

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Aleksandra B. Kolarski

**ELEKTROMAGNETSKA
SPREGA SISTEMA
LITOSFERA-ATMOSFERA-JONOSFERA**

doktorska disertacija

Beograd, 2016

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Aleksandra B. Kolarski

**ELECTROMAGNETICAL
COUPLING IN
LITHOSPHERE-ATMOSPHERE-
IONOSPHERE SYSTEM**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

Mentori:

1. dr Boban Marinković, vanredni profesor
uža naučna oblast: matematika i informatika
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet
2. dr Vesna Damnjanović, vanredni profesor
uža naučna oblast: osnove tehničke fizike
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

1. dr Boban Marinković, vanredni profesor
uža naučna oblast: matematika i informatika
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet
2. dr Vesna Damnjanović, vanredni profesor
uža naučna oblast: osnove tehničke fizike
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
3. dr Vesna Cvetkov, docent
uža naučna oblast: geofizika
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
4. dr Snežana Ignjatović, docent
uža naučna oblast: geofizika
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet
5. dr Aleksandra Nina, naučni saradnik
uža naučna oblast: fizika plazme i jonizovanih gasova
Institut za fiziku

Datum odbrane: _____

ZAHVALNOST

Predlog teme doktorske disertacije pod nazivom “Elektromagnetska sprega sistema litosfera-atmosfera-jonosfera” potekao je sa Katedre za Geofiziku Departmana za Geofiziku Geološkog odseka i Katedre za fiziku, Rudarsko-geološkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Realizacija ove doktorske disertacije nije bila nezavisan poduhvat, već deo Projekta III44002 pod pokroviteljstvom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, koji se odvijao u Institutu za fiziku i Astronomskoj opservatoriji u Beogradu. Istraživanje u okviru ove problematike deo je i međunarodne akcije COST TD1403 (ranije 724 i ES0803).

Zahvaljujem se:

- mentorima i članovima komisije na korisnim savetima i sugestijama koji su učinili ovu doktorsku disertaciju boljom,
- rukovodiocu projekta dr Darku Jevremoviću na podršci prilikom izrade doktorske disertacije,
- prof. dr Desanki Šulić, u penziji, na obezbeđenoj eksperimentalnoj postavci na kojoj su dobijeni podaci korišćeni u ovoj doktorskoj disertaciji,
- Katedri za Geofiziku Departmana za Geofiziku Geološkog odseka i Katedri za fiziku, Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu na podršci prilikom izrade doktorske disertacije,
- Studentskoj službi Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu na podršci prilikom izrade doktorske disertacije,
- kolegama iz Laboratorije za fiziku plazme, Instituta za fiziku u Beogradu na podršci prilikom izrade doktorske disertacije,
- prof. dr Zoranu Gligoriću na podršci prilikom izrade doktorske disertacije,
- dr Snežani Ignjatović na podršci prilikom izrade doktorske disertacije i
- Goranu Mihajloviću dipl. meteorologu i Neveni Živanović dipl. meteorologu iz Republičkog hidrometeorološkog zavoda na stručnim razgovorima.

Posebno se zahvaljujem:

- prof. dr Vesni Damnjanović na rukovođenju ovom disertacijom, na brojnim korisnim savetima i sugestijama, stručnoj pomoći i podršci prilikom izrade doktorske disertacije,
- dr Vidi Žigman na stručnoj pomoći i podršci prilikom izrade doktorske disertacije,
- dr Aleksandri Nina na brojnim korisnim savetima i sugestijama prilikom izrade doktorske disertacije, na podršci i saradnji u prethodnom periodu,
- Direktor WWLLN mreže prof. dr Bob-u Holzworth-u na razumevanju i omogućenom pristupu satelitskim podacima o atmosferskim pražnjenjima WWLLN mreže, na dostavljenim satelitskim podacima i stručnoj prepisci,
- Administratoru stanice Ferrara I.M.T.N. mreže Ferruccio-u Zannoti-u na dostavljenim podacima o TLE pojavama snimljenim I.M.T.N. mrežom,
- Sekretaru EUCLID/Météorage organizacije Marc-u Bonnet-u na razumevanju i omogućenom pristupu satelitskim podacima o atmosferskim pražnjenjima EUCLID mreže,
- Goran-u Milev-u iz Elektroinštitut-a Milan Vidmar iz Ljubljane na dostavljenim satelitskim podacima o atmosferskim pražnjenjima EUCLID mreže i stručnim razgovorima i
- Filipu Dubovcu dipl. inž. organizacionih nauka - odsek za informacione sisteme na pomoći i podršci prilikom izrade doktorske disertacije

Želim posebno da se zahvalim Nataši Smuđa dipl. inž. geologije za hidrogeologiju na pruženoj nesebičnoj pomoći i podršci tokom izrade ove doktorske disertacije.

Najveću zahvalnost dugujem prof. dr Davorki Grubor, u penziji, na pruženoj nesebičnoj pomoći, na stručnoj pomoći i konstantnoj saradnji i podršci tokom izrade ove doktorske disertacije.

Zahvaljujem se članovima svoje porodice i prijateljima na iskazanoj podršci, strpljenju i razumevanju za moje odsustvo iz njihovih života tokom izrade ove doktorske disertacije.

Svojim roditeljima Milici i Borislavu

Apstrakt

Radio talasi vrlo niskih frekvencija VLF (eng. Very Low Frequency) frekventnog opsega od 3 do 30 kHz, koji se prostiru talasovodom Zemlja-jonosfera (50 - 90 km) su, kao što je poznato, efikasni i nezamenljivi u osmatranju pojava u niskoj jonosferi, sa tla. Promene jonizacije podstaknute različitim fenomenima koji proističu iz solarno-terestričkih interakcija mogu uspešno da se detektuju analizom amplitude i faznog pomeraja signala, u različitim, pogodno odabranim intervalima vremena. Ovo istraživanje je usmereno ka proučavanju promene jonizacije usled snažne emisije energije oslobođene atmosferskim električnim pražnjenjem, a koja najviše utiče na prostiranje VLF talasa. Povećana jonizacija duž putanje prostiranja primetna je u poremećaju (povećenju-smanjenju) amplitude signala i faznog pomeraja u odnosu na neporemećene uslove prostiranja.

U analizi pojava uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem, osnovni skup podataka čine registracije amplitude i faznog pomeraja VLF signala prikupljene sistemom AbsPAL (Absolute Phase and Amplitude Logger), smeštenom u Institutu za Fiziku u Beogradu (44.85 S; 20.38 D). Efekti indukovanih promena jonizacije posmatrani su duž različitih putanja prostiranja, između odabranih VLF predajnika i prijemnika u Beogradu: NAA/24.0 kHz (44.63 S; 67.28 Z), GQD/22.1 kHz (54.72 S; 2.88 Z), NWC/19.8 kHz (27.2 J; 114.98 I), DHO/23.4 kHz (53.08 S; 7.62 D), ICV/20.27 kHz (40.92 S; 9.73 D), HWU/18.3 kHz (46.71 S; 1.24 D), FTA/20.9 kHz (48.54 S; 2.58 D) i NDT/22.2 kHz (32.08 S; 130.83 D).

Podaci o parametrima prostiranja VLF signala razmatrani su uporedo sa podacima dve druge, nezavisne baze podataka: prvom - o atmosferskim pražnjenjima dostupnom preko globalne WWLLN (World Wide Lightning Location Network) i regionalne EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection) mreže i drugom - o kratkotrajnim svetlosnim pojavama TLE (eng. Transient Luminous Events) dostupnom preko mreže I.M.T.N. (ITALIAN METEOR and TLE NETWORK). U periodu od marta 2008. do juna 2011. godine, identifikovano je 250 događaja od kojih je 179 izdvojeno za detaljnu analizu.

Događaji kratkotrajnih svetlosnih pojava TLE (eng. Transient Luminous Events): sprajtovi, halo-i i elvi (eng. sprites, halos and elves) i pražnjenjem izazvane precipitacije elektrona, poremećaji LEP (eng. Lightning-induced Electron precipitation), identifikovani su na osnovu njihovih signatura prepoznatih na poremećajima VLF signala. Polazeći od sprajtova snimljenih sa rezolucijom u vremenu od 0.001 - 0.1 s, a koji su u koincidenciji sa vremenima atmosferskih pražnjenja (WWLLN i EUCLID, sa tačnošću od 1 ns), jednominutni intervali VLF registracija (rezolucije 0.1 s), analizirani su detaljno za svaki pojedini događaj. Određeno je vreme početka poremećaja amplitude i faznog pomeraja, vreme uspostavljanja maksimalnog poremećaja, maksimalne promene amplitude i faze i vreme oporavka (povratka vrednosti parametara na nivo neporemećenog signala).

U skladu sa pojmovima poznatim iz literature poremećaji koji su detektovani, klasifikovani su kao: rani poremećaji, signature poremećaja LEP i poremećaji LORE (eng. LOng-Recovery Early events). U noći izuzetno velike olujne aktivnosti 27 - 28. maja 2009. godine, na video snimcima dokumentovan je 71 sprajt i 10 halo-a izazvanih negativnim pražnjenjem tipa oblak - tlo. Poremećaji VLF signala koji se u vremenu podudaraju sa svim tim događajima, detaljno su analizirani kvalitativno i kvantitativno.

Za karakteristične primere, korišćenjem programskog paketa LWPC (Long Wave Propagation Capability), simulirane su promene vrednosti amplitude i faze signala u uslovima izmenjene koncentracije elektrona usled atmosferskih pražnjenja. Izračunate vrednosti koncentracije elektrona u talasovodu tokom poremećaja, za tipične primere sprajtova, su u opsegu od $4.7 \cdot 10^6$ do $1.6 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$. Za izabrane primere sprajtova procenjene su vrednosti momenta naelektrisanja električnog dipola, a odatle i disipirana energija. Procenjene vrednosti disipirane energije su opsegu od 5.4 kJ do 714 MJ. Za VLF poremećaj izazvan pojavom elva koji nastaje pri vršnoj struji pražnjenja većoj od 250 kA, izračunata koncentracija elektrona u talasovodu dostiže vrednost $7 \cdot 10^7 \text{ m}^{-3}$, dok je disipirana energija procenjena na 6 GJ. Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa rezultatima proračuna na osnovu drugih modela niske jonosfere, kao i sa rezultatima merenja primenom različitih tehnika, sa tla i "in situ".

Ključne reči: Prostiranje talasa vrlo niskih frekvencija, Talasovod Zemlja-jonosfera, globalno električno kolo, Atmosfersko električno pražnjenje, Kratkotrajne svetlosne pojave

Naučna oblast: Geo-nauke

Uža naučna oblast: Geofizika

UDK: 550.38:551.510.535:551.51(043.3)

Abstract

Very Low Frequency (VLF) waves (3 - 30 kHz) which travel along the Earth-ionosphere waveguide (50 - 90 km height) are known to be an efficient and irreplaceable tool in ground based observations of the lower ionosphere. Ionization changes driven by different phenomena resulting from the Sun-Earth interaction can be successfully VLF detected by analyzing the amplitude and phase delay of the propagating signal at different appropriate time scales.

In this study we focus on ionization changes that most dominantly affect the VLF wave propagation: the strong release of energy by atmospheric lightning discharges. The increased ionization along the propagation path is apparent in the perturbation (increase/decrease) of the signal amplitude and phase delay with respect to regular undisturbed ionospheric conditions.

The present analysis of lightning discharge events takes, for the basic data set, the VLF signal amplitude and phase delay data registered by the AbsPAL (Absolute Phase and Amplitude Logger) receiving system, located at the Institute of Physics, Belgrade (44.85 N; 20.38 E). The effects of induced ionization changes have been observed along different propagation paths, between a selected transmitter and the Belgrade receiver. VLF data from transmitters NAA/24.0 kHz (44.63 N; 67.28 W), GQD/22.1 kHz (54.72 N; 2.88 W), NWC/19.8 kHz (27.2 S; 114.98 E), DHO/23.4 kHz (53.08 N; 7.62 E), ICV/20.27 kHz (40.92 N; 9.73 E), HWU/18.3 kHz (46.71 N; 1.24 E), FTA/20.9 kHz (48.54 N; 2.58 E) and NDT/22.2 kHz (32.08 N; 130.83 E) to the Belgrade receiver have been considered. These VLF data sets have been related to two other independent data sets namely, the lightning discharges data obtained through the global WWLLN (World Wide Lightning Location Network) and the regional EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection) networks, on one hand and the data about TLE (Transient Luminous Events) events provided by the I.M.T.N. (ITALIAN METEOR and TLE NETWORK) network, on the other.

The time span encompasses March 2008 to June 2011 with 250 events identified and 179 events singled out for detailed analysis.

TLE events (sprites, halos and elves) and LEP (Lightning-induced Electron precipitation) events were identified by their signatures on VLF perturbations. On the basis of the sprite event registration time from I.M.T.N. (with 0.001 - 0.1 s resolution) and in coincidence with the lightning discharge time (WWLLN and EUCLID with 1 ns resolution), a one-minute VLF registration interval (with 0.1 s resolution) has been analysed in detail for each particular event. The time of the beginning of the amplitude and phase delay perturbations, the respective onset time to maximum perturbation, and the recovery time to unperturbed signal level have been determined. Detected VLF perturbations have been classified, according to literature, into early events, signatures of LEP events and LORE (LONg-Recovery Early events). On the extremely strong atmospheric activity occurred during the night 27th - 28th May, 2009, 71 sprite events and 10 halos, caused by multiple returned strokes of negative CG lightning discharges, have been documented by video recordings (I.M.T.N.). For all of them, corresponding signatures in VLF perturbations were detected and analysed. Apparently, similar perturbations have not been reported in literature up to the present.

The ionization effects of lightning discharges on the VLF propagation have been modelled by applying the LWPC (Long Wave Propagation Capability) simulation code to selected events. Thus, the perturbed lightning induced electron density along the Earth-ionosphere waveguide for typical sprite events is found to range from $4.7 \cdot 10^6$ to $1.6 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$, while the dissipated energy is estimated to vary between 5.4 kJ and 714 MJ. VLF perturbations related to elve event occurrence with parent lightning peak current of 250 kA amount to electron density of $7 \cdot 10^7 \text{ m}^{-3}$, with the dissipated energy estimated to 6 GJ. The present results are consistent with the predictions of other models of the lower ionosphere, as well as with independent ground based and space-borne measurements.

Keywords: VLF propagation, Earth-ionosphere waveguide, Global electric circuit, Atmospheric lightning discharge, Transient luminous events

Scientific area: Geo-sciences

Narrow scientific area: Geophysics

UDC: 550.38:551.510.535:551.51(043.3)

Sadržaj:

UVOD.....	4
1. Elektromagnetska sprega sistema litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje.....	6
1.1. Osnovne karakteristike Zemljine atmosfere.....	7
1.2. Olujna aktivnost i električni fenomeni u atmosferi Zemlje.....	10
1.3. Formiranje kvazi-elektrostatičkih polja u sistemu atmosfera - jonosfera Zemlje.....	15
1.3.1. Globalno strujno kolo jednosmerne struje.....	16
1.3.2. Električno kolo naizmjenične struje.....	18
1.3.3. Naelektrisanje olujnih oblaka i ekranizacija.....	19
1.3.4. Varijacije globalnog električnog kola u vremenu i prostoru.....	20
2. Osnovne karakteristike kratkotajnih svetlosnih atmosferskih fenomena TLE (eng. transient luminous events) i intenzivnih atmosferskih pražnjenja.....	21
2.1. Intenzivna atmosferska pražnjenja koja iniciraju sprajtove.....	24
2.2. Crveni sprajtovi (eng. red sprites).....	24
2.3. Elvi (eng. elves).....	29
2.4. Plavi mlazevi (eng. blue jets, blue starters, gigantic jets).....	31
2.5. Pražnjenje iznad vrha oblaka naviše.....	32
2.6. Emisija radio talasa iz TLE.....	33
3. Prostiranje VLF radio talasa kroz Geoprostor.....	35
3.1. Prostiranje VLF talasa kroz talasovod Zemlja-jonosfera.....	36
3.2. Prostiranje VLF talasa pod uticajem geomagnetskog polja.....	37

4. Podaci potrebni za analizu elektromagnetske sprege sistema litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje.....	41
4.1. Osmatranja atmosferskih pražnjenja.....	41
4.1.1. Svetska mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja.....	42
4.1.2. Regionalna evropska mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja.....	44
4.1.3. Opažanje olujne aktivnosti u Republici Srbiji.....	45
4.2. Lokalna italijanska mreža za osmatranje meteora i TLE pojava..	46
4.3. Registrovanje parametara prostiranja uskopojasnih VLF signala	47
5. Detektovane TLE i LEP pojave na osnovu analize VLF signala.....	49
5.1. Analiza i obrada podataka VLF signala.....	49
5.1.1. Promene parametara propagacije VLF signala.....	50
5.2. Modeliranje amplitude i faze VLF signala.....	53
6. Rezultati i diskusija rezultata.....	56
6.1. Analiza podataka VLF signala snimljenih sistemom AbsPAL.....	56
6.2. Obrada podataka VLF signala snimljenih sistemom AbsPAL.....	70
6.1.1. Određivanje koncentracije elektrona talasovoda u uslovima VLF poremećaja vezanih za sprajtove.....	78
6.1.2. Određivanje koncentracije elektrona talasovoda u uslovima VLF poremećaja vezanih za elve.....	87
ZAKLJUČAK.....	93
Literatura.....	96

PRILOG 1A. Raspored registrovanih VLF signala po kanalima sistema AbsPAL, tokom 2008. i 2009. godine.....	1
PRILOG 1B. Raspored registrovanih VLF signala po kanalima sistema AbsPAL, tokom 2010. i 2011. godine.....	2
PRILOG 1C. TLE pojave registrovane kamerama mreže I.M.T.N. u periodu 2008 - 2011. godine izabrane za analizu.....	3
PRILOG 2A. Poremećaji na noćnim VLF signalima, snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine, sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2008. godine izabrani su za dalju analizu.....	5
PRILOG 2B. Poremećaji na noćnim VLF signalima, snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine, sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2009. godine izabrani su za dalju analizu.....	9
PRILOG 2C. Poremećaji na noćnim VLF signalima, snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine, sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2010. godine izabrani su za dalju analizu.....	33
PRILOG 2D. Poremećaji na noćnim VLF signalima, snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine, sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2011. godine izabrani su za dalju analizu.....	49
PRILOG 3A. Poremećaji na noćnom NAA/24.0 kHz signalu, snimljeni 27. maja 2009. godine u Beogradu.....	53
PRILOG 3B. Poremećaji na noćnom GQD/22.1 kHz signalu, snimljeni 27. maja 2009. godine u Beogradu.....	57
PRILOG 3C. Poremećaji na noćnom NAA/24.0 kHz signalu, snimljeni 28. maja 2009. godine u Beogradu.....	61
PRILOG 3D. Poremećaji na noćnom GQD/22.1 kHz signalu, snimljeni 28. maja 2009. godine u Beogradu.....	66

Biografija

Прилог 1. Изјава о ауторству

Прилог 2. Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Прилог 3. Изјава о коришћењу

UVOD

Doktorska disertacija povezuje tri fenomena:

- a) atmosferska pražnjenja i zatvaranje globalnog strujnog kola koje protiče kroz sistem litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje,
- b) kratkotrajne/prolazne svetlosne pojave TLE (eng. Transient Luminous Events), izazvane atmosferskim pražnjenjem i pojave precipitacije elektrona izazvane atmosferskim pražnjenjima LEP (eng. Lightning-induced Electron Precipitation) i
- c) prostiranje radio talasa vrlo niskih frekvencija VLF (eng. Very Low Frequency) talasa u talasovodu Zemlja-jonosfera u uslovima poremećaja izazvanih atmosferskim pražnjenjima.

Podaci koji su potrebni za proučavanje navedenih pojava, dobijeni su preko sledećih izvora:

- a) mreže WWLLN (World Wide Lightning Location Network) i EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection), za podatke o olujnoj aktivnosti, b) mreža I.M.T.N. (ITALIAN METEOR and TLE NETWORK) za snimke TLE pojava i c) mreža predajnika i prijemnika VLF signala, u kojoj je i prijemnik sistema AbsPAL (Absolute Phase & Amplitude Logger), lociran u Institutu za fiziku u Beogradu. Analiziran je period od marta 2008. do juna 2011. godine.

Tema pokriva fenomene iz tri različita područja koji su povezani zajedničkim karakteristikama u prostoru i vremenu, prvenstveno mehanizmom nastajanja, pa se tretiraju istim fizičkim veličinama. Povezanost je uzročno-posledičnog karaktera. Pojave inicirane atmosferskim pražnjenjima su TLE sa jedne i poremećaji u prostiranju VLF talasa kroz talasovod Zemlja-jonosfera, sa druge strane.

Rad je koncipiran tako da ima opšti deo, deo u kome su navedeni izvori podataka potrebnih za analizu i deo u kome su prikazani i diskutovani rezultati istraživanja koja su predmet ove disertacije.

U opštem delu, pregledno su data saznanja o pomenutim fenomenima proistekla iz dosadašnjih istraživanja u različitim oblastima nauke, koja su se bavila problematikom svakog od pomenutih fenomena. Postupno su unesene činjenice koje povezuju posebne oblasti, počevši od uzročnih fenomena - atmosferskih pražnjenja, preko TLE i LEP pojava kao posledica, do VLF signatura prva dva fenomena.

Prvi korak u istraživanju bilo je prikupljanje podataka o dokumentovanim TLE pojavama I.M.T.N. mrežom i pronalaženje njima uzrokovanih poremećaja na VLF signalima. Za korelaciju sa inicirajućim atmosferskim pražnjenjima korišćeni su podaci ranije navedenih WWLLN i EUCLID mreža. Istraživanje je prvenstveno bilo orijentisano na sprajtove jer su bili pouzdano i najbolje dokumentovani, a ujedno i najbrojnije TLE pojave registrovane I.M.T.N. mrežom.

Polazeći od dokumentovanih sprajtova, određene su njima pripadajuće signature na VLF signalima posmatranih trasa. Izvedeni su zaključci o opštim karakteristikama VLF poremećaja uzrokovanih sprajtovima. To je omogućilo klasifikaciju VLF poremećaja u odnosu na promene koje sprajtovi izazivaju u talasovodu Zemlja-jonosfera. Kvalitativna i kvantitativna analiza VLF poremećaja omogućila je zaključke u vezi sa promenama u oblasti D jonosfere (50 - 90 km) u toku atmosferskih pražnjenja. Određena je promena koncentracije elektrona. Procenjena je promena momenta električnog dipola i energija emitovana u toku pojave sprajta. Za sve razmatrane primere za koje je izvršena kvalitativna i kvantitativna analiza, diskutovani su rezultati i upoređeni sa rezultatima sličnih istraživanja u svetu.

1. Elektromagnetska sprega sistema litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje

Pod elektromagnetskom spregom se podrazumeva niz uzajamno uslovljenih promena u elektromagnetskom polju sistema litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje koje nastaju intenzivnim atmosferskim pražnjenjem.

Stavovi koji određuju redosled razmatranja karakteristika atmosfere i jonosfere Zemlje i pojava koje proizilaze iz elektromagnetske sprege u sistemu litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje su:

- Da bi se sa više aspekata proučila elektromagnetska sprega sistema litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje potrebno je da se poznaju osnovne električne karakteristike svakog od ovih područja.
- Kada se ostvari elektromagnetska sprega u području između tla i jonosfere Zemlje javljaju se kratkotrajne/prolazne svetlosne pojave TLE.
- Pomenute TLE pojave su povezane sa velikim lokalnim promenama koncentracije elektrona u atmosferi i jonosferi Zemlje, a to ima za posledicu promenu elektroprovodljivosti sistema koji deluje kao globalno strujno kolo.
- Promena koncentracije elektrona u talasovodu Zemlja - jonosfera utiče na prostiranje radio talasa vrlo niskih frekvencija VLF (3 - 30 kHz). Ova činjenica omogućava da se upravo registracije promena parametara VLF talasa koriste u dijagnostičke svrhe, tj. da se iz oblika i trajanja promena tih parametara zaključuje do kakvih poremećaja je došlo u globalnom strujnom kolu.

1.1. Osnovne karakteristike Zemljine atmosfere

Zemljina atmosfera, kao zaštitni spoljašnji omotač, gravitaciono je vezana za planetu Zemlju. Kao najvažnije opšte karakteristike Zemljine atmosfere, pritisak i gustina vazduha u Zemljinoj atmosferi eksponencijano opadaju sa porastom visine, uopšteno posmatrano na skali od oko 7 km, (Rycroft, 2003). Pošto Zemljina atmosfera nije izotermna i izotropna sredina, pomenuta skala, a samim tim pritisak, gustina i temperatura vazduha, neznatno variraju u prostoru i vremenu. Približno 50 % ukupnog sadržaja atmosfere smešteno je na i ispod visine 5 km, dok 90 % ukupnog sadržaja atmosfere leži ispod visine 15 km.

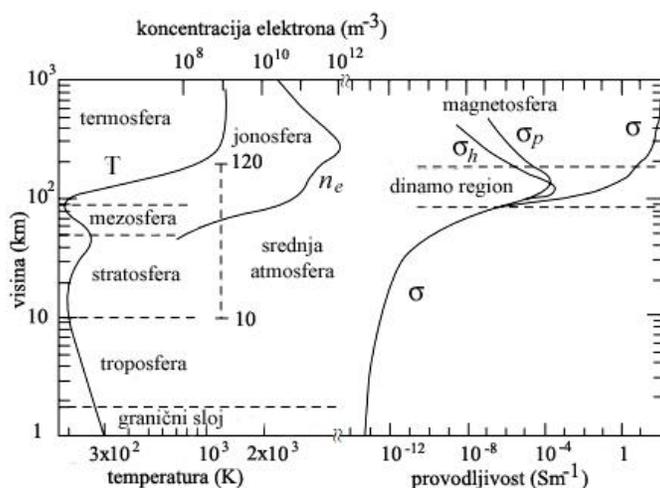
Najtoplije oblasti Zemljine atmosfere nalaze se na samoj Zemljinoj površi (globalna prosečna temperatura $T = 288$ K, pritisak $p = 1.013 \cdot 10^5$ Pa, gustina $\rho \geq 1.2$ kg/m³), na stratopauzi (približno 250 K, oko visine 50 km) i u termosferi (iznad 110 km, odakle temperatura brzo raste do približno 2000 K, oko visine 300 km), u zavisnosti od faze ciklusa solarne aktivnosti, koji dostiže maksimum svakih ~ 11 godina. Vazdušni pritisak na visini 32 km iznosi oko 1 % svoje vrednosti na Zemljinoj površi, a na visini 100 km, iznosi oko jedan milioniti deo svoje vrednosti na Zemljinoj površi. Najhladnije oblasti Zemljine atmosfere nalaze se na gornjoj površi troposfere, koja se naziva tropopauza (na visini 18 km iznad tropskih oblasti, 14 km iznad oblasti srednjih geografskih širina i samo 9 km iznad oblasti visokih geografskih širina) i na gornjoj površi mezofere, koja se naziva mezopauza (na visini 85 km, u periodu leta oko 140 K i u periodu zime oko 210 K).

Iznad Zemlje, koja rotira, vetrovi duvaju iz toplijih regiona, u osnovi horizontalno - zonalno (za datu geografsku širinu) ili meridijalno (za datu geografsku dužinu). Vetrovi prenose toplotu kroz atmosferu, pokušavajući da atmosferu dovedu u stanje termalne ravnoteže.

Atmosfera u blizini kopnenih delova Zemljine površi može se posmatrati kao naelektrisani gas; oko $2 \cdot 10^6/\text{m}^3\text{s}^{-1}$ molekularnih jonskih parova formira se emanacijama radona iz Zemlje, međutim, pošto je proces rekombinacije veoma brz, koncentracija elektrona iznosi približno 1 m^{-3} .

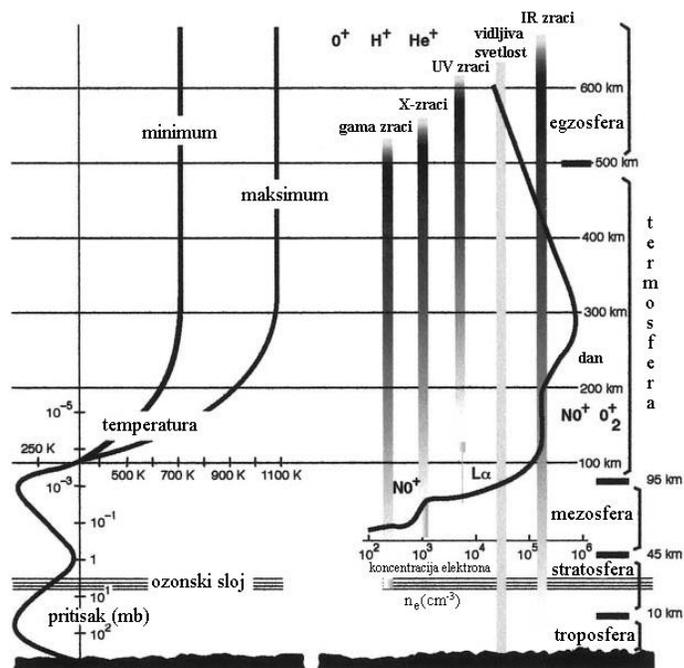
Emisija gama zračenja i galaktički kosmički zraci (naelektrisane čestice - elektroni, protoni i jezgra helijuma, sa ekstremnim energijama (GeV) poreklom izvan naše galaksije), prodiru u atmosferu jonizujući atmosferske molekule sudarnim procesima. Najveća brzina produkcije elektrona jonizacijom je oko visine 20 km. Do 20 km, električna provodljivost atmosfere raste od približno 10^{-14} Sm^{-1} na skali od oko 5 km, a iznad 20 km, porast je još brži. Koncentracija molekularno - jonskih parova dostiže maksimalnu vrednost od oko 10^9 m^{-3} , na visinama 15 - 20 km (Harrison i Carslaw, 2003). Električna provodljivost stratosfere varira malo, dok su u okviru mezofere njene promene znatno veće.

