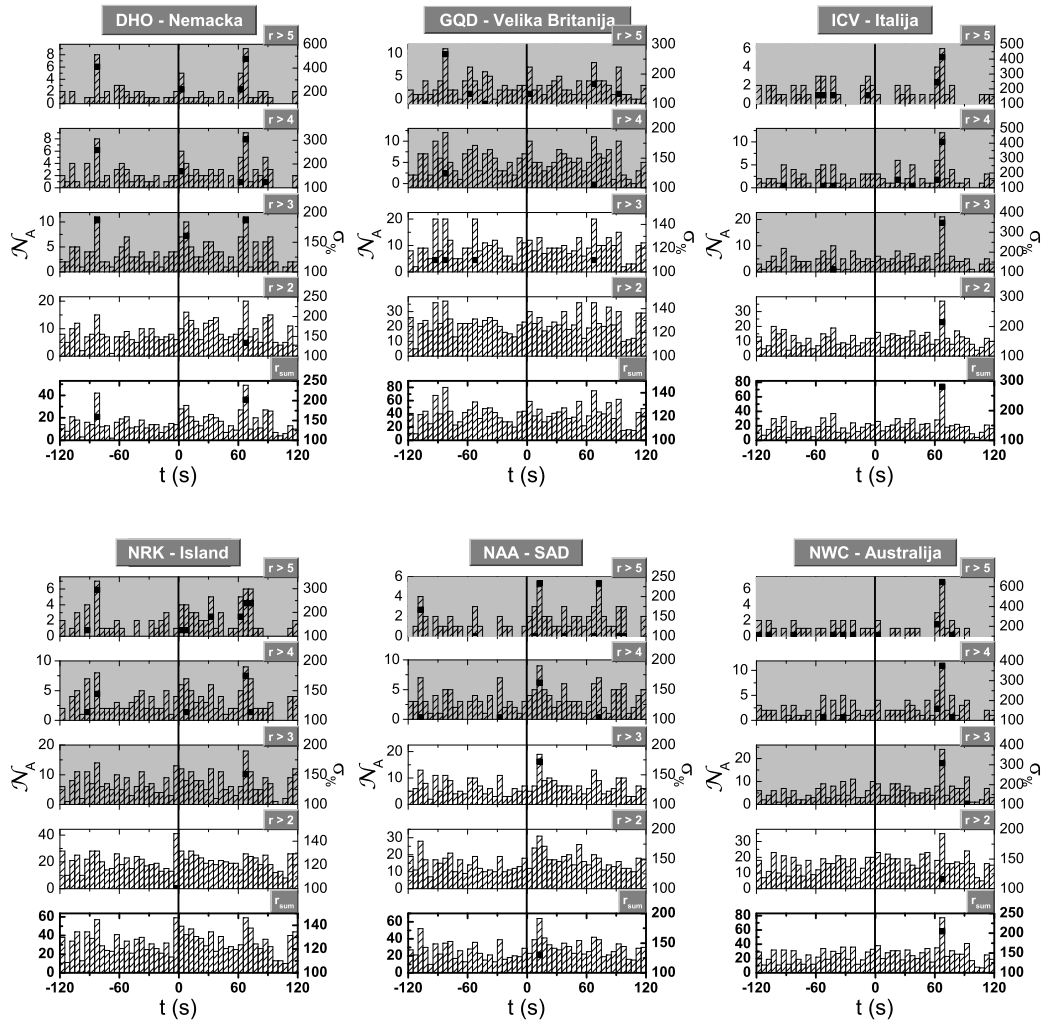
Karakteristike vremenskih varijacija amplituda pojedinačnog signala zavise od snage njihovog emitovanja i uslova u kojima se prostire do prijemnika. Naime, na odgovarajućoj frekvenciji prijemnik pored posmatranog signala beleži i mnogobrojne sporedne uticaje čiji je doprinos značajniji kod slabijih signala. Pored toga uticaj prostorno-vremenski promenljivih uslova se pojačava sa dužinom trase. U ovom drugom slučaju, uticaj na detektabilnost promena u niskoj jonosferi uzrokovane GB-ovima nije trivijalna jer povećanje dužine trase sa jedne strane utiče na šum, dok se, sa druge strane, povećava prostor u kome je prisutno intenzivno visokoenergijsko zračenje. Iz ovih razloga, pre detaljne analize prethodno pomenutih faktora, ispitane su reakcije šest VLF signala emitovanih predajnicima DHO (Nemačka), GQD (Velika Britanija), ICV (Italija), NRK (Island), NAA (SAD) i NWC (Australija). U Tabeli 7.4 date su karakteristike transmitera, dužine trasa i amplitude šuma (njihove minimalne, maksimalne i usrednjene vrednosti za posmatrana 54 GB-a i vrednost parametra p od 2 procenta).

Tabela 7.4: Karakteristike predajnika, trasa i relevantnih amplituda šuma za posmatrane signale. Podaci za predajnike su uzeti sa sajta http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY_Test/TechDocs/AWESOMETransmitters, a dužina trase je dobijena LWPC modelom za simulaciju prostiranja VLF signala (Ferguson, 1998).

PREDAJNIK			TRASA	A_{sum} (dB)		
oznaka	lokacija	snaga (kW)	dužina (km)	min	max	srednja
DHO	Rhauderfehn, Germany	800	1304	0.25	3.52	0.84
GQD	Anthorn, UK	200	1935	0.31	5.42	2.05
ICV	Isola di Tavolara, Italy	20	976	0.51	5.06	2.54
NRK	Grindavik, Island	800	3230	0.73	5.57	2.87
NAA	Cutler, Maine, USA	1000	6548	0.68	3.83	2.51
NWC	North West Cape, Australia	1000	11974	2.38	5.31	3.47

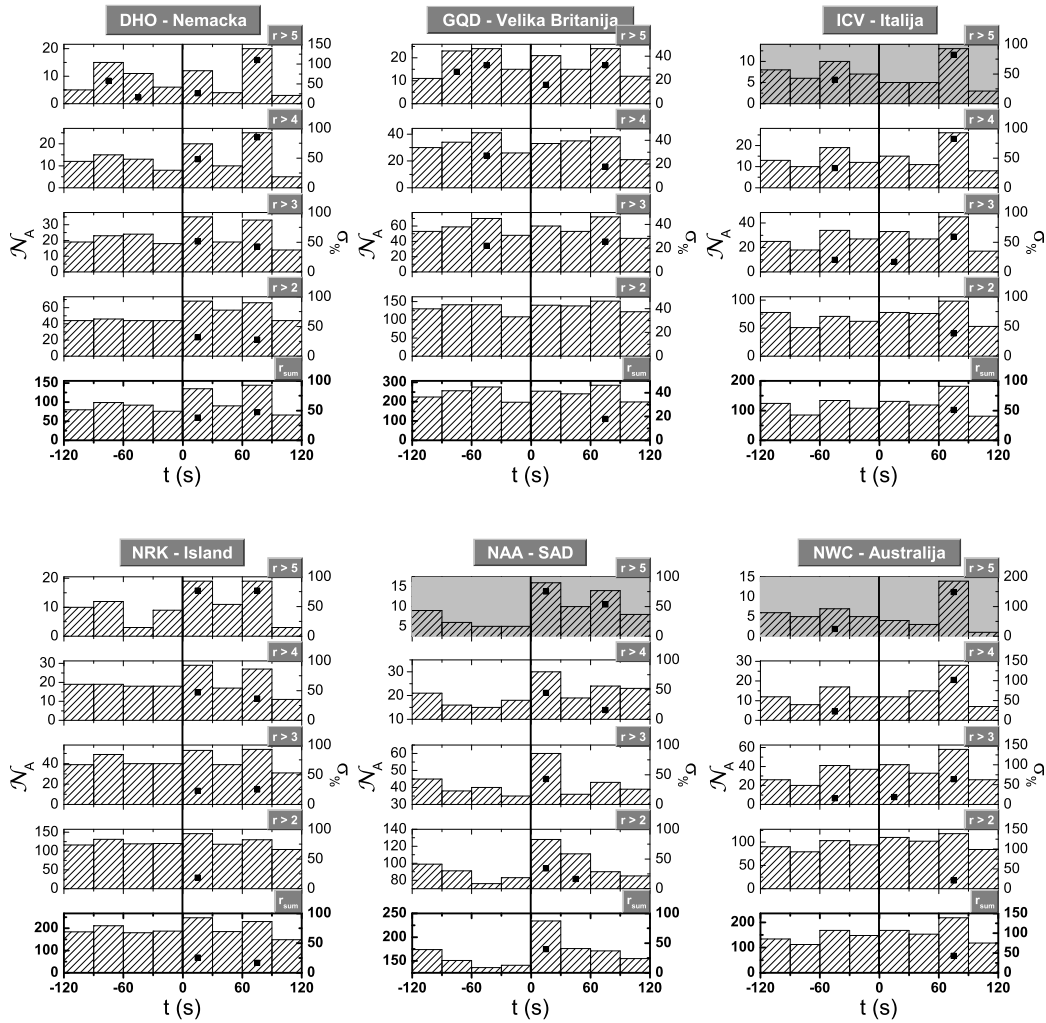
Generalno gledajući, dva analizirana signala su prekookeanska sa najvećom snagom od po 1000 kW. Veoma duga trasa signala iz Australije daje izrazito najveću minimalnu i usrednjenu amplitudu šuma. Iz tog razloga detektabilnost GB-ova je znatno otežana, što će se videti i iz dobijenih rezultata prikazanih nešto niže. S druge strane, signal iz SAD ima nisku maksimalnu vrednost A_{sum} i praktično, najujednačenije vrednosti ove veličine za sve uzorke. Ostala četiri signala su celom trasom u Evropi, ali različitih snaga. Iako nesto manja nego kod prekookeanska dva, vrlo visoka snaga od 800 kW signala emitovanog mnogo bliže lociranim predajnikom u Nemačkoj daje najmanje vrednosti sve tri karakteristične amplitude šuma prikazane u tabeli. Ostala tri signala se ne razlikuju značajno. Interesantna je vrlo mala snaga najbližeg predajnika u Italiji, dok je prostor kroz koji prolazi signal iz Islanda karakterističan u odnosu na druge signale zbog lokacije samog predajnika i, posledično, značajnijeg prodiranja naelektrisanih čestica iz svemira u nisku jonosferu usled zakrivljenosti magnetnih linija sila. Ovaj uticaj objašnjava i veće amplitude šuma nego u slučaju signala iz Nemačke iako su im iste snage.

Na Slikama 7.20 - 7.23 su dati histogrami koji se odnose na brojeve amplitudnih pikova, $\mathcal{N}_A$, (prve dve slike) i GB-ova sa registrovanom odgovarajućom reakcijom, $\mathcal{N}_{GB}$, (druge dve slike). Posmatrane su širine binova od 5 i 30 s. U slučaju užih binova, povećanje nakon registracije GB-a u oba slučaja se najjasnije uočava u slučaju transmitera NAA gde je najviši odbroj u binu koji se odnosi na period 10 - 15 sekundi i statistički je značajan za vrednost parametra $r = 3$ (razmatraju se samo paneli u kojima je zadovoljen z uslov koji, u ovom



Slika 7.20: Histogrami broja skokova amplituda signala emitovanih predajnicima DHO (Nemačka), GQD (Velika Britanija), ICV (Italija), NRK (Island), NAA (SAD) i NWC (Australija) za binove od 5 s za $p = 2\%$. Vertikalna linija označava vreme satelitske registracije GB-a, a crne tačke značajnost pikova u histogramima.