U regularnim uslovima u periodu solarnog minimuma, nema velikih fluktuacija električne provodljivosti, dok u periodu solarnog maksimuma, fluktuacije solarnog vetra izazivaju i velike fluktuacije električne provodljivosti atmosfere i jonosfere. Fluks galaktičkih kosmičkih zraka smanjuje se u periodima solarnog maksimuma, a povećava u periodima solarnog minimuma. Kosmički zraci ulaze u Zemljino okruženje u oblastima polarnih i visokih geografskih širina gde se nalaze geomagnetski polovi. Time se objašnjava značajna varijacija atmosferske jonizacije tokom 11-ogodišnjeg solarnog ciklusa (Ney, 1959), a što je naročito izraženo na višim geografskim širinama (oko 50° - 60° geomagnetske širine). Varijacije temperature i koncentracije elektrona i električne provodljivosti jonosferskih slojeva prikazani su na Slici 1.1.1.



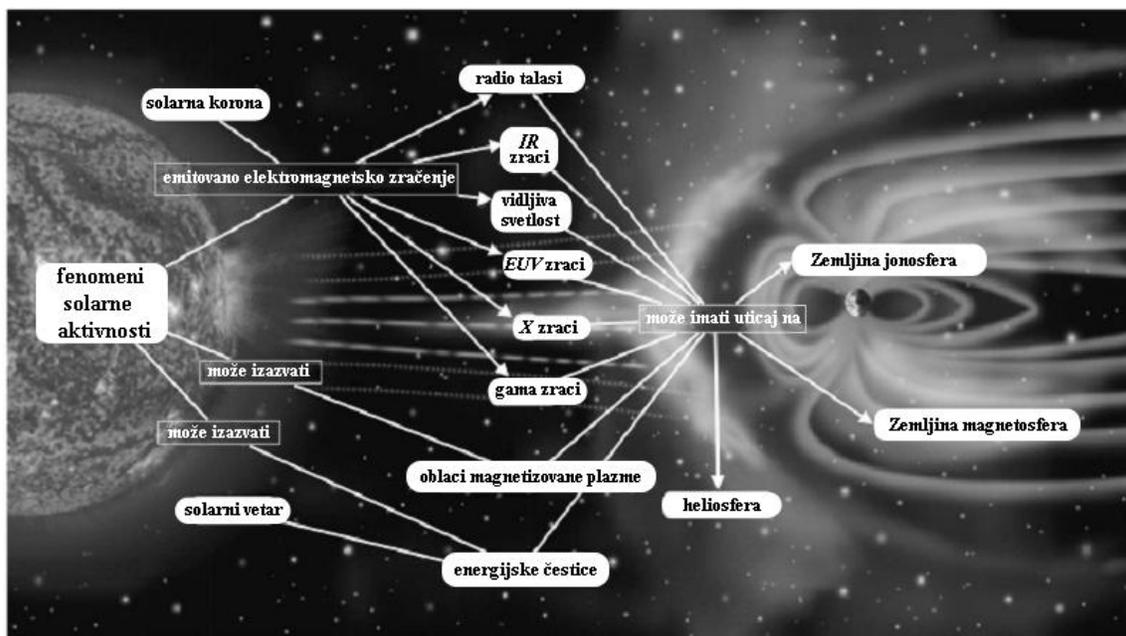
Slika 1.1.1. Varijacije sa visinom najvažnijih parametara atmosfere i jonosfere (Hargreaves, 1992)

Jonosfera se formira jonizujućim dejstvom solarnog ekstremnog UV zračenja i X-zraka, čiji uticaj je ~ 100 puta jači u periodu solarnog maksimuma u odnosu na period solarnog minimuma. Najniža oblast jonosfere, tzv. oblast D (50 - 90 km), formira se u najvećoj meri dejstvom solarne Lyman- α linije (121.5 nm) na okside azota. Tokom noći, usled procesa rekombinacije, koncentracija jonosferske plazme opada najbrže na visini od 90 km (od 10^{11} do 10^8 m⁻³), dok na većim visinama gde procesi efektivne rekombinacije traju znatno duže opada sporije (Schunk i Nagy, 2000). Procesu fotodisocijacije i fotojonizacije izazvani solarnim zračenjem vrše veliki uticaj na višu atmosferu (Whitten i Poppoff, 1965). Dubina prodiranja različitih komponenti solarnog elektromagnetskog zračenja u neutralnu atmosferu data je na Slici 1.1.2.



Slika 1.1.2. Atmosferske i jonosferske oblasti (Goodman, 2005)

Jonosfera i magnetosfera brzo reaguju na promene kosmičke klime (eng. space weather). Najvažniji je uticaj solarnog vetra, solarnih flerova, izbacivanja koronalne mase CME (eng. Coronal Mass Ejections) kao i rekonekcija linija geomagnetskog polja u interplanetarnom prostoru pod dejstvom udarnog talasa čije su posledice geomagnetske bure ili magnetosferske podbure (Baker, 2000). Pojave i procesi koji imaju uticaja na kosmičku klimu prikazani su na Slici 1.1.3.



Slika 1.1.3. Pojave i procesi koji utiču na kosmičku klimu
(Schwenn, 2006)

1.2. Olujna aktivnost i električni fenomeni u atmosferi Zemlje

Na osnovu merenja gradijenta električnog napona u blizini Zemljine površi u regionima vedrog vremena, udaljenim od područja olujne aktivnosti, izračunato je da je srednja vrednost električnog polja oko 100 V/m (Mauchly, 1923; Hoffman, 1923). Integracijom vertikalnog električnog napona sa visinom (merenog “in situ” pomoću balona i letilica) dobija se razlika napona između jonosfere i Zemlje - jonosferski potencijal, sa srednjom vrednošću 250 kV (Markson, 1985). Budući da električno polje brzo opada sa visinom, proračun jonosferskog potencijala daje dobre rezultate do visine oko 20 km. Jonosferski potencijal u regionima vedrog vremena pokazuje dnevnu i sezonsku varijaciju povezanu sa balansom toplotne energije Zemlje, usled zagrevanja insolacijom i njenog hlađenja.

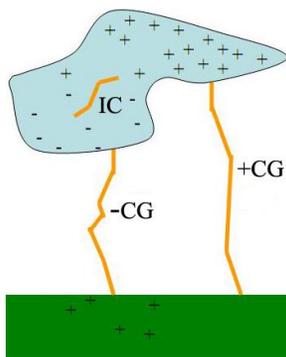
Olujna aktivnost u Zemljinoj atmosferi kao najvažniju posledicu ima tzv. olujne nepogode (Rakov i Uman, 2003). Olujne nepogode javljaju se usled snažnih konvekcija, kada cumulus oblaci postaju cumulonimbus oblaci i dospevaju čak do tropopauze.

U najjednostavnijem slučaju, donja površ olujnog oblaka naelektrisana je negativno, dok je gornja površ naelektrisana pozitivno i može evoluirati tako da poprimi formu “nakovnja”. U realnim uslovima, raspodele naelektrisanja u oblacima su znatno kompleksnije, vrlo često sa postojanjem pozitivno naelektrisanih regiona ispod regiona sa negativnim naelektrisanjem. U literaturi je predloženo više različitih mehanizama naelektrisanja oblaka kojima se objašnjava struktura naelektrisanja prisutna kod olujnih nepogoda (MacGorman i Rust, 1998; Rakov i Uman, 2003; Jayarante, 2003). Ovde neće biti reči o samoj fizici atmosferskog pražnjenja, pošto se ta materija može naći u velikom broju knjiga (Rakov i Uman, 2003; MacGorman i Rust, 1998; Williams, 1988; Uman, 1987; National Research Council, 1986; Volland, 1982; Golde, 1977).

U okviru olujnog oblaka, vertikalna električna polja su u rasponu vrednosti $\pm 100 \text{ kVm}^{-1}$ i znatno variraju na rastojanjima od 1 km usled prisutnih tankih naelektrisanih slojeva. Direktno iznad olujnog oblaka, ovo polje odstupa od srednje vrednosti polja za nekoliko kVm^{-1} . Kada dođe do pojave atmosferskog pražnjenja, polje varira u opsegu između tih vrednosti. Odmah nakon udara, polja mogu dostići čak i veće vrednosti. Prečnik pojedinačnih konvektivnih ćelija je najčešće veći od 1 km i one mogu konstituisati pojedinačne olujne nepogode. U drugim slučajevima mogu se razviti u olujne nepogode velikih razmera, u tzv. konvektivne sisteme srednjih razmera MCS (eng. Mesoscale Convective Systems), čiji radijus tipično iznosi do 100 km, ili čak i više.

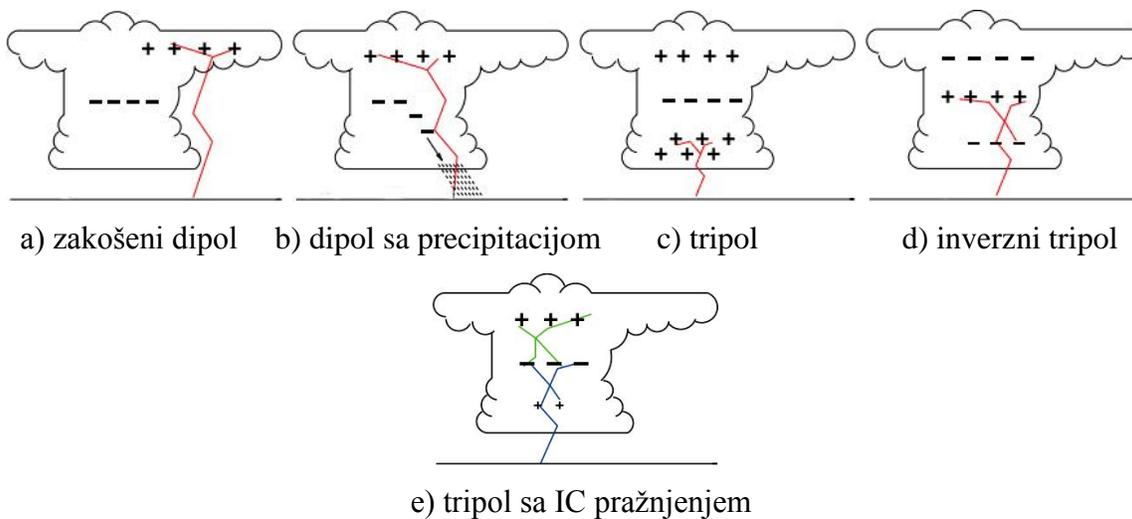
Terminologija koja je u upotrebi prilikom ispitivanja i osmatranja atmosferskog pražnjenja odnosi se na atmosfersko pražnjenje između oblaka i tla CG (eng. cloud-to-ground), između oblaka CC (eng. cloud-to-cloud), unutar samog oblaka IC (eng. intra-cloud) i između oblaka i vazduha CA (eng. cloud-to-air) i koji zajedno čine totalno atmosfersko pražnjenje (eng. total lightning). Uobičajeno je da se pravi razlika samo između atmosferskog pražnjenja koje se dešava između oblaka i tla i pražnjenja koja nisu između oblaka i tla (pa se pražnjenja između oblaka i oblaka, unutar oblaka i između oblaka i vazduha često zajedno svrstavaju u IC pražnjenje). Pražnjenja unutar oblaka javljaju se u najvećem broju atmosferskih pražnjenja.

Shematski prikaz tipičnih atmosferskih pražnjenja prikazan je na Slici 1.2.1. Negativno pražnjenje između oblaka i tla –CG, sprovodi negativno naelektrisanje ka tlu i najčešće je pražnjenje tipa oblak-tlo. Pražnjenje između oblaka i tla +CG sprovodi pozitivno naelektrisanje ka tlu i povezano je sa pojavama većine sprajtova (vrsta TLE).



Slika 1.2.1. Shematski prikaz tipičnih atmosferskih pražnjenja (Cohen i Cotts, 2009)

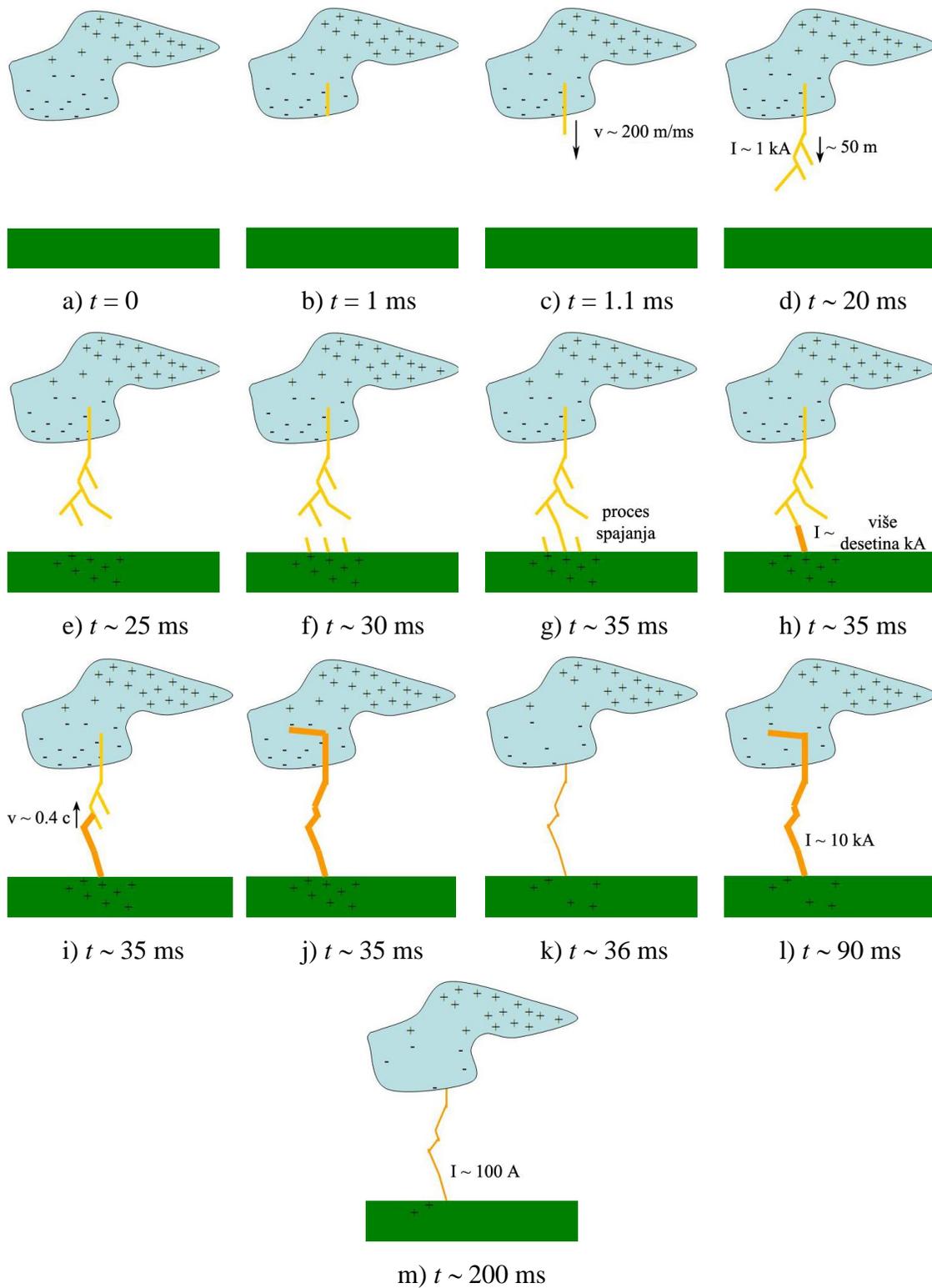
Strukture naelektrisanja oblaka koje mogu proizvesti pozitivno CG pražnjenje (crvena boja kanala na Slici 1.2.2), shematski se mogu prikazati kao: a) zakošeni dipol, b) dipol sa pražnjenjem kroz atmosfersku precipitaciju, c) tripol, d) inverzni tripol; e) tripol sa IC pražnjenjem između gornjeg pozitivnog i središnjeg negativnog regiona (zelena boja kanala na Slici 1.2.2) i negativnim CG pražnjenjem između središnjeg negativnog i donjeg pozitivnog regiona sa manjom količinom naelektrisanja (plava boja kanala na Slici 1.2.2).



Slika 1.2.2. Shematski prikaz struktura naelektrisanja oblaka koja mogu rezultovati +CG pražnjenjem (Betz et al., 2009)

Prema statistici meteoroloških opažanja, pražnjenje tipa IC se javlja u 75 % od totalnog atmosferskog pražnjenja, dok pražnjenje tipa CG čini preostalih 25 %. Od ukupnog broja CG pražnjenja, negativni tip čini preko 90 % i najčešće je sačinjen od većeg broja povratnih udara, dok pozitivni tip čini manje od 10 % i uglavnom ima samo jedan povratni udar. Jačina vršne struje kod CG pražnjenja najčešće se kreće u rasponu 1 - 200 kA. Negativni tip CG pražnjenja uklanja 1 - 40 C naelektrisanja, a pozitivni tip CG pražnjenja uklanja 20 - 350 C. Oslobođena energija prilikom atmosferskih pražnjenja može dostići 10 GJ.

Shematski prikaz nastanka i razvoja atmosferskog pražnjenja (kanali žute boje) dat je na Slici 1.2.3: a) $t = 0$; nagomilavanje naelektrisanja unutar oblaka dostiže prag proboja pri električnom polju ~ 300 kV/m; b) $t = 1$ ms; dolazi do preliminarnog proboja unutar oblaka; c) $t \sim 1.1$ ms; $30 \mu\text{s}$ nakon što električno polje premaši polje proboja ka vazduhu, formira se “vodeći kanal” (stepped leader) kojim se naelektrisanje sprovodi ka tlu; d) $t \sim 20$ ms; “vodeći kanal” se, “korak po korak”, dalje spušta ka tlu, sa pauzama od nekoliko desetina μs , pri čemu može doći do grananja; e) $t \sim 25$ ms; dolazi do naelektrisanja tla usled približavanja “vodećeg kanala”; f) $t \sim 30$ ms; “tokovi” jonizovane plazme ($\sim 10^4$ K) uzdižu se od tla u susret “vodećem kanalu”, često sa visokih tačaka (npr. vrhovi drveća, šiljati objekti i dr); g) $t \sim 35$ ms; dolazi do spajanja nekih od “tokova” jonizovane plazme sa “vodećim kanalom”; h) $t \sim 35$ ms; formira se kanal u čijem donjem delu počinje da teče jaka struja, započinjući povratni udar (return stroke) sa dna kanala; i) $t \sim 35$ ms; povratni udar se kreće naviše, brzinom uporedivom sa brzinom svetlosti i u kanalu temperatura raste do $3 \cdot 10^4$ K; j) $t \sim 35$ ms; povratni udar stiže do oblaka, mnogo brže u odnosu na kretanje “vodećeg kanala” ka tlu; k) $t \sim 36$ ms; povratni udar slabi pošto se količina naelektrisanja smanjila, ukupni transfer naelektrisanja je obično reda veličine nekoliko C; l) $t \sim 90$ ms; često se javlja nekoliko povratnih udara, na svakih ~ 50 ms i tipično su slabiji od prvog povratnog udara; m) $t \sim 200$ ms; tokom narednih 100 ms ili više, može se nastaviti proticanje slabijih struja, kojima se dodatno vrši prenos još naelektrisanja; sprajtovi se mogu pojaviti pri desetinama prenesenih C.



Slika 1.2.3. Shematski prikaz nastanka i razvoja atmosferskog pražnjenja
(Cohen i Cotts, 2009)

1.3. Formiranje kvazi-elektrostatičkih polja u sistemu atmosfera - jonosfera Zemlje

U okviru sistema atmosfera - jonosfera, električna i magnetska polja, gustina naelektrisanja ρ i gustina ukupne električne struje \mathbf{J} međusobno su povezana pomoću četiri jednačine elektromagnetizma poznate kao Maxwell-ove jednačine. Najkraći način pisanja Maxwell-ovih jednačina je (Jackson, 1967):

$$\left. \begin{aligned} \nabla \mathbf{D} &= \rho, \\ \nabla \mathbf{B} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{d\mathbf{B}}{dt}, \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \left(\mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \right). \end{aligned} \right\} \quad (1.3.1)$$

U prvoj jednačini (jednačina kontinuiteta), ρ je gustina naelektrisanja, $\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$, gde je \mathbf{E} vektor električnog polja, a ε dielektrična konstanta sredine. Druga jednačina pokazuje da magnetsko polje magnetske indukcije \mathbf{B} , nema izvora i ponora. Treća jednačina proizilazi iz Faraday-evog zakona elektromagnetske indukcije i pokazuje da promena magnetske indukcije u vremenu izaziva pojavu vrtložnog električnog polja. Četvrta jednačina pokazuje da promena struje pomeraja u vremenu, uz struju provodljivosti čija je gustina \mathbf{J} , uzrokuje pojavu vrtložnog magnetskog polja. Ovim sistemom jednačina, u principu, je moguće rešavanje problema prostiranja elektromagnetskih talasa kroz jonizovanu sredinu, u smislu određivanja parametara sredine prostiranja. Magnetska permeabilnost vakuumu je $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ (Tm/A).

U slučajevima atmosferskih električnih pražnjenja, kada dolazi do emisije energije u vidu širokog spektra elektromagnetskih talasa, značajna veličina je gustina struje \mathbf{J}_n koja protiče kanalima pražnjenja (Budden, 1961):

$$\frac{dJ_n}{dt} + v_n \cdot J_n = \frac{q_n}{|q_n|} \omega_{Bn} (J_n \times B_E) + \varepsilon_0 \omega_{pn}^2 E, \quad (1.3.1a)$$

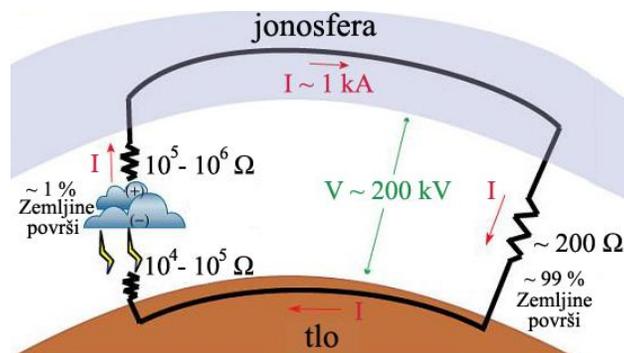
gde je B_E magnetska indukcija Zemlje, q_n je količina naelektrisanja, ω_{pn} plazmena frekvencija, ω_{Bn} je žirofrekvencija i v_n je frekvencija sudara pri kojima se vrši prenos momenta količine kretanja, a $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ (C²N⁻¹m⁻²) je dielektrična konstanta vakuuma. Indeks n se odnosi na pojedinu vrstu čestica jonizovane sredine.

Rešavanje sistema jednačina (1.3.1) i (1.3.1a), moguće je samo uz značajna pojednostavljenja realnog stanja u jonosferi: 1) u modalnoj teoriji propagacije VLF talasa (Budden, 1961), jonosfera se tretira kao anizotropni provodnik i 2) uzimajući u obzir geometriju talasovoda Zemlja-jonosfera, u proračun se uvodi samo vertikalna komponenta geomagnetskog polja. Rešavanje pomenutih jednačina moguće je i numeričkim putem, primenom metode konačnih razlika u domenu vremena FDTD (eng. finite difference time domain, Cummer, 2000), na potpuno dvodimenzioni model talasovoda. U ovom radu je za proračun trase i parametara prostiranja VLF talasa korišćen programski paket LWPC (Long Wave Propagation Capability, Ferguson, 1998), zasnovan na numeričkom pristupu.

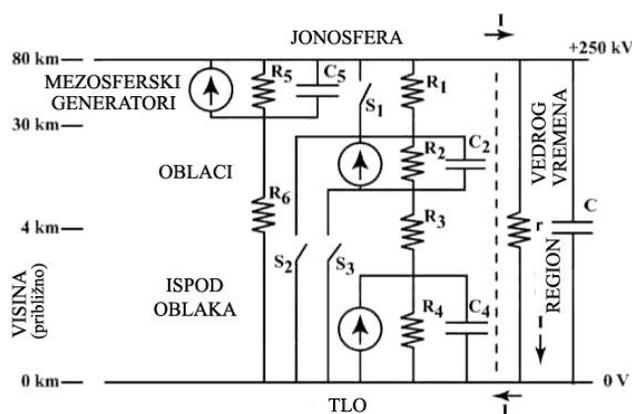
1.3.1. Globalno strujno kolo jednosmerne struje

Važan generator globalnog strujnog kola (Rycroft et al., 2000; Williams, 2002; Harrison, 2004; Kartalev et al., 2004) povezan je sa olujnom aktivnošću. U globalnom strujnom kolu, struje protiču naviše iznad olujnih oblaka ka jonosferi (Wilson-ove struje), do različitih visina, uglavnom kroz visoko provodljivu jonosferu, ali delimično i kroz mezosferu. Struje protiču duž linija sila geomagnetskog polja u i iz magnetosfere, naročito na visokim geografskim širinama. Površni jonosfere su približno ekvipotencijalne, pa stoga struje kroz jonosferu protiču horizontalno širom planete, a zatim nadole ka Zemlji u regionima vedrog vremena. Budući da je litosfera takođe visoko provodljiva (Rycroft i Harrison, 2012), struje kroz kopnene i delove Zemljine površi prekrivene vodom, protiču nazad u atmosfersku oblast u kojoj je nastala olujna aktivnost. Time se globalno strujno kolo zatvara.

Na Slici 1.3.1.1 prikazani su pojednostavljeno globalno strujno kolo (gornji panel) i shematski prikaz kola ekvivalentnog globalnom strujnom kolu (donji panel).



a)



b)

Slika 1.3.1.1. a) Pojednostavljeno globalno strujno kolo (Golkowski et al., 2009) i
 b) Shematski prikaz kola ekvivalentnog globalnom strujnom kolu
 (Füllekrug et al. (eds), 2006)

Struje koje protiču od gornje površi olujnih oblaka (Slika 1.3.1.1, donji panel), naviše ka visokoj atmosferi, prolaze kroz otpornik R_1 ka jonosferi. U regionima vedrog vremena, najveći deo električne otpornosti r je u okviru nekoliko km Zemljine površi. Struje koje u regionima vedrog vremena protiču nadole ka tlu mogu se meriti i njihova gustina je oko 2 pA/m^2 . U regionu vedrog vremena, mereno na površi Zemlje (Rycroft i Harrison, 2012), električno polje je reda veličine $100 - 300 \text{ V/m}$. U prvoj aproksimaciji, oblast između dobro provodljive litosfere i jonosfere tretira se kao sferni kondenzator sa atmosferom kao izolatorom, koji se puni proticanjem naviše struja izazvanih olujnim nepogodama.

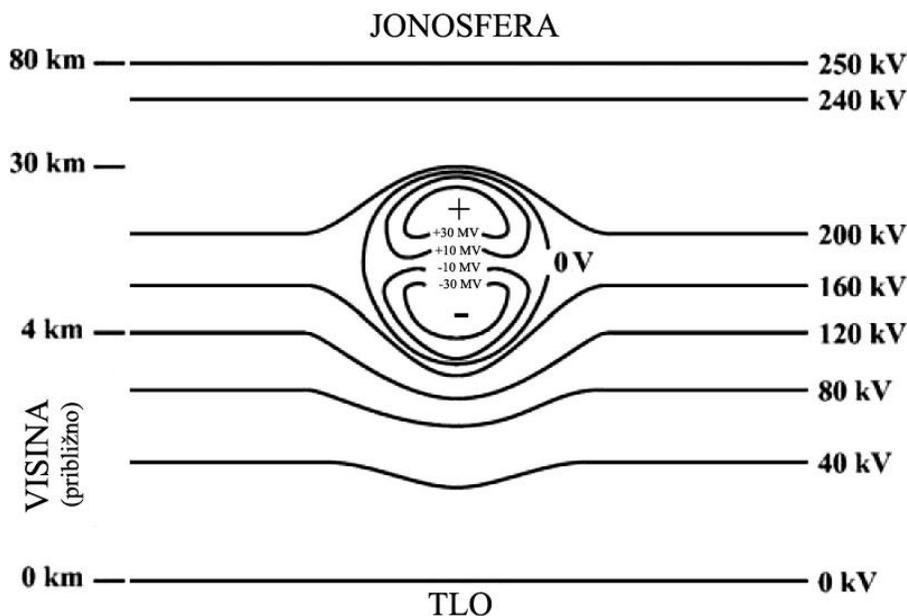
Generatori polja mogu biti i struje termalne konvekcije kao i struje tačkastog pražnjenja. Strujni generatori, prikazani sa leve strane vertikalne isprekidane linije (Slika 1.3.1.1, donji panel), deluju iznad manje od 1 % Zemljine površi. Region vedrog vremena, prikazan sa desne strane isprekidane linije, deluje iznad oko 99 % Zemljine površi i deo je kola u kojem se vrši naelektrisanje. Ukupna struja koja protiče iznosi približno 1 kA. Vremenska konstanta strujnog kola τ , iznosi nekoliko minuta. Kada se javi \pm CG pražnjenje, prekidač S_2 za tu oluju se zatvori na period od oko 1 ms, nakon čega se ponovo otvori. Kada se pojavi sprajt, njegov prekidač S_1 se zatvori na period od nekoliko ms, nakon čega se ponovo otvori.

1.3.2. Električno kolo naizmenične struje

Atmosfersko pražnjenje generiše u vremenu promenljiva električna polja, usled kojih protiču naizmenične struje. Ove struje čine naizmenično kolo unutar globalnog strujnog kola. Posledica proticanja struja usled tog polja je elektromagnetsko polje koje se širi u oblast pražnjenja kao elektromagnetski impuls EMP (eng. Electro Magnetic Pulse). Spektar elektromagnetskih talasa je veoma širok, od ekstremno niskih frekvencija ELF (eng. Extremely Low Frequency) ispod 3 kHz, preko radio talasa iz opsega niskih LF (eng. Low Frequency) i vrlo niskih frekvencija VLF, do opsega visokih frekvencija HF, VHF, UHF (eng. High, Very High i Ultra High Frequency). Pored “vodećih” i “povratnih” udara pražnjenja tipa oblak-tlo (\pm CG) i pražnjenja unutar oblaka (IC), javljaju se i procesi usporavanja relativističkih elektrona oslobođenih u aktivnim kanalima nekih od navedenih pražnjenja, pri sudarima sa jezgrima atoma konstituenata atmosfere (tzv. bremsstrahlung). Ovi procesi dovode do emitovanja zemaljskih gama “bljeskova” TGF (eng. Terrestrial Gamma-ray Flash). Takođe, procesi pražnjenja dovode do prostiranja talasa u modu kanalisanih i nekanalisanih “zviždućih” atmosfera. Vremena relaksacije sredine u kojoj se događa pražnjenje, ($t \sim \epsilon_0/\sigma$, gde je ϵ_0 permitivnost vakuuma, a σ provodljivost sredine), pri svim ovim pojavama su veoma različita i kreću se od 1 μ s do 200 s. Vreme relaksacije koje razdvaja kolo naizmenične struje od kola jednosmerne struje unutar globalnog kola je 200 s (Rycroft i Harrison, 2012).

1.3.3. Naelektrisanje olujnih oblaka i ekranizacija

Iznad gornje, široko rasprostranjene i pozitivno naelektrisane (oko 100 C) površi olujnog oblaka sa +100 C na visini 15 km i -100 C na visini 5 km, sa +100 MV i -100 MV, trebalo bi da postoji široko rasprostranjeno elektrostatičko polje, (Slika 1.3.3.1). U prirodi, takva polja ne postoje uvek, usled efekta ekranizacije (eng. screening).



Slika 1.3.3.1. Dijagram raspodele ekvipotencijalnih površi između Zemlje i jonosfere u blizini idealizovanog olujnog oblaka pre pojave atmosferskog pražnjenja (Füllekrug et al. eds, 2006)

U atmosferi, koja predstavlja slabo jonizovani gas, gde je koliziona frekvencija elektron-neutral veoma velika, provodljivost je ograničena. Najniža visina u atmosferi na kojoj se dešava ekranizacija pozitivnim naelektrisanjem je oko 60 km, gde vreme relaksacije iznosi oko 10 ms. Na visini 40 km, vreme relaksacije iznosi oko 100 ms, a iznad gornje površi oblaka iznosi nekoliko s. Samo u ovim vremenskim intervalima, u atmosferi zaista i postoji kvazi-elektrostatičko polje, usmereno nadole od jonosfere ka gornjoj površi oblaka. Ekranizacija smanjuje električno polje iznad olujnog oblaka, na vrednost koja je skoro uporediva sa vrednostima električnih polja u regionima vedrog vremena (polje koje je prikazano horizontalnim ekvipotencijalnim linijama na Slici 1.3.3.1).

1.3.4. Varijacije globalnog električnog kola u vremenu i prostoru

Iako naizgled jednostavno, globalno strujno kolo pokazuje kompleksne varijacije u zavisnosti od geografske lokacije olujne aktivnosti, koja proizvodi atmosferska pražnjenja, jonosferskih i magnetosferskih procesa kao i uticaja zagađenja i klimatskih faktora.

U oba dela električnog kola, kako u delu u kome se vrši pražnjenje (gde je $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ negativno) tako i u delu kola u kome se vrši naelektrisanje (pozitivno $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$), važi Ohm-ov zakon. Međutim, interpretacija naizgled jednostavnog Ohm-ovog zakona nije jednoznačna.

Mogu se javiti četiri tipa varijabilnosti $\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}$:

- ako je σ konstantno, \mathbf{J} i \mathbf{E} su povezani linearno,
- ako je \mathbf{J} konstantno, a σ se povećava, \mathbf{E} se smanjuje,
- ako je \mathbf{E} konstantno, a σ se povećava, \mathbf{J} se povećava proporcionalno σ i
- \mathbf{J} , σ i \mathbf{E} se menjaju nezavisno jedno od drugog.

Varijabilnost globalnog električnog kola u prostoru, uzrokovana je različitim procesima, pretežno u zavisnosti od geografskog položaja olujne aktivnosti koja proizvodi atmosferska pražnjenja (tj. od geografske širine, kopnene ili vodene oblasti, tipa meteoroloških uslova, prisustva ili odsustva zagađenja).

Varijabilnost u vremenu javlja se u širokom opsegu vremena, od $\sim \mu\text{s}$ (atmosfersko pražnjenje) do $\sim \text{ms}$ (emisija VLF/ELF radio talasa), $\sim 0.1 \text{ s}$ (Schumann-ove rezonancije), zatim minuta i sati (evolucija olujnih nepogoda). Treba uzeti u obzir i dnevnu (plimsku), kao i 27-dnevnu varijaciju (period solarne rotacije). Promene troposferskih strujnih izvora i solarne/geomagnetske aktivnosti pokazuju sezonske, polugodišnje i godišnje varijacije. Takođe, postoje i duže varijacije kao što su stratosferske kvazi-dvogodišnje oscilacije, solarni ciklus i dugoročnije klimatske promene (npr. u slučaju povećanja solarne aktivnosti iz solarnog minimuma u solarni maksimum moguće je da dođe do: a) neznatnog smanjenja visine niske jonosfere i b) znatnog smanjenja električne provodljivosti stratosfere).

2. Osnovne karakteristike kratkotrajnih svetlosnih atmosferskih fenomena TLE (eng. transient luminous events) i intenzivnih atmosferskih pražnjenja

Kratkotrajne/prolazne svetlosne atmosferske pojave TLE (eng. Transient Luminous Events,) predstavljaju svetlosne pojave velikih dimenzija koje se javljaju na visinama stratosfere, mezofere i niske jonosfere, a koje su neposredno vezane za električnu aktivnost oblaka olujnih nepogoda iznad kojih se i pojavljuju (Sentman et al., 1995; Neubert et al., 2008; Pasko, 2003).

Iako se za pojavu TLE znalo više od 120 godina (MacKenzie i Toynbee, 1886; Davidson, 1893; Everett, 1903; Boys, 1926; Vaughan i Vonnegut, 1989 i dr.), naučna istraživanja ovih pojava započela su tek 90-ih godina XX veka, nakon prvog snimka sprajta, slučajno zabeleženog 1989. godine, televizijskim kamerama prilagođenim za rad u uslovima slabog osvetljenja (Franz et al., 1990).

Od tada, TLE pojave i atmosferska pražnjenja koja ih iniciraju osmatrana su sa različitih aspekata, tokom brojnih specijalizovanih i usko usmerenih kampanja (EuroSprite 2003, 2005, 2007). Pojave su opažane sa Zemljine površi (Rairden i Mende, 1995; Lyons, 1996; Winckler et al., 1996; Stanley et al., 1999; Gerken et al., 2000; Barrington-Leigh et al., 2001; Su et al., 2002), iz vazduha (balonima, Bering et al., 2004; Holzworth et al., 2005; raketnim probama, Rakov i Uman, 2003; letilicama; Sentman et al., 1995; Wescott et al., 1995) i iz svemira. Osmatranja iz svemira, takođe, su vršena tokom različitih kampanja, orbitirajućim sensorima smeštenim na Space Shuttle-u (Boeck et al., 1995; Vaughan Jr. et al., 1992; Lyons i Williams, 1993; Isrealevich et al., 2004; Yair et al., 2004), na Internacionalnoj kosmičkoj stanici (Blanc et al., 2004) i satelitima (Lang et al., 2008, 2010; Lefeuvre et al., 2009, prvi satelitski eksperiment za osmatranje sprajtova ROCSAT-II ISUAL, kasnije FORMOSAT, Mende et al., 2004; Frey et al., 2004; DEMETER, Parrot et al., 2013; Záhlava et al., 2015; FORMOSAT2, Chern et al., 2015).

Za sada još uvek nije lansiran nijedan satelit namenjen isključivo osmatranju atmosferskih pražnjenja i TLE fenomena. Prvi satelit dizajniran za osmatranje atmosferskih pražnjenja na visinama 20 - 100 km, čija je misija osmatranje pojava TLE i TGF, biće satelit TARANIS, planiran za lansiranje krajem 2017. godine (<https://taranis.cnes.fr/en/TARANIS/index.htm>).

Razumevanje procesa koji povezuju TLE pojave i tipove intenzivnih (atipičnih) atmosferskih pražnjenja koja ih iniciraju, sa jedne strane i meteoroloških režima u kojima nastaju tipovi konventivnih olujnih nepogoda koje pogoduju generisanju takvih intenzivnih atmosferskih pražnjenja, sa druge strane, predstavlja predmet naučne oblasti koja se u novije vreme ubrzano razvija. Napredak je prvenstveno omogućen zahvaljujući razvoju novih tehnologija za osmatranje Zemlje iz vazduha i svemira.

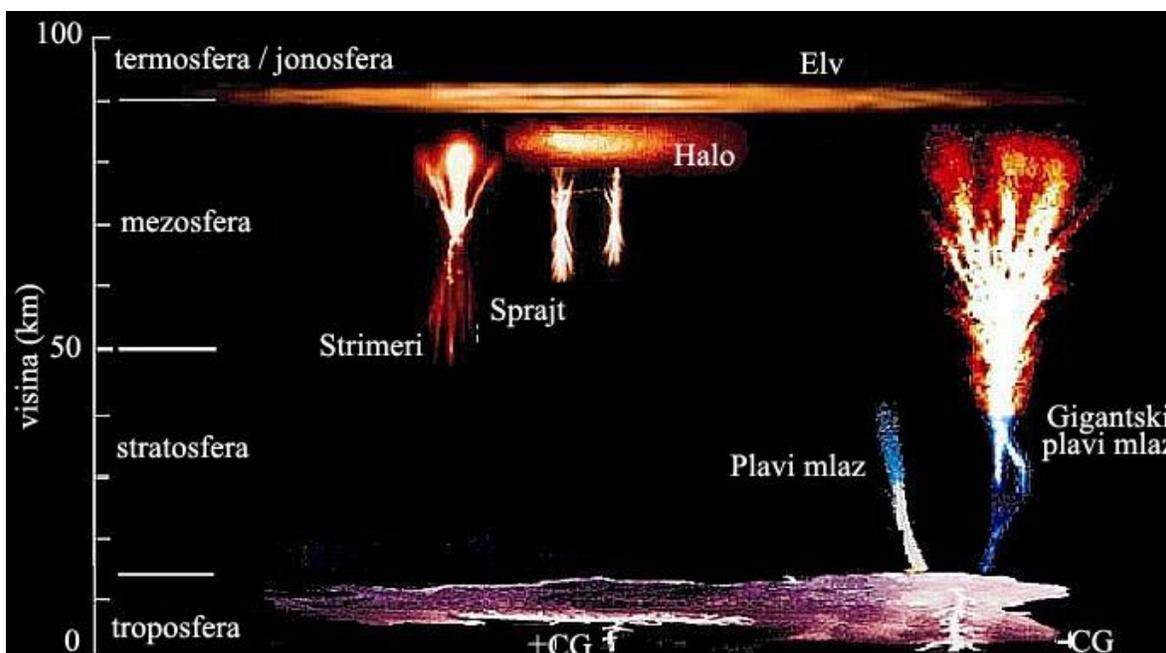
U poslednjih 30 godina istraživanja TLE pojava dokumentovano je i klasifikovano nekoliko različitih tipova. Ovde su u kratkim crtama prikazane najvažnije karakteristike osnovnih tipova kratkotrajnih/prolaznih svetlosnih atmosferskih pojava koje se klasifikuju kao TLE: crvenih sprajtova, halo-a, elvi, plavih mlazeva i pražnjenja iznad vrha oblaka naviše. Postojanje ovih fenomena manifestuje se pored svetlosne emisije i u drugim delovima elektromagnetskog spektra, od emisije radio talasa ekstremno niskih frekvencija (ELF) preko radio talasa niskih i vrlo niskih frekvencija (LF i VLF), pa do radio talasa vrlo visokih frekvencija (VHF). Detektovani su i prepoznatljivi znaci prostiranja infrazvuka povezani sa pojavom sprajtova (Liszka, 2004; Farges et al., 2005, Bedard Jr. et al., 1999).

Najnovija istraživanja imaju za cilj da dokažu i objasne pojavu TGF (eng. Terrestrial Gamma Rays) kao posledicu ubrzavanja elektrona do relativističkih brzina (Cohen et al., 2010), oslobođenih iz sprajtova pri čemu se emituje X (Moore et al., 2001; Dwyer et al., 2003, 2004b, 2005; Dwyer, 2004) i gama zračenje (Dwyer et al., 2004a; Dwyer, 2005; Smith et al., 2005; Cummer et al., 2005; Inan et al., 2005; Milikh et al., 2005; Dwyer et al., 2012; Croizé et al., 2014; Cummer et al., 2014, 2015).

Iako su prethodno pomenuti tipovi TLE ujedno i najviše istraživani tipovi, još uvek postoji veliki broj otvorenih pitanja u vezi njihovih pojava, nastanka, evolucije, prostorne i vremenske povezanosti sa inicirajućim pražnjenjima i sistemima konvektivnih olujnih nepogoda. Još uvek se intenzivno proučava njihov uticaj na nisku jonosferu i magnetosferu (usled narušavanja termalnih i hemijskih balansa) i klimu planete Zemlje uopšte. Takođe, međusobna povezanost i interakcije između različitih tipova TLE još uvek nisu dovoljno istraženi.

Važno je napomenuti da postoje i druge kratkotrajne/prolazne svetlosne atmosfere koje se ne mogu svrstati ni u jedan od prethodno navedenih tipova TLE i za čije razumevanje su neophodna dodatna istraživanja (Lyons et al., 2001; Pasko i George, 2001; Lyons et al., 2003a).

Shematski prikaz osnovnih tipova TLE pojava: sprajtova, elvi i plavih mlazeva dat je na Slici 2.1.



Slika 2.1. Shematski prikaz osnovnih tipova TLE pojava

(<http://www.cnes.fr/web/CNES-en/9128-gp-taranis-satellite-to-study-lightning.php>)

2.1. Intenzivna atmosferska pražnjenja koja iniciraju sprajtove

Snažna atmosferska pražnjenja, u završnim fazama razvoja konvektivnih kompleksa srednjih razmera MCC (eng. Mesoscale Convective Complex), koja proizvode sprajtove, često prenose pozitivno naelektrisanje iz olujnog oblaka sa visine od oko 5 km ka tlu (+CG pražnjenja). Tom prilikom nestaje dipolni moment koji ima velike vrednosti (formiran od naelektrisanja oko 100 C u oblaku) i njime izazvan dipolni moment u tlu od oko 1000 Ckm (Lyons et al., 2003b). To je ekvivalentno horizontalnom proticanju struje jačine 100 kA, u dužini 15 km na visini 5 km, koja zatim nastavlja da protiče ka tlu (moment struje je 1000 kAkm), tokom atmosferskog pražnjenja trajanja oko 1 ms (saglasno sa teorijskim modelom datim kod Cho i Rycroft, 2001). Intenzivna atmosferska CG pražnjenja sa dipolnim momentima većim od 100 Ckm iniciraju sprajtove (Hu et al., 2002) i tokom trajanja takvih pražnjenja dipolni moment prelazi 300 Ckm (Huang et al., 1999).

2.2. Crveni sprajtovi (eng. red sprites)

Na osnovu osmatranja sa Zemljine površi, crveni sprajtovi (eng. red sprites - “crveni đavolčići, duhovi, vilenjaci”), predstavljaju najčešće osmatrane pojave od svih TLE pojava. Sa Zemljine površi sprajtovi se mogu registrovati video zapisima (rezolucije 33 ms) ili fotometrijskim zapisima (rezolucije 1 ms i bolje). Takođe, proučavani su iz vazduha pomoću različitih instrumentalnih tehnika (letilice, baloni, raketne probe), a u novije vreme i iz svemira npr. na Internacionalnoj svemirskoj stanici (Blanc et al., 2004) i misija Columbia Space Shuttle (Yair et al., 2003, 2004; Price et al., 2004). Pojave crvene svetlosti velikog sjaja - crveni sprajtovi, javljaju se od oko 1 ms pa do nekoliko desetina ms nakon početka inicirajućeg atmosferskog pražnjenja, tipično na visinama oko 75 km (40 - 90 km). Crvena boja sprajta potiče od prvog pozitivnog kontinuuma zračenja atoma azota. Takve kratkotrajne/prolazne svetlosne pojave mogu biti sukcesivne, tako da ukupna aktivnost traje od ≥ 1 ms do ≥ 100 ms. Višestruka pražnjenja sličnih karakteristika mogu se simultano javiti međusobno horizontalno udaljena nekoliko km, pa čak i do 30 km.

U toku naredne 1 ms, generišu se strujni kanali naviše i naniže, dužine od nekoliko km čak do 10 km i širine oko 0.1 km ili čak i manje, a čija evolucija može trajati do 100 ms. Karakteristično je da se grananje tih kanala složene strukture (strimera) često prvo prostire nadole, što prati ekspanzija svetlosti naviše, uz pojavu prilično difuznog sjaja na samom vrhu sprajta (Pasko i Stenbaek-Nielsen, 2002). Završeci strujnih kanala u donjim delovima sprajta ("korenčići" - eng. tendrils) mogu se spustiti do visina ispod 40 km, pa čak i ispod 30 km. Donji delovi sprajta uvek su jasne plave boje koja potiče od prvog kontinuuma zračenja negativnog dvostruko jonizovanog azota i drugog pozitivnog kontinuuma zračenja atoma azota. Nije jasno da li završeci strujnih kanala u donjim delovima sprajta mogu da ostvare fizičku vezu sa gornjim delom olujnog oblaka od koga potiče inicijalno pražnjenje.

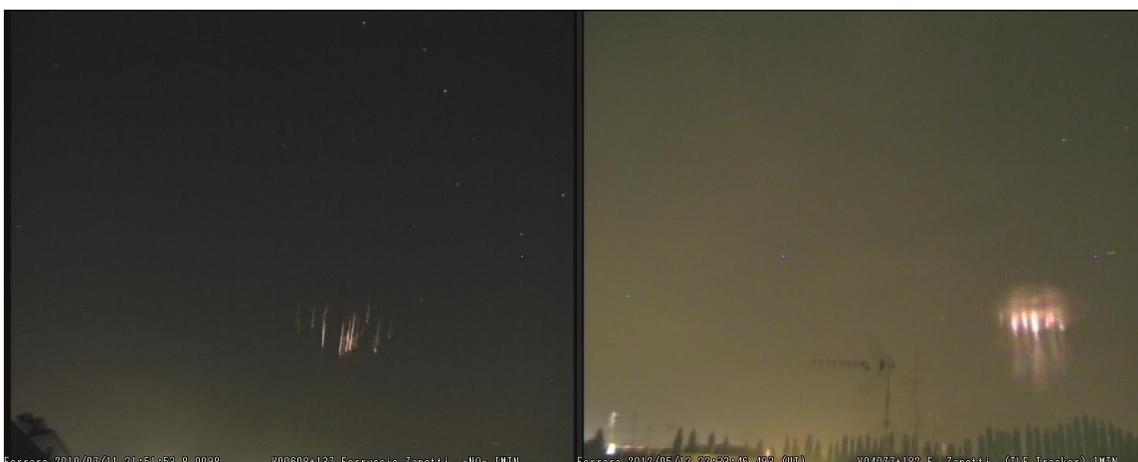
Tipovi sprajtova su dobili nazive po formama u kojima se pojavljuju. U literaturi su postali uobičajeni nazivi "sprajtovi u formi karote" (eng. "carrot sprites"), ili "sprajtovi u formi stubaca" (eng. "columniform sprites" ili "c-sprites"). Sprajtovi u formi stubaca su veoma uzane (reda veličine 1 km), naizgled kompaktne, gotovo vertikalne stubaste pojave, često sa "vlaknima" (eng. filaments) koja se pružaju naviše i naniže. Mogu se javiti kao klasteri, kada grupa od destak ili više sprajtova prekriva prostranstvo od svega nekoliko pa od nekoliko desetina km. Kod sprajtova u formi karote strujanja su grupisana tako da se nadole sužavaju dok se gornji delovi proširuju. Veći klasteri sprajtova često se nazivaju "A-bombe" ili "anđeli".

Tipična oluja koja generiše sprajtove, proizvodi sprajt na svakih nekoliko minuta i dok traje, pojavi se i po nekoliko desetina sprajtova. Ponekad oluje proizvode čak 400 do 750 sprajtova za 4 - 5 časova. Kod nekih oluja kod kojih se sprajtovi veoma brzo proizvode, oni na video snimcima izgledaju kao amorfni bljesci (Gerken i Inan, 2004). Razlog takve hiperaktivnosti oluja još nije uvek jasan. Snimci različitih tipova sprajtova prikazani su na Slici 2.2.1. Primer javljanja mnogobrojnih sprajtova generisanih intenzivnom olujnom aktivnošću dat je na Slici 2.2.2. Razvoj klastera sprajtova u vremenu može se videti na video zapisu: <http://www.wired.com/2013/07/transient-luminous-events/>.



a) klaster sprajtova tipa “andeli”

b) karot sprajt sa halo-om



c) klaster, kolumn sprajтови

d) klaster, karot sprajтови sa halo-om

Slika 2.2.1. Snimci različitih tipova sprajtova (<http://www.imtn.it/>)



Slika 2.2.2. Snimci sprajtova generisanih intenzivnom olujnom aktivnošću

(<http://spaceweathergallery.com>)

Velika horizontalno usmerena pražnjenja u oblacima, tipa paukove mreže (eng. spider lightning, Mazur et al., 1998), mogu se prostirati kroz oblake i preko 100 km, a zatim se u formi +CG pražnjenja u više tačaka pripajaju sa tlom i mogu inicirati sukcesivne serije sprajtova u formi koja podseća na “plesalice” (eng. “dancing sprites”, Hardman et al., 2000).

Većina informacija o trajanju sprajtova i njihovoj evoluciji dobijena je na osnovu video snimaka rezolucije 16.7 ms. Uglavnom vertikalno usmereni strujni kanali sprajtova, veoma različitih formi i fine strukture, lateralno mogu biti široki od nekoliko desetina pa do više stotina metara (Gerken et al., 2000; Gerken i Inan, 2002, 2003, 2005). Video sistemi visoke rezolucije (1 ms i bolje) pokazuju da najsjajnjiji elementi sprajta u formi strimera traju samo nekoliko ms. Inherentni sjaj sprajtova obično se kreće oko 1.0 MR (mada tokom kratkih intervala može dostići i nekoliko puta veću vrednost), a smatra se da u retkim slučajevima dostiže vrednosti i do 10 - 30 MR. Neki sprajtovi mogu se čak videti i golim okom adaptiranim na uslove slabog osvetljenja, mada se ponekad opažaju kao zeleni, beli ili žuti usled subjektivnih efekata prisutnih u ljudskom vidu u uslovima mraka.

Kod sprajtova je čest oštar prelaz po visini između gornjeg dela sprajta koji je difuzan i donjeg dela koji se sastoji od izrazito struktuiranih regiona (Stenbaek-Nielsen et al., 2000; Pasko i Stenbaek-Nielsen, 2002; Gerken i Inan, 2002, 2003, 2005). Kod velikog broja sprajtova javlja se amorfni difuzni svetli “krug” u formi oreola na njihovom gornjem delu tzv. “halo” (Barrington-Leigh et al., 2001; Wescott et al., 2001; Miyasato et al., 2002, 2003; Moudry et al., 2003; Gerken i Inan, 2003; Moore et al., 2003; Bering et al., 2004).

Vreme kašnjenja sprajta u odnosu na CG povratni udar veoma varira i može se odrediti pomoću video sistema visoke rezolucije ili fotometrijskim merenjima. Sprajtovi najvećeg sjaja često se javljaju oko 1 ms nakon povratnog udara, međutim, uobičajena su i kašnjenja od po više desetina ms.

Sprajtovi su uglavnom inicirani +CG pražnjenjima (Sentman et al., 1995; Boccippio et al., 1995). Na osnovu registracija mreža za detektovanje atmosferskih pražnjenja, zaključeno je da je velika većina sprajtova, oko 90 % sprajtova, indukovana +CG pražnjenjima, dok se oko 10 % sprajtova ne može dovesti u vezu sa +CG pražnjenjima. Iako su vršne struje +CG pražnjenja koja iniciraju sprajtove za oko 25 - 50 % jače u odnosu na ostala +CG pražnjenja u toku iste oluje, sama jačina vršnih struja u kanalu pražnjenja kao parametar je slab predskazivač potencijala CG pražnjenja za iniciranje sprajta (Lyons, 1996). Sprajtovi se najčešće javljaju u slučaju vršnih struja jačine preko 50 kA, mada su detektovani i u slučajevima slabih vršnih struja od samo 9 kA. U slučaju “najefikasnijih” oluja za iniciranje sprajtova, najčešće samo jedno od pet +CG pražnjenja inicira sprajt, ostavljajući otvoreno pitanje za dodatna istraživanja po čemu se ono razlikuje od ostalih koja ne iniciraju sprajtove.

U retkim slučajevima, sprajtovi se mogu javiti i usled veoma intenzivnih –CG pražnjenja (Barrington-Leigh et al., 1999; van der Velde O. et al., 2006; Taylor et al., 2008, Haldoupis et al., 2013), koja su po veličini dipolnog momenta i trajanju uporediva sa tipičnim +CG pražnjenjima koja iniciraju sprajtove. Statistička analiza povezanosti sprajtova kako sa pozitivnim tako i sa negativnim CG pražnjenjima na osnovu podataka NLDN (National Lightning Detection Network) mreže, data je kod São Sabbas et al., 2003. Pojava sprajtova sa halo-om, iniciranih –CG pražnjenjima na osnovu podataka WWLLN (World Wide Lightning Location Network) mreže, data je kod Taylor et al., 2008.

Vrednosti dipolnog momenta koje su potrebne da bi se inicirao sprajt su reda veličine od 100 do 600 Ckm (Lang et al., 2004; Lyons et al., 2003b; Cummer i Lyons, 2004, 2005), pa do 1000 Ckm (Hu et al., 2002; Williams, 2001), dok je potrebno da promena dipolnog momenta traje nekoliko ms. Promena dipolnog momenta ($\Delta M_Q(t)$, Ckm) definiše se kao proizvod srednje visine iznad tla (Z_Q , km), sa koje se prilikom pražnjenja naelektrisanje sprovodi do tla i količine sprovedenog naelektrisanja ($Q(t)$, C): $\Delta M_Q(t) = Z_Q \cdot Q(t)$ (Ckm). Procedura za dobijanje vrednosti dipolnog momenta iz ELF i VLF talasa emitovanih pri atmosferskom pražnjenju, data je kod Cummer, 2003.

Halo predstavlja pojavu u obliku sočiva amorfno sjaja čiji se intenzitet smanjuje nadole (Armstrong i Lyons, 2000; Stanley et al., 1999; Stenbaek-Nielsen et al., 2000). Halo se javlja 1 - 2 ms nakon inicirajućeg povratnog pražnjenja i traje 1 - 3 ms. Prečnik halo-a je najviše 100 km, a najniža visina na kojoj se javlja je 65 km (uvek je niži od elva). Manjeg je sjaja od sprajta (0.5 - 1 MR) i crvene je boje. Kada se halo javi praćen sprajtom, sprajt se inicira ispod halo-a. Opažanja kampanje optičkim sensorima na balonima 1999. godine (Bering et al., 2004) pokazala su da su brojni halo-i inicirani –CG pražnjenjima. U zavisnosti od tipa CG pražnjenja, razlikuje se +CG halo i –CG halo. Elvi i halo-i su manje ili više centrirani iznad CG pražnjenja, dok sprajtovi u odnosu na inicirajuća pražnjenja često mogu biti izmešteni i do 50 km (Wescott et al., 2001; Lyons, 1996). Snimci halo-a praćenog sprajtom i halo-a koji se javlja bez sprajta (eng. “spriteless halo”, Bering et al., 2004) prikazani su na Slici 2.2.3.