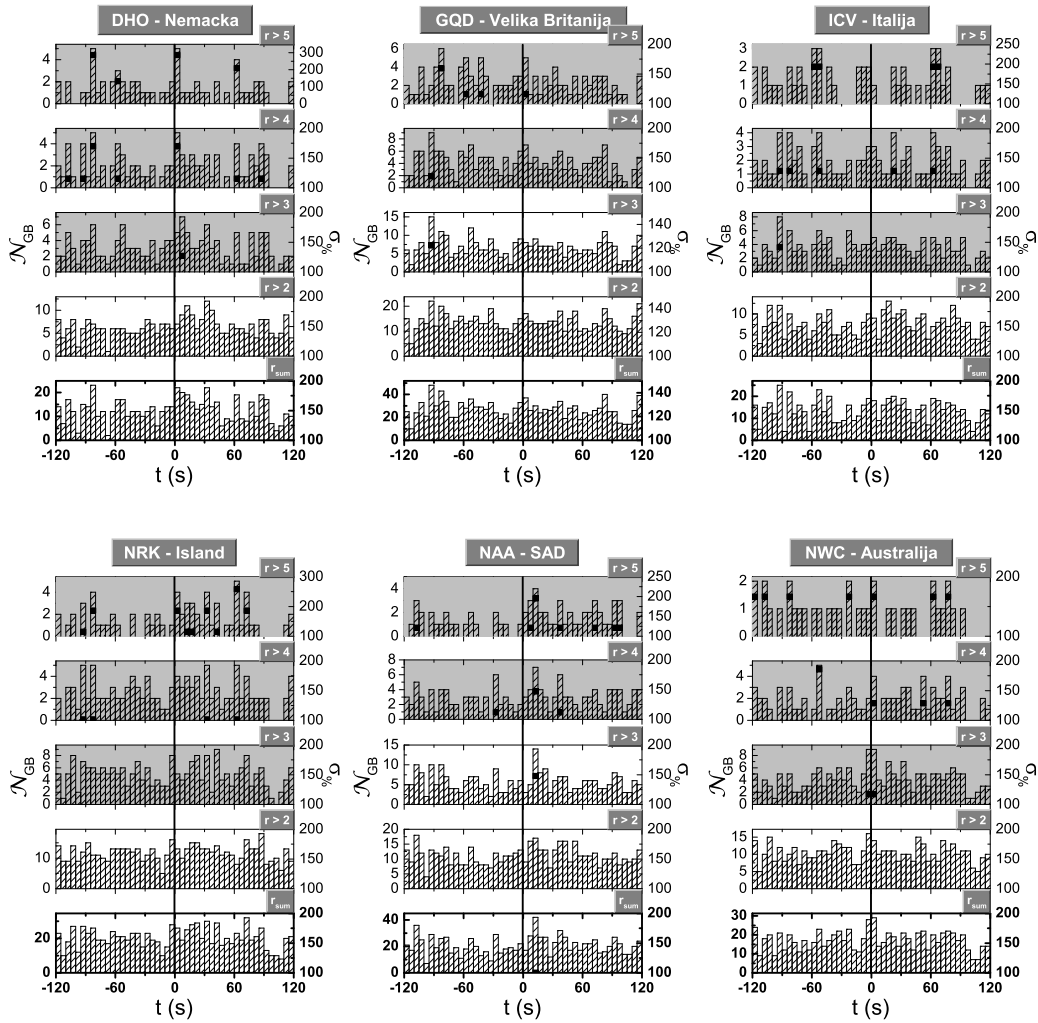
slučaju, daje da maksimalni broj GB-ova sa reakcijom mora da bude iznad 10). Interesantan je skok broja amplitudnih pikova u binu 65 - 70 s koji, za razliku od prethodnog, nije praćen odgovarajućim porastom broja GB-ova i koji je uočljiv kod svih signala (značajan je kod signala iz Nemačke, Velike Britanije, Italije i Australije). Posmatrajući histograme kako amplitudnih pikova tako i GB-ova sa adekvatnom reakcijom uočava se jasnija promena primljenih VLF signala emitovanih iz USA i Nemačke što se poklapa sa njihovim evidentnim izdvajanjem po najnižoj maksimalnoj amplitudi šuma. Ta činjenica predočava da je za detekciju reakcije na GB-ove, odnosno njeno izdvajanje od drugih uzroka perturbacija niskojonosferske plazme pouzdanije koristiti signal sa što manjim šumom. U svakom slučaju, iz date analize sledi da se u koracima od po 5 s statistički može potvrditi prisustvo traženog odziva i da pos-



Slika 7.21: Isto kao na Slici 7.20, ali za binove od 30 s.

toji izvesni period nakon satelitske registracije početka GB-a do reakcije jonosfere. U ovoj analizi interesantno je primetiti i statistički značajan skok kod signala iz Islanda (specifičnom po uticaju naelektrisanih čestica) u binu koji predhodi registraciji GB-ova. S obzirom na "pre-vremenu" reakciju signala iz USA registrovanom prijemnikom u Srbiji u slučaju GRB041227 prikazanim u 6.2 ovako ponašanje je vrlo interesantno i zahteva detaljniju analizu u predstojećim istraživanjima.

Povećanjem širine bina na 30 s sa grafika 7.21 i 7.23 se jasno vidi inteziviranje kako broja skokova amplituda, $\mathcal{N}_A$, tako i broja GB-ova sa odzivom niske jonosfere, $\mathcal{N}_{GB}$, nakon inteziviranja zračenja, i to kod svih 6 signala. Time se definitivno potvrđuje prisustvo kratkotrajnih perturbacija. Pik kod skokova amplituda u periodu 60 s - 90 s od pocetka upada GB-a je registrovan u svim slučajevima i dobija na značaju sa povećanjem r , odnosno sa porastom amplitude. Ovo uvećanje je u slučaju statistike GB-ova praćeno značajnijom reakcijom

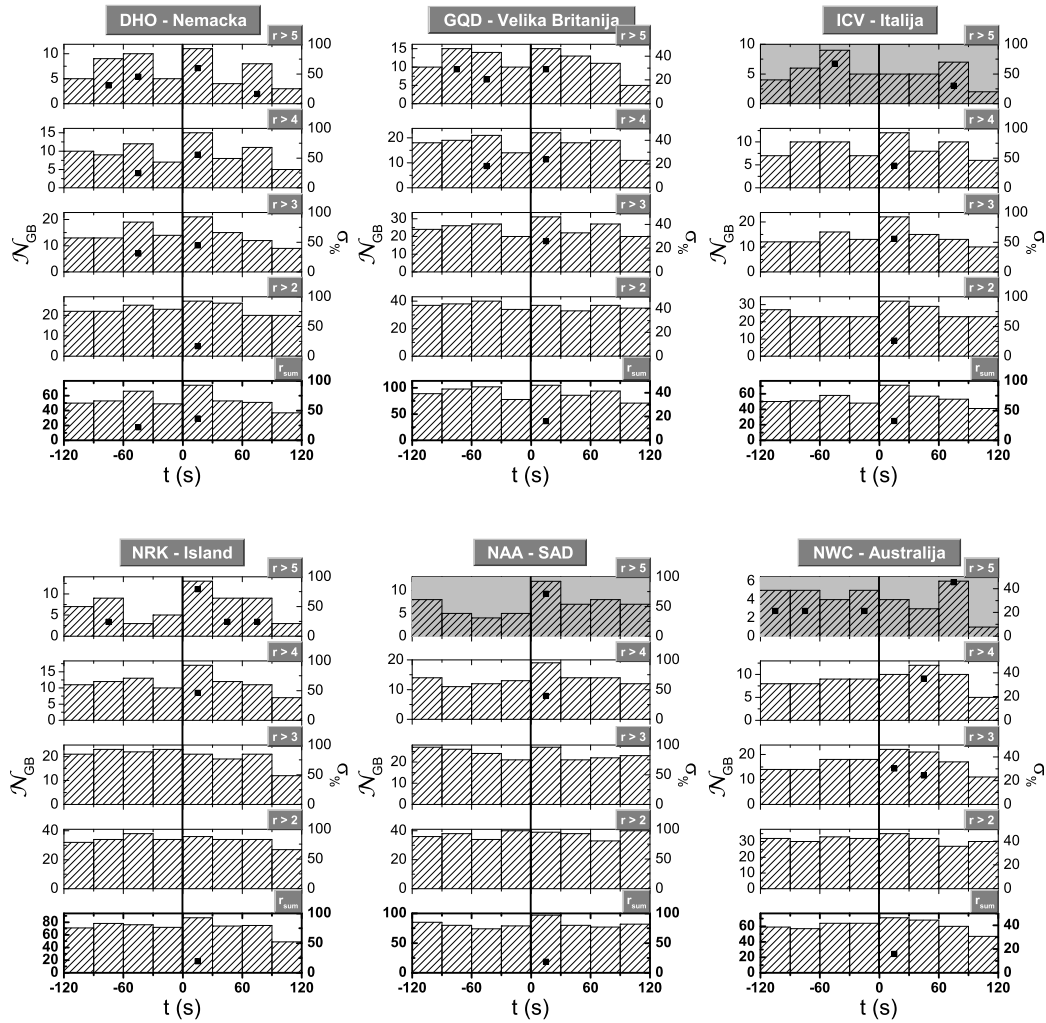


Slika 7.22: Isto kao na Slici 7.20, ali za broj GB-ova sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda.

samo u slučaju najintenzivnijih skokova amplituda ($r = 5$) signala iz Nemačke i Islanda, što ukazuje na kasniju reakciju u pojedinačnim slučajevima čija je mogućnost dugotrajnijeg pojavljivanja predložena u *Hudec et al.* (2010).

Uzimajući u obzir činjenicu da je za širinu bina od 5 s reakcija u obe analize najintenzivnija u slučaju signala emitovanog predajnikom NAA lociranim u SAD, u daljoj studiji su ispitivanja nastavljena sa podacima relevantnim za ovu trasu.

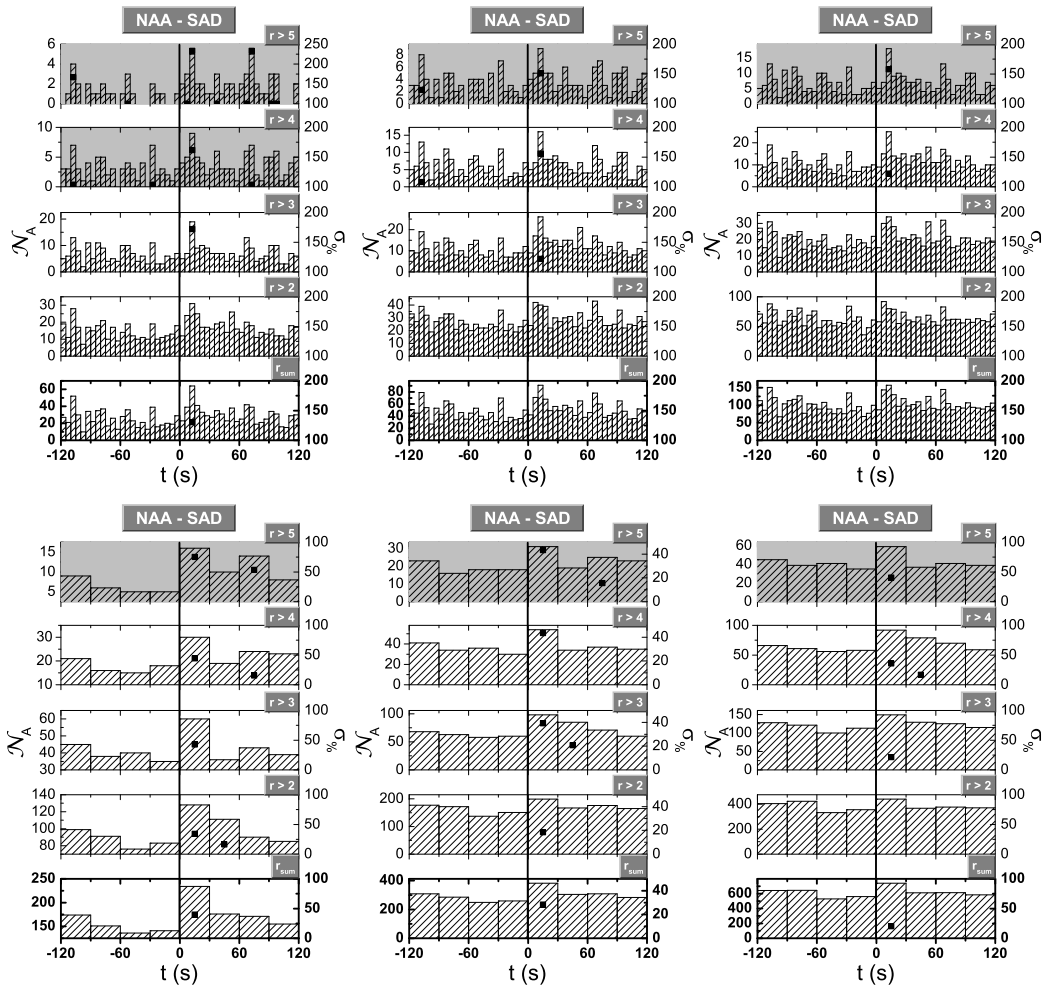
Evidentiranje vremena u kome amplituda ima odgovarajuće uvećanje zavisi od amplitude šuma koja je u ovoj studiji određena parametrom p . Provera uticaja vrednosti ovog parametra urađena je izborom tri vrednosti: 2%, 5% i 10%, čime se, respektivno, smanjuje amplituda šuma. Rezultati prikazani na Slikama 7.24 i 7.25, relevantni za skokove amplituda i GB-ove sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda, respektivno, pokazuju vrlo slične grafike



Slika 7.23: Isto kao na Slici 7.20, ali za broj GB-ova sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda i za binove od 30 s.

kod panela koji se odnose na vrednosti $r(10\%) = r(5\%) + 1 = r(2\%) + 2$. Time se pokazuje da nivo šuma utiče samo na vrednosti r kada počinje da se uočava reakcija, a ne na njeno evidentiranje. S obzirom da se pri $p = 2\%$ za $r = 2$ javljaju jasniji skokovi nego u ostala dva slučaja i da je značajnost dobijenih pikova pri tom izboru najveća za isto r , uzimanje ove vrednosti omogućava bolju preglednosti bez gubitaka značajnih informacija. Iz tog razloga, u nastavku analize je p fiksirano upravo na 2% .

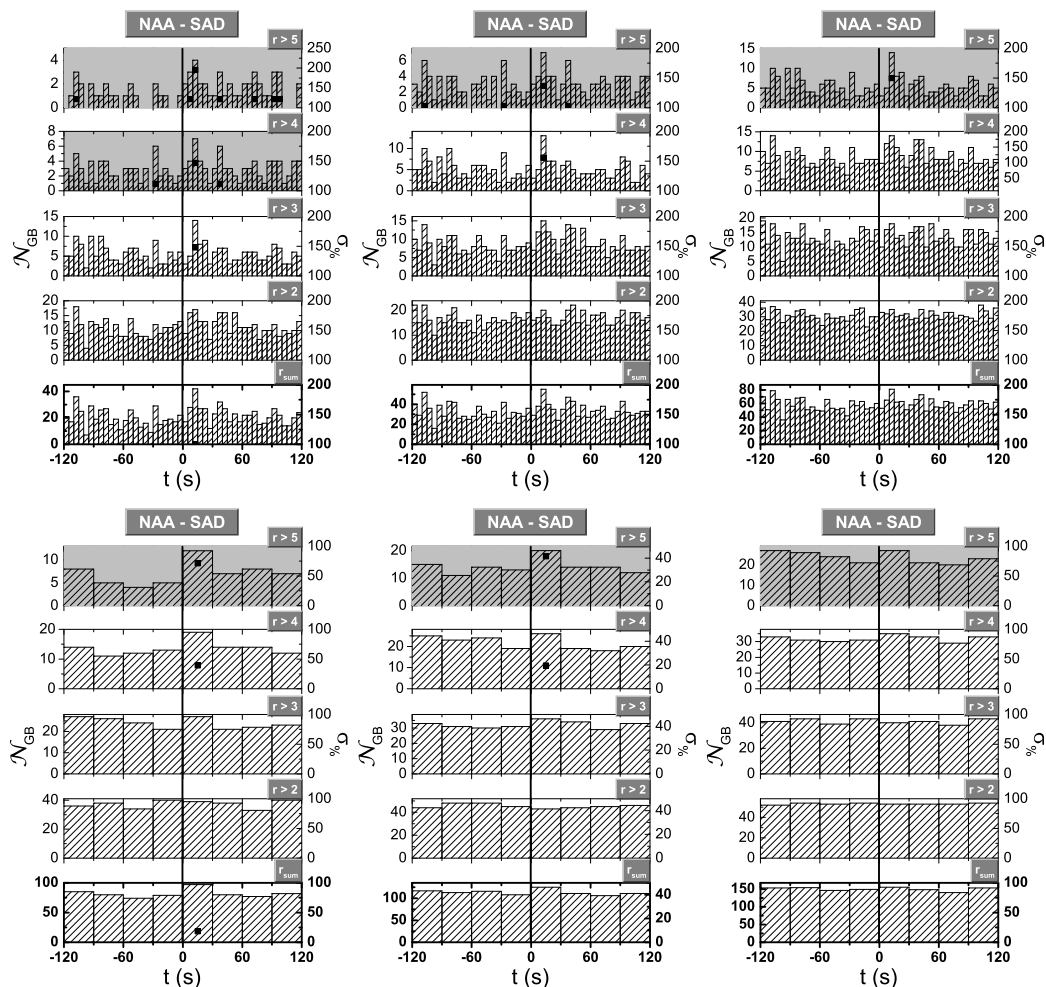
Prikaz značajnosti pikova za $p = 2\%$ dobijen metodom opisanom u 7.3.1 pokazuje da u slučaju obe analize najveći značaj imaju pikovi unutar prvih 30 s.



Slika 7.24: Histogrami broja skokova amplituda signala iz SAD za binove od 5 s (gornji grafici) i 30 s (donji grafici) pri vrednostima $p = 2\%$ (levi paneli), $p = 5\%$ (srednji paneli) i $p = 10\%$ (desni paneli).

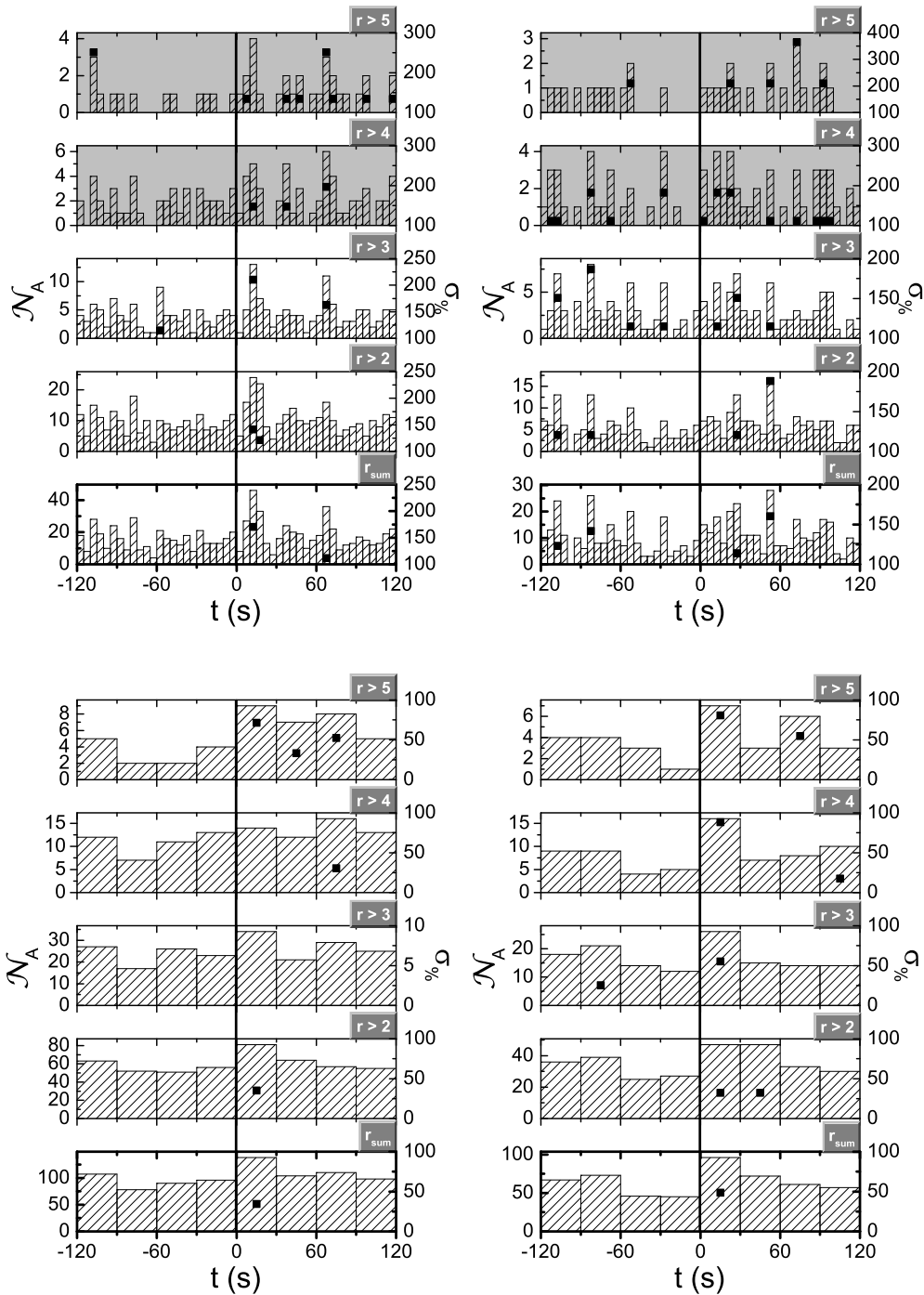
7.3.3 Klasifikacija po ukupnom odbroju fotona na satelitu

Na Slikama 7.26 i 7.27 su dati histogrami klasifikovani u dva intervala u zavisnosti od ukupnog odbroja fotona sa granicom od $1.4 \cdot 10^6$. Iako je za oba intervala uočljivo povećanje odgovarajućih skokova amplituda nakon registracije GB postoji razlika u njihovim raspodelama. Naime, u slučaju manjih odbroja, kod užih binova najjasnije se uočava skok u prvih 20-tak sekundi nakon početka upada zraka ($r = 2$ i 3). Kasniji skok (posle 1 min) dobija na značaju za $r = 3$. Kod većih odbroja, pri užim binovima se uočava širenje pika i pomeranje maksimalnih vrednosti u kasnije periode. To dovodi do povećanja broja pikova koji su značajnije iznad usrednjene vrednosti, ali i smanjenja pojedinačnog značaja za veće vrednosti r . Pri tome, kod većih odbroja značajni pikovi se javljaju i pre registracije GB-ova,



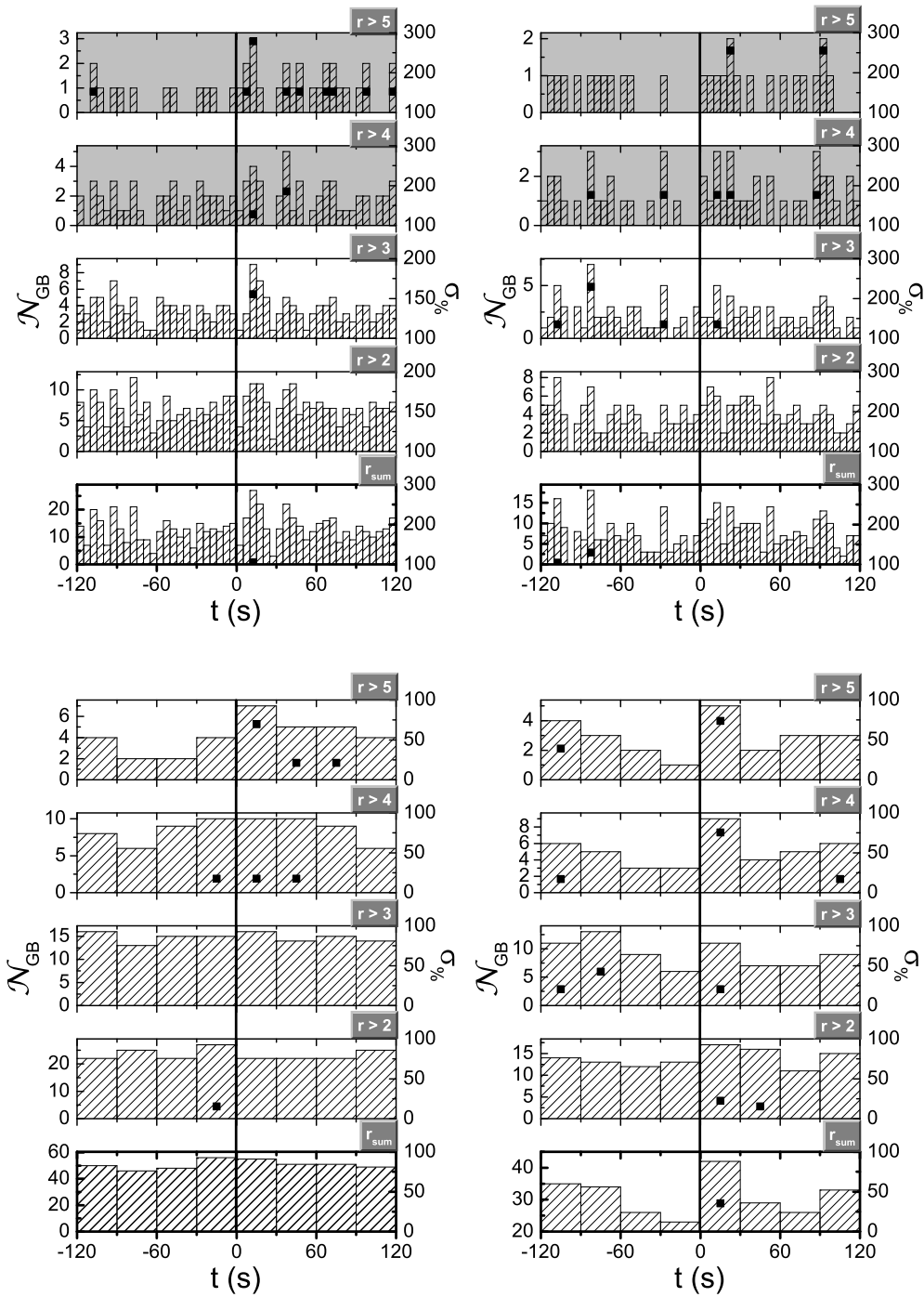
Slika 7.25: Isto kao na Slici 7.24, ali za broj GB-ova sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda.

što praktično smanjuje mogućnost statističke potvrde da postoji reakcija niske jonofsere na GB-ove u ovako uskim binovima. Kod analize odziva GB-ova u slučaju malih odbroja jasno je uočljiv značajan pik između 10 s i 15 s, dok se kod većih odbroja definitivno ne može potvrditi tražena reakcija s obzirom da su skokovi značajniji pre posmatranih događaja. Pri tome treba imati u vidu da je kod većih odbroja manji uzorak i da je mnogo relevantnija analiza za širine binova od 30 s. U tom slučaju jasno se uočava povećanje značaja pika u prvih 30 s za veće odbroje kao i njegovo proširenje na period 30 s - 60 s za manje skokove ($r = 2$). To sugerše na uticaj i fotona koji kasnije stižu u atmosferu. Na Slici 7.28 je predstavljena zavisnost dužine trajanja upada u zavisnosti od odbroja na kojoj se vidi tendencija povećanja dužine trajanja pri povećanju ukupnog odbroja. To ide u prilog povezivanju signalnih promena koji opisuju jonosferu nekoliko desetina sekundi nakon početka GB-a sa



Slika 7.26: Histogrami broja skokova amplituda signala iz SAD za binove od 5 s (gornji grafici) i 30 s (donji grafici) klasifikovani prema ukupnom odbroju: manji od $14 \cdot 10^5$ (levi grafici) i veći od $14 \cdot 10^5$ (desni grafici).