Slika 2.2.3. Snimci različitih tipova halo-a:

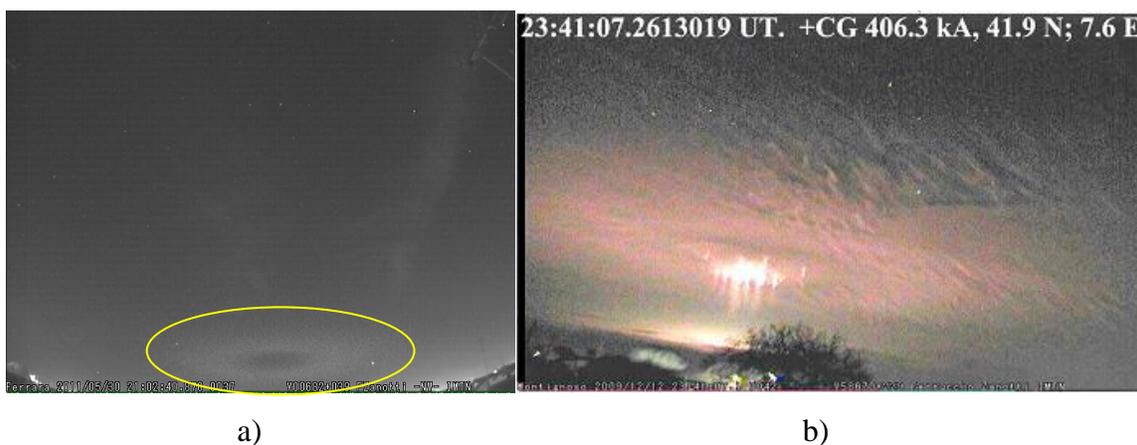
a) karot sprajt sa halo-om (<http://www.imtn.it/>) i b) halo (Moudry et al., 2003)

2.3. Elvi (eng. elves)

Reč “ELVES” u množini (u množini na srpskom jeziku - elvi) je skraćenica od: Emission of Light and VLF perturbation from an EMP Source (Fukunishi et al., 1996), u prevodu: emisija svetlosti i VLF perturbacija izazvana impulsnim elektromagnetskim izvorom. U jednini se koristi reč “ELVE” (u jednini na srpskom jeziku - elv).

Pojave crvene svetlosti, nazvane elvi (eng. elves), javljaju se oko 0.3 ms nakon početka atmosferskog pražnjenja koje ih je iniciralo, tipično na visinama oko 90 km (80 - 100 km). Geometrija Geoprostora (eng. Geospace) uslovljava da se ova svetlost pojavljuje u formi prstena koji se širi brzinom svetlosti, čiji prečnik dostiže 400 km ili više. Atmosferskim CG pražnjenjem emituju se snažni elektromagnetski impulsi koji zagrevaju atmosferu na visini oko 90 km. Zagrejani elektroni dovode do pobuđivanja molekula azota koji zatim zrače u prvom pozitivnom opsegu talasnih dužina (crvena boja). Iako su približno istog sjaja kao sprajtovi (približno 1 MR), elvi traju oko deset puta kraće, pa ih je teško detektovati video sistemima sa tla. Osmatranjima iz svemira utvrđeno je da elvi nisu tako retke pojave kao što se prvobitno smatralo na osnovu zemaljskih opažanja.

Prema opažanjima, najveći broj elva je iniciran –CG pražnjenjima pri kojima je promena dipolnog momenta izazvana impulsnim pražnjenjem u kraćem intervalu nego kod sprajtova. U tom procesu emituje se velika količina energije što se manifestuje visokom vrednošću vršne struje (kod sprajtova oko 100 kA, a kod elva preko 200 kA, Haldoupis et al., 2013). Upoređivanje promene dipolnog momenta kod sprajtova i elva je još uvek predmet sistematskih istraživanja. Novija istraživanja elva data su kod Haldoupis et al., 2013 i tu citiranim radovima. Tokom iste oluje sprajtovi i elvi mogu da se jave u promenljivom odnosu. Retko se javljaju samo sprajtovi ili samo elvi. Snimci tipičnog elva i elva sa sprajtom dati su na Slici 2.3.1.



Slika 2.3.1. Snimci elva:

a) elv (<http://www.imtn.it/>) i b) elv sa sprajtom (Haldoupis et al., 2012)

2.4. Plavi mlazevi (eng. blue jets, blue starters, gigantic jets)

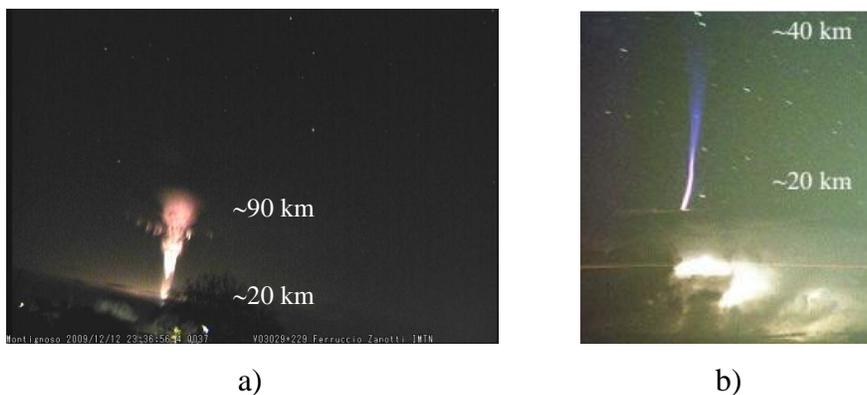
Grupa TLE pojava nazvanih plavi mlazevi najslabije je istražena u odnosu na sprajtove i elve, prvenstveno zbog izuzetno retkog pojavljivanja. Njihovo osmatranje sa Zemljine površi je otežano zbog izrazitog prigušenja svetlosti plave boje u atmosferi usled Rayleigh-jevog rasejanja (Wescott et al., 1998; Heavner et al., 2000). Kao jedan od glavnih razloga retkosti pojavljivanja ovih pojava može biti i sama konfiguracija senzora sistema za registrovanje TLE pojava, koji su pretežno usmereni na registrovanje svetlosti crvene boje.

Plavi mlaz je pojava jasno plave boje svetlosti (Wescott et al., 2001), koja se prostire naviše od gornje površi oblaka, pa do visina od oko 30 - 40 km gde se završava, brzinama 100 - 200 km/s i ima konusni oblik (Wescott et al., 1998, 2001; Lyons et al., 2003a). Ova pojava je prvi put registrovana 1995. godine tokom osmatranja iz vazduha (Wescott et al., 1995). Njihova struktura nije homogena već se sastoji iz više kanala (fotografska, Wescott et al., 2001 i video osmatranja, Pasko et al., 2002). Inherentni sjaj ovih pojava iznosi oko 1 MR, pa bi se u idealnim uslovima mogle videti golim okom adaptiranim na uslove mraka.

Plavi starter, takođe, predstavlja pojavu plave svetlosti. Prostire se naviše od gornje površi oblaka (17 - 18 km), ali se u odnosu na pojave plavih mlazeva, završava na znatno nižim visinama, maksimalno do 25.5 km (Wescott et al., 1996, 2001).

Gigantski plavi mlaz (Su et al., 2003; van der Velde O. et al., 2010), takođe, predstavlja pojavu plave svetlosti, ali se u odnosu na pojave plavih mlazeva, završava na znatno višim visinama, čak do 90 km. Gigantski plavi mlaz direktno električno povezuje olujni oblak sa nižom jonosferom (Pasko et al., 2002; Su et al., 2003; Pasko, 2003, Lu et al., 2011).

Snimci gigantskog plavog mlaza i plavog mlaza prikazani su na Slici 2.4.1. Razvoj plavog mlaza i gigantskog plavog mlaza u vremenu, može se videti na video zapisima: <http://elf.gi.alaska.edu/movies/output.mpg> i <https://vimeo.com/136192846>.

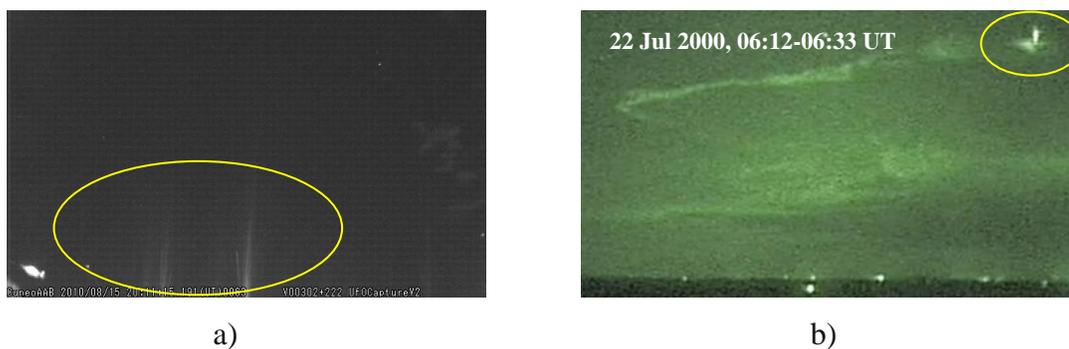


Slika 2.4.1. Snimci plavih mlazeva:

a) gigantski plavi mlaz (<http://www.imtn.it/>) i b) plavi mlaz (Wescott et al.,1995)

2.5. Pražnjenje iznad vrha oblaka navije

Tip pražnjenja nazvan “pražnjenje iznad vrha oblaka navije” (eng. Upward Lightning from Cloud Tops), prostire se u visinu od nekoliko stotina m, pa do više desetina km iznad oblaka. Izdvojeno je i tzv. “pravo pražnjenje navije” (eng. true upward lightning), koje je vidljivo i tokom dana. Pojava svetlosti u formi stubca koja podseća na munju, a koji se prostire od gornjeg dela oblaka i preko 30 km navije, ne treperi i ima boju od žute do bele, može trajati 1 do 2 s pre nego što čitav stubac ne izbledi (pregled dotadašnjih opažanja ovih pojava dat je kod Lyons et al., 2003a). Snimci pražnjenja iznad vrha oblaka navije prikazani su na Slici 2.5.1.



Slika 2.5.1. Snimci pražnjenja iznad vrha oblaka navije:

a) eng. upward lightning (<http://www.imtn.it/>) i
b) eng. upward lightning (Lyons et al., 2003a)

2.6. Emisija radio talasa iz TLE

Budući da unutar struktura TLE pojava protiču struje promenljive jačine, ali dovoljno jake da proizvedu momente uporedive sa momentima jačine struje kod atmosferskih pražnjenja, treba očekivati da i same TLE generišu elektromagnetske talase iz radio opsega. Ova pojava je teorijski predviđena i istraživana za slučaj zračenja ELF talasa iz sprajtova (Pasko et al., 1998). Na osnovu podataka o ELF talasima emitovanim u vreme opažanja sprajtova i merenja struja pražnjenja, određivani su momenti jačine struje i pripadne promene momenata električnog dipola.

Opažanja su pokazala da se promene momenata električnog dipola, koje su dovoljne za iniciranje sprajtova kreću u širokom opsegu, od 100 do 2000 Ckm. U poređnom analizom vremena pojavljivanja sprajtova na video zapisima visoke rezolucije i registracija magnetskog polja ELF talasa u toku jednog dana, ustanovljeno je da je najveći broj sprajtova iniciran promenama momenta električnog dipola u opsegu 300 - 1100 Ckm, sa kašnjenjem za inicirajućim pražnjenjem 2 - 11 ms (Cummer et al., 1998, Cummer, 2003). Ovo upućuje na mogućnost, da naelektrisanje, koje nije promenom momenta električnog dipola deponovano izvan sprajta, omogućava dalje proticanje struje i formiranje momenta dipola sprajta. To naročito važi za izuzetno intenzivne sprajtove.

Satelit Demeter na orbiti od 700 km, namenjen prvenstveno za praćenje emisije ELF i VLF talasa koje emituju "zviždući" atmosferici, zabeležio je "in situ" elektromagnetske efekte koji potiču od sprajtova (Blecki et al., 2009). Dva sprajta snimljena su kamerom, 20. jula 2007. godine u 20:10:08 UT, u observatoriji u Poljskoj (50.74 S; 15.74 I) na 1603 m nadmorske visine. Istovremeno, zabeleženi su jasni i jaki ELF i VLF signali prijemnikom na satelitu, iako je bio udaljen 1200 km od oblasti olujne aktivnosti. Prema podacima mreže za registrovanje atmosferskih pražnjenja EUCLID, dva +CG udara inicirala su pomenute sprajtove.

Jačina vršne struje ovih pražnjenja bila je reda veličine 100 kA, ali nije bilo dovoljno podataka da se izračuna promena momenta dipola koja bi ukazivala da se radi o emisiji iz sprajtova. Međutim, na osnovu potpuno različitih oblaka i trajanja ELF signala istovremeno dobijenih od “zviždućih” atmosfera, zaključeno je da ova emisija potiče od elektrostatičkog pražnjenja u samim sprajtovima.

U toku 2003. i 2004. godine, u Francuskoj su postavljene četiri stanice za osmatranje zračenja iz pražnjenja i sprajtova. Cilj je bio da se mere vertikalna električna polja emisije radio talasa u rasponu frekvencija od VLF (3 - 30 kHz) do LF (30 - 300 kHz), MF (eng. Medium Frequency, 0.3 - 3 MHz) i HF (3 - 30 MHz) i da se detektuje moguća emisija usled električnog proboja povezanog sa oslobađanjem elektrona u toku pražnjenja. Upoređeni su podaci o CG pražnjenjima registrovanim sistemom Meteorage i optička opažanja sprajtova opservatorije Observatoire Midi-Pyrenees. Slaba emisija HF talasa od 0.5 do 3 MHz izmerena je u intervalu u kome su se pojavili sprajtovi. Od primećenih 113 sprajtova, 58 se pojavilo istovremeno sa primljenim HF talasima. Za analizu su odabrani samo oni događaji pri kojima nije bilo zabeleženo CG pražnjenje. Daljom selekcijom HF emisija je povezana sa 8 sprajtova. U nekoliko slučajeva, HF emisija zabeležena je istovremeno sa VLF emisijom, koja je mogla da potiče od sprajtova ili od IC pražnjenja, koje inicira sprajtove tipa karote (Neubert et al., 2008).

Pored navedenih i ostala istraživanja, zasnovana na simultanim video zapisima sprajtova, fotometrijskim merenjima i registracijama ELF radio atmosfera, ukazuju na to da vertikalne struje koje teku unutar sprajtova, generišu značajnu ELF emisiju. Sprajtovi u električnoj sprezi između oblasti atmosfere predstavljaju jedan od izvora struje naizmeničnog strujnog kola i zbog toga su deo globalnog atmosferskog električnog polja.

Nije sa sigurnošću utvrđeno da li i ostale TLE pojave sopstvenim strujama generišu elektromagnetske talase iz radio opsega.

3. Prostiranje VLF radio talasa kroz Geoprostor

Način radiopropagacije zavisi od promena stanja Geoprostora, koji obuhvata oblast jonizovane okoline Zemlje - jonosferu i magnetosferu Zemlje. Prostiranje radio talasa kroz slojevitou jonizovanu sredinu u magnetskom polju, sa neutralnom atmosferom kao pozadinom, praćeno je anizotropijom, disperzijom i rasipanjem (Budden, 1961).

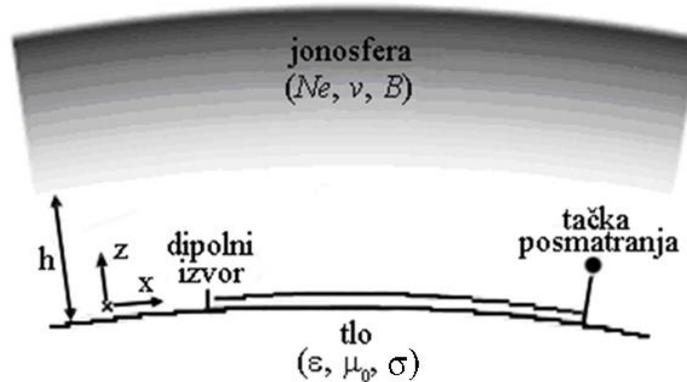
Povećanje stepena jonizacije u jonosferi u periodima pojačane solarne aktivnosti, naročito u oblasti D, dovodi do poremećaja osnovnih parametara dugih LF i vrlo dugih VLF radio talasa, koji se prostiru niskom jonosferom (kroz talasovod Zemlja-jonosfera).

Manifestacije tih poremećaja, zabeležene sistemima AbsPAL (Absolute Phase & Amplitude Logger) i AWESOME (Atmospheric Weather Electromagnetic Sistem for Observation Modeling and Education) u Beogradu, iskorišćene su za dijagnostiku niske jonosfere u regularnim i neregularnim solarno-terestričkim uslovima. Rezultati tih istraživanja mogu se naći kod grupe autora: Kolarski et al., 2011; Kolarski i Grubor, 2014, 2015; Grubor et al., 2008; Žigman et al., 2007, 2014; Nina et al., 2011, 2012a, 2012b, 2015; Nina i Čadež, 2013, 2014; Bajčetić et al., 2015; Šulić et al., 2006, kao i u Magistarskoj tezi Kolarski A., 2009 i Doktorskoj disertaciji Nina A., 2014.

Promene uslova propagacije u talasovodu se na VLF signalima manifestuju kroz različite tipove promena amplitude i faze duž trase signala, što se uspešno koristi u svrhe radiodijagnostike oblasti D. Primenjuje se tehnika registrovanja više različitih VLF talasa emitovanih od predajnika na različitim udaljenostima u odnosu na prijemnik. Prate se varijacije amplitude i faze registrovanih talasa na dnevnoj bazi, kako u mirnim jonosferskim uslovima, tako i tokom različitih poremećaja. Moguće je odrediti i efektivnu visinu refleksije talasa i provodljivost sredine, kao i pratiti njihove varijacije.

3.1. Prostiranje VLF talasa kroz talasovod Zemlja-jonosfera

Propagacija VLF radio talasa frekventnog opsega 3 - 30 kHz, na udaljenostima većim od nekoliko stotina kilometara, obično se teorijski tretira kao propagacija kroz talasovod koji je sa donje strane ograničen tlom, a sa gornje jonosferom, koji su oboje delimično provodljivi. Shematski prikaz talasovoda Zemlja-jonosfera, gde je ravan x-y tangencijalna na površ Zemlje, a osa z usmerena vertikalno, dat je na Slici 3.1.1.



Slika 3.1.1. Shema talasovoda Zemlja-jonosfera (Cummer, 2000)

Talasne dužine VLF talasa (10 - 100 km) su toliko velike da se u rasponu od jedne talasne dužine jonosfera znatno menja i nailazeći VLF signal “vidi” bazu jonosfere kao oštru granicu. U nižoj jonosferi frekvencija sudara elektron-jon (ν) iznosi oko $2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ (na visini 70 km) i ona je veća od frekvencije talasa (ω). U takvim uslovima se opšti oblik Appleton-Hartree-jeve jednačine za indeks prelamanja n (Budden, 1961) svodi na oblik:

$$n^2 = 1 - i \frac{X}{Z} = 1 - i \frac{\omega_N^2}{\omega \nu}. \quad (3.1.1)$$

Veličine X i Z su bezdimenzione veličine definisane kao $X = \frac{\omega_N^2}{\omega^2}$ i $Z = \frac{\nu}{\omega}$, gde je ω_N kružna (angularna) plazmena frekvencija, a ν je frekvencija sudara (koliziona frekvencija) između elektrona i ostalih čestica jonizovane sredine.

Kružna frekvencija radio talasa je označena sa $\omega = 2\pi f$, gde je f frekvencija radio talasa. Veza između frekvencije i talasne dužine radio talasa je: $\lambda=c/f$, gde je λ talasna dužina, a c brzina prostiranja elektromagnetskih talasa u vakuumu.

Jonosfera sa koncentracijom elektrona N_e se u ovom slučaju ponaša više kao metal nego kao dielektrik, sa elektroprovodljivošću $\sigma = \frac{N_e^2}{m\nu} = \frac{\epsilon_0\omega_N^2}{\omega\nu}$ (vidi npr. Milić, 1989), gde je m masa elektrona. Pretpostavka oštrog granice jonosfere, koja je pogodna je za upotrebu u uslovima nekih jonosfernih poremećaja, nije realna u neporemećenim uslovima jonosfere.

Problem graničnih uslova za bilo koji pretpostavljeni profil koncentracije elektrona i frekvencije sudara po vertikali i za bilo koju frekvenciju radio talasa, polarizaciju i upadni ugao talasa, može se egzaktno rešiti primenom postupka tzv. “potpunog rešenja talasne jednačine” inkorporiranog u složene programske pakete za proračun trase i parametara prostiranja dugih talasa, kao što je npr. LWPC.

3.2. Prostiranje VLF talasa pod uticajem geomagnetskog polja

U magnetosferi gustina energije geomagnetskog polja prevazilazi gustinu kinetičke energije čestica plazme, pa je kretanje naelektrisanih čestica pretežno određeno geomagnetskim poljem:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} > NkT, \quad (3.2.1)$$

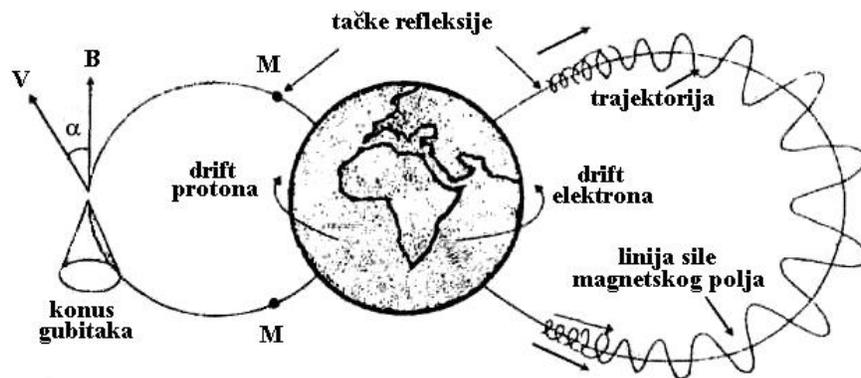
gde je B magnetska indukcija u teslama (T), μ_0 je magnetska permeabilnost vakuuma, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ (J/K) je Boltzman-ova konstanta, a N je koncentracija čestica plazme u m^{-3} na apsolutnoj temperaturi T .

Oblik i strukturu magnetosfere uglavnom određuje interakcija geomagnetskog polja sa interplanetarnim magnetskim poljem IMF (eng. Interplanetary Magnetic Field). O strukturi magnetosfere postoji veliki broj radova (sažet pregled može se naći u monografiji Grubor i Šulić, 1997), baziranih na satelitskim podacima, kao i više matematičko-fizičkih modela. Ovde će samo ukratko biti pomenute najvažnije karakteristike magnetosferske plazme neophodne za razumevanje osnovnih procesa iz ugla VLF propagacije.

Geomagnetsko polje drži na okupu nekoliko različitih populacija naelektrisanih čestica:

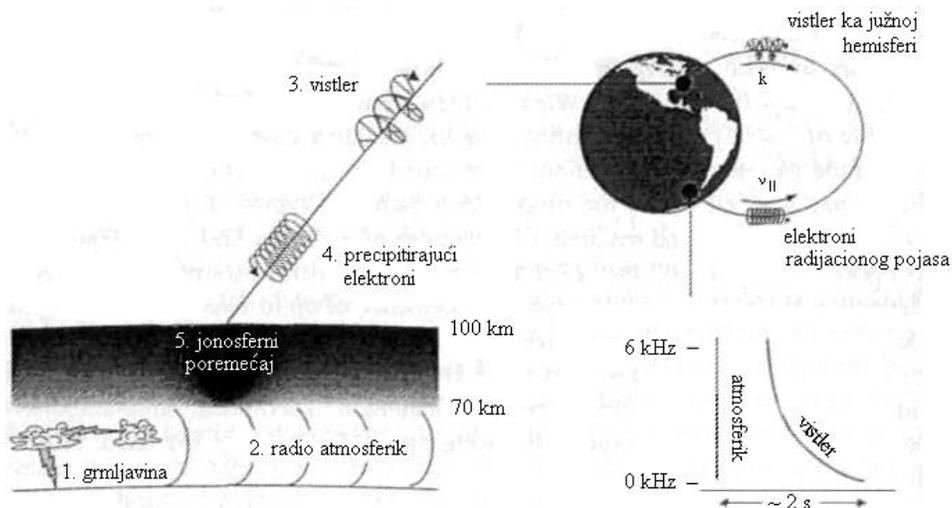
- Duboko unutar magnetosfere nalazi se plazmasfera (“unutrašnja magnetosfera”), koja kroz razne procese stupa u međudelovanje sa srednješirinskom jonosferom. Plazmasfera sadrži elektrone, protone i neke jone veće atomske mase i sve ove čestice vrše termalno kretanje.
- Na zatvorenim linijama sile geomagnetskog polja, postoje zarobljene visokoenergijske čestice koje formiraju Van Allen-ove radijacione pojaseve. Unutrašnji pojas se prostire od visine 400 km do 1200 km, odakle počinje spoljašnji pojas, koji se prostire do $6 \cdot 10^4$ km, gledano u ekvatorijalnoj ravni. Kada pomenute čestice napuste oblast zarobljavanja, one precipitiraju u atmosferi, gde doprinose stepenu jonizacije. *Ova pojava može da se detektuje pomoću promena VLF signala.*
- Unutar magnetorepa nalazi se plazmena “naslaga”, koja sadrži visoko energijske elektrone. Ovi elektroni izazivaju auroralne pojave i ostale promene visokoširinske jonosfere. Njihove energije imaju vrednosti između energija čestica u Van Allen-ovim pojasevima i u plazmasferi.
- U magnetopauzi se nalaze čestice čiji sastav i energije regulišu solarni vetar i plazma iz magnetoobloge.

U Van Allen-ovim pojasevima, naelektrisane visokoenergijske čestice, sa kinetičkim energijama $E_k \geq 30$ keV, kreću se po helikoidalnim putanjama oko linija sile geomagnetskog polja, kojima su trajno zarobljene. Kretanje se vrši usled Lorentz-ove sile u stacionarnom magnetskom polju indukcije \mathbf{B} . Ugao α koji zaklapa vektor brzine čestice \mathbf{v} , sa vektorom \mathbf{B} naziva se nagibni ugao (pitch angle) i prikazan je na Slici 3.2.1.



Slika 3.2.1. Shematski prikaz kretanja zarobljenih čestica duž zatvorenih linija sile geomagnetskog polja (Hargreaves, 1992)

Pražnjenja u atmosferi koja rezultuju širokim spektrom radiotalasa od ELF do VHF dovode do interakcije tipa talas-čestica, gde su talasi iz područja ELF - VHF, a čestice su elektroni koji žiriraju duž linija sile geomagnetskog polja. Elektroni precipitiraju u niskoj jonosferi usled gubljenja energije tokom te interakcije. U niskoj jonosferi javljaju se područja povećane koncentracije elektrona LIE (eng. Localised Ionisation Enhancement, Nunn, 1997), koja utiču na uslove propagacije VLF talasa. Precipitacija elektrona izazvana kanalisanim “zviždućim” atmosfericima, VLF talasima 3 - 30 kHz (Strangeways, 1996), prikazana je na Slici 3.2.2.



Slika 3.2.2. Precipitacija elektrona izazvana kanalisanim “zviždućim” atmosfericima (Strangeways, 1996)

Poremećaji parametara VLF propagacije, kao posledica precipitacije elektrona izazvane atmosferskim pražnjenjem, koje emituje kanalisane “zvižduće” atmosferike, kraće se nazivaju WEP (eng. Whistler-induced Electron Precipitation). Poremećaji parametara VLF propagacije kao posledica precipitacije elektrona izazvane atmosferskim pražnjenjem koje emituje nekanalisane “zvižduće” atmosferike, kraće se nazivaju LEP (eng. Lightning-induced Electron Precipitation).

Poreklo visokoenergijskih čestica u prirodnim radijacionim pojasevima je različito. Čestice u unutrašnjem pojasu su posledica kosmičkog zračenja ili izbacivanja koronalne mase Sunca CME (eng. Coronal Mass Ejection). Čestice u spoljašnjem pojasu potiču od solarnog vetra i jonosferske plazme. Međutim, postoje i veštački radijacioni pojasevi sačinjeni od produkata radioaktivnog raspada, ubačenih u magnetosferu putem linija sile geomagnetskog polja, nastali pri atomskim probama na velikim visinama.