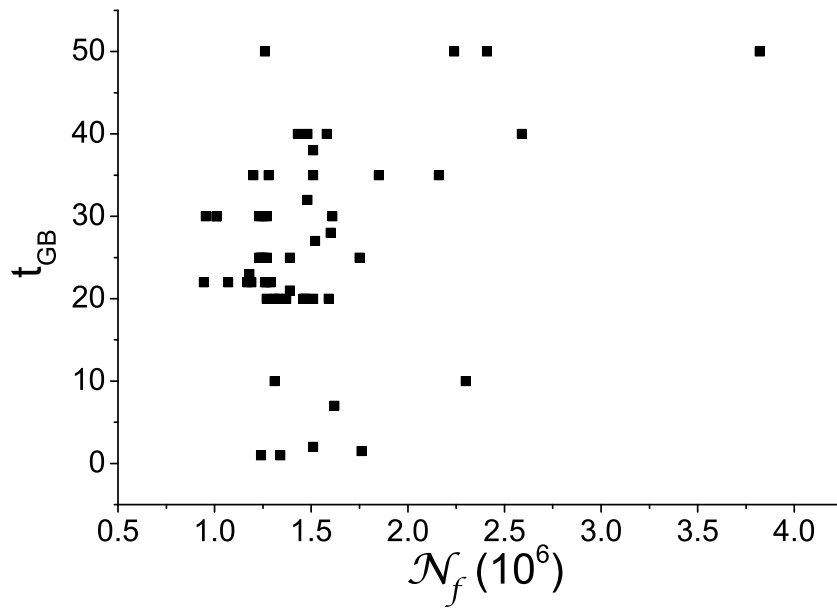
njegovim uticajem. Svakako, pored kasnije pistiglih fotona ne može se isključiti ni uticaj potencijalnih sekundarnih reakcija na atmosferske pojave koje izazivaju GB-ovi. Za manje odbroje, uočavaju se povećanja, ali manje značajna. Kod reakcije na GB-ove razlika u pos-



Slika 7.27: Isto kao na Slici 7.26, ali za broj GB-ova sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda.

matrana dva slučaja je još drastičnija. Naime, prvo povećanje pika u prvih 30 s u odnosu na periode pre GB-ova za manje odbroje javlja se tek za $r > 4$, za razliku od uzorka sa višim odbrojima gde se ovo uvećanje javlja u prvih 30 s na svim panelima.

Na osnovu date analize histograma uzoraka sa manjim i većim odbrojem može se izvesti

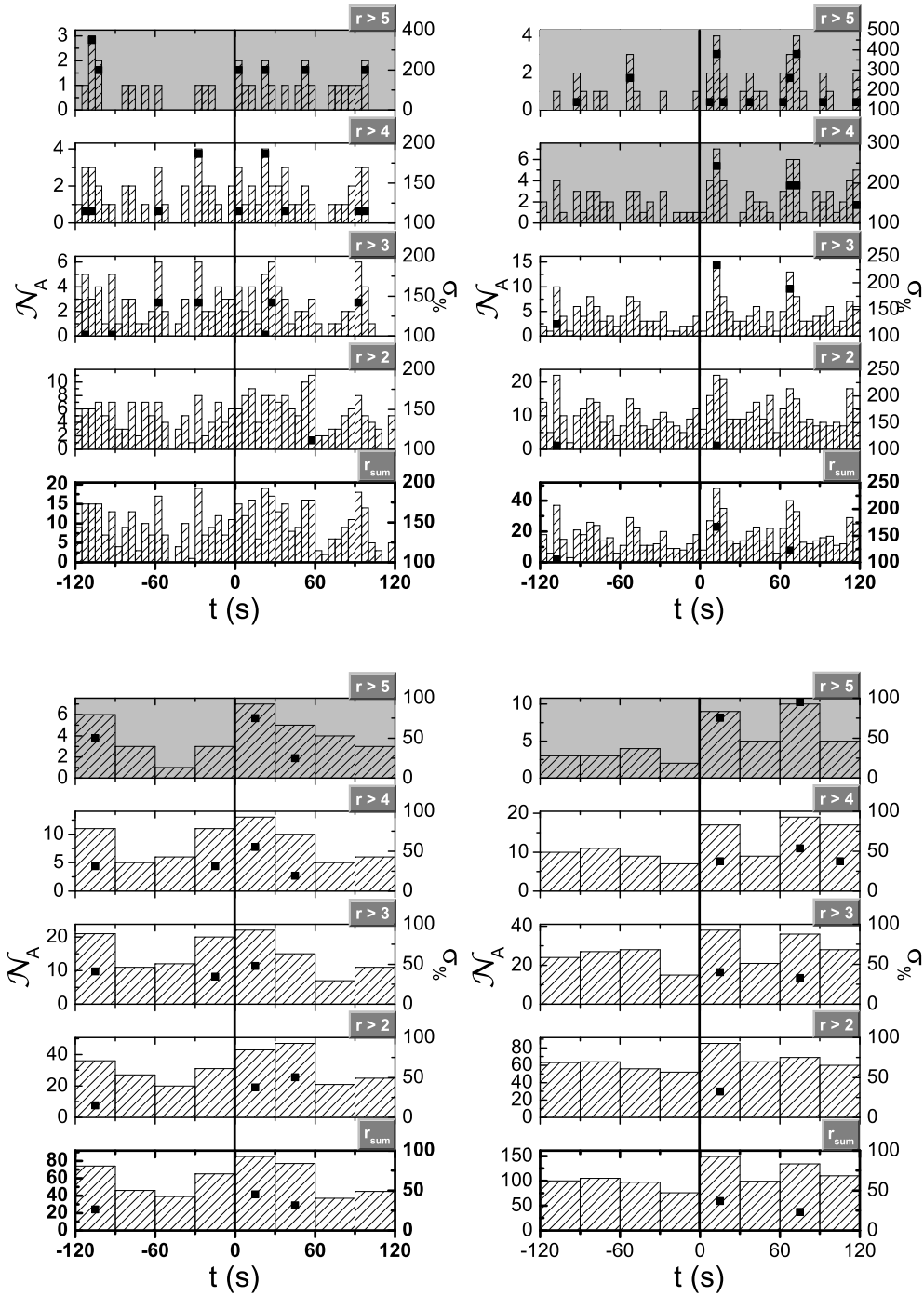


Slika 7.28: Zavisnost dužine trajanja GB-a od ukupnog odbroja fotona na satelitu.

zaključak da se za uže binove reakcija jasnije vidi u prvom a za šire binove u drugom slučaju. To se može objasniti tendencijom uvećanja dužine trajanja GB-a sa povećanjem odbroja prikazanom na Slici 7.28 i pomeranjem maksimuma intenziteta zračenja ka kasnijim vremenima.

7.3.4 Klasifikacija po upadnom pravcu γ -bljeska

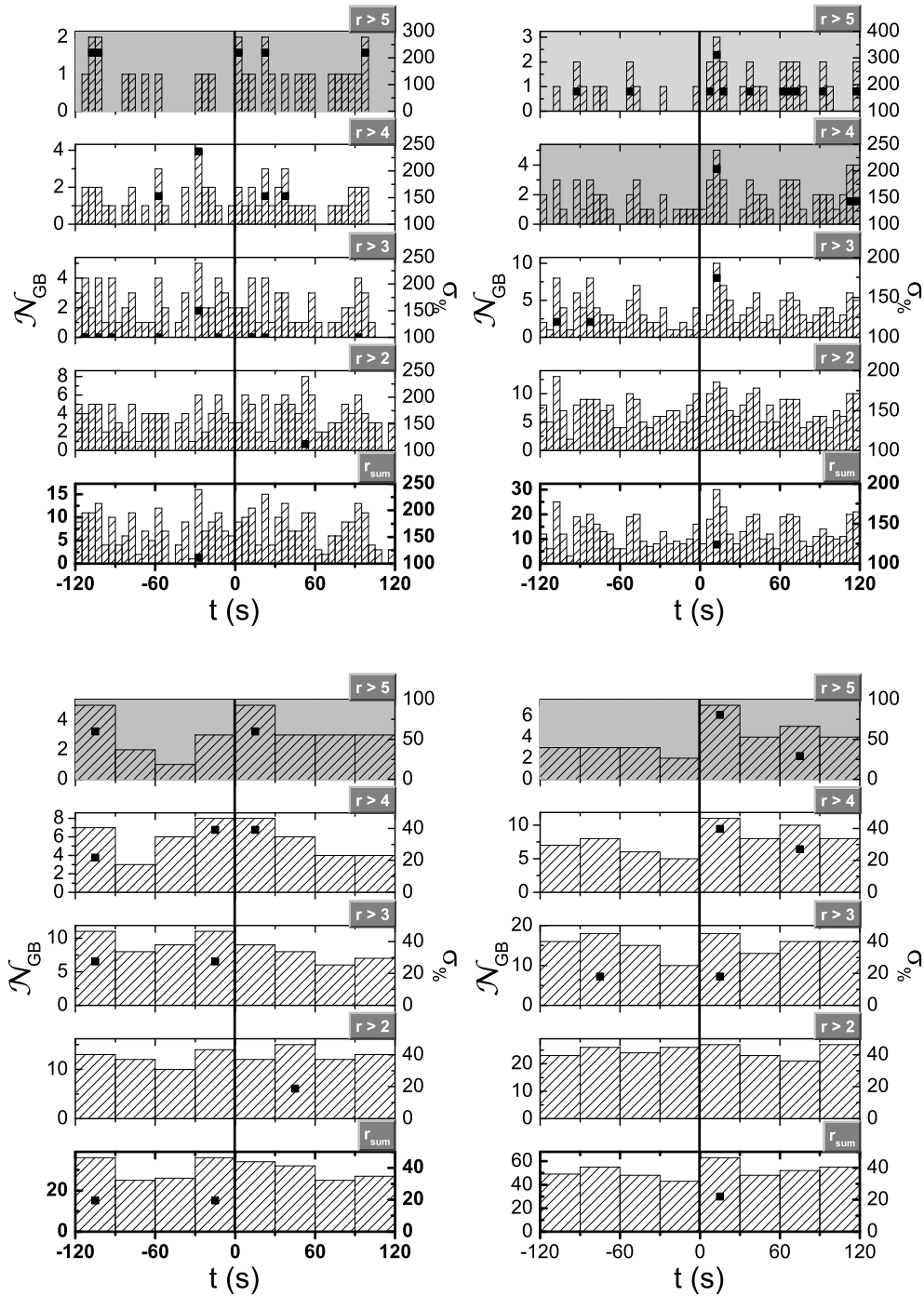
Iako se na osnovu analize histograma vremena skokova amplituda VLF signala i broja GB-ova sa odgovarajućim reakcijama (Slike 7.29 i 7.30) uočavaju reakcije niske jonosfere u obe podele po upadnom pravcu zračenja, mnogo jasniji uticaj se registruje u slučaju većih visina α_{GB} . Ovi rezultati mogu da se objasne presekom za jonizaciju čestica koji se značajno povećava sa smanjenjem upadnih energija fotona. Naime, u slučaju snopova čija je centralna upadna tačka udaljenija od trase VLF signala, prolazak kroz atmosferu upadnih fotona je duži što za posledicu ima njihovu intenzivniju interakciju sa česticama sredine kroz koju prolaze i ubrzavanje atmosferskih čestica. Za razliku od fotona nižih energija (najznačajniji za nisku jonosferu pored mekih X fotona su $Ly\alpha$ fotoni), koji pri jonizaciji čestica izgube dovoljno energije da posle ne mogu jonizovati čestice na nižim visinama usled čega se jonizaciona moć snopa smanjuje, fotoni iz oblasti tvrdog X- i γ -spektra gube deo svoje energije, ali im



Slika 7.29: Histogrami broja skokova amplituda signala iz SAD za binove od 5 s (gornji grafici) i 30 s (donji grafici) klasifikovani prema visini α_{GB} : $\alpha_{GB} > 0^\circ$ (levi grafici) i $\alpha_{GB} < 0^\circ$ (desni grafici).

je preostala energija dovoljna za ponovnu jonizaciju i to sa povećanim presekom za ovaj proces. Pored toga, broj sekundarnih čestica dovoljnih energija za jonizaciju plazme prisutne u niskoj jonosferi se povećava. U ovom drugom slučaju, a priori ne možemo da tvrdimo da će

sve ubrzane čestice stići do posmatranog jonosferskog prostora sa mogućnošću jonizacije, ali je svakako realno pretpostaviti da će se njihova produkcija na dovoljno maloj udaljenosti od trase povećati.



Slika 7.30: Isto kao na Slici 7.29, ali za broj GB-ova sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda.

Kod pozitivnih visina α_{GB} značajni pikovi u histogramima nakon registracije GB-a se

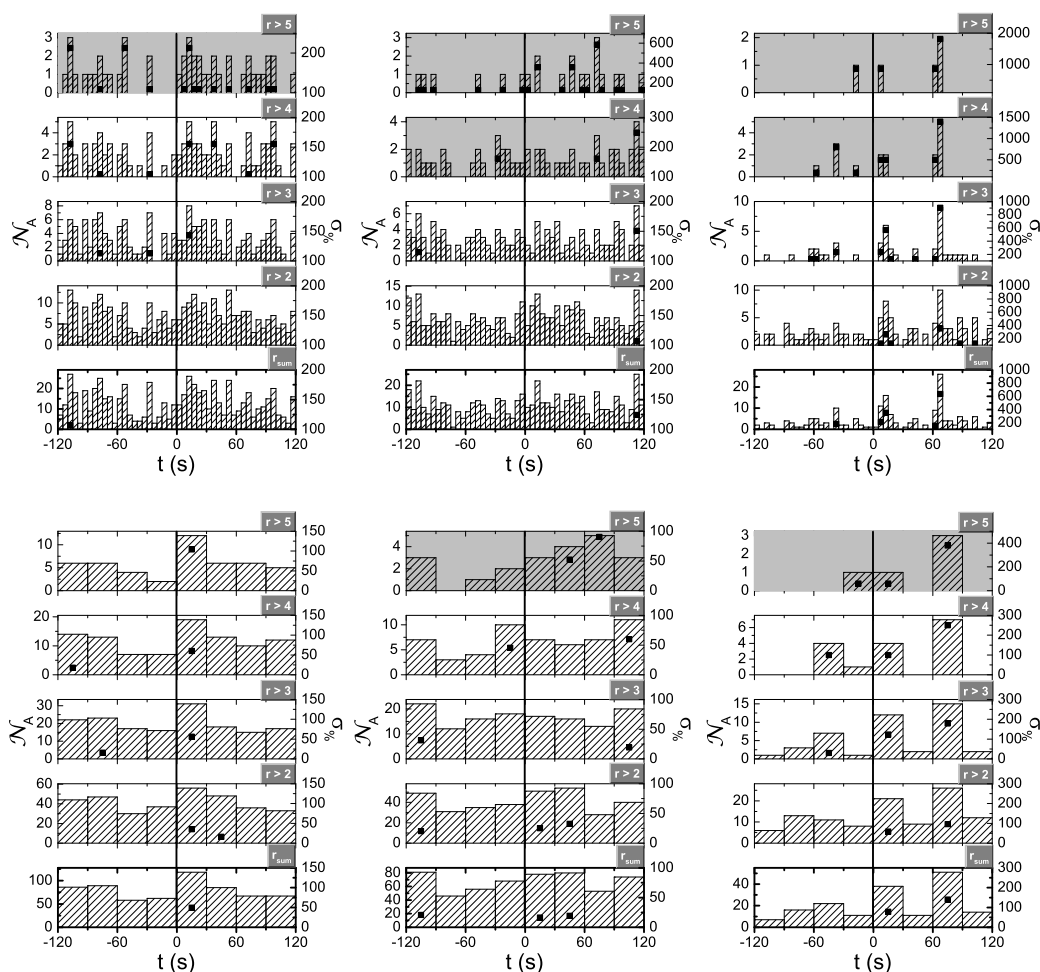
javljaju na sva četiri grafika. Međutim, njihove značajnosti, generalno, ne odstupaju bitno od značajnosti pikova pre registracije GB-a. Kod negativnih visina značajni skokovi se i kod amplitudnih skokova i kod GB-ova sa odgovarajućom reakcijom javljaju u prvih 30 sekundi i nakon 1 min. Drugi interval ukazuje na mogućnost prisustva sekundarnih jonizacija. Takođe, bitno je primetiti da se, za razliku od "vidljivih" upada, u drugom slučaju za binove od 30 s statistički značajni pikovi javljaju, izuzev na jednom panelu, samo nakon inteziviranja upada visokoenergijskih fotona.

Prilikom analize podele GB-ova na "vidljive" i "nevidljive" bitno je predočiti da odnosi manjeg i većeg odbroja (11:9 i 19:15, respektivno), kao i kraćeg i dužeg trajanja (15:15 i 9:11, respektivno) pokazuju da njihovi uticaji ne bi trebalo da imaju presudan značaj u izvedenim zaključcima.

7.3.5 Klasifikacija po osunčanosti putanje signala

Analiza reakcije niske jonosfere na intenzivno visokoenergijsko zračenje u zavisnosti od osunčanosti putanje signala je prikazana na Slikama 7.31 i 7.32. Pouzdanost rezultata u ovom slučaju je najmanja s obzirom na podelu ukupnog uzorka na tri dela, čime se znatno smanjuje broj GB-ova u pojedinačnom poduzorku. To se prvenstveno odnosi na slučaj dnevnog signala koji daje pikove u prvih 30 s i nakon 1 min. Međutim, interesantno je poređenje signala koji se prostiru u delimično osunčanoj i noćnoj trasi. U prvom slučaju se praktično ne može na osnovu statistike tvrditi da se upadi GB-ova mogu detektovati VLF radio talasima, dok je detekcija u drugom slučaju pri širini bina od 30 s (time se postiže bolja statistika) evidentna. Razlog za ovu razliku se pre svega može tražiti u šumu. Naime, u Tabeli 7.5 se vidi približno upola manja minimalna i srednja amplituda šuma kod noćnog signala, što u skladu sa komentarima iz 7.3.2 (primenjeni na signale sa različitih trasa), značajno povećava detektabilnost kratkotrajnih reakcija.

Uticaj odbroja i dužine trajanja GB-ova u ovoj podeli ne možemo dovesti u vezu sa pomenutom različitom detektabilnošću na posmatranom uzorku s obzirom da se ne uočavaju značajna odstupanja u broju odgovarajućih GB-a. Naime, na osnovu podataka iz Tabele 7.2, odnosi brojeva GB-a sa manjim odnosno većim odbrojem za $s = 0, 0.5$ i 1 su 10:10, 14:9 i 6:5, respektivno, a za kraće i duže trajanje 12:8, 13:10 i 5:6. Međutim, interesantan je uticaj vidljivosti GB (odnosi broja "nevidljivih" i "vidljivih" GB-a za $s = 0, 0.5$ i 1 su 13:7, 16:7 i 5:6, respektivno), pre svega za $s = 0.5$. Naime, znatno veći broj GB-ova je za $\alpha_{GB} < 0$

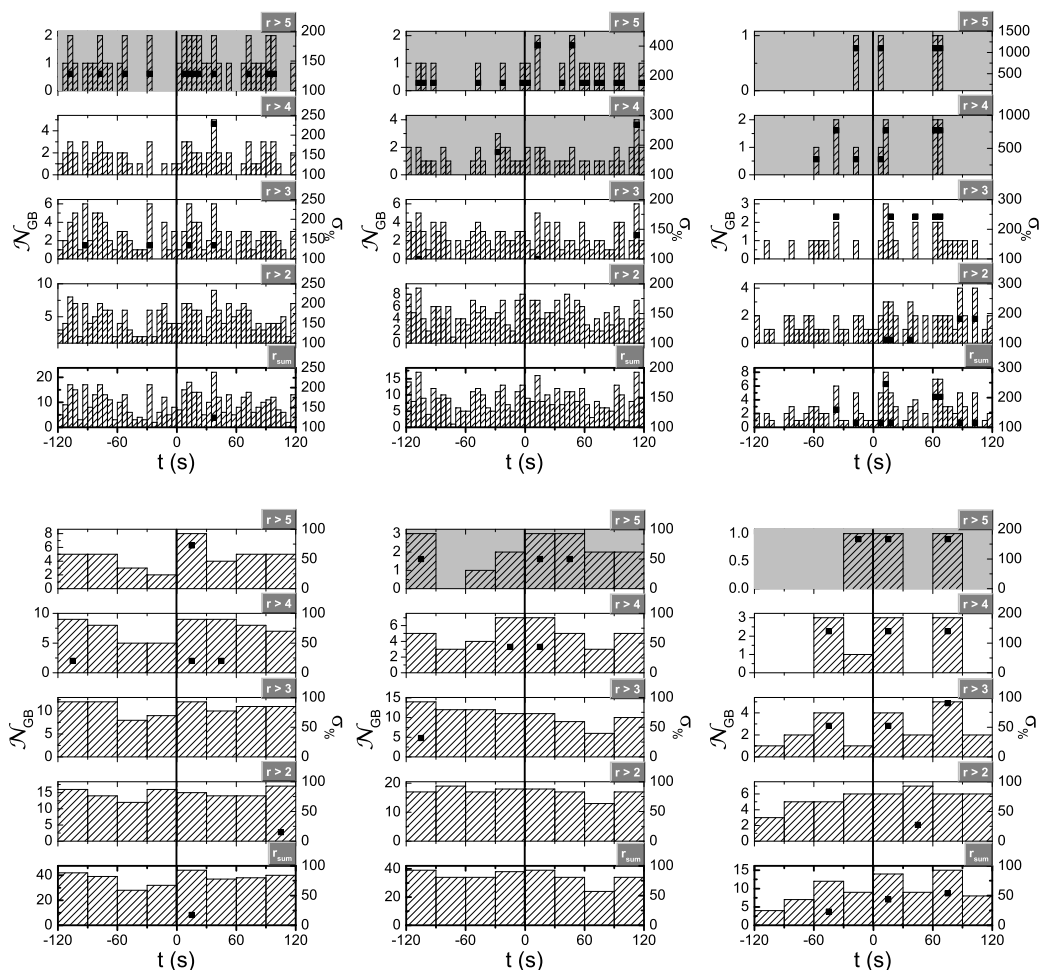


Slika 7.31: Histogrami broja skokova amplituda signala iz SAD za binove od 5 s (gornji grafici) i 30 s (donji grafici) klasifikovani prema osunčanosti putanje: $s = 0$ (levi grafici), $s = 0.5$ (srednji grafici) i $s = 1$ (desni grafici).

što na osnovu analize date u 7.3.4 sugerise na povećanu verovatnoću detekcije GB. Međutim, raspodele date na Slikama 7.29 i 7.30 to ne potvrđuju. Ovo neslaganje ide u prilog značajnosti uticaja šuma na detektabilnost GB pomoću VLF signala.

Tabela 7.5: Maksimalna, minimalna i usrednjena vrednost amplitude šuma za signal iz SAD za slučajeve noćne, delimično osunčane i dnevne trase.

doba dana	A_{summax}	A_{summin}	$\bar{A}_{\text{sum}}$
noć	3.42	0.68	1.59
dlelimično osunčano	3.83	1.45	3.04
dan	3.67	1.88	3.08

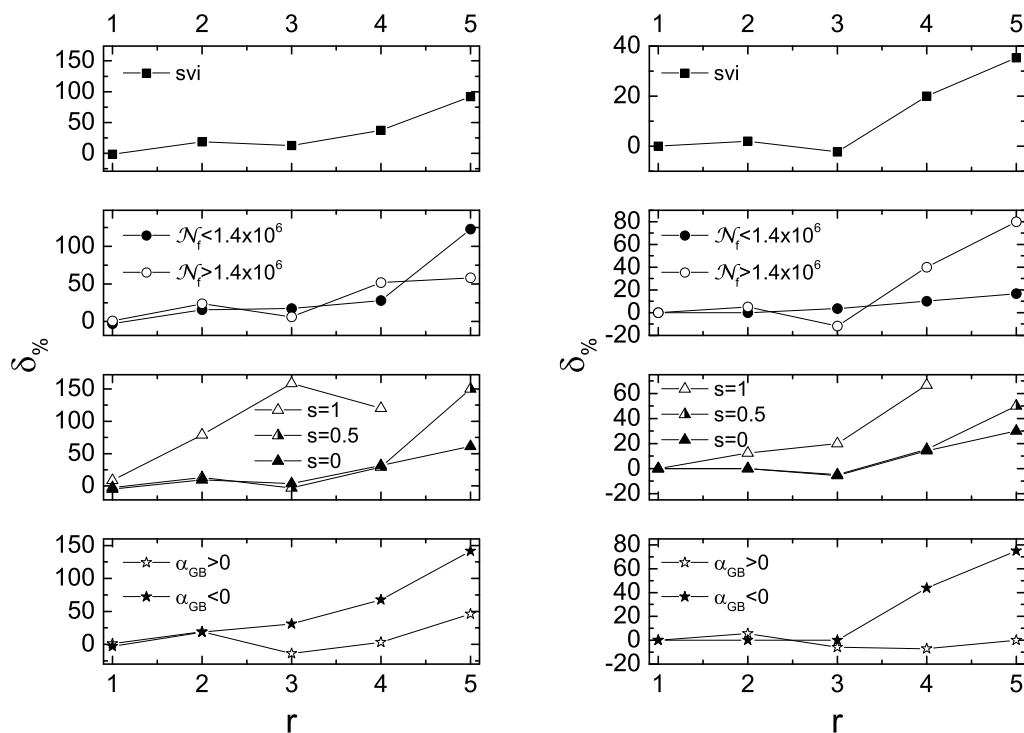


Slika 7.32: Isto kao na Slici 7.31, ali za broj GB-ova sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda.

7.3.6 Sumarni uticaji pre i posle

Procentualni porast odbroja amplitudnih pikova i GB-ova sa odgovarajućom reakcijom posle početka registracije upadnog zraka, dati izrazom (7.16), su prikazani na Slici 7.33 (levi i desni panel, respektivno) gde se vidi tendencija inteziviranja procentualnog porasta odgovarajućih odbroja sa povećanjem intenziteta amplitudnih pikova. Najizraženije su promene kod dnevnog signala mada je u tom slučaju vrlo mali broj GB-ova što dovodi u pitanje pouzdanost izvedenih zaključaka. S druge strane, kod upada čije su napadne tačke vidljive sa centra putanje VLF signala (na površini) praktično nemamo pouzdanu potvrdu merljive reakcije niske jonosfere na GB-ove. Za sve ostale slučajeve dobijeni podaci potvrđuju povećanje i broja amplitudnih pikova i broja GB-ova sa odgovarajućom reakcijom čime se sa velikom sigurnošću može konstatovati da visokoenergijsko zračenje izaziva kratkotrajna povećanja

elektronske koncentracije u najnižoj oblasti jonosfere.