Registrowanje VLF talasa u Beogradu vrši se pomoću AbsPAL i AWESOME sistema VLF prijemnika, instaliranih u Institutu za fiziku. Registracije VLF talasa AbsPAL prijemnim sistemom sa šest kanala, vrše se kontinuirano od 2004. godine do danas. Sistemom AWESOME moguća je simultana registracija 15 VLF signala. Sistem AWESOME radi kontinuirano od 2008. godine do danas. Primena VLF talasa registrovanih u Beogradu u istraživanju niske jonosfere može se naći u Kolarski et al., 2011; Kolarski i Grubor, 2014, 2015; Grubor et al., 2008; Žigman et al., 2007, 2014; Nina et al., 2011, 2012a, 2012b, 2015; Nina i Čadež, 2013, 2014; Bajčetić et al., 2015; Šulić et al., 2006, kao i u Magistarskoj tezi Kolarski A., 2009 i Doktorskoj disertaciji Nina A., 2014.

Registracije “zviždućih” atmosferika (eng. whistlers) vrše se posebnim sistemima za registrovanje. Stanica za registrovanje “zviždućih” atmosferika u Beogradu puštena je u rad krajem sedamdesetih godina XX veka u Geomagnetskom institutu. Primena “zviždućih” atmosferika registrovanih u Beogradu u istraživanju plazmasfere može se naći u Doktorskoj disertaciji Šulić D. M., 1987.

4. Podaci potrebni za analizu elektromagnetske sprege sistema litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje

Za analizu elektromagnetske sprege sistema litosfera - atmosfera - jonosfera Zemlje, neophodno je imati podatke o atmosferskim pražnjenjima, TLE pojavama i o prostiranju VLF talasa. Ukratko će biti opisani izvori podataka koji su korišćeni u ovoj doktorskoj disertaciji.

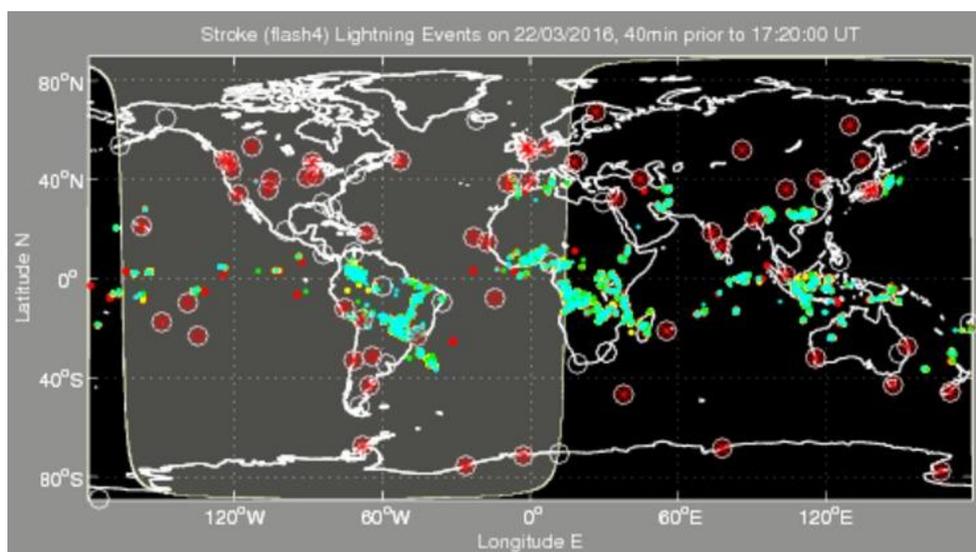
4.1. Osmatranja atmosferskih pražnjenja

Atmosferska pražnjenja i naelektrisanje olujnih oblaka ispitivani su brojnim tehnikama, uključujući mreže sa automatizovanim brojanjem bljeskova, mreže za merenja električnog polja, laboratorijska ispitivanja kanala pražnjenja, ispitivanja atmosferskog pražnjenja izazvanog raketama, ispitivanja "in situ" električnog polja u oblacima pomoću balona i sondiranjem letilicama. Tokom poslednjih decenija, glavni iskorak u ispitivanju atmosferskih pražnjenja napravljen je prvenstveno primenom zemaljskih mreža za detektovanje atmosferskih pražnjenja i primenom specijalnih senzora smeštenih na satelitima. Danas širom sveta postoje brojne zemaljske mreže za detektovanje atmosferskih pražnjenja, lokalnog ili regionalnog rasprostranjenja, a takođe postoji i globalna mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja.

Zemaljska mreža za detektovanje pražnjenja daje, u realnom vremenu, ili iz arhiva, sledeće podatke: vreme pražnjenja, broj i redosled povratnih udara (u ms ili čak preciznije), vršnu struju (kA) i/ili energiju (J), polarnost, lokaciju i tip (IC ili CG) pražnjenja. Kod modernih sistema, tipična preciznost pri određivanju lokacije udara iznosi približno 500 m. Efikasnost detektovanja pražnjenja iznosi 50 - 70 %, a bljeska 80 - 90 %. Pražnjenja tipa +CG detektuju se sa većom preciznošću nego -CG.

4.1.1. Svetska mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja

Svetska mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja WWLLN (World Wide Lightning Location Network, <http://wwlln.net/new/>, Slika 4.1.1.1) sa sedištem na Univerzitetu u Washington-u (Seattle, USA), za lociranje pražnjenja koristi senzore iz VLF opsega. Globalna mreža WWLLN uspešno detektuje oko 50 % najjačih pražnjenja, ali samo 15 % svih pražnjenja, što znači da je za pronalaženje poklapanja 1 naprema 1 između pražnjenja i pojave sprajta, u startu potrebno imati 3 ili 4 puta više podataka o pojavama sprajtova.



Slika 4.1.1.1. Lokacije atmosferskih pražnjenja registrovane WWLLN mrežom (<http://wwlln.net/new/>)

Globalna mreža WWLLN u formi listinga (Tabela 1) daje podatke o datumu, vremenu, položaju i energiji pražnjenja, kao i broj stanica kojima je to pražnjenje bilo registrovano.

Prilikom atmosferskih pražnjenja emituju se impulsi elektromagnetskih talasa značajne snage u širokom opsegu frekvencija, od nekoliko Hz (ELF opseg) do više stotina MHz (VHF opseg). Najveći deo emitovane energije je u opsegu VLF talasa, tzv. "sferici". Tipičan spektrogram registrovanih sferika, generisanih atmosferskim pražnjenjima, na jednoj od stanica WWLLN mreže (Tel Aviv) prikazan je na Slici 4.1.1.2.

Tabela 1. Primer načina zapisa podataka o pražnjenjima registrovanih WWLLN mrežom

Y/M/D	Hr:Mn:sec.fract UT	Lat (°)	Lon (°)	resid (μ s)	nsta	Energy (J)	energy_ uncertainty (J)	esta
2012/4/23	00:00:00.149517	26.5463	135.4961	13.2	9	2741.38	332.49	5
2012/4/23	00:00:00.834707	10.7970	125.8763	06.2	7	1744.95	131.47	6
2012/4/23	00:00:00.943868	19.4564	-070.9303	17.2	6	298.00	118.10	4
2012/4/23	00:00:00.922768	14.1879	-090.7451	24.0	16	507.86	136.14	13
2012/4/23	00:00:00.943845	19.3481	-070.9295	16.4	5	212.37	48.31	4
2012/4/23	00:00:01.205949	14.2636	-090.4189	14.0	11	140.89	33.33	9

Gde je:

Y/M/D - datum pražnjenja u formatu godina/mesec/dan,

Hr:Mn:sec.fract UT - UT vreme pražnjenja u formatu sat/minut/sekund.deo,

Lat (°) - geografska širina (°),

Lon (°) - geografska dužina (°),

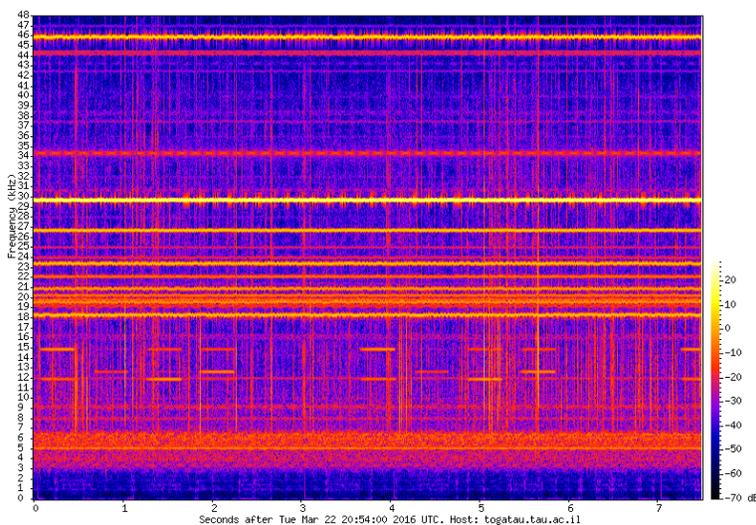
resid (μ s) - rezidualna greška u μ s (uvek manje od 30 μ s),

nsta - ukupan broj stanica WWLLN mreže koje su registrovale pražnjenje (uvek ≥ 5),

Energy (J) - energija pražnjenja (RMS energija 7 - 18 kHz u intervalu uzorkovanja 1.3 ms),

energy_uncertainty (J) - nesigurnost prilikom određivanja enegije pražnjenja,

esta - broj stanica, od ukupnog broja stanica, koje su korišćene za određivanje energije i pražnjenja i koje su od 1000 do 8000 km udaljene od samog pražnjenja.



Slika 4.1.1.2. Spektrogram sferika u VLF opsegu registrovanih WWLLN mrežom na stanici Tel Aviv (<http://wwlln.net/new/spectra/>)

4.1.2. Regionalna evropska mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja

Regionalna evropska mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection, <http://www.euclid.org/>, Slika 4.1.2.1), predstavlja kooperaciju između lokalnih nacionalnih mreža za registrovanje atmosferskih pražnjenja na području Evrope. Mreža EUCLID u formi listinga (Tabela 2) daje podatke o datumu, vremenu, položaju, vršnoj struji i tipu pražnjenja (CG ili IC), kao i broj i redosled povratnih udara. Efikasnost detektovanja CG pražnjenja iznosi preko 90 %, a u slučaju IC pražnjenja je oko 65 %. Prostorna preciznost pri određivanju lokacije udara je oko 500 m.

Tabela 2. Primer načina zapisa podataka o pražnjenjima registrovanih EUCLID mrežom

date	time UT	nano UT	longitude (°)	latitude (°)	amplitude (kA)	nbloc	numloc	icloud
2009-05-27	21:00:20	7.42975E8	15.3888	44.4319	-32.6	4	1	f
2009-05-27	21:00:20	7.80628E8	15.3793	44.4286	-26.8	4	2	f
2009-05-27	21:00:20	7.96053E8	15.3788	44.4292	-6.6	4	3	f
2009-05-27	21:00:20	8.63537E8	15.3799	44.4243	-23.2	4	4	f
2009-05-27	21:00:26	6.96238E8	14.236	42.7018	-30.1	1	1	t
2009-05-27	21:00:26	7.01008E8	14.2354	42.7065	-68	3	1	f
2009-05-27	21:00:26	7.4047E8	14.2534	42.7004	-17.9	3	2	f

Gde je:

date - datum pražnjenja u formatu godina-mesec-dan,

time UT - UT vreme pražnjenja u formatu sat-minut-sekund,

nano UT - UT broj ns,

longitude (°) - geografska dužina (°),

latitude (°) - geografska širina (°),

amplitude (kA) - vršna struja pražnjenja (kA),

nbloc - broj povratnih udara pražnjenja,

numloc - redosled povratnih udara pražnjenja i

icloud - tip pražnjenja; IC = t(true), CG = f(false).



Slika 4.1.2.1. Lokacije atmosferskih pražnjenja registrovane EUCLID mrežom

(+ = pozitivno pražnjenje, ■ = negativno pražnjenje,

<http://www.euclid.org/realtime.html>)

4.1.3. Opažanje olujne aktivnosti u Republici Srbiji

Opažanje olujne aktivnosti u Republici Srbiji vrši Republički hidrometeorološki zavod, od početka juna 1975. godine do danas, mrežom stanica koje rade u režimu tzv. brojanja dana sa grmljavinom.

Grmljavine registrovane direktno iznad stanice, nose oznaku GR, dok grmljavine registrovane kao olujna aktivnost u daljini, koje mogu biti po 100 km daleko od stanice, nose oznaku GM. Na velikom broju stanica opažanja nisu vršena u kontinuitetu, izuzev stanice u Beogradu, Nišu i Novom Sadu (Rimski Šančevi). Olujna aktivnost tipa GR beležena je na sve tri pomenute stanice, dok je olujna aktivnost tipa GM beležena jedino na stanici u Beogradu.

Sistem u formi listinga daje podatke o položaju olujne aktivnosti u odnosu na stanicu kojom je registrovana (GR ili GM), datumu, početku i završetku (trajanju) grmljavine, sa minutnom tačnošću, kao i o intenzitetu zabeležene grmljavine. Primer registrovane olujne aktivnosti stanicom u Beogradu dat je u tabelama 3 i 4.

Tabela 3. Primer registrovanja olujne aktivnosti direktno iznad stanice u Beogradu

Gh id	Pn abbreviation	Begin time	End time	Day	Month	Year	Intensity
27400G00	GR	15:08	16:29	16	07	2014	7
27400G00	GR	20:06	21:40	17	07	2014	7
27400G00	GR	19:06	21:10	18	07	2014	8
27400G00	GR	17:14	17:29	22	07	2014	6
27400G00	GR	22:04	23:15	22	07	2014	7
27400G00	GR	00:40	06:15	27	07	2014	8

Tabela 4. Primer registrovanja olujne aktivnosti u daljini u odnosu na stanicu u Beogradu

Gh id	Pn abbreviation	Begin time	End time	Day	Month	Year	Intensity
27400G00	GM	17:34	00:20	18	08	2014	
27400G00	GM	24:99	08:96	18	08	2014	0
27400G00	GM	21:97	00:11	03	08	2014	
27400G00	GM	00:07	00:71	02	08	2014	3
27400G00	GM	23:05	23:46	05	04	2014	9
27400G00	GM	00:07	22:01	18	08	2014	3

Gde je:

Gh id - oznaka stanice,

Pn abbreviation - položaj registrovane grmljavine u odnosu na stanicu, GR ili GM,

Begin time - UT vreme početka grmljavine,

End time - UT vreme završetka grmljavine,

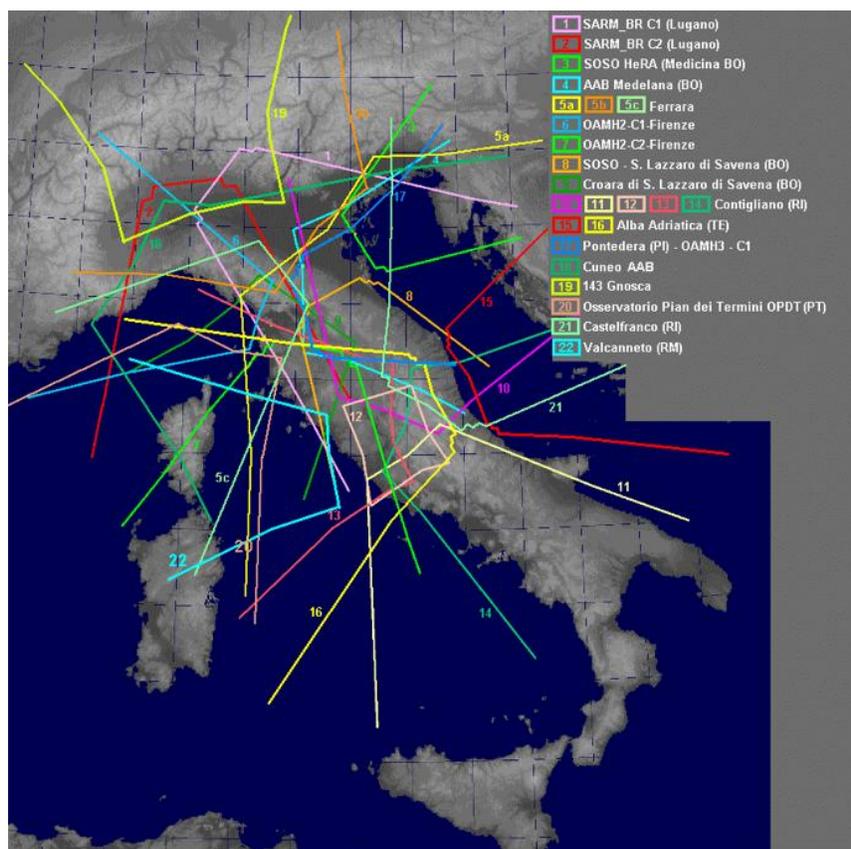
Day - Month -Year - dan, mesec i godina registrovanja grmljavine i

Intensity - intenzitet grmljavine.

4.2. Lokalna italijanska mreža za osmatranje meteora i TLE pojava

Lokalna zemaljska mreža na području Italije za osmatranje meteora i TLE pojava I.M.T.N. (ITALIAN METEOR and TLE NETWORK, <http://www.imtn.it/>), obuhvata preko 20 automatizovanih digitalnih video kamera visoke rezulocije, mobilnih ili sa fiksnom pozicijom. Osmatranja su usmerena prvenstveno na područje Apeninskog i Balkanskog poluostrva, prema Tirenskom, Mediteranskom i Jadranskom moru i prema severozapadu Evrope (više informacija: http://www.imtn.it/dove_siamo.htm).

Mreža I.M.T.N u kontinuiranom režimu radi od januara 2009. godine, a prvi snimci TLE pojava zabeleženi su u martu 2008. godine. Kamere se podešavaju tako da rade sa rezolucijom od 0.001 do 0.1 s prema potrebama snimanja. Shematski prikaz područja koje zahvataju kamere dat je na Slici 4.2.1.



Slika 4.2.1. Shematski prikaz područja koje zahvataju kamere I.M.T.N. mreže (<http://meteore.forumattivo.com/t861-ultimo-aggiornamento-fov-imtn-04-11-2010>)

4.3. Registrovanje parametara prostiranja uskopoljarnih VLF signala

Za registrovanje VLF signala, koje emituju transmiteri vojne i komercijalne namene, na fiksnim frekvencijama, locirani širom sveta, u ovoj doktorskoj disertaciji korišćeni su zapisi sistema AbsPAL. Sistem može simultano da primi i registruje amplitudu i fazu šest fazno stabilisanih signala sa frekvencijama u VLF opsegu (16 - 30 kHz). Sistem je razvijen od strane grupe Radio and Space Physics Group, na Univerzitetu Otago, Novi Zeland.

Sistem koristi dve antene, jednu za prijem transmitovanih VLF signala, a drugu za prijem signala GPS (eng. Global Positioning System), pomoću koga se vrši sinhronizacija sistema sa signalom tačnog vremena. Sinhronizacija sistema vrši se svake sekunde. Sistem generiše signale frekvencije 30.0 i 30.1 kHz, koji služe za startovanje registrovanja faze transmitovanih VLF signala, po prijemu GPS signala i oni predstavljaju kontrolne signale. Ostali kanali prijemnika registruju fazu i amplitudu transmitovanih VLF signala. Sistem generiše dva tipa fajlova koji sadrže podatke o amplitudi i fazi primljenih VLF signala. Registracije sa visokom rezolucijom (50 ms ili 100 ms) su tzv. "O fajlovi", a registracije sa niskom rezolucijom (60 s) su tzv. "Z fajlovi".

Kod promena u talasovodu Zemlja-jonosfera koje se dešavaju na vremenskoj skali minuta, pa naviše, za VLF dijagnostiku se koriste "Z fajlovi". Takve su regularne promene, dnevne, sezonske i promene u toku solarnog ciklusa, s jedne strane i poremećaji izazvani npr. upadom X-zračenja u toku solarnih flerova, sa druge strane. Kod promena koje se dešavaju na vremenskoj skali sekundi i delova sekunde, za VLF dijagnostiku se koriste "O fajlovi". Takve promene nastaju atmosferskim pražnjenjem, ali i retkim pojavama upadnog X i gama zračenja, koje potiče od magnetar zvezda, u atmosferu Zemlje.

Pri izboru signala koji se registruju i njihovom raspoređivanju po kanalima prijemnika, treba obratiti pažnju na karakteristike transmitera u smislu stabilnosti režima rada u višegodišnjem periodu:

- stabilnosti faze emitovanih signala,
- emitovanja signala na konstantnim frekvencijama,
- stabilnosti emitovane snage signala,
- opterećenja registrovanih signala šumom duž trase.

Za registrovanje su izabrani oni transmiteri koji godinama rade u stabilnom režimu rada (http://radioastronomy.me.uk/VLF_Transmitters_List.pdf, http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY_Test/TechDocs/AWESOME%20Transmitters.pdf).

5. Detektovane TLE i LEP pojave na osnovu analize VLF signala

Promene karakteristika talasovoda Zemlja-jonosfera, izazvane atmosferskim pražnjenjima, TLE i LEP pojavama, ispitivane su na osnovu promena parametara propagacije VLF talasa.

5.1. Analiza i obrada podataka VLF signala

Prijem i registrovanje VLF signala izvršeno je pomoću sistema AbsPAL lociranog u Beogradu (44.85 S; 20.38 I), u Institutu za fiziku, sa kontinuiranim režimom rada od 2004. godine. Pomoću ovog sistema vrši se kontinuirano simultano registrovanje šest VLF signala sa rezolucijom 0.1 s.

Tokom analiziranog perioda, od marta 2008. do juna 2011. godine, u Beogradu su registrovani sledeći VLF signali: NAA/24.0 kHz, GQD/22.1 kHz, NWC/19.8 kHz, DHO/23.4 kHz, ICV/20.27 kHz, HWU/18.3 kHz, FTA/20.9 kHz i NDT/22.2 kHz. Pregled registrovanih VLF signala po godinama prikazan je sažeto u Tabeli 5 (detaljan pregled dat je u **PRILOGU 1**). Karakteristike VLF predajnika i registrovanih signala u pomenutom periodu date su u Tabeli 6. Kod signala NAA/24.0 kHz i NWC/19.8 kHz, emitovana snaga je uvek 1000 kW, dok kod ostalih transmitera dolazi do njene promene.

Tabela 5. Raspored registrovanih VLF signala u posmatranom periodu 2008 - 2011. godine

godina	kod i frekvencija registrovanih VLF signala (kHz) po kanalima sistema AbsPAL					
	1	2	3	4	5	6
2008	30.0	FTA/20.9	HWU/18.3 DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0
2009		FTA/20.9 ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8 NDT/22.2	NAA/24.0
2010		ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0
2011		ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0

Tabela 6. Karakteristike VLF predajnika i trasa registrovanih u analiziranom periodu

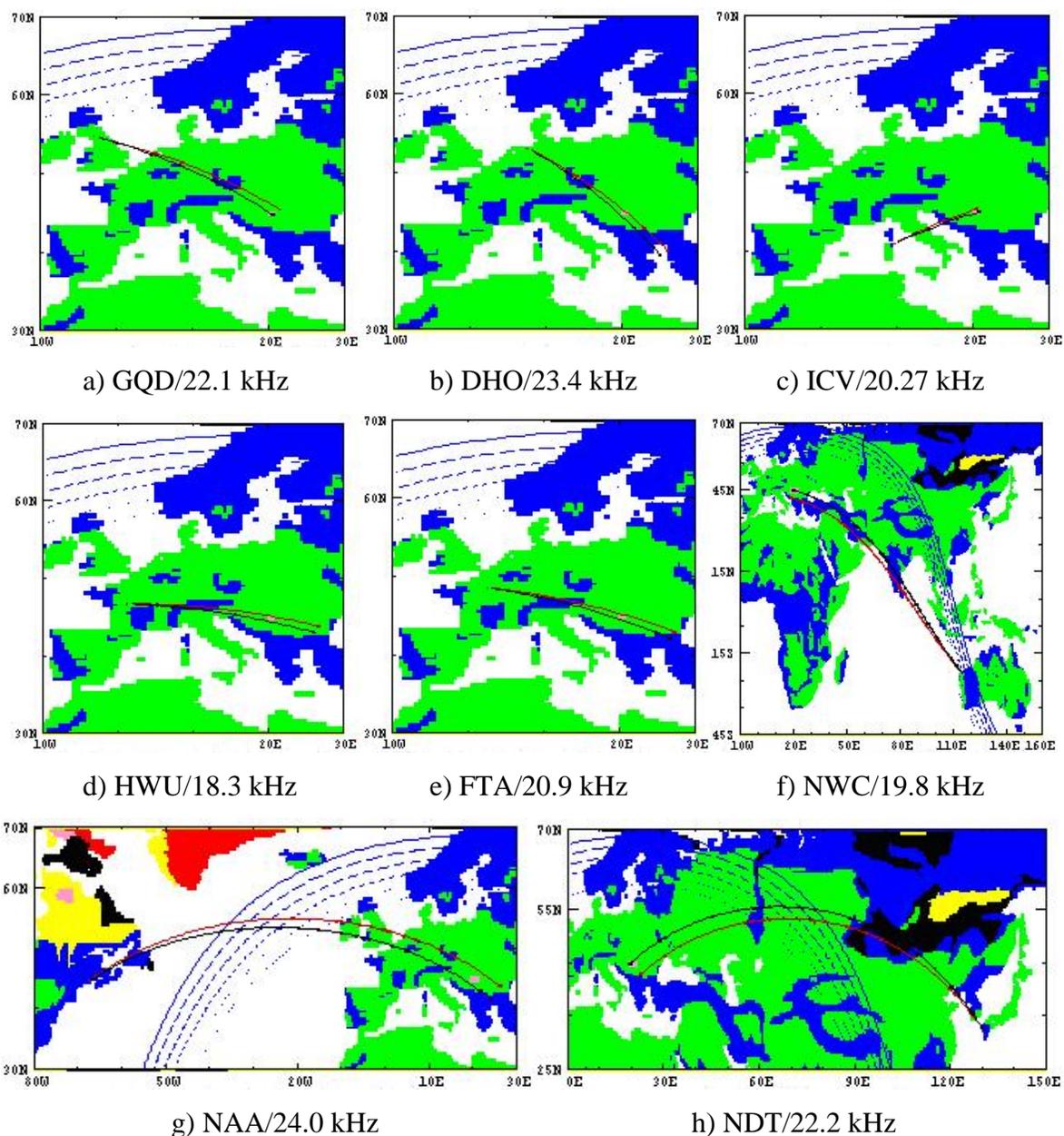
kod i frekvencija VLF signala	lokacija predajnika	emitovana snaga	udaljenost između predajnika i prijemnika duž GCP*
NAA/24.0 kHz	Maine, USA (44.63 S; 67.28 Z)	1000 kW	6547 km
GQD/22.1 kHz	Skelton, UK (54.72 S; 2.88 Z)	500 kW	1982 km
NWC/19.8 kHz	H. E. Holt, Australija (27.2 J; 114.98 I)	1000 kW	11975 km
DHO/23.4 kHz	Rhauderfehn, Nemačka (53.08 S; 7.62 I)	800 kW	1301 km
ICV/20.27 kHz	Isola di Tavolara, Italija (NATO) (40.92 S; 9.73 I)	20 kW	970 km
HWU/18.3 kHz	Rosnay, Francuska (NATO) (46.71 S; 1.24 I)	400 kW	1493 km
FTA/20.9 kHz	Sainte-Assise, Francuska (48.54 S; 2.58 I)	400 kW	1413 km
NDT/22.2 kHz	Ebino, Japan (32.08 S; 130.83 I)	200 kW	8946 km

* GCP (eng. Great Circle Path) - putanja po velikom krugu.

5.1.1. Promene parametara propagacije VLF signala

Refleksione karakteristike donje granice talasovoda, određene su elektroprovodljivošću σ_g (S) i relativnom dielektričnom konstantom $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$, gde je ϵ dielektrična konstanta površi, a ϵ_0 dielektrična konstanta vakuuma. Područja preko kojih prelaze trase VLF signala registrovanih u Beogradu, tokom analiziranog perioda, prikazane su na Slici 5.1.1.1. Trase signala proračunate su pomoću programskog paketa LWPC, za regularne noćne uslove u talasovodu Zemlja-jonosfera. Mape elektroprovodljivosti sadržane u LWPC, sačinjene su na osnovu mernih podataka širom sveta. Područja niske elektroprovodljivosti, $\sigma_g \approx 3 \cdot 10^{-3}$ S, $\epsilon_r = 15$, prikazana su crnom, žutom i crvenom bojom, područja nešto veće elektroprovodljivosti, plavom i zelenom bojom, $\sigma_g = 3 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-1}$ S, $\epsilon_r = 15$, dok vodene površi (bela boja), imaju veliku elektroprovodljivost ($\sigma_g = 4$ S, $\epsilon_r = 81$).

Poremećaji o kojima će biti reči, odvijaju se na vremenskoj skali reda veličine sekundi i delova sekundi, pa do minuta i zato su ispitivani na snimcima visoke rezolucije.



Slika 5.1.1.1. Trase signala emitovanih ka Beogradu iz: a) Skelton-a, b) Rhauderfehn-a, c) Isola di Tavolara-e, d) Rosnay-a, e) Sainte-Assise-a, f) Holt-a, g) Maine-a i h) Ebino-a

“O fajlovi” (pogledati odeljak 4.3), pokazuju da su pri regularnim noćnim uslovima prostiranja VLF signala varijacije amplitude i faze u intervalima od jednog minuta veoma male, u proseku su ispod 0.5 % od prosečne vrednosti amplitude signala. Sve promene veće od toga, u tom intervalu, ukazuju da je došlo do promene uslova propagacije u talasovodu.

Ti poremećaji započinju i razvijaju se na razne načine, trajanje im je različito i prema tome, pripisuju se različitim uzrocima. Ove pojave je prvi primetio M. L. Trimpi, pa su sve te pojave nazvane “trimpi efekti”. Dugogodišnje analize VLF zapisa pokazale su da su “trimpi efekti” primećeni na noćnim signalima u periodima intenzivne olujne aktivnosti. Koncentracija elektrona tokom noći u niskoj jonosferi je niska, pa svaka promena ima značajan efekat na uslove VLF propagacije talasovodom. Koincidencija događaja detektovanih atmosferskih pražnjenja (pogledati odeljak 4.1) i početaka poremećaja koji su zabeleženi na zapisima VLF signala, ukazuje da je atmosfersko pražnjenje uzrok značajne promene koncentracije elektrona u niskoj jonosferi.

Na osnovu signatura poremećaja na VLF zapisima koji su posledica atmosferskog pražnjenja, istorijski posmatrano, razlikuju se:

- 1) “klasični trimpi efekti” (kasnije nazvani LEP efekti) i
- 2) efekti koji se zbog tipičnog vremenskog razvoja brzog uspostavljanja i brzog opadanja promene nazivaju RORD (eng. Rapid Onset Rapid Decay, Dowden et al., 1994).

Na osnovu fizičkih procesa nastalih usled atmosferskih pražnjenja koji se povezuju sa posmatranim varijacijama signala, razlikuju se sledeći tipovi VLF poremećaja:

- 1) poremećaji na trasi VLF signala koji nastaju formiranjem oblasti povećane koncentracije elektrona u sredini gde su se dogodile TLE pojave, u koje spadaju:
 - a) rani/brzi (eng. early/fast),
 - b) rani/spori (eng. early/slow) i
 - c) rani poremećaji dugog oporavka, LORE (eng. LOng Recovery Early VLF events) i
- 2) poremećaji na trasi VLF signala koji nastaju mehanizmom opisanim u odeljku 3.2, tzv. LEP poremećaji.

5.2. Modeliranje amplitude i faze VLF signala

Za određivanje promena koncentracije elektrona u talasovodu Zemlja-jonosfera, a koje nastaju kao posledica atmosferskog pražnjenja korišćen je model niske jonosfere u noćnim uslovima, koji je sastavni deo modela propagacije dugih talasa LWPM (Long Wave Propagation Model), koji sadrži ulazne podatke za programski paket LWPC. Postupak korišćenja ovog programa za određivanje parametara trasa VLF signala je isti kao kod Kolarski et al., 2011; Kolarski i Grubor, 2014, 2015; Grubor et al., 2008; Žigman et al., 2007, 2014; kao i u Magistarskoj tezi Kolarski A., 2009. Za postupak proračuna koncentracije elektrona u talasovodu, izabrani su karakteristični primeri poremećaja iz analiziranog perioda 2008 - 2011. godine, registrovani sistemom AbsPAL u Beogradu, na trasama NAA/24.0 kHz i GQD/22.1.

Postupak koji je korišćen polazi od jednačine za određivanje koncentracije elektrona N_e (m^{-3}) u talasovodu u noćnim uslovima. Koncentracija elektrona računata je kao funkcija određenog para parametara β i H' , na visini z , na osnovu formule (Thomson et al., 2007) prilagođene za noćnu jonosferu:

$$N_e(z, H', \beta) = 1.86 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-0.15 \cdot z) \cdot 78.57 \cdot \exp(\beta(z - H')) \text{ (m}^{-3}\text{)}, \quad (5.2.1)$$

gde je parametar β tzv. "oštrina" (km^{-1}) gornje granice talasovoda, a parametar H' (km) visina na kojoj dolazi do refleksije VLF talasa (Wait i Spies, 1964). Ako se koncentracija elektrona računa na visini refleksije, kada je $z = H'$, formula (5.2.1) se svodi na oblik: $N_e(H', \beta) = 146.1402 \cdot 10^{11} \cdot \exp(-0.15 \cdot H') \text{ (m}^{-3}\text{)}$. Za LWPM model, parametar β za regularne noćne uslove u jonosferi iznosi 0.40 km^{-1} , a parametar H' je visina 87 km. Prema Thomson et al., 2007, parametar β za regularne noćne uslove u jonosferi iznosi 0.63 km^{-1} , a parametar H' je visina 85.1 km. Međutim, za modeliranje vrednosti amplitude i faze VLF signala, potrebno je u svakom konkretnom slučaju odrediti odgovarajuće parametre β i H' tako da simulirane vrednosti odgovaraju izmerenim vrednostima.

Parovi β i H' određeni su tako da daju što približnije vrednosti stvarno izmerenim vrednostima amplitude i faze signala, kako za neporemećene, tako i za poremećene uslove u posmatranom delu talasovoda.

Korišćenjem programskog paketa LWPC za izračunavanje parametara propagacije, razvijenim za potrebe navigacije od strane američke mornarice (eng. Space and Naval Warfare System Center), simulirane su promene vrednosti amplitude i faze signala u uslovima izmenjene koncentracije elektrona. Programski paket LWPC polazi od modela niske jonosfere i modela prostiranja VLF talasa na određenim GCP od predajnika do prijemnika. Osnovni parametri sredine propagacije, oštrina gornje granice talasovoda i visina reflektovanja signala, povezane su sa koncentracijom elektrona u talasovodu. Svaka promena koncentracije elektrona u talasovodu menja parametre propagacije, amplitudu i fazu signala. Simuliranje propagacije VLF signala vršeno je pomoću LWPC - rexp koda.

Izmerene vrednosti promene amplitude i faze usled poremećaja označene su ΔA_m i ΔP_m . Promena amplitude ΔA_m , dobijena je kao razlika između maksimalne vrednosti amplitude u toku poremećaja i srednje vrednosti amplitude u neporemećenom intervalu signala. Promena faze ΔP_m , dobijena je kao razlika vrednosti faze koja po vremenu odgovara maksimalnoj vrednosti amplitude u toku poremećaja i srednje vrednosti faze u neporemećenom intervalu signala. Izračunate vrednosti amplitude i faze za neporemećene uslove označene su sa A_{calc1} i P_{calc1} , a za perturbovano stanje A_{calc2} i P_{calc2} , pa je promena amplitude $\Delta A_{calc} = A_{calc2} - A_{calc1}$, a promena faze $\Delta P_{calc} = P_{calc2} - P_{calc1}$. Parametri kojima su te vrednosti dobijene su (β_1, H'_1) i (β_2, H'_2) . Na osnovu parametara (β_1, H'_1) i (β_2, H'_2) računata je koncentracija elektrona u neporemećenim (N_{e1}) i poremećenim (N_{e2}) uslovima. Promena koncentracije elektrona usled poremećaja posmatrana je u rasponu visina karakterističnih za sprajtove i elv. Procenjen je moment električnog dipola M_Q (Ckm), koji odgovara dostignutoj maksimalnoj koncentraciji elektrona tokom poremećaja, a na osnovu njega i disipirana energija E (MJ) u prostor oko sprajta i elva.

Određivanje vrednosti momenta električnog dipola koji se prenese u prostor oko formiranog sprajta moguće je uz poznavanje ukupne količine naelektrisanja koje se nalazi u tom prostoru i rastojanja između polova formiranog dipola. Količina naelektrisanja Q (C) može da se odredi uz poznavanje koncentracije elektrona u prostoru oko sprajta i dimenzija tog prostora. Za pojednostavljen slučaj, pravilne cilindrične zapremine oko strimera sprajta, poluprečnika r (km) i visine d (km) jednake rastojanju između polova električnog dipola, zapremina je jednaka: $V = r^2 \pi d$ (m³). S druge strane, broj naelektrisanih čestica - elektrona u ovoj zapremini jednak je: $n = N_e V$, gde je N_e (m⁻³) koncentracija elektrona.

Ukupna količina naelektrisanja Q (C) u zapremini V (m³) je: $Q = n \cdot e$, gde je $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ (C) količina naelektrisanja elektrona, pa se izraz za ukupnu količinu naelektrisanja svodi na oblik: $Q = N_e r^2 \pi d \cdot e$ (C).

Moment električnog dipola M_Q (Ckm) je: $M_Q = Q \cdot d$ (Ckm), pa se izraz za moment električnog dipola svodi na oblik:

$$M_Q = N_e r^2 \pi e d^2 \text{ (Ckm)}. \quad (5.2.2)$$

Na osnovu procenjene vrednosti momenta električnog dipola M_Q (Ckm), moguće je izvršiti procenu energije disipirane u prostor oko sprajta: $E = Fd \cdot I \cdot t$ (J), gde je član Fd napon (V) i predstavlja umnožak jačine električnog polja dipola $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{M_Q}{d^3}$ (Vm⁻¹) i rastojanja između polova dipola d (m), I (A) je jačina struje, a t (s) je vreme pražnjenja.

Izraz za energiju E (J) svodi se na oblik:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{M_Q}{d^2} \cdot I \cdot t \text{ (J)} \quad (5.2.3)$$

6. Rezultati i diskusija rezultata

U periodu od marta 2008. do juna 2011. godine, AbsPAL sistemom u Beogradu, registrovani su rani/spori, LORE i LEP poremećaji VLF signala izazvani atmosferskim pražnjenjima. U najvećoj meri su registrovani poremećaji koji prate sprajtove. Detaljan pregled registrovanih signala dat je u **PRILOGU 1**.

Budući da VLF registracije sadrže informacije o veoma velikom broju VLF poremećaja, polazna tačka analize bila je informacija o snimljenim sprajtovima mrežom I.M.T.N. Na listingu (odjeljak 4.2) snimljenih sprajtova postoje vremena registrovanja sprajtova sa tačnošću od 0.001 do 0.1 s. Za datume i vremena kada su zabeleženi sprajtovi izvršen je pregled VLF zapisa kako bi se odredili intervali u kojima se vidi da su pojave VLF poremećaja i sprajtova povezane (**PRILOG 2**).

Tokom analiziranog perioda 2008 - 2011. godine, sprajtovi su se javljali sporadično. Izdvaja se noć sa intenzivnom olujnom aktivnošću 27 - 28. maja 2009. godine, kada je registrovan 81 događaj, od čega je najveći broj bio sprajtova. Tokom analize podataka poremećaji iz ove grupe analizirani su zasebno i odabrani su za obradu.

6.1. Analiza podataka VLF signala snimljenih sistemom AbsPAL

Pregledan je veliki broj snimaka i utvrđeno je da korelacija između pojave sprajtova, zabeleženih kamerama I.M.T.N. mreže i registrovanih VLF poremećaja postoji u velikom broju slučajeva.

Preliminarnom selekcijom izabirani su oni slučajevi, u kojima je VLF poremećaj simultano bio registrovan na dve i više trasa, pri čemu je veličina VLF poremećaja bila znatna u odnosu na veličinu neporemećenog signala u vremenski bliskom periodu, a sam signal nije bio (previše) opterećen šumom.

Od prvobitno izdvojenih 250 poremećaja zabeleženih tokom 64 dana (**PRILOZI 1 i 2**), na osnovu kriterijuma izolovanosti posmatranog VLF poremećaja, da se poremećaj jasno može razlikovati od okolnih poremećaja bliskih u vremenu, za dalju analizu je izabrano ukupno 179 poremećaja tokom 39 dana, (**PRILOG 2**, uokvireni paneli). Raspodela izabranih VLF poremećaja po godinama, sažeto je prikazana u Tabeli 7 (detaljan prikaz dat je u **PRILOGU 1**).

Tabela 7. Raspodela izabranih VLF poremećaja po godinama

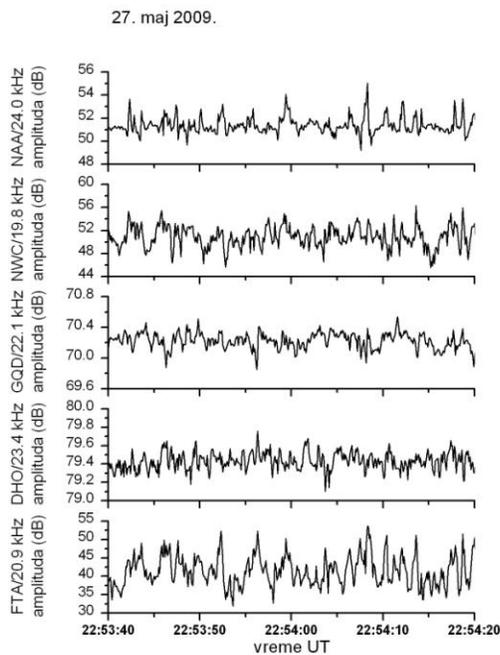
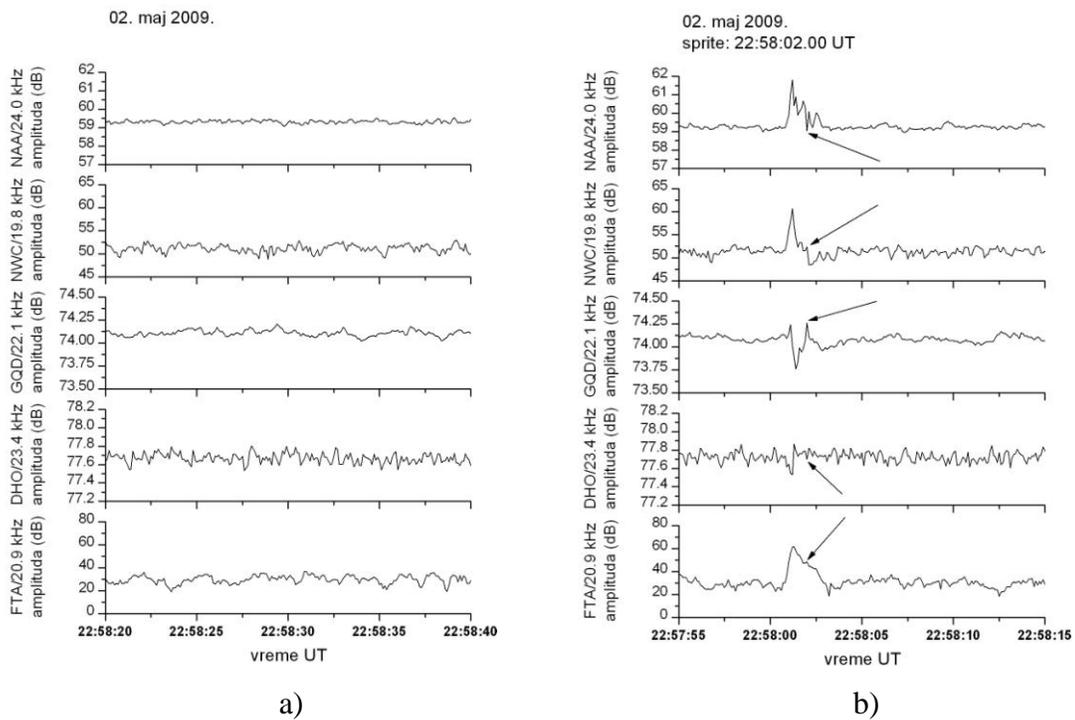
godina	broj izabr. poremećaja	broj izabr. dana	datum	broj sprajtova (listing)	broj izdvojenih TLE pojava sa video snimka		broj izdvojenih VLF poremećaja
					sprajt	mogući halo	
2008	2	2					
2009 (bez 27. i 28. maja)	39	14	27. maj	24	40	0	40
2010	40	15	28. maj	22	31	10	41
2011	17	6					
ukupno: (bez 27. i 28. maja)	98	37	ukupno:	46	71	10	81*

* U okviru 2009. godine, noć 27 - 28. maj 2009. godine analizirana je zasebno.

ukupno: 179 izabranih poremećaja u 39 dana

S obzirom da je listing od prijavljenih 46 sprajtova, registrovanih tokom noći 27 - 28. maja 2009. godine kamerom iz Ferrara-e, bio dat sa tačnošću od 1 s, izvršena je detaljna analiza video snimka zabeleženih sprajtova i vremena su očitana sa tačnošću 0.1 s. Prilikom pravljenja video kompilacije, neki od pomenutih 46 sprajtova ispušteni su iz video zapisa (**PRILOG 2**, paneli uokvireni isprekidanom linijom).

Detaljnou analizom izdvojena je ukupno 81 TLE pojava, od kojih su velika većina bili sprajtovi, njih 71, a preostalih 10 su izdvojeni kao mogući halo-i. Od toga, 40 sprajtova je izdvojeno u toku 27. maja, a 31 u toku 28. maja. Mogući halo-i, od kojih je jedan bio u kombinaciji sa sprajtom, javili su se pred kraj olujne aktivnosti 28. maja. Primeri za neporemećene uslove u talasovodu, zatim za posmatrani izolovani VLF poremećaj i za jako poremećene uslove u talasovodu, kada se posmatrani VLF poremećaj ne može jasno razlikovati od okolnih poremećaja bliskih u vremenu, prikazani su na Slici 6.1.1.



Slika 6.1.1. Različiti uslovi radiopropagacije u talasovodu Zemlja-jonosfera:
 a) neporemećeni uslovi, b) izolovan VLF poremećaj i c) jako poremećeni uslovi
 (strelicom je obeleženo vreme sprajta)

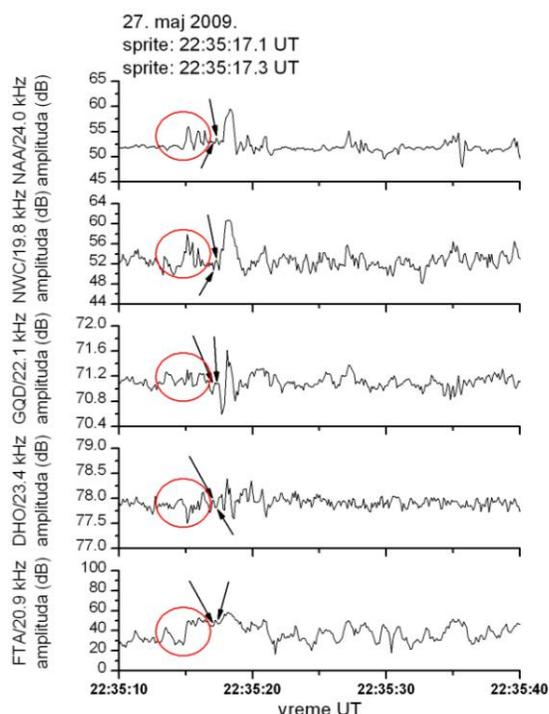
Analizirani su jednominutni intervali u kojima se javljaju izolovani VLF poremećaji u periodima sa zabeleženom olujnom aktivnošću, mrežama WWLLN i EUCLID (odeljci 4.1.1 i 4.1.2). Posmatrani su podaci mreža o atmosferskim pražnjenjima iznad područja prema kome su bile usmerene kamere I.M.T.N. mreže. U velikom broju slučajeva sve tri pojave, atmosferska pražnjenja, sprajtovi i VLF poremećaji, dogodile su se u toku iste olujne aktivnosti koju karakteriše bliska lokacija (u okviru desetog dela stepena geografske širine i dužine) i blisko vreme udara (reda veličine sekundi).

Na osnovu sprovedene analize, utvrđeno je da se VLF poremećaji generalno mogu svrstati u sledeće grupe:

1. pojava atmosferskog pražnjenja (udar) prethodi pojavi sprajta, koji prethodi VLF poremećaju,
2. pojava atmosferskog pražnjenja prethodi pojavi sprajta, a VLF poremećaj koji pripada istoj olujnoj aktivnosti započinje ranije,
3. pojava sprajta prethodi VLF poremećaju, a atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža nije zabeleženo,
4. pojava sprajta prethodi VLF poremećaju, a atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža javlja se u toku VLF poremećaja,
5. pojava VLF poremećaja prethodi pojavi sprajta, a atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža nije zabeleženo i
6. pojava atmosferskog pražnjenja javlja se u toku VLF poremećaja, ali sprajt nije zabeležen kamerama I.M.T.N. mreže. Poremećaji ovog tipa nisu bili ciljna grupa za sprovedene analize, kao ni za obradu signala u ovoj doktorskoj disertaciji.

Zajedničko za prvih pet slučajeva je, da se sprajt i VLF poremećaj javljaju kao izolovani događaji u toku iste olujne aktivnosti, za koju u nekim slučajevima postoji i podatak o inicirajućem atmosferskom pražnjenju. Tipični primeri za slučajeve od 1 - 5. prikazani su na slikama 6.1.2 - 6.1.7. Primer za 6. slučaj prikazan je na Slici 6.1.2 zaokružen crvenom bojom, a posebno je prikazan na Slici 6.1.7.

Za 1. slučaj (kada pojava atmosferskog pražnjenja prethodi pojavi sprajta, koji prethodi VLF poremećaju), najveći broj događaja zabeležen je tokom izuzetno velike olujne aktivnosti 27 - 28. maja 2009. godine. Tipičan primer su sprajtovi zabeleženi 27. maja 2009. godine u 22:35:17.1 UT i 22:35:17.3 UT, koji su prikazani na Slici 6.1.2 (primer za 6. slučaj zaokružen je crvenom bojom). Mrežom EUCLID 27. maja 2009. godine, od 22:35:16.886967 do 22:35:17.442794 UT, zabeležena je serija od 12 udara, od kojih su najjači dati u Tabeli 8.

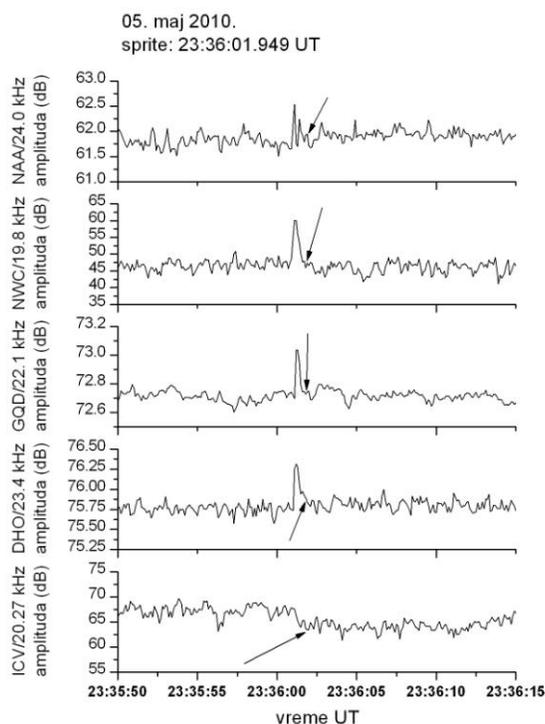


Slika 6.1.2. Primer kada pojava atmosferskog pražnjenja prethodi pojavi sprajta koji prethodi VLF poremećaju (vremena sprajtova obeležena su strelicama)

Tabela 8. Atmosferska pražnjenja zabeležena mrežom EUCLID 27. maja 2009. godine od 22:35:16.886967 do 22:35:17.442794 UT

vreme pražnjenja UT	koordinate pražnjenja	jačina struje (kA) i polarlost udara	ukupan broj udara	udar po redu	tip udara
22:35:17.0091481	(15.4578 I; 43.0800 S)	-37.7	12	5	CG
22:35:17.0114519	(15.3932 I; 43.0694 S)	-63.0	12	7	CG
22:35:17.2170060	(15.4513 I; 43.0612 S)	-45.3	12	11	CG

Za 2. slučaj (kada pojava atmosferskog pražnjenja prethodi pojavi sprajta, a VLF poremećaj koji pripada istoj olujnoj aktivnosti započinje ranije), tipičan primer je sprajt zabeležen 05. maja 2010. godine u 23:36:01.949 UT (Slika 6.1.3). U periodu bliskom vremenu javljanja sprajta, mrežom WWLLN zabeleženo je samo pražnjenje u 23:36:01.928193 UT (Tabela 9).

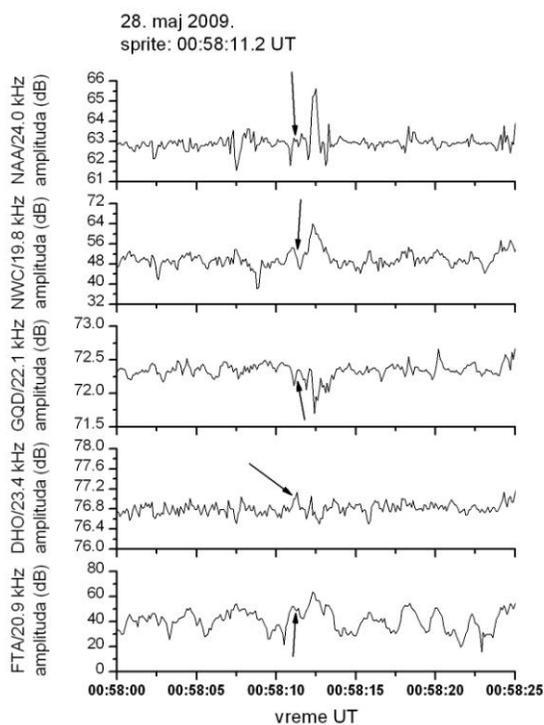


Slika 6.1.3. Primer kada pojava atmosferskog pražnjenja prethodi pojavi sprajta dok VLF poremećaj koji pripada istoj olujnoj aktivnosti započinje ranije (vreme sprajta obeleženo je strelicom)

Tabela 9. Atmosfersko pražnjenje zabeleženo mrežom WWLLN 05. maja 2010. godine u periodu bliskom vremenu javljanja sprajta 23:36:01.949 UT

vreme pražnjenja UT	koordinate pražnjenja	energija pražnjenja (J)	ukupan broj stanica koje su registrovale udar
23:36:01.928193	(41.9584 S; 012.8264 I)	22070.53	8

Za 3. slučaj (kada pojava sprajta prethodi VLF poremećaju, a atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža nije zabeleženo), tipični primer je sprajt zabeležen 28. maja 2009. godine u 00:58:11.2 UT (Slika 6.1.4). Mrežom EUCLID 28. maja 2009. godine, u periodu bliskom vremenu pojavljivanja sprajta, nije zabeleženo nijedno pražnjenje (Tabela 10).

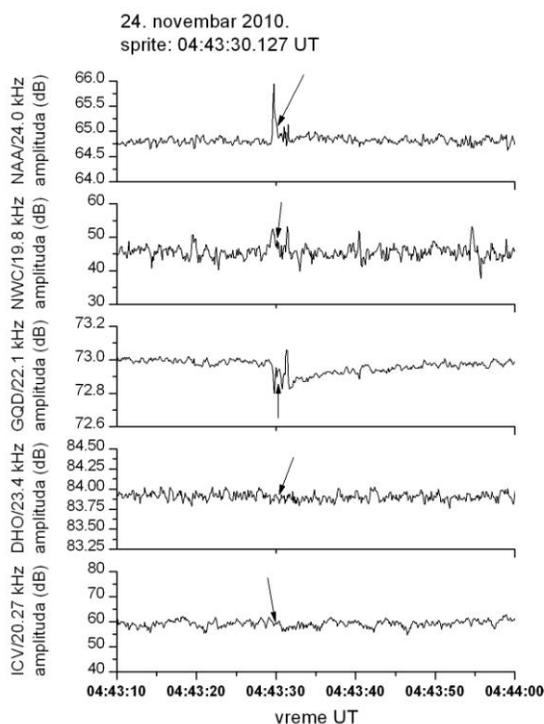


Slika 6.1.4. Primer kada pojava sprajta prethodi VLF poremećaju dok atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža nije zabeleženo (vreme sprajta obeleženo je strelicom)

Tabela 10. Atmosferska pražnjenja zabeležena mrežom EUCLID 28. maja 2009. godine u periodu bliskom vremenu pojavljivanja sprajta 00:58:11.2 UT

vreme pražnjenja UT	koordinate pražnjenja	jačina struje (kA) i polarnost udara	ukupan broj udara	udar po redu	tip udara
00:58:09.776233	(17.1064 I; 43.5754 S)	-13.9	3	1	CG
00:58:09.925583	(17.1003 I; 43.5885 S)	-11.0	3	2	CG
00:58:10.0119382	(17.1062 I; 43.5655 S)	-12.2	3	3	CG
00:58:14.204946	(16.8752 I; 44.1780 S)	42.2	2	1	CG
00:58:14.308581	(16.8597 I; 44.2180 S)	17.1	2	2	CG

Za 4. slučaj (kada pojava sprajta prethodi VLF poremećaju, a atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža se javlja u toku VLF poremećaja), tipičan primer je sprajt zabeležen 24. novembra 2010. godine u 04:43:30.127 UT (Slika 6.1.5). Mrežom WWLLN 24. novembra 2010. godine, u periodu bliskom vremenu javljanja sprajta, zabeležena su dva pražnjenja (Tabela 11).