Slika 7.33: Relativna promena broja skokova amplituda signala iz SAD (levi paneli) i broja GB-ova sa prisutnim odgovarajućim skokovima amplituda (desni paneli) u periodu 2 minute nakon početka satelitske registracije GB-a u odnosu na period pre.

Poglavlje 8

Zaključak

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji predstavljaju studiju plazme jonosferske D-oblasti na osnovu podataka registrovanih prijemnikom radio signala vrlo niskih frekvencija lociranim na Institutu za fiziku u Zemunu i uključenim u međunarodnu mrežu Stanford/AWESOME prijemnika za globalna istraživanja VLF signalima.

U disertaciji je prikazana postavka sistema predajnika i AWESOME prijemnika, i detaljno opisan uređaj kojim su izvršena prikazana merenja. Pored toga, opisane su karakteristike plazme D-oblasti koje se odnose na njen sastav, interakciju sa spoljašnjim zračenjem, kao i fizičke i hemijske procese unutar nje. Takođe, dat je pregled mehanizama poremećaja u plazmi D-oblasti i pojava koji ih uzrokuju, i ilustrativno su prikazane promene u signalima nastale kao posledica uticaja različitih izvora.

Akcent u studiji je stavljen na proučavanje poremećaja usled promena u jonizujućem zračenju koje u Zemljinu atmosferu pristiže iz svemira. U tom smislu analize su izvršene u tri različita pravca zasnovana na:

1. Modeliranju reakcije plazme D-oblasti na inteziviranje upadnog jonizujućeg zračenja npr. usled Sunčevih X-flerova.
2. Uvođenju nove procedure za registraciju hidrodinamičkih talasa koja je u konkretnom slučaju primenjena na pojave izlaska i zalaska Sunca.
3. Ispitivanju detektabilnosti uticaja male jonizacione moći u plazmi D-oblasti, primenom na bljeskove γ -zraka.

U cilju modeliranja karakteristika plazme D-oblasti razvijeni su numerička procedura za obradu registrovanih podataka i teorijski model koji se primenjuje na kraj relaksacionog pe-

rioda nakon perturbacije. Pored toga ispitan je i uticaj simultanog pojačanja $\text{Ly}\alpha$ -zračenja sa Sunčevim X-flerom na fotojonizacione procese u D-oblasti. Osnovni rezultati ovih istraživanja (*Nina et al.*, 2011, 2012a,b; *Nina and Čadež*, 2014) su:

1. Određivanje prostorno-vremenske raspodele elektronske koncentracije za konkretne uslove u velikom vremenskom intervalu sa proizvoljnom vremenskom rezolucijom. To, dalje, omogućava izračunavanje više drugih parametara plazme iz jednačina koje sadrže vremenske izvode.
2. Određivanje prostorno-vremenske raspodele brzina proizvodnje i gubitka elektrona, i koeficijenta koji se odnosi na njihove efektivne gubitke tokom relaksacione faze nakon perturbacije. Saturacione vrednosti vremenskih raspodela ovih parametara daju odgovarajuće prostorne raspodele u mirnoj jonosferi.
3. Izračunavanje brzina fotojonizacionih procesa uzrokovanih $\text{Ly}\alpha$ -zračenjem sa Sunca na visinama od 70 km do 80 km.
4. Ustanovljavanje dominacije X-zračenja tokom Sunčevog X-flera i u uslovima kada je pojačano $\text{Ly}\alpha$ -zračenje.

U okviru izrade disertacije razvijena je procedura za određivanje perioda akustičnih i gravitacionih hidrodinamičkih talasa u jonosferskoj D-oblasti. Po prvi put je izvršena odgovarajuća studija za slučaj njihovog pobuđivanja tokom izlazaka i zalazaka Sunca (*Nina and Čadež*, 2013a). Iz ovog istraživanja se mogu izvesti sledeći zaključci:

1. Tokom izlazaka i zalazaka Sunca se ekscituju akustični i gravitacioni talasi.
2. Periodi ovih talasa su u dobrom slaganju sa odgovarajućim vrednostima registrovanih talasa na višim atmosferskim slojevima. To potvrđuje njihovu globalnu prirodu u smislu prostora u kojem se pod različitim fizičkim uslovima prostiru.

U trećem delu ove disertacije je predstavljeno ispitivanje postojanja kratkotrajnih reakcija niske jonosfere (visine od oko 60 km - 90 km) na upade visokoenergijskog elektromagnetnog zračenja (15 keV - 150 keV) registrovanog SWIFT satelitom. Posmatranje jonosfere je vršeno radio talasima emitovanim sa šest predajnika lociranih u SAD, Australiji, Nemačkoj, Islandu, Italiji i Velikoj Britaniji i registrovanih u Srbiji. Na osnovu dobijenih rezultata baziranih na statističkoj analizi 54 satelitski registrovana γ -bljeska mogu se izvesti sledeći zaključci:

- Potvrđena je detektabilnost kratkotrajnih promena u plazmi niske jonosfere pod uticajem γ -bljeskova.
- Povećanje broja amplitudnih skokova registrovanih signala se javlja kako u periodu nekoliko sekundi od početka upadnog snopa tako i kasnije.
- Na detektabilnost γ -bljeskova u niskoj jonosferi utiču karakteristike zračenja (intenzitet, dužina trajanja i upadni pravac u odnosu na trajektoriju posmatranog signala), jonosfere (osunčanost) i signala (šum).

Istraživanja prikazana u ovoj disertaciji su otvorila nova pitanja na koje treba dati odgovor i koja se odnose na:

1. Uticaje stanja mirne jonosfere (razlikuju se tokom dana, sezone, godine, Sunčevog ciklusa) na njene promene izazvane različitim procesima.
2. Prostorno-vremenske raspodele brzina proizvodnje i gubitaka elektrona, i koeficijenta koji se odnosi na njihove efektivne gubitke tokom celog perioda perturbacije.
3. Detekcije hidrodinamičkih talasa u ovoj oblasti inteziviranih različitim događajima.
4. Detektabilnost elektromagnetnog i čestičnog zračenja različitih energija koje slabo jonizuje konstituente u D-oblasti.

Njihova studija će biti predmet naših predstojećih istraživanja koja će se zasnivati na procedurama razvijenim u ovoj disertaciji.

Literatura

- Afraimovich, E. L. (2008), First GPS-TEC evidence for the wave structure excited by the solar terminator, *Earth, Planets and Space*, 60, 895.
- Aikin, A. C., J. A. Kane, and J. Troim (1964), Some Results of Rocket Experiments in the Quiet D Region, *Journal of Geophysical Research*, 69, 4621.
- Barabash, V., A. Osepian, P. Dalin, and S. Kirkwood (2012), Electron density profiles in the quiet lower ionosphere based on the results of modeling and experimental data, *Annales Geophysicae*, 30, 1345.
- Belenkiy, M. I., A. B. Orlov, G. A. Petrova, and A. N. Uvarov (2006), Modeling of the electron density profile of the lower ionosphere (45-75 km) for sudden ionospheric disturbance conditions based on the data on sudden phase anomalies of VLF signals, *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 6, G13007.
- Belrose, J. S., and M. J. Burke (1964), Study of the Lower Ionosphere using Partial Reflection: 1. Experimental Technique and Method of Analysis, *Journal of Geophysical Research*, 69, 2799.
- Berger, M. J., J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, J. Chang, J. S. Coursey, R. Sukumar, and D. S. Zucker (1998), *XCOM: Photon Cross Sections Database*. Available at <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/Text/XCOM.html>.
- Bilitza, D. (1992), International reference ionosphere (1990), *Planetary and Space Science*, 40, 544.
- Blaunstein, N., and C. Christodoulou (2006), *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links: Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*, Wiley, USA.
- Bourdeau, R. E., A. C. Aiken, and D. J. L. (1965), *The Lower Ionosphere at Solar Minimum*, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt.
- Briggs, M. S., V. Connaughton, C. Wilson-Hodge, R. D. Preece, G. J. Fishman, R. M. Kippen, P. N. Bhat, W. S. Paciesas, V. L. Chaplin, C. A. Meegan, A. von Kienlin, J. Greiner, J. R. Dwyer, and D. M. Smith (2011), Electron-positron beams from terrestrial lightning observed with fermi gbm, *Geophysical Research Letters*, 38(2), L02808.
- Budden, K. G. (1988), *The Propagation of Radio Waves*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Carpenter, G. B., and A. L. Whitson (1965), Observation of NPG VLF Transmissions at Tracy, California During Path Equinox, *Radio science*, 69D(4), 4621.

- CCIR (1986), *World Distribution and Characteristics of Atmospheric radio Noise*, CCIR Report 322, Documents of Xth Plenary Assembly, International Telecommunications Union, Geneva.
- Chakrabarti, S. K., S. K. Mandal, S. Sasmal, D. Bhowmick, A. K. Choudhury, and N. N. Patra (2010), First VLF detections of ionospheric disturbances due to Soft Gamma Ray Repeater SGR J1550-5418 and Gamma Ray Burst GRB 090424, *Indian Journal of Physics*, 84, 1461.
- Chamberlin, P. C., T. N. Woods, and F. G. Eparvier (2007), Flare Irradiance Spectral Model (FISM): Daily component algorithms and results, *Space Weather*, 5, S07005.
- Chamberlin, P. C., T. N. Woods, and F. G. Eparvier (2008), Flare Irradiance Spectral Model (FISM): Flare component algorithms and results, *Space Weather*, 6, S05001.
- Clilverd, M. A., N. R. Thomson, and C. J. Rodger (1999), Sunrise effects on VLF signals propagating over a long north-south path, *Radio Science*, 34, 939.
- Clilverd, M. A., C. J. Rodger, and D. Nunn (2004), Radiation belt electron precipitation fluxes associated with lightning, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109, A12208.
- Clilverd, M. A., C. J. Rodger, N. R. Thomson, J. B. Brundell, T. Ulich, J. Lichtenberger, N. Cobbett, A. B. Collier, F. W. Menk, A. Seppälä, P. T. Verronen, and E. Turunen (2009), Remote sensing space weather events: Antarctic-Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition-VLF Atmospheric Research Konsortium network, *Space Weather*, 7, S04001.
- Cohen, M. B., U. S. Inan, and E. W. Paschal (2010), Sensitive Broadband ELF/VLF Radio Reception With the AWESOME Instrument, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48, 3.
- Correia, E., P. Kaufmann, J.-P. Raulin, F. Bertoni, and H. R. Gavilan (2011), Analysis of day-time ionosphere behavior between 2004 and 2008 in Antarctica, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 2272.
- Cotts, B. R. T., U. S. Inan, and N. G. Lehtinen (2011), Longitudinal dependence of lightning-induced electron precipitation, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 116, A10206.
- Dautermann, T., E. Calais, P. Lognonné, and G. S. Mattioli (2009), Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling after the 2003 explosive eruption of the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, *Geophysical Journal International*, 179, 1537.
- De Keyser, J., and V. Čadež (2001a), Excitation of low-frequency fluctuations at the magnetopause by intermittent broadband magnetosheath waves, *Journal of Geophysical Research*, 106, 29,467.
- De Keyser, J., and V. Čadež (2001b), Transient development of magnetohydrodynamic wave mode conversion layers, *Journal of Geophysical Research*, 106, 15,609.
- de Larquier, S., V. P. Pasko, H. C. Stenbaek-Nielsen, C. R. Wilson, and J. V. Olson (2010), Finite-difference time-domain modeling of infrasound from pulsating auroras and comparison with recent observations, *Geophysical Research Letters*, 37, L06804.

- Drobzheva, Y., and V. Krasnov (2006), Acoustic energy transfer to the upper atmosphere from surface chemical and underground nuclear explosions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(3-5), 578.
- Drobzheva, Y. V., and V. M. Krasnov (2003), The acoustic field in the atmosphere and ionosphere caused by a point explosion on the ground, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 369.
- Evans, J. V. (1969), *Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar*, in Proceedings of the IEEE, 57(4), 496.
- Fadnavis, S., D. Siingh, and R. P. Singh (2009), Mesospheric inversion layer and sprites, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 114, D23307.
- Ferguson, J. A. (1980), *Ionospheric profiles for predicting nighttime VLF/LF propagation*, Final Report, Jan. 1974 - Sep. 1979 Naval Ocean Systems Center, Eds Northrop, J., Shockley, R. C. and Hansen, P. G. San Diego.
- Ferguson, J. A. (1992), *A review of the ionospheric model for the long wave prediction capability*, Final Report Naval Command, Control and Ocean Surveillance Center, Eds Hanson, F. E., Katz, D. L. and Poirier, P., San Diego.
- Ferguson, J. A. (1998), *Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0*, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego.
- Fishman, G. J., and U. S. Inan (1988), Observation of an ionospheric disturbance caused by a gamma-ray burst, *Nature*, 331, 418.
- Fishman, G. J., P. N. Bhat, R. Mallozzi, J. M. Horack, T. Koshut, C. Kouveliotou, G. N. Pendleton, C. A. Meegan, R. B. Wilson, W. S. Paciesas, S. J. Goodman, and H. J. Christian (1994), Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin, *Science*, 264, 1313.
- Friedrich, M., and K. M. Torkar (2001), FIRI: A semiempirical model of the lower ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 106, 21,409.
- Fröhlich, C. (2009), Evidence of a long-term trend in total solar irradiance, *Astronomy and Astrophysics*, 501, L27.
- Galushko, V. G., V. V. Paznukhov, Y. M. Yampolski, and J. C. Foster (1998), Incoherent scatter radar observations of agw/tid events generated by the moving solar terminator, *Annales Geophysicae*, 16(7), 821.
- Gopalswamy, N. (2009), *Coronal mass ejections and space weather*, in Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES) Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium. Edited by T. Tsuda, R. Fujii, K. Shibata, and M.A. Geller. Tokyo: TERRAPUB, 77.
- Grubor, D. P., D. M. Šulić, and V. Žigman (2008), Classification of X-ray solar flares regarding their effects on the lower ionosphere electron density profile, *Annales Geophysicae*, 26, 1731.
- Gurevich, A. V., and K. P. Zybin (2001), REVIEWS OF TOPICAL PROBLEMS: Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms, *Physics Uspekhi*, 44, 1119.