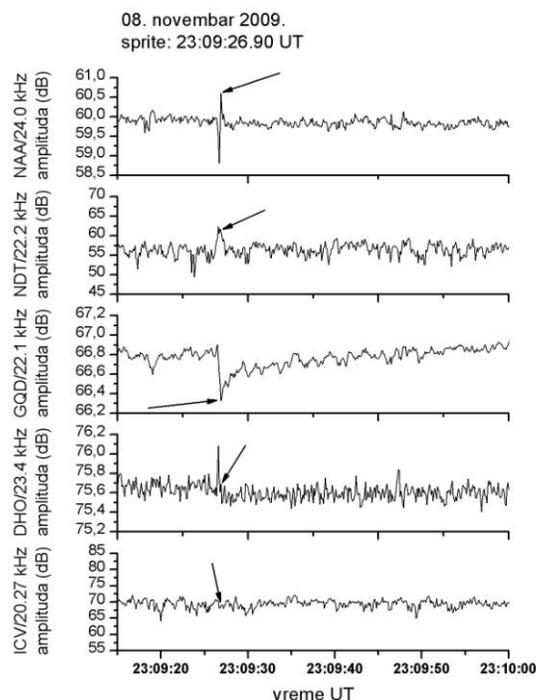


Slika 6.1.5. Primer kada pojava sprajta prethodi VLF poremećaju dok se atmosfersko pražnjenje prema informacijama mreže WWLLN javlja u toku VLF poremećaja (vreme sprajta obeleženo je strelicom)

Tabela 11. Atmosfersko pražnjenje zabeleženo mrežom WWLLN 24. novembra 2010. godine u periodu bliskom vremenu javljanja sprajta 04:43:30.127 UT

vreme pražnjenja UT	koordinate pražnjenja	energija pražnjenja (J)	ukupan broj stanica koje su registrovale udar
04:43:30.477766	(43.4117 S; 010.2281 I)	3057.43	9
04:43:30.358060	(43.2137 S; 010.4382 I)	9427.29	14

Za 5. slučaj (kada pojava VLF poremećaja prethodi pojavi sprajta, a atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža nije zabeleženo), tipičan primer je sprajt zabeležen 08. novembra 2009. godine u 23:09:26.90 UT (Slika 6.1.6). Mrežom WWLLN 08. novembra 2009. godine, u periodu bliskom vremenu javljanja sprajta, zabeležena su pražnjenja koja su prikazana u Tabeli 12.

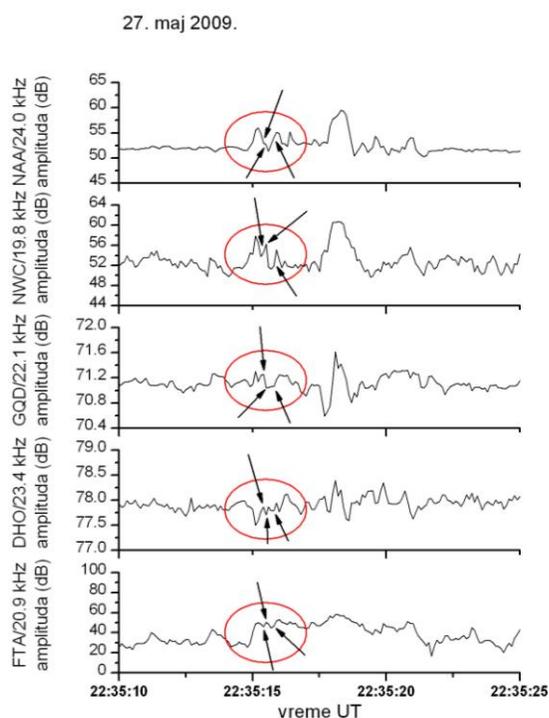


Slika 6.1.6. Primer kada pojava VLF poremećaja prethodi pojavi sprajta dok atmosfersko pražnjenje prema informacijama pomenutih mreža nije zabeleženo (vreme sprajta obeleženo je strelicom)

Tabela 12. Atmosfersko pražnjenje zabeleženo mrežom WWLLN 08. novembra 2009. godine u periodu bliskom vremenu javljanja sprajta 23:09:26.90 UT

vreme pražnjenja UT	koordinate pražnjenja	energija pražnjenja (J)	ukupan broj stanica koje su registrovale udar
23:08:12.581447	(43.2970 S; 009.9064 I)	16946.43	5
23:09:27.600714	(45.4672 S; 012.8491 I)	2071.59	5
23:09:27.761693	(45.7336 S; 011.8884 I)	11682.36	8
23:09:27.841493	(45.4547 S; 011.9966 I)	10369.69	6
23:12:40.799043	(40.9383 S; 013.5644 I)	42845.25	9

Za 6. slučaj, kada se atmosfersko pražnjenje javlja u toku VLF poremećaja, ali sprajt nije zabeležen kamerama I.M.T.N. mreže, primer je prikazan na Slici 6.1.7 i zaokružen je crvenom bojom. VLF poremećaj zabeležen je 27. maja 2009. godine u periodu od 22:35:14.8 do 22:35:16.7 UT. Atmosferska pražnjenja zabeležena mrežom EUCLID 27. maja 2009. godine, u pomenutom intervalu, data su u Tabeli 13. Poremećaji ovog tipa nisu bili ciljna grupa za sprovedene analize niti za obradu signala u ovom doktorskom radu.



Slika 6.1.7. Primer kada pojava atmosferskog pražnjenja prethodi VLF poremećaju zaokruženom crvenom bojom i sprajt nije zabeležen kamerama I.M.T.N. mreže (vremena atmosferskih pražnjenja registrovanih mrežom EUCLID obeležena su strelicama)

Tabela 13. Atmosferska pražnjenja zabeležena mrežom EUCLID 27. maja 2009. godine u periodu bliskom vremenu pojavljivanja registrovanog VLF poremećaja

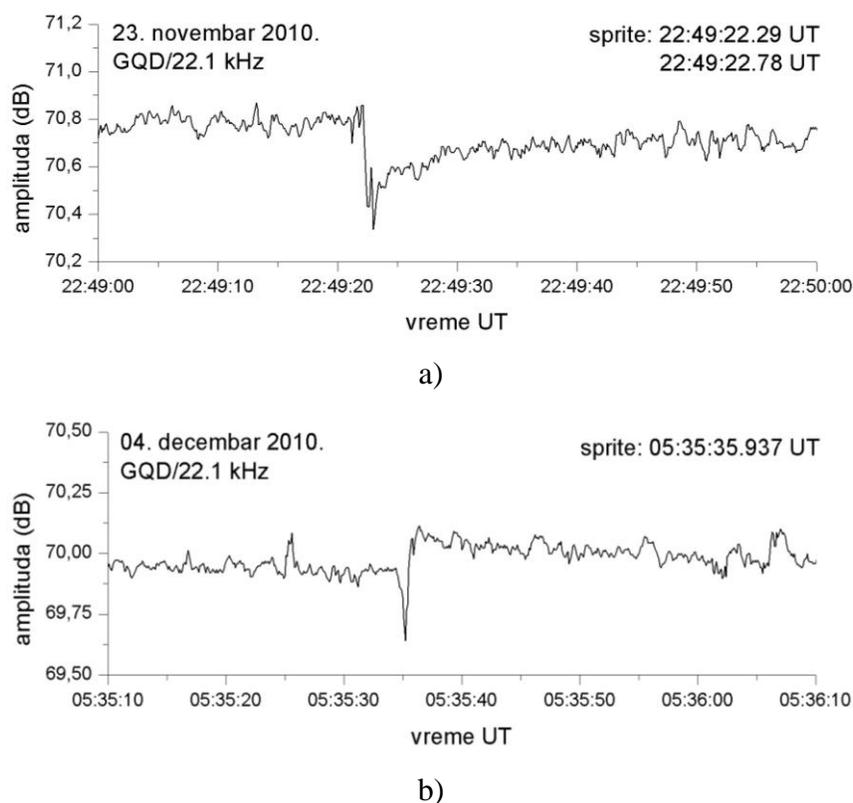
vreme pražnjenja UT	koordinate pražnjenja	jačina struje (kA) i polarnost udara	ukupan broj udara	udar po redu	tip udara
22:35:15.385249	(15.6052 I; 43.2614 S)	-30.8	4	1	CG
22:35:15.426919	(15.6121 I; 43.2600 S)	-26.1	4	2	CG
22:35:15.471114	(15.6160 I; 43.2790 S)	-25.6	4	3	CG
22:35:15.753170	(15.6363 I; 43.2811 S)	-22.5	4	4	CG

Većina sprajtova uzrokovana je +CG pražnjenjima, ali ukoliko su –CG pražnjenja bliskog intenziteta i trajanja kao +GC, moguće je da iniciraju sprajtove. Efikasnost registrovanja CG pražnjenja mrežama je oko 90 %. Neke mreže registruju i IC pražnjenja (npr. EUCLID sa efikasnošću oko 65 %). Ukoliko pojava sprajta sledi po vremenu CG pražnjenje u intervalu do 100 ms onda se sigurnošću može tvrditi da je to pražnjenje iniciralo sprajt. U tim slučajevima VLF poremećaj sledi posle obe pomenute pojave, rani/brzi i rani/spori poremećaji do 100 ms nakon inicirajućeg pražnjenja (1. slučaj).

Ukoliko postoji zabeležen sprajt, ali ne postoji registrovano CG pražnjenje koje prethodi sprajtu, onda se može pretpostaviti da mreža nije registrovala inicirajuće CG pražnjenje ili da je uzrok pojave sprajta neki drugi mehanizam. Takav mehanizam iniciranja sprajta (kada izostaje registracija CG pražnjenja), obuhvata promenu koncentracije elektrona usled elektromagnetskih impulsa EMP koji potiču od sukcesivnih IC pražnjenja koja su povezana sa CG pražnjenjima, a koja su verovatno izvor struja koje dalje kontinuirano protiču i umnogome doprinose promeni momenta dipola naelektrisanja pri CG pražnjenju (Marshall et al., 2008). Istim mehanizmom se objašnjavaju slučajevi kada se sprajt javlja znatno kasnije (do 300 ms, Mika et al., 2005) za nekim zabeleženim CG pražnjenjem, kao u 3. i 5. slučaju kada nije zabeleženo CG pražnjenje. Ovaj mehanizam može da izazove poremećaj na trasi VLF signala i pre nego što je iniciran sprajt (2. slučaj).

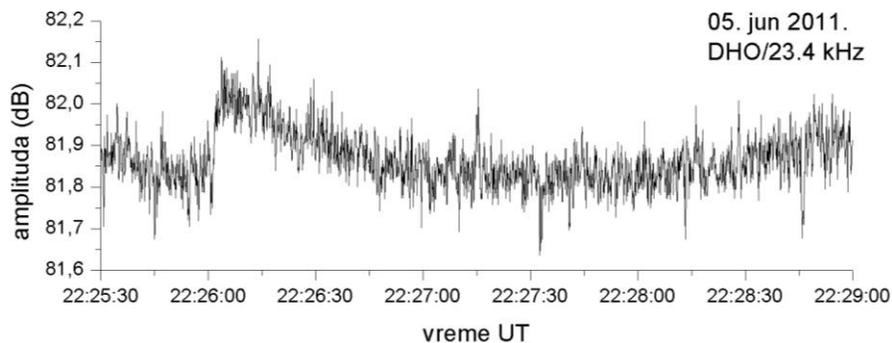
U slučaju kada nije registrovano inicirajuće CG pražnjenje, a kada se najbliže (u vremenu) registrovano CG pražnjenje javlja u toku VLF poremećaja, ono može da predstavlja jedan od povratnih udara iz iste olujne aktivnosti koja je inicirala VLF poremećaj. U 4. slučaju sprajt je registrovan pre VLF poremećaja. U 6. slučaju sprajt nije bio registrovan. Moguće je da uopšte nije došlo do pojave sprajta, jer se nisu stekli svi uslovi za iniciranje sprajta (odgovarajuća kombinacija jačine struje i prenesenog momenta dipola naelektrisanja). Takođe, moguće je da mreža nije snimila sprajt (npr. sprajt je bio zaklonjen oblacima, prag optičkih uređaja kamere za automatsko snimanje je neadekvatno podešen ili je intenzitet sjaja sprajta bio nizak, ili sprajt nije bio u vidokrugu kamere i dr.).

Većina sprajtova analiziranih u ovoj doktorskoj disertaciji, dogodila se tokom iste oluje kada su zabeleženi i LEP-ovi na trasama, tako da je rezultujući poremećaj VLF signala kombinacija ta dva poremećaja. Superpozicija ranih/sporih i LEP poremećaja, može da se odvija na različite načine i oblik rezultujućeg VLF poremećaja zavisi od predznaka i veličine svakog od pomenutih poremećaja. Identifikovani su kombinovani poremećaji različite morfologije, a tipični primeri prikazani su na gornjem i donjem panelu Slike 6.1.8.



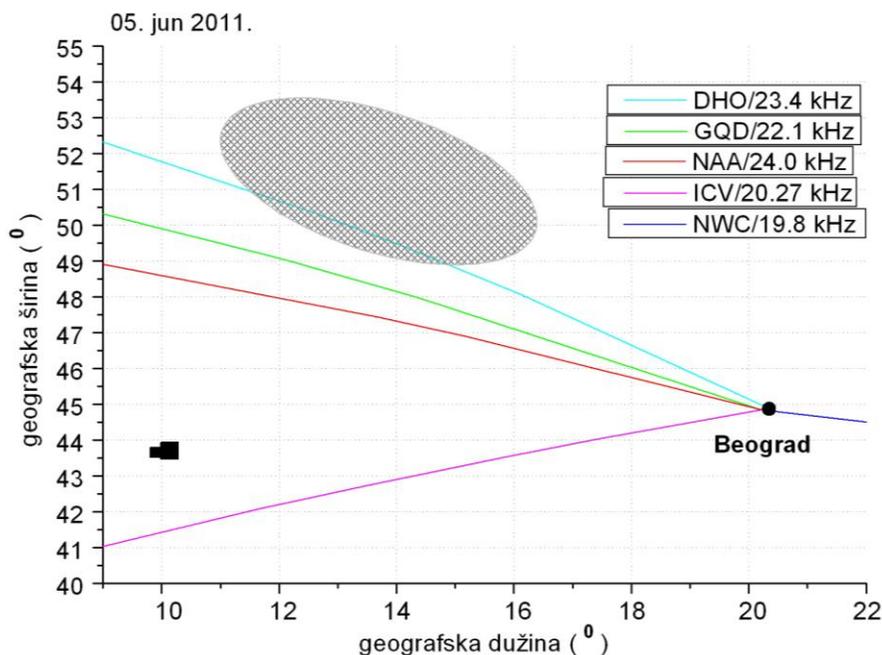
Slika 6.1.8. Tipični VLF poremećaji kombinovani od ranih/sporih i LEP poremećaja

Između primera LEP (odjeljak 3.2.) poremećaja, izabran je LEP koji se pojavio u vreme kada tokom iste oluje nije bio zabeležen sprajt i prikazan je na Slici 6.1.9. Zapažaju se karakteristike LEP-a, dužina uspostavljanja i trajanje poremećaja. U ovom slučaju i amplituda i faza DHO/23.4 kHz signala su se povećale, pa prema tome, putanja ovog signala duž velikog kruga CGP (eng. Great Circle Path) ne prolazi kroz središte oblasti LIE (Dowden et al., 1994; Šulić et al., 2010). Pretpostavljeni položaj LIE, prikazan je sivom elipsom na Slici 6.1.10.



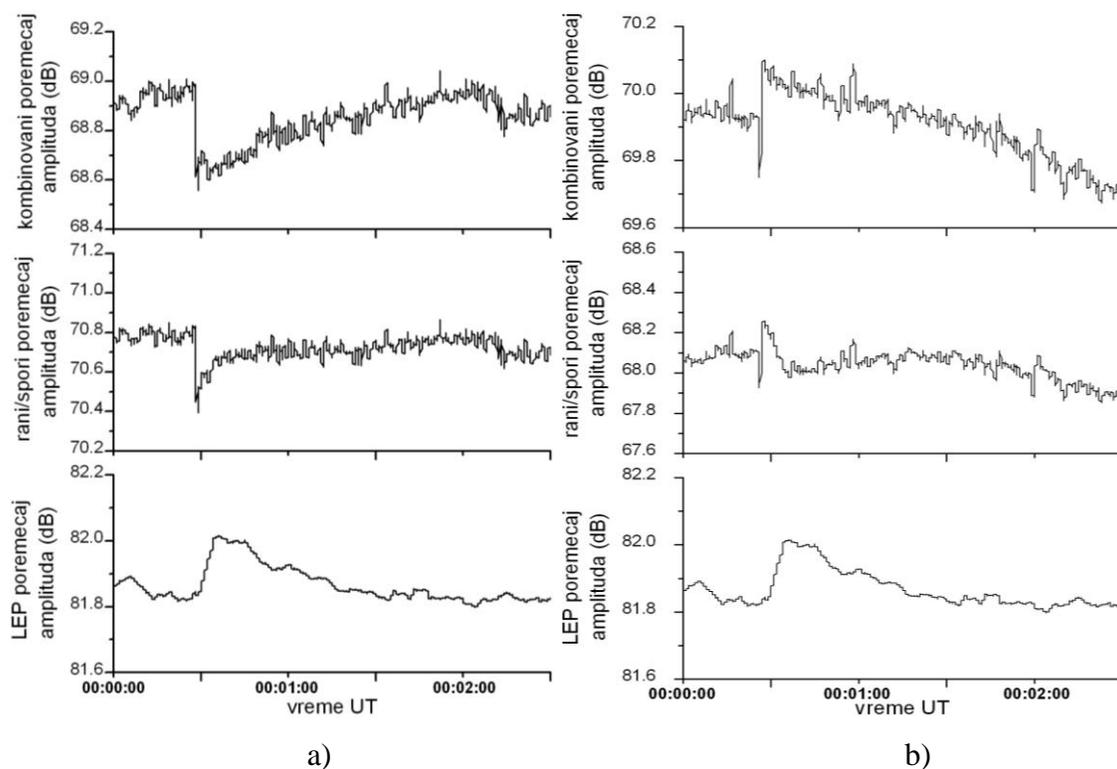
Slika 6.1.9. Tipičan LEP poremećaj

Prema podacima mreže WWLLN, u intervalu vremena bliskom pojavi LEP poremećaja, zabeležena je olujna aktivnost sa velikim energijama pražnjenja od nekoliko hiljada pa do nekoliko desetina hiljada J (crni kvadratići na Slici 6.1.10), lokalizovana iznad oblasti Ligurijskog mora u priobalju zapadne obale Italije, u nivou Pize (43.64 S; 10.11 I).



Slika 6.1.10. Pretpostavljeni položaj LIE u slučaju LEP poremećaja registrovanog 05. juna 2011. godine obeležen je sivom elipsom (atmosferska pražnjenja predstavljena su crnim kvadratićima)

Izabrani su tipični LEP i rani/spori poremećaj i izvršeno je izgladivanje signala kako bi se otklonio šum. Superponiranjem takvih izgladenih signala dobijeni su sintetički kombinovani VLF poremećaji, koji po formi odgovaraju tipičnim kombinovanim VLF poremećajima prikazanim na Slici 6.1.8. Izgladeni signali i sintetički kombinovani poremećaji prikazani su na Slici 6.1.11. Sintetički kombinovani VLF poremećaj, koji odgovara registrovanom kombinovanom VLF poremećaju prikazanom na gornjem panelu Slike 6.1.8, prikazan je na gornjem panelu Slike 6.1.11.a. Izgladeni rani/spori i LEP poremećaji, čijim superponiranjem je dobijen sintetički kombinovani VLF poremećaj prikazan na gornjem panelu Slike 6.1.11.a, prikazani su na srednjem i donjem panelu Slike 6.1.11.a. Sintetički kombinovani VLF poremećaj, koji odgovara registrovanom kombinovanom VLF poremećaju prikazanom na donjem panelu Slike 6.1.8, prikazan je na gornjem panelu Slike 6.1.11.b. Izgladeni rani/spori i LEP poremećaji, čijim superponiranjem je dobijen sintetički kombinovani VLF poremećaj prikazan na gornjem panelu Slike 6.1.11.b, prikazani su na srednjem i donjem panelu Slike 6.1.11.b.



Slika 6.1.11. Sintetički kombinovani VLF poremećaji dobijeni superponiranjem izgladenog ranog/sporog i LEP poremećaja

6.2. Obrada podataka VLF signala snimljenih sistemom AbsPAL

Da bi se odredili poremećaji varijacije faze i amplitude registrovanog noćnog VLF signala, koji nastaju pri poremećajima jonosfere usled promene stepena jonizacije kao posledice TLE pojava izazvanih atmosferskim pražnjenjima, potrebno je da se poznaje regularna varijacija ovih parametara. U noćnim uslovima prostiranje VLF talasa vrši se izmenjenim talasovodom Zemlja-jonosfera u odnosu na dnevne uslove. Gornja granica talasovoda je jonizovana sredina, ali sa znatno smanjenom koncentracijom elektrona u odnosu na dnevnu oblast D. VLF talasi prodiru do većih visina nego pri dnevnoj propagaciji, tako da se reflektovanje u neporemećenim uslovima dešava uglavnom na visini oko 87 km. Ukoliko se promene regularni uslovi, a što se dešava pri povećanju koncentracije elektrona u oblasti iznad atmosferskih pražnjenja, do reflektovanja dolazi i na nižim visinama. VLF signal je u noćnim uslovima propagacije znatno više opterećen šumom, pa je određivanje srednjih vrednosti amplitude i faze u neporemećenim uslovima teže nego za signale koji se prostiru u neporemećenim dnevnim uslovima. Utoliko se teže detektuju poremećaji amplitude i faze koji se javljaju usled TLE pojava, jer su mali u odnosu na neporemećene vrednosti i često maskirani šumom. Dodatno otežavajuća okolnost je izuzetno kratko trajanje ovih poremećaja. Perturbacije se dešavaju na nivou sekunde i delova sekunde, pa do minutâ.

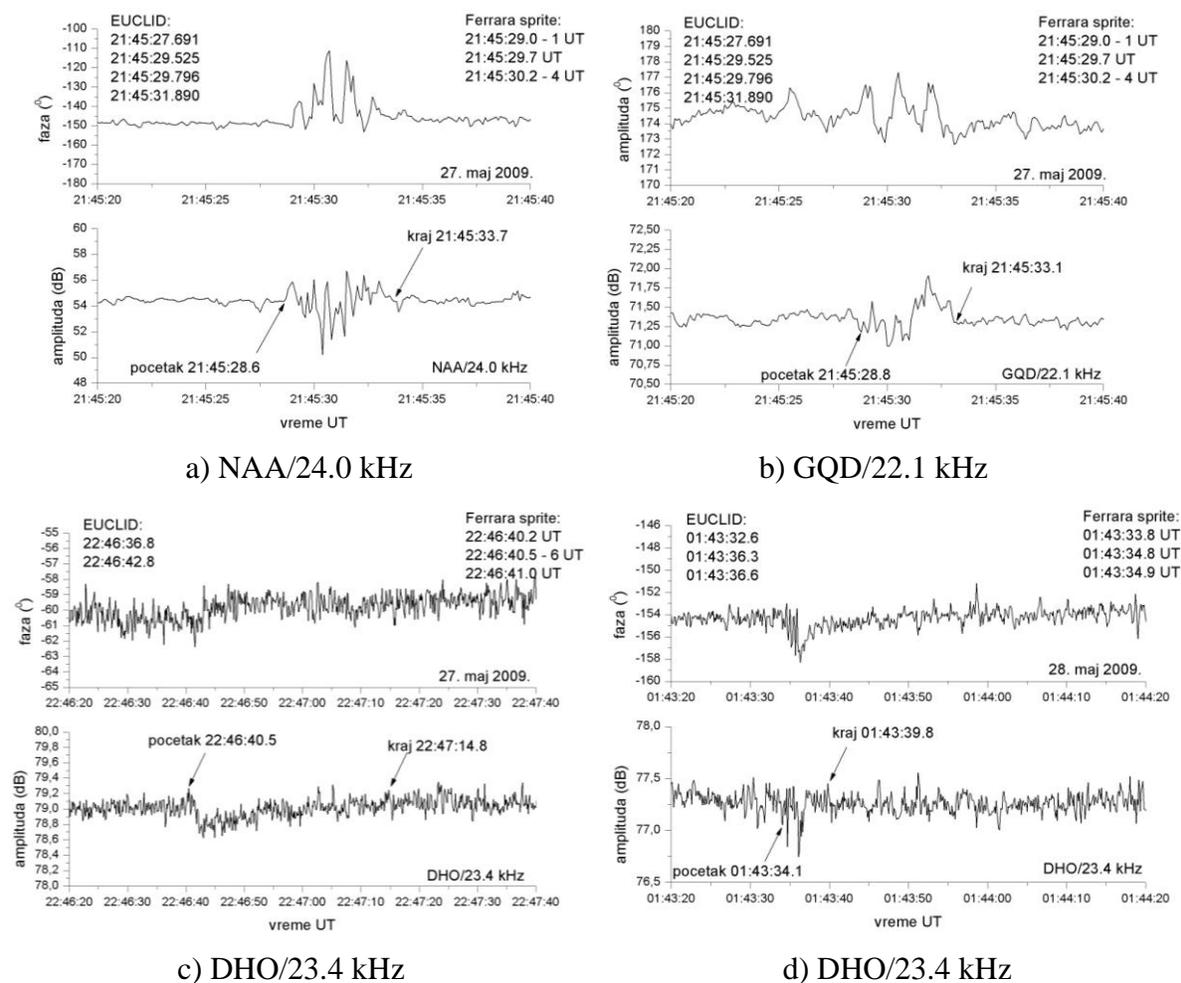
Za određivanje regularnih vrednosti faze i amplitude za neporemećene uslove, u ovoj doktorskoj disertaciji je korišćen isti pristup kao u Magistarskoj tezi Kolarski A., 2009. Posmatrani su parametri signala u najbližem mirnom intervalu pre pojave VLF poremećaja, tj. uzete su usrednjene vrednosti parametara signala u periodu 1 s pre početka poremećaja, u slučajevima relativno mirnog neporemećenog signala i izolovanog poremećaja (u njegovoj okolini nije bilo drugih poremećaja bliskih u vremenu). U slučajevima kada to nije bilo moguće, uzete su usrednjene vrednosti parametara neporemećenog signala, na delu signala, koji je bio najbliži poremećaju, posmatrano u vremenu. Vrednosti faze i amplitude VLF signala, usvojene kao referentne za neporemećene uslove VLF propagacije, označene su sa P_{reg} i A_{reg} . U odnosu na te vrednosti, određene su promene faze i amplitude, za koje se može smatrati da su izazvane isključivo TLE pojavama.

Poremećaji faze i amplitude VLF signala pod uticajem TLE pojava analizirani su u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine. U posmatranom periodu pregledane su registracije VLF signala visoke rezolucije (0.1 s) za pojedine trase i izdvojeni su poremećaji sa očiglednim efektima TLE pojava na fazu i amplitudu VLF signala. Najveći broj slučajeva registrovanih TLE pojava, mrežom I.M.T.N. u pomenutom periodu, bili su sprajtovi, pa je time analiza poremećaja VLF signala orijentisana prvenstveno na ispitivanje njihovog uticaja na posmatrane VLF trase. Tipični VLF poremećaji posmatrani su na VLF trasama tako odabranim da su u najvećem broju slučajeva imale čiste signale, ne previše opterećene šumom, kontinuitet u smislu višegodišnjeg neprekidnog registrovanja AbsPAL sistemom u Beogradu, kao i stalnu emitovanu snagu. Kao tipične trase registrovane u Beogradu u posmatranom periodu, izabrane su: jedna kopnena, relativno kratka trasa, GQD/22.1 kHz i jedna kombinovana morsko-kopnena, relativno duga trasa, NAA/24.0 kHz (Slika 5.1.1.1). Vrednosti faze i amplitude VLF signala izmerene u pojedinim trenucima tokom trajanja uticaja posmatranih sprajtova, označavane su sa P_{pert} , odnosno A_{pert} .

Uzevši u obzir gore navedeni pristup, poremećaji faze i amplitude VLF signala mogu se definisati kao ΔA i ΔP , tako da je: $\Delta P = P_{pert} - P_{reg}$ i $\Delta A = A_{pert} - A_{reg}$. U zavisnosti od tipa poremećaja karakterističnog za datu trasu i datu TLE pojavu, poremećaji ΔP i ΔA mogu da budu pozitivni, negativni ili složeni - kombinovani (**PRILOG 3**). Za vreme početka i završetka VLF poremećaja (t_{beg} i t_{end} , **PRILOG 3**) očitavana su vremenena nagle promene amplitude signala, jer su nedvosmisleno ukazivala na poremećaj (Slika 6.2.1). Manje promene signala, iako možda pripadaju poremećaju, bile su na nivou šuma i nisu bile pouzdane za određivanje početka poremećaja. Za sve primere date u priložima smatra se da postoji podudaranje u vremenu između VLF poremećaja i TLE i podataka o atmosferskim pražnjenjima ukoliko se karakteristična vremena nalaze u intervalu od 100 ms. Kašnjenje početka jedne od ovih pojava u odnosu na druge objašnjeno je u diskusiji uz primere od 1. do 6. slučaja (odjeljak 6.1).

Preliminarnom selekcijom u periodu 2008 - 2011. izdvojeno je 250 događaja TLE pojava, od kojih je najveći broj bio sprajtova, sa izraženim pratećim VLF poremećajima.

Samo u toku noći 27 - 28. maja 2009. godine, izdvojen je 81 TLE događaj, dokumentovan mrežom I.M.T.N. i praćen VLF poremećajima koji su registrovani sistemom AbsPAL u Beogradu. To ukazuje na izuzetnu olujnu aktivnost, sa velikim brojem povratnih udara, u periodu od 21:10:57 UT 27. maja, kada je zabeležen prvi sprajt, pa do 02:18:55 UT 28. maja 2009. godine, kada je zabeležen poslednji sprajt. Na trasama GQD/22.1 kHz i NAA/24.0 kHz signala, analizirana je grupa VLF poremećaja registrovanih sistemom AbsPAL u Beogradu, tokom noći 27 - 28. maja 2009. godine, a izazvana serijom TLE pojava zabeleženih kamerom sistema I.M.T.N. (Ferrara), iniciranih atmosferskim pražnjenjima tokom intenzivne olujne aktivnosti. Karakteristike perturbacija posmatranih signala, izazvanih TLE pojavama, uglavnom sprajtovima, date su u tabelama 14 - 17.



Slika 6.2.1. Razvoj VLF poremećaja u odnosu na vremena zabeleženih sprajtova i atmosferskih pražnjenja tokom noći 27 - 28. maja 2009. godine

Tabela 14. Perturbacije NAA/24.0 kHz signala registrovane 27. maja 2009. godine

27. maj 2009.		NAA/24.0 kHz								
br.	vreme registracije sprajta UT	A_{reg} (dB)	ΔA (dB)	ΔA_{max} (dB)	ΔA_{2max} (dB)	Δt_{VLF} (ms)	Δt_{ONS} (ms)	Δt_d (s)	Δt_{cd} (s)	Δt_{CD} (s)
**	21:10:57									
**	21:38:49									
1.	21:42:11.4	54.8		3.5	-2.5	600	200	2.1		
2.	21:42:12.1 – 2					#				
3.	21:45:29.0 – 1	54.33		-4.1		-400	400		5.1	
4.	21:45:29.7					#				
5.	21:45:30.2 – 4					#				
6.	21:55:37.3 – 7					#				
7.	21:55:38.2 – 6					#				
8.	21:55:38.9	54.19		1.5	-0.9	0*	300		1.5	
9.	22:00:27.8	54.2		2.6		300	500		1.8	
10.	22:03:04.2	54.2		0.8	-1.8	700	200	0.9		
11.	22:06:12.9 – 13.0					#				
12.	22:06:13.2	53.8		3.3	-2.5	500	900	4.3		
13.	22:20:01.1 – 2					#				
14.	22:20:01.4	52.6		4.9		100	1200	2.7		
15.	22:35:17.1					#				
16.	22:35:17.3	52.0		7.5		200	800	1.3		7.8
17.	22:39:19.8 – 9	52.0		1.5		0*	200	0.5	2.6	
18.	22:41:58.8 – 9					#				
19.	22:41:59.0	52.2	2.0	0.7	5.5	100	100		0.9	2.4
20.	22:44:22.2	51.8	2.9	4.9		-100	200		3.9	4.3
21.	22:46:40.2					#				
22.	22:46:40.5 – 6	51.7		4.6	-5.3	100	200		3.1	4.1
23.	22:46:41.0					#				
24.	22:50:08.9					#				
25.	22:50:09.1	51.3		3.1	3.4	600	400	1.7	4.2	
26.	22:52:35.1					#				
27.	22:52:35.8 – 9	51.3		7.7	7.7	500	600	2.4	4.3	
28.	22:56:48.7 – 8	50.9		7		800	300	1.2	2.1	
29.	23:00:07.2 – 4	51.3		11.3		700	800	1.7		
30.	23:05:54.7 – 8	51.3		11.5		600	500	1.8		
**	23:15:56									
31.	23:25:54.9					#				
32.	23:25:55.5	54.5		6	-4.3	-100	500		2.9	
33.	23:29:27.6	54.5	5.6	7.7		900	200		2.8	
34.	23:34:09.6 – 7	55.5	2.1			500	600	1.0		
35.	23:34:25.6	55.5	3.2	-3.5		400	700	1.3		19.9
36.	23:44:19.5 – 6	57.5		2.5	-1.9	-100	100		1.8	5.2
37.	23:45:01.9					#				
38.	23:45:02.0	57.7		4.0		600	500	1.0		
39.	23:48:56.0 – 1	58.5	1.5			-1100	400	2.0		
40.	23:51:37.4 – 5	59.0	-0.48	2.6		200	300	1.4	2.6	

Gde je:

* za Δt_{VLF} (ms) = 0 ms - očitavanje je u okviru rezolucije registracije sistema AbsPAL,

** - sprajt postoji u listingu, ali ga nema u video kompilaciji,

- u tabelu su uneti samo podaci o VLF poremećajima za koje je zabeleženo inicijalno pražnjenje i sprajt, a za ostale VLF poremećaje, koji su takođe zabeleženi u tom intervalu, stavljena je oznaka #,

ΔA (dB) - poremećaj signala (definisani na način objašnjen ranije u tekstu) $\Delta A = A_{pert} - A_{reg}$,

A_{reg} (dB) - vrednost amplitude signala u neporemećenim uslovima,

ΔA_{max} (dB) - maksimalna vrednost prvog ekstremuma poremećenog signala u slučaju složenih klastera poremećaja, ΔA_{2max} - drugog itd.,

Δt_{VLF} (ms) - kašnjenje početka VLF poremećaja u odnosu na vreme registrovanja TLE pojave kamerom (negativna vrednost znači da VLF poremećaj prethodi sprajtu),

Δt_{ONS} (ms) - vreme potrebno da amplituda VLF signala dostigne prvi ekstremum vrednosti u odnosu na početak VLF poremećaja,

Δt_d (s) - trajanje pojedinačnog poremećaja, $t_d = t_{beg} - t_{end}$, gde je t_{beg} vreme početka poremećaja (**PRILOG 3**, označeno zelenom bojom), a t_{end} kraj poremećaja (**PRILOG 3**, označeno plavom bojom),

Δt_{cd} (s) - trajanje klastera poremećaja u slučaju složenih poremećaja i

Δt_{CD} (s) - trajanje celokupnog klastera poremećaja u slučaju veoma složenih poremećaja.

Iste oznake važe i za tabele 15 - 17.

Podaci koji su dati u tabelama 14 - 17, upotpunjeni očitavanjima promene faze signala, dovoljni su za određivanje promene koncentracije elektrona u talasovodu Zemlja-jonosfera, a koje nastaju kao posledica atmosferskog pražnjenja. U tu svrhu korišćen je programski paket LWPC. Postupak korišćenja ovog programa za određivanje parametara trasa VLF signala je isti kao kod Kolarski et al., 2011; Kolarski i Grubor, 2014, 2015; Grubor et al., 2008; Žigman et al., 2007, 2014; kao i u Magistarskoj tezi Kolarski A., 2009.

Tabela 15. Perturbacije GQD/22.1 kHz signala registrovane 27. maja 2009. godine

27. maj 2009.		GQD/22.1 kHz									
broj	vreme registracije sprajta UT	A_{reg} (dB)	ΔA (dB)	ΔA_{max} (dB)	ΔA_{2max} (dB)	ΔA_{3max} (dB)	Δt_{VLF} (ms)	Δt_{ONS} (ms)	Δt_d (s)	Δt_{cd} (s)	Δt_{CD} (s)
**	21:10:57										
**	21:38:49										
1.	21:42:11.4	71.42		-0.46	-0.31	-0.11	500	300	1.2		
2.	21:42:12.1 – 2						#				
3.	21:45:29.0 – 1	71.37		-4.1			-200	500		4.3	
4.	21:45:29.7						#				
5.	21:45:30.2 – 4						#				
6.	21:55:37.3 – 7						#				
7.	21:55:38.2 – 6						#				
8.	21:55:38.9	71.25		0.19	-0.45		-300	500		2.4	
9.	22:00:27.8	71.34		0.31			200	500	1.2		
10.	22:03:04.2	71.53		0.26			-200	900	1.2		
11.	22:06:12.9 – 13.0						#				
12.	22:06:13.2	71.78	-0.46	-0.51			600	500		19	
13.	22:20:01.2						#				
14.	22:20:01.4	71.41		-0.73			700	300	1.3		
15.	22:35:17.1						#				
16.	22:35:17.3	71.10		-0.51	0.51		200	200	1.2	2.6	
17.	22:39:19.8 – 9	70.8		-0.28	0.4		800	300	1.2		
18.	22:41:58.8 – 9						#				
19.	22:41:59.0	71.45		0.46	-0.23		100	700	36.1	37.9	
20.	22:44:22.2	71.33	0.26	0.27	-0.31		200	200		2.4	3.5
21.	22:46:40.2						#				
22.	22:46:40.5 – 6						#				
23.	22:46:41.0	71.06		-0.79			400	100	46.9		
24.	22:50:08.9						#				
25.	22:50:09.1	70.69	0.32				-500	700	2.2		
26.	22:52:35.1						#				
27.	22:52:35.8 – 9	70.51	0.34	0.38	-0.52	0.34	700	300	2.9	4.0	
28.	22:56:48.7 – 8	70.15	0.61				1200	400	1.0		
29.	23:00:07.2 – 4	69.65	-0.43	0.32			800	400	1.8		
30.	23:05:54.7 – 8	69.41	0.7	-0.65			-100	1200	88		
**	23:15:56										
31.	23:25:54.9						#				
32.	23:25:55.5	70.34	0.22	-1.1	0.6		-100	400	2.2		
33.	23:29:27.6	70.64	-1.05				1200	400	0.7	4.7	
34.	23:34:09.6 – 7	70.24	0.34				300	500	1.2		
35.	23:34:25.6	70.24	-0.41				-200	300	2.2		10.8
36.	23:44:19.5 – 6	71.32	0.41	0.5	-0.46		-200	500	28.9		
37.	23:45:01.9						#				
38.	23:45:02.0	71.2		0.63			0*	1200	1.8	2.8	
39.	23:48:56.0 – 1	71.34	0.28				-1300	700	2.5		
40.	23:51:37.4 – 5	71.89	-0.3	0.18	-0.29		200	200	2.1		

Tabela 16. Perturbacije NAA/24.0 kHz signala registrovane 28. maja 2009. godine

28. maj 2009.		NAA/24.0 kHz								
broj	vreme registracije TLE pojave UT	A_{reg} (dB)	ΔA (dB)	ΔA_{max} (dB)	ΔA_{2max} (dB)	Δt_{VLF} (ms)	Δt_{ONS} (ms)	Δt_d (s)	Δt_{cd} (s)	Δt_{CD} (s)
41.	00:37:34.2	62.6	1.6			900	400	0.9		
42.	00:42:09.7 – 8	63.0	2.2			700	400	1.2		
43.	00:45:06.2	63.08	0.68	1.3		500	200		3.5	
44.	00:45:07.0 – 1					#				
45.	00:49:41.6 – 7	62.8		3.2	-2.5	600	700	3.2		
46.	00:54:00.1 – 2	63.0	0.1	-0.97	1.3	600	100	1.1		
47.	00:58:11.2	62.8	2.8			700	500	0.8		2.7
48.	00:58:24.0	62.8	1.0	1.3		200	100	0.5		2.0
49.	01:09:06.4 – 5	62.9	0.7	-1.32	3.0	500	400		1.9	5.2
50.	01:14:28.3	63.3		2.3		100	700	1.0		4.5
51.	01:23:05.4	63.0		-0.9		1200	300	0.4		6.2
52.	01:23:57.8 – 9					#				
53.	01:23:58.1 – 2					#				
54.	01:23:58.4	63.2	5.8	-0.6		200	800		1.7	2.3
55.	01:27:20.0 – 1					#				
56.	01:27:20.2	63.6	0.9	-1.7	1.2	300	300		1.9	
57.	01:32:16.0	64.3	1.5	-1.1	1.6	-300	300	1.0	2.5	
58.	01:35:13.6					#				
59.	01:35:14.0 – 1	64.9	1.0	-1.4	1.8	900	200		1.3	10.7
60.	01:37:23.3 – 4	65.15	1.7	-0.8		100	800		2.5	
61.	01:41:24.9 – 25.0	65.4	0.3			0*	200	0.7		4.8
62.	01:41:25.6 mogući halo	65.4	0.6			500	200	0.6		4.8
63.	01:43:33.8	65.8	1.1			0*	200	1.0		5.3
64. 65.	01:43:34.8 sprajt i mogući halo					#				
66.	01:43:34.9	65.8	1.6			300	300	1.2		5.3
67.	01:48:02.7	65.9	0.9	-1.4		400	500		3.3	7.0
68.	01:50:09.0	65.9	0.3	-1.6		100	600		1.2	5.2
69.	01:51:23.5 mogući halo	66.0	-0.8	0.2		300	400		1.8	
70.	01:55:03.4 – 5	66.3	0.6			0*	100	0.4		3.8
71.	01:55:04.2 – 3	66.3	0.8	-1.3		300	200		1.4	3.8
72.	02:00:51.7	66.3	0.5	-1.4	1.0	800	300			6.2
73. 74.	02:03:49.3 – 4 2 x mogući halo					#				
75. 76.	02:03:49.4 – 5 2 x mogući halo					#				
77.	02:03:50.0 – 1	66.0	1.4			100	500		2.1	3.9
78.	02:09:19.1 – 2	66.1	5.5	0.9	-1.5	100	200		2.6	4.1
79. 80.	02:14:42.8 – 9 2 x mogući halo	65.9	1.6			600	700	1.2		4.0
81.	02:18:55.0 mogući halo	66.3	0.2	-1.1	1.1	400	300		2.2	4.2

Tabela 17. Perturbacije GQD/22.1 kHz signala registrovane 28. maja 2009. godine

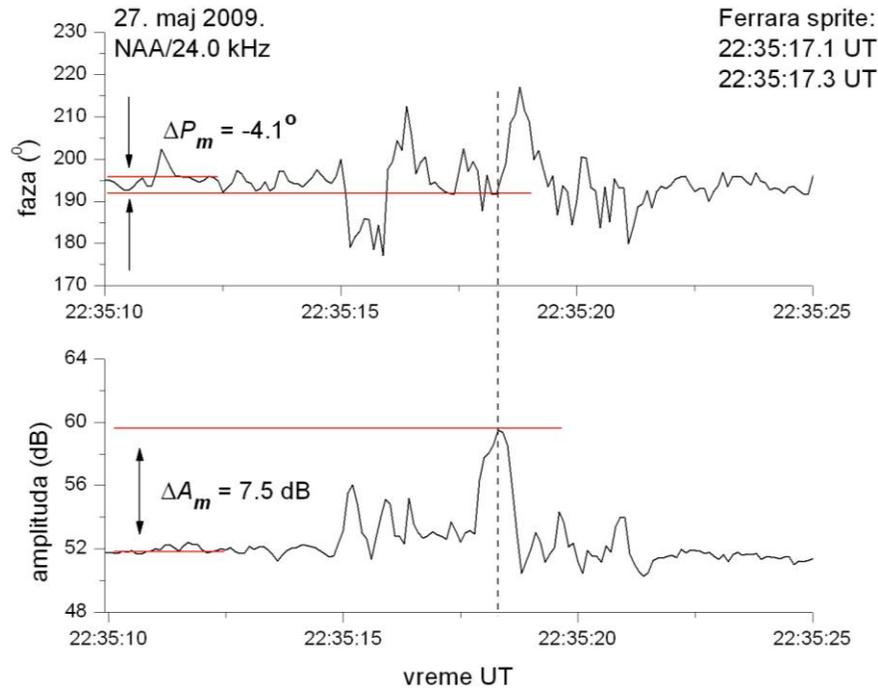
28. maj 2009.		GQD/22.1 kHz									
broj	vreme registracije TLE pojave UT	A_{reg} (dB)	ΔA (dB)	ΔA_{max} (dB)	ΔA_{2max} (dB)	ΔA_{3max} (dB)	Δt_{VLF} (ms)	Δt_{ONS} (ms)	Δt_d (s)	Δt_{cd} (s)	Δt_{CD} (s)
41.	00:37:34.2	72.37	0.07				-800	800	1.6		
42.	00:42:09.7 – 8	72.47	0.29				100	800	1.3		
43.	00:45:06.2	72.57	0.38	0.43			300	800	2.0		
44.	00:45:07.0 – 1						#				
45.	00:49:41.6 – 7	72.79	0.33	-0.21	0.32		800	300	1.5		
46.	00:54:00.1 – 2	72.82	0.1	0.9			700	200	2.0		
47.	00:58:11.2	72.39	-0.02	-0.69			700	200		1.2	2.5
48.	00:58:24.0	72.39	0.19	0.28	-0.13		0*	400		2.5	3.6
49.	01:09:06.4 – 5	72.7	0.61	-0.3			700	400		1.5	6.5
50.	01:14:28.3	72.89	0.55				1200	200	1.2		4.9
51.	01:23:05.4	72.79		0.5	-0.49		-400	400	0.7		5.2
52.	01:23:57.8 – 9						#				
53.	01:23:58.1 – 2						#				
54.	01:23:58.4	72.6	0.6	-5.8	0.6		0*	500	1.7	2.3	
55.	01:27:20.0 – 1						#				
56.	01:27:20.2	72.2	0.38	0.69			300	300	0.6	2.9	
57.	01:32:16.0	72.16	0.45				200	500	1.0	3.4	
58.	01:35:13.6						#				
59.	01:35:14.0 – 1	72.34	0.39				700	400	1.1		8.4
60.	01:37:23.3 – 4	72.58	0.46	-0.55			700	600		1.8	3.7
61.	01:41:24.9 – 25.0	72.98	0.12				-300	200	0.7		6.0
62.	01:41:25.6 mogući halo	72.98	0.1	-0.3	0.32		700	500	1.7		6.0
63.	01:43:33.8	72.9	0.5				-200	300	0.6		6.1
64. i 65.	01:43:34.8 sprajt i mogući halo						#				
66.	01:43:34.9	72.9	0.5				-400	300	0.4		6.1
67.	01:48:02.7	73.0	0.15				1000	300	0.7		6.4
68.	01:50:09.0	73.13	0.11	0.32			-100	700	1.4		5.6
69.	01:51:23.5 mogući halo	72.9	0.07	0.1			400	200		1.6	
70.	01:55:03.4 – 5	72.53	0.16				-200	300	0.5		5.4
71.	01:55:04.2 – 3	72.53	0.09	0.33			-200	200	1.0		5.4
72.	02:00:51.7	72.74	0.12	-0.62	0.54	0.72	1600	900		5.4	7.0
73. i 74.	02:03:49.3 – 4 2 x mogući halo						#				
75. i 76.	02:03:49.4 – 5 2 x mogući halo						#				
77.	02:03:50.0 – 1	73.1	0.38	-0.78	0.32		100	700		2.2	5.4
78.	02:09:19.1 – 2	73.27	0.05	-0.42	0.42		700	300		1.7	6.4
79. i 80.	02:14:42.8 – 9 2 x mogući halo	73.12	0.47				400	400	0.9		3.8
81.	02:18:55.0 mogući halo	72.1	0.09	0.72	-0.52	0.55	400	300		2.1	4.5

6.2.1. Određivanje koncentracije elektrona talasovoda u uslovima VLF poremećaja vezanih za sprajtove

Za postupak proračuna koncentracije elektrona u talasovodu, izabran je karakterističan primer poremećaja iz analiziranog perioda 2008 - 2011. godine registrovan sistemom AbsPAL u Beogradu, na trasama NAA/24.0 kHz i GQD/22.1, a koji je bio izazvan pojavom sprajta 27. maja 2009. godine u 22:35:17.3 UT. Način određivanja izmerenih (ΔA_m i ΔP_m) i izračunatih (ΔA_{calc} i ΔP_{calc}) vrednosti promene amplitude i faze posmatranih signala usled pomenutog sprajta i postupak kojim su izračunate koncentracije elektrona za neporemećene i poremećene uslove u talasovodu, na osnovu kojih su procenjene vrednosti momenta električnog dipola i energije disipirane u prostor oko sprajta, opisani su u odeljku 5.2.

Određivanje vrednosti ΔA_m i ΔP_m za slučaj poremećaja izazvanog pojavom sprajta 27. maja 2009. godine u 22:35:17.3 UT, a registrovanog na NAA/24.0 kHz trasi, kao ulaznih parametara za proračun koncentracije elektrona u toku VLF poremećaja, prikazano je na Slici 6.2.1.1 linijama crvene boje. Vertikalna isprekidana linija označava vreme, kada amplituda signala ima maksimalnu vrednost, za koje je računata koncentracija elektrona. Parametri promene uslova propagacije ΔA_m (dB), ΔP_m (°), ΔA_{calc} (dB), ΔP_{calc} (°), koncentracije elektrona za neporemećene (N_{e1}) i poremećene (N_{e2}) uslove na visinama 50, 75 i 80 km, dati su u Tabeli 18, zajedno sa procenjenim vrednostima momenta električnog dipola i energije disipirane u prostor oko sprajta.

U neporemećenim noćnim uslovima, realna visina na kojoj dolazi do reflektovanja signala NAA/24.0 kHz je oko 80 km. Prilikom proračuna koncentracije elektrona, posmatran je opseg visina 50 - 80 km, kao oblast u kojoj sprajt može imati uticaja na radiopropagaciju. Treba imati u vidu ograničenja modela i primenjene formule za računanje koncentracije elektrona na granicama talasovoda, tako da je proračun najpouzdaniji za visinu 75 km, kao visinu reflektovanja. U poremećenim uslovima, dodatna jonizacija utiče na povećanje koncentracije elektrona za 4 - 5 redova veličine, u čitavom opsegu posmatranih visina.



Slika 6.2.1.1. Određivanje izmerenih vrednosti ΔA_m i ΔP_m u slučaju NAA/24.0 kHz signala

Tabela 18. Parametri promene uslova propagacije NAA/24.0 kHz signala tokom VLF poremećaja izazvanog pojavom sprajta 27. maja 2009. godine u 22:35:17.3 UT

NAA/24.0 kHz										
visina (km)	ΔA_m (dB)	ΔP_m (°)	ΔA_{calc} (dB)	ΔP_{calc} (°)	N_{e1} (m ⁻³)	N_{e2} (m ⁻³)	M_Q (50 m) (Ckm)	M_Q (100 m) (Ckm)	E (50 m) (MJ)	E (100 m) (MJ)
50	7.5	-4.1	7.34	-3.63	$2.15 \cdot 10^3$	$4.12 \cdot 10^7$	-	-	-	-
75					$7.09 \cdot 10^5$	$1.58 \cdot 10^{11}$	~ 180	~ 715	~ 180	~ 715
80					$4.28 \cdot 10^7$	$8.20 \cdot 10^{11}$	-	-	-	-

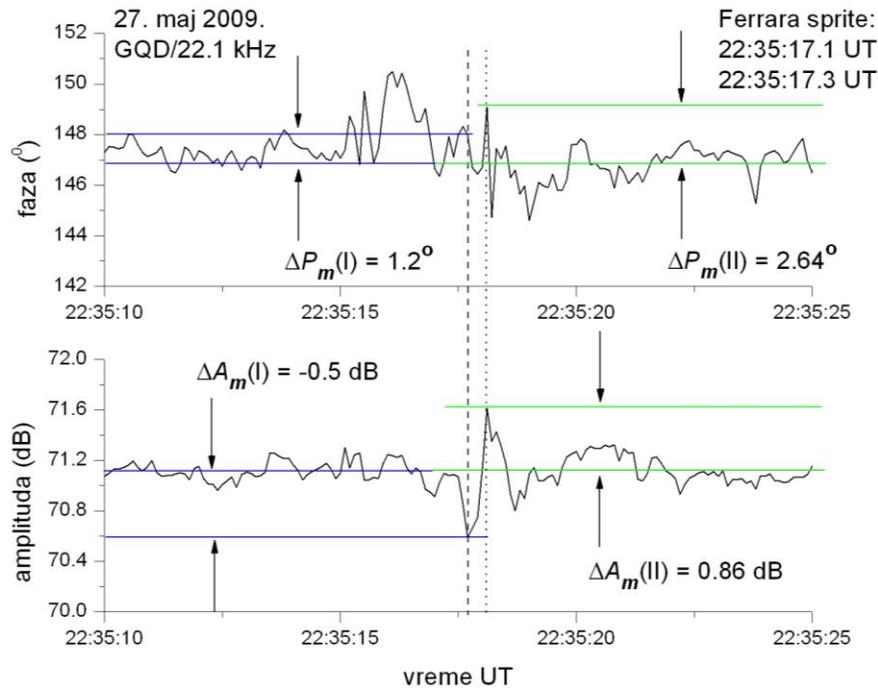
Vrednosti momenta električnog dipola M_Q (Ckm) pri povećanju koncentracije elektrona do vrednosti $1.6 \cdot 10^{11} \text{ m}^{-3}$ (Tabela 18), procenjene su na osnovu količine naelektrisanja u pretpostavljenoj cilindričnoj zapremini strimera sprajta, za poluprečnike cilindra 50 i 100 m i visinu 30 km (prema formulama datim u odeljku 5.2). Prema podacima iz literature, te dimenzije odgovaraju mogućim zapreminama u kojima je došlo do promene koncentracije usled atmosferskog pražnjenja, a koje je imalo za posledicu pojavu sprajta (Lyons et al., 2003b; Cummer, 2003).

Na osnovu procenjenih vrednosti momenta električnog dipola, procenjena je i ukupna energija deponovana tokom poremećaja izazvanog sprajtom (prema formulama datim u odeljku 5.2), u slučaju pražnjenja trajanja 1 ms sa vršnom strujom jačine 100 kA (Tabela 18). Procenjena energija na osnovu momenta električnog dipola, prema podacima iz literature uobičajenog za ovakve uslove ($M_Q = 10^3$ Ckm), iznosi 1 GJ. Procenjene vrednosti energija su u skladu sa podacima iz literature, kako dobijenih merenjima tako i teorijskih, da se ukupna deponovana energija od sprajtova kreće u rasponu od 1 MJ do 40 GJ (Pasko et al., 2012). U slučaju poremećaja, kada se javlja više uzastopnih promena M_Q koje odgovaraju višestrukim povratnim udarima atmosferskog pražnjenja, ukupna deponovana energija može da premaši vrednosti date u Tabeli 18.

Određivanje vrednosti ΔA_m i ΔP_m za slučaj poremećaja izazvanog pojavom sprajta 27. maja 2009. godine u 22:35:17.3 UT, a registrovanog na GQD/22.1 kHz trasi, kao ulaznih parametara za proračun koncentracije elektrona u toku VLF poremećaja, prikazano je na Slici 6.2.1.2.

U slučaju GQD/22.1 kHz trase, promena amplitude karakteriše se prvo padom, što je analizirano kao primer I (linije plave boje na Slici 6.2.1.2), a zatim porastom, što je analizirano kao primer II (linije zelene boje na istoj slici). Vertikalna isprekidana linija označava vreme kada amplituda GQD/22.1 kHz signala ima minimalnu vrednost (primer I), dok vertikalna tačkasta linija označava vreme kada amplituda signala ima maksimalnu vrednost (primer II), za koja su računane koncentracije elektrona. Parametri ΔA_m (dB), ΔP_m (°), ΔA_{calc} (dB), ΔP_{calc} (°), N_{e1} (m⁻³), N_{e2} (m⁻³), M_Q (Ckm) i E (KJ) dati su u Tabeli 19.

U neporemećenim noćnim uslovima, realna visina na kojoj dolazi do reflektovanja signala GQD/22.1 kHz je blizu 80 km. U ovom slučaju, izračunata koncentracija elektrona za tu visinu ujedno je i maksimalna koncentracija elektrona u posmatranom opsegu visina 50 - 80 km. U poremećenim uslovima, dodatna jonizacija neznatno utiče na povećanje koncentracije elektrona, u čitavom opsegu posmatranih visina.



Slika 6.2.1.2. Određivanje izmerenih vrednosti ΔA_m i ΔP_m u slučaju GQD/22.1 kHz signala

Tabela 19. Parametri promene uslova propagacije GQD/22.1 kHz signala tokom VLF poremećaja izazvanog pojavom sprajta 27. maja 2009. godine u 22:35:17.3 UT

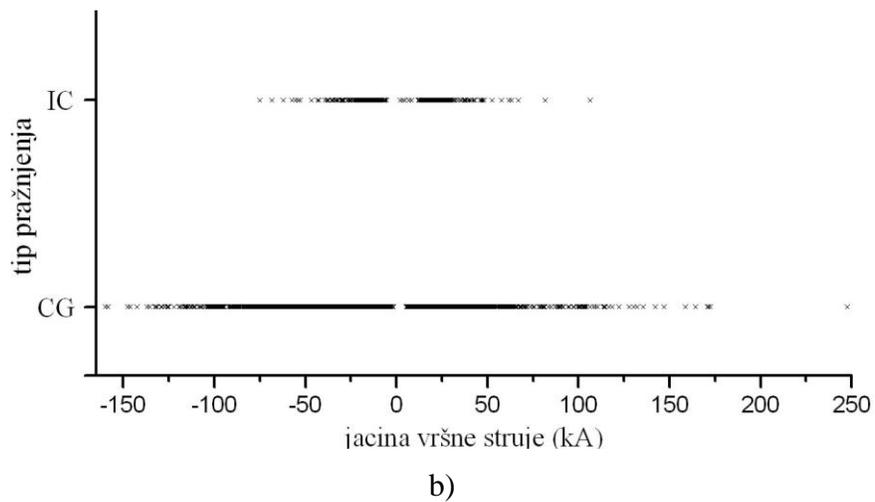