- Haldoupis, C., R. J. Steiner, . Mika, S. Shalimov, R. A. Marshall, U. S. Inan, T. Bösinger, and T. Neubert (2006), "early/slow" events: A new category of vlf perturbations observed in relation with sprites, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *111*, A11321.
- Han, F., S. A. Cummer, J. Li, and G. Lu (2011), Daytime ionospheric D region sharpness derived from VLF radio atmospherics, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *116*, A05314.
- Hargreaves, J. K. (2005), A new method of studying the relation between ionization rates and radio-wave absorption in polar-cap absorption events, *Annales Geophysicae*, *23*, 359.
- Heavner, M. J., D. D. Sentman, D. R. Moudry, E. M. Wescott, C. Siefring, J. S. Morrill, and E. J. Bucsela (2000), *Sprites, blue jets, and elves: optical evidence of energy transport across the stratopause*, in *Atmospheric Science Across the Stratopause*, Eds Siskind, D. E., Eckermann, S. D. and Summers, M. E., American Geophysical Union, Washington DC.
- Heavner, M. J., J. S. Morrill, C. Siefring, D. D. Sentman, D. R. Moudry, E. M. Wescott, and E. J. Bucsela (2010), Near-ultraviolet and blue spectral observations of sprites in the 320-460 nm region: N₂ (2PG) emissions, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *115*, A00E44.
- Helliwell, R. A., J. P. Katsufakis, and M. L. Trimpi (1973), Whistler-induced amplitude perturbation in vlf propagation, *Journal of Geophysical Research*, *78*(22), 4679.
- Hernández-Pajares, M., J. M. Juan, and J. Sanz (2006), Medium-scale traveling ionospheric disturbances affecting GPS measurements: Spatial and temporal analysis, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, *111*, A07S11.
- Hudec, R., M. Spurny, M. Krizek, P. Pata, R. Slosiar, M. Rerabek, and M. Klima (2010), Detection of GRBs and OTs by All-Sky Optical and SID Monitors, *Advances in Astronomy*, *2010*, 428943.
- Hurford, G., R. Schwartz, S. Krucker, R. Lin, D. Smith, and N. Vilmer (2003), First gamma-ray images of a solar flare, in *International Cosmic Ray Conference*, edited by T. Kajita, Y. Asaoka, A. Kawachi, Y. Matsubara, and M. Sasaki, p. 3203, Universal Academy Press, Tokyo, Japan.
- Inan, U. S., D. C. Shafer, W. Y. Yip, and R. E. Orville (1988), Subionospheric vlf signatures of nighttime d region perturbations in the vicinity of lightning discharges, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *93*(A10), 11455.
- Inan, U. S., F. A. Knifsend, and J. Oh (1990), Subionospheric VLF 'imaging' of lightning-induced electron precipitation from the magnetosphere, *Journal of Geophysical Research*, *95*, 17217.
- Inan, U. S., T. F. Bell, and J. V. Rodriguez (1991), Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning, *Journal of Geophysical Research*, *18*, 705.
- Inan, U. S., N. G. Lehtinen, R. C. Moore, K. Hurley, S. Boggs, D. M. Smith, and G. J. Fishman (2007), Massive disturbance of the daytime lower ionosphere by the giant γ -ray flare from magnetar SGR 1806-20, *Geophysical Research Letters*, *34*, L08103.

- Jagtap, U. S. (2012), Studies of F-region using night airglow at a low latitude station, Kolhapur, M.S. (Geogr. Lat., 16.8° N; long 74.2° E; dip. Lat., 10.6° N), *Doctoral dissertation*, Shivaji University, Kolhapur, India .
- Kiryushkin, V. V., E. L. Afraimovich, and A. A. Disenov (2008), GPS monitoring of ionospheric disturbances generated during rocket launches at large distances from launch sites, *Geomagnetism and Aeronomy/Geomagnetizm i Aeronomiia*, 48, 352.
- Kolarski, A., D. Grubor, and D. Šulić (2011), Diagnostics of the Solar X-Flare Impact on Lower Ionosphere through Seasons Based on VLF-NAA Signal Recordings, *Baltic Astronomy*, 20, 591.
- Kull, A., E. Kopp, C. Granier, and G. Brasseur (1997), Ions and electrons of the lower-latitude d region, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 102(A5), 9705.
- Lehtinen, N. G., T. F. Bell, and U. S. Inan (1999), Monte Carlo simulation of runaway MeV electron breakdown with application to red sprites and terrestrial gamma ray flashes, *Journal of Geophysical Research*, 104, 24699.
- Lin, R., S. Krucker, G. Hurford, D. Smith, H. Hudson, G. Holman, R. Schwartz, B. Dennis, G. Share, R. Murphy, A. Emslie, C. Johns-Krull, and N. Vilmer (2003), Rhessi observations of particle acceleration and energy release in an intense solar gamma-ray line flare, *Astrophys. J. Lett.*, 595, L69.
- Mallick, S., V. A. Rakov, and J. R. Dwyer (2012), A study of X-ray emissions from thunderstorms with emphasis on subsequent strokes in natural lightning, *Journal of Geophysical Research*, 117, D16107.
- McCarthy, M. P., and G. K. Parks (1992), On the Modulation of X Ray Fluxes in Thunderstorms, *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 97, 5857.
- McEwan, M., and F. Phillips (1978), *Chemistry of the Atmosphere*, Mir Publishers, Moscow.
- McKinnell, L.-A., and M. Friedrich (2007), A neural network-based ionospheric model for the auroral zone, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 1459.
- McRae, W. M., and N. R. Thomson (2000), VLF phase and amplitude: daytime ionospheric parameters, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 609.
- McRae, W. M., and N. R. Thomson (2004), Solar flare induced ionospheric D-region enhancements from VLF phase and amplitude observations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66, 77.
- Mitra, A. P. (1977), *Ionospheric Effects of Solar Flares*, Mir, Moscow.
- Molchanov, O., M. Hayakawa, T. Oudoh, and E. Kawai (1998), Precursory effects in the subionospheric {VLF} signals for the kobe earthquake, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 105, 239.
- Morfitt, D. G. (1977), Effective electron density distributions describing VLF/LF propagation data, *Tech. rep.* 141, Naval Ocean Systems Center, SanDiego.

- Morfitt, D. G., and C. H. Shellman (1976), *MODESRCH, an improved computer program for obtaining ELF/VLF mode constants in an Earth-ionosphere waveguide*, Defense Nuclear Agency (DNA) Interim Report 77T, Naval electronics lab center, San Diego.
- Morgan, R. R. (1968), *World-wide VLF effective conductivity map*, Report 8013F-1, Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh.
- Nagano, I., S. Yagitani, K. Miyamura, and S. Makino (2003), Full-wave analysis of elves created by lightning-generated electromagnetic pulses, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 615.
- Nath, N., and C. Setty (1976), The d-region ion composition, *pure and applied geophysics*, 114(6), 891–908, doi:10.1007/BF00876189.
- Nicolet, M., and A. C. Aikin (1960), The Formation of the D Region of the Ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 65, 1469.
- Nina, A., V. Čadež, V. A. Srećković, and D. Šulić (2011), The Influence of Solar Spectral Lines on Electron Concentration in Terrestrial Ionosphere, *Baltic Astronomy*, 20, 609.
- Nina, A., and V. M. Čadež (2012), *Modal frequencies of ionospheric perturbations induced by solar X-flares*, in Contributed papers and abstracts of invited lectures and progress reports of the 26th Summer School and International Symposium on the Physics of Ionized Gases, Eds Kuraica, M. and Mijatović Z., University of Novi Sad, Faculty of Sciences, Department of Physics, Novi Sad, 379.
- Nina, A., V. Čadež, V. Srećković, and D. Šulić (2012a), Altitude distribution of electron concentration in ionospheric D-region in presence of time-varying solar radiation flux, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 279, 110.
- Nina, A., V. Čadež, D. Šulić, V. Srećković, and V. Žigman (2012b), Effective electron recombination coefficient in ionospheric D-region during the relaxation regime after solar flare from February 18, 2011, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 279, 106.
- Nina, A. (2013), *Perturbations of the terrestrial low ionosphere caused by solar flares*, in Publications of the Astronomical Society "Ruđer Bošković" Belgrade, No. 12, Proceedings of the VIII Serbian-Bulgarian astronomical conference, edited by Dimitrijević, M. S. and Tsvetkov K., 289.
- Nina, A., and V. M. Čadež (2013a), Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by vlf radio waves, *Geophysical Research Letters*, 40(18), 4803.
- Nina, A., and V. M. Čadež (2013b), *Peculiarities of ionospheric response to solar eruptive events*, in Publ. Astron. Obs. Belgrade, Proceedings of the INTERNATIONAL BELIS-SIMA CONFERENCE, vol. 92, edited by Samurović, S., Vukotić B. and Mičić M., Astronomical Observatory, Belgrade, 157.
- Nina, A., V. M. Čadež, L. Č. Popović, V. A. Srećković, D. Jevremović, and S. Simić (2013), *Dijagnostika perturbacija plazme niske jonosfere vlf radio talasima u Zborniku radova XII Kongresa fizičara Srbije*, Urednici. Labat, J., Cvetanović, N., Dojčinović, I., Društvo fizičara Srbije, Beograd, 388.

- Nina, A., and Čadež (2014), Electron production by solar Ly- α line radiation in the ionospheric D-region, *Advances in Space Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.042>.
- Osepian, A., S. Kirkwood, P. Dalin, and V. Tereschenko (2009), D-region electron density and effective recombination coefficients during twilight - experimental data and modelling during solar proton events, *Annales Geophysicae*, 27, 3713.
- Paschal, E. W. (1980), *The design of broad-band VLF receivers with air-core loop antennas*, Stanford Univ., Stanford
- Pasko, V. P., U. S. Inan, T. F. Bell, and Y. N. Taranenko (1997), Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere, *Journal of Geophysical Research*, 102, 4529.
- Pasko, V. P., M. A. Stanley, J. D. Mathews, U. S. Inan, and T. G. Wood (2002), Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere, *Nature*, 416, 152.
- Pierce, E. T. (1976), Atmospheric electricity and earthquake prediction, *Geophysical Research Letters*, 3(3), 185.
- Ratcliffe, J. A. (1972), *An Introduction to the Ionosphere and the Magnetosphere*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Raulin, J.-P., P. Correia de Matos David, R. Hadano, A. C. V. Saraiva, E. Correia, and P. Kaufmann (2009), The South America VLF NETwork (SAVNET), *Earth Moon and Planets*, 104, 247.
- Raulin, J.-P., G. Trottet, M. Kretzschmar, E. L. Macotela, A. Pacini, F. C. P. Bertoni, and I. E. Dammasch (2013), Response of the low ionosphere to X-ray and Lyman- α solar flare emissions, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 118, 570.
- Rishbeth, H., and O. K. Garriott (1969), *Introduction to ionospheric physics*, Academic Press, New York.
- Roussel-Dupré, R., and A. V. Gurevich (1996), On runaway breakdown and upward propagating discharges, *Journal of Geophysical Research*, 101, 2297.
- Row, R. V. (1967), Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake, *Journal of Geophysical Research*, 72(5), 1599.
- Rowe, J. N. (1972), *Model studies of the lower ionosphere*, Sci. Rep.No. 406, Pennsylvania State Univ., Univ. Park, USA.
- Rowland, H. L., R. F. Fernsler, and P. A. Bernhardt (1996), Breakdown of the neutral atmosphere in the D region due to lightning driven electromagnetic pulses, *Journal of Geophysical Research*, 101, 7935.
- Rozhnoi, A., S. Shalimov, M. Solovieva, B. Levin, M. Hayakawa, and S. Walker (2012), Tsunami-induced phase and amplitude perturbations of subionospheric VLF signals, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 117, A09313.

- Sagar, B. R. (2012), *Simulation of Transport of Gamma-Rays Through Atmosphere Using Monte Carlo Method for The Taranis Mission of CNES*, Thesis, Luleå University of Technology Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, France.
- Scherrer, D., M. Cohen, T. Hoeksema, U. Inan, R. Mitchell, and P. Scherrer (2008), Distributing space weather monitoring instruments and educational materials worldwide for IHY 2007: The AWESOME and SID project, *Advances in Space Research*, 42, 1777.
- Sentman, D. D., E. M. Wescott, R. H. Picard, J. R. Winick, H. C. Stenbaek-Nielsen, E. M. Dewan, D. R. Moudry, F. T. Sa~O Sabbas, M. J. Heavner, and J. Morrill (2003), Simultaneous observations of mesospheric gravity waves and sprites generated by a midwestern thunderstorm, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65, 537.
- Simões, F., R. Pfaff, J.-J. Berthelier, and J. Klenzing (2012), A Review of Low Frequency Electromagnetic Wave Phenomena Related to Tropospheric-Ionospheric Coupling Mechanisms, *Space Science Reviews*, 168, 551.
- Sindelarova, T., Z. Mosna, D. Buresova, J. Chum, L.-A. McKinnell, and R. Athieno (2012), Observations of wave activity in the ionosphere over South Africa in geomagnetically quiet and disturbed periods, *Advances in Space Research*, 50, 182.
- Singh, A., D. Siingh, R. Singh, and S. Mishra (2011a), Electrodynamical coupling of earth's atmosphere and ionosphere: An overview, *International Journal of Geophysics*, 2011, ID 971, 302.
- Singh, R., B. Veenadhari, A. K. Maurya, M. B. Cohen, S. Kumar, R. Selvakumaran, P. Pant, A. K. Singh, and U. S. Inan (2011b), D-region ionosphere response to the total solar eclipse of 22 July 2009 deduced from ELF-VLF tweek observations in the Indian sector, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 116, A10301.
- Smith, L. G. (1969), *Langmuir probes in the ionosphere*, in *Small Rocket Techniques*, by K. I. Maeda, 1, North Holland, Amsterdam.
- Swamy, A. C. B. (1991), A new technique for estimating D-region effective recombination coefficients under different solar flare conditions, *Astrophysics and Space Science*, 185, 153.
- Tanaka, Y. T., J.-P. Raulin, F. C. P. Bertoni, P. R. Fagundes, J. Chau, N. J. Schuch, M. Hayakawa, Y. Hobara, T. Terasawa, and T. Takahashi (2010), First Very Low Frequency Detection of Short Repeated Bursts from Magnetar SGR J1550-5418, *The Astrophysical Journal Letters*, 721, L24.
- Taranenko, Y. N., U. S. Inan, and T. F. Bell (1993b), The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: Excitation of optical emissions, *Geophysical Research Letters*, 20, 2675.
- Thomas, L. (1976), No^+ and water cluster ions in the d-region, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 38(1), 61.
- Thomas, L., and M. Bowman (1985), Model studies of the d-region negative-ion composition during day-time and night-time, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 47(6), 547.

- Thomas, L., P. Gondhalekar, and M. Bowman (1973), The influence of negative-ion changes in the d-region during sudden ionospheric disturbances, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 35(3), 385.
- Thomson, N. R. (1993), Experimental daytime VLF ionospheric parameters, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 55, 17.
- Thomson, N. R., C. J. Rodger, and M. A. Clilverd (2005), Large solar flares and their ionospheric D region enhancements, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 110, A06306.
- Turunen, E., J. Tolvanen, M. H., and H. Ranta (1992), *D Region Ion Chemistry Model* in STEP Handbook of Ionospheric Models.
- Turunen, E., H. Matveinen, J. Tolvanen, and H. Ranta (1996), *D Region Ion Chemistry Model*, in STEP Handbook of Ionospheric Models, 1.
- Šulić, D., A. Nina, and V. Srećković (2010), Numerical Simulations Of The Effect Of Localised Ionospheric Perturbations On Subionospheric VLF Propagation, *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd*, Proceedings of 24th summer school and international symposium on the physics of ionized gases, 23 August - 3 September 2010, Donji Milanovac, Serbia, Eds: Popović L. Č. and Kuraica M. M., 89, 391.
- Žigman, V., D. Grubor, and D. Šulić (2007), D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 775.
- Valníček, B., and P. Ranzinger (1972), X-ray emission and D-region "sluggishness", *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 23, 318.
- Veronis, G., V. P. Pasko, and U. S. Inan (1999), Characteristics of mesospheric optical emissions produced by lighting discharges, *Journal of Geophysical Research*, 104, 12,645.
- Wait, J. R., and K. P. Spies (1964), *Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves*, NBS Technical Note 300, Colorado.
- William, s., and C. I. Foley (1978), *Steady-state Multi-ion Disturbed D-region Model*, Hanscom AFB, Mass.: Aeronomy Division, Air Force Geophysics Laboratory, USA.
- Woods, T. N., W. K. Tobiska, G. J. Rottman, and J. R. Worden (2000), Improved solar Lyman α irradiance modeling from 1947 through 1999 based on UARS observations, *Journal of Geophysical Research*, 105, 27195.
- Yang, Y.-M., J. L. Garrison, and S.-C. Lee (2012), Ionospheric disturbances observed coincident with the 2006 and 2009 North Korean underground nuclear tests, *Geophysical Research Letters*, 39, L02103.
- Yeh, K. C., and C. H. Liu (1972), *Theory of ionospheric waves*, Academic Press, New York.

BIOGRAFIJA

Aleksandra Nina (rođ. Stojković) je rođena 13. 08. 1977. godine u Bačkoj Palanci. Osnovnu školu je završila u Baču, a gimnaziju u Bačkoj Palanci. 1996. godine je upisala Fizički fakultet u Beogradu (smer Teorijska i eksperimentalna fizika) gde je 2002. godine diplomirala sa prosekom 9.43. Magistarske studije je upisala 2002. i završila 2008. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru Primenjena elektromagnetika i optoelektronika sa temom "Dinamika i neutralizacija naelektrisanih čestica u visokim poljima u blizini elektroda u uređajima za proizvodnju integrisanih kola" i prosečnom ocenom 9.83. U Institutu za fiziku u Zemunu, u Laboratoriji za gasnu elektroniku, je zaposlena 2003. godine. Nakon magistrature rad nastavlja u Laboratoriji za Fiziku plazme, takođe u Institutu za fiziku. Doktorske studije je upisala na Fizičkom fakultetu u Beogradu na smeru Fizika jonizovanih gasova, plazme i kvantne optike 2008. godine.

SPISAK RADOVA

(povezanih sa doktorskom disertacijom)

Radovi Aleksandre Nina koji su, kao rezultat rada na doktorskoj disertaciji, objavljeni u vodećim međunarodnim časopisima su:

1. **Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves**, A. Nina, V. M. Čadež, *Geophys. Res. Lett.*, (2013), 40 (18), 4803-4807, (M21).
2. **The influence of solar spectral lines on electron concentration in terrestrial ionosphere**, A. Nina, V. Čadež, V. Srećković, D. Šulić, *Balt. Astron.*, vol. 20, 609-612, 2011, (M23).
3. **Altitude distribution of electron concentration in ionospheric D-region in presence of time-varying solar radiation flux**, A. Nina, V. Čadež, V. Srećković, D. Šulić, *Nucl. Instrum. Meth. B*, (2012), 279, 110-113, (M21).
4. **Effective electron recombination coefficient in ionospheric D-region during the relaxation regime after solar flare from February 18, 2011**, A. Nina, V. Čadež, D. Šulić, V. Srećković, V. Žigman, *Nucl. Instrum. Meth. B*, (2012), 279, 106-109, (M21).
5. **Electron production by solar Ly- α line radiation in the ionospheric D-region**, A. Nina and V. Čadež, *Adv. Space. Res.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.042>, (M23).

Ostali radovi vezani za ovu disertaciju su:

a) Radovi saopšteni na međunarodnim skupovima štampani u celini

1. **Perturbations of the terrestrial low ionosphere caused by solar flares**, A. Nina, in Publications of the Astronomical Society "Ruđer Bošković", Belgrade, No. 12, Proceedings of the VIII Serbian-Bulgarian astronomical conference, Eds Dimitrijević, M. S. and Tsvetkov K., (2013), 289-295.

2. **Dijagnostika perturbacija plazme niske jonosphere VLF radio talasima**, A.Nina, V.M. Čadež, L. Č. Popović, V. A. Srećković, D. Jevremović i S. Simić, Zbornik radova, XII Kongres fizičara Srbije, urednici: J. Labat, N. Cvetanović, I. Dojčinović, (2013), 388-392.
3. **Peculiarities of ionospheric response to solar eruptive events**, V. Čadež and A. Nina, Publ. Astron. Obs. Belgrade No. 92, Proceedings of the International BELISSIMA conference, Eds Srđan Samurović, Branislav Vukotić and Miroslav Mičić, (2013), 157 - 160.
4. **Modal frequencies of ionospheric perturbations induced by solar X-flares**, Nina, A., and V. M. Čadež, Contributed papers and abstracts of invited lectures and progress reports of the 26th Summer school and international symposium on the physics of ionized gases, Eds Kuraica, M. and Mijatović Z., (2012), 379-382.
5. **Numerical Simulations Of The Effect Of Localised Ionospheric Perturbations On Subionospheric VLF Propagation**, Šulić, D., A. Nina, and V. Srećković, Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd, 89, Proceedings of 24th Summer school and international symposium on the physics of ionized gases, 23 August - 3 September 2010, Donji Milanovac, Serbia, Eds Popović L. Č. and Kuraica M. M., (2010), 391-395.

b) Predavanja po pozivu na međunarodnim skupovima štampana u izvodu

1. **Photo-ionization in the ionospheric D region induced by the solar Ly- α line emission**, A. Nina and V.M. Čadež, IX Serbian conference on spectral line shapes in astrophysics, May 13-17, 2013, Banja Koviljača, Serbia, Book of Abstracts, Eds. L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević, Z. Simić and M. Stalevski, (2013), 42.

c) Radovi saopšteni na međunarodnim skupovima štampani u izvodu

1. **Statistical analysis of D-region electron density during solar flares from VLF radio measurements**, Šulić D., Nina A., Srećković V., Čadež V., XVI National Conference of Astronomers of Serbia, Belgrade, 10-12 October 2011, Book of abstracts, Ed. M. Stojanović, (2011), 54.

2. **Altitude distribution of electron concentration in the ionospheric D-region in presence of time-varying solar radiation flux**, A. Nina, V. Čadež, D. Šulić, V. Srećković, Book of Abstracts, 5th Conference on Elementary Processes in Atomic, Belgrade, Serbia, June 21 - 25, Eds. A. Milosavljević, S. Dujko and B. Marinković, (2011), 60.
3. **Effective electron recombination coefficient in the ionospheric D-region during the relaxation regime following a solar flare on February 18, 2011**, Nina, A., V. Čadež, D. Šulić, V. Srećković, V. Žigman, Book of Abstracts, 5th Conference on Elementary Processes in Atomic, Belgrade, Serbia, June 21 - 25, Eds. A. Milosavljević, S. Dujko and B. Marinković, (2011), 61.
4. **VLF remote sensing of the lower ionospheric disturbances produced by solar flares and precipitation of energetic electrons**, D. M. Šulić, V. Žigman, A. M. Nina and V. A. Srećković, VIII Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, 6-10 June 2011, Divčibare, Serbia, Book of abstracts, Eds L. Č. Popović, D. Jevremović i D. Ilić, (2011), 62.
5. **Possible detection of the GRBs and γ -ray echos by analyzing the ionospheric perturbations**, A. Nina, L. Č. Popović, V. A. Srećković and S. Simić IX Serbian conference on spectral line shapes in astrophysics, May 13-17, 2013, Banja Koviljača, Serbia, Book of Abstracts, Eds. L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević, Z. Simić and M. Stalevski, (2013), 70.
6. **Perturbations of the lower ionosphere due to the γ , X and UV stellar radiation**, V. A. Srećković, A. Nina, D. Šulić and A. A. Mihajlov IX SERBIAN CONFERENCE ON SPECTRAL LINE SHAPES IN ASTROPHYSICS May 13-17, 2013, Banja Koviljača, Serbia Book of Abstracts, Eds. L. Č. Popović, M. S. Dimitrijević, Z. Simić and M. Stalevski, (2013), 75.
7. **Study of the Observed Amplitude and Phase Perturbations on VLF Signals From Lighting Induced Electron Precipitation and Reconstruction of D-region Electron Density Height Profile**, Desanka Šulić, Vida Žigman, Aleksandra Nina 4th VERSIM workshop, September 13-17 2010, Prague, Czech Republic, Book of abstracts, (2010), 48.

d) Radovi saopšteni na radionicama štampani u izvodu

1. **Importance Of Very Low Frequency Radio Signal Data Registered By VLF-receiver System**, Aleksandra Nina, Vladimir M. Čadež and Vladimir Srećković Book of abstracts, Regional workshop on atomic and molecular data Belgrade, Serbia, 14-16 June 2012, Ed. Milan S. Dimitrijević, (2013), 15.
2. **VLF data acquisition and central database storing**, Vladimir Srećković, Desanka Šulić, Aleksandra Nina, Anatolij Mihajlov, Ljubinko Ignjatović Book of abstracts, Regional workshop on atomic and molecular data Belgrade, Serbia, 14-16 June 2012, Ed. S. Dimitrijević, (2013), 20.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Александра Нина

број индекса Д10/2008

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Дијагностика плазме јоносферске D области електромагнетним VLF таласима

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 21. 02. 2014.

Александра Нина

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Александра Нина

Број индекса Д10/2008

Студијски програм Докторске студије физике

Наслов рада Дијагностика плазме јоносферске D области електромагнетним
VLF таласима

Ментор др Владимир А. Срећковић

Потписани/а Александра Нина

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 21. 02. 2014.

Александра Нина

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Дијагностика плазме јоносферске D области електромагнетним VLF таласима

која је моје ауторско депо.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
- ☒ 3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 21. 02. 2014.

Александра Нина

1. Ауторство - Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.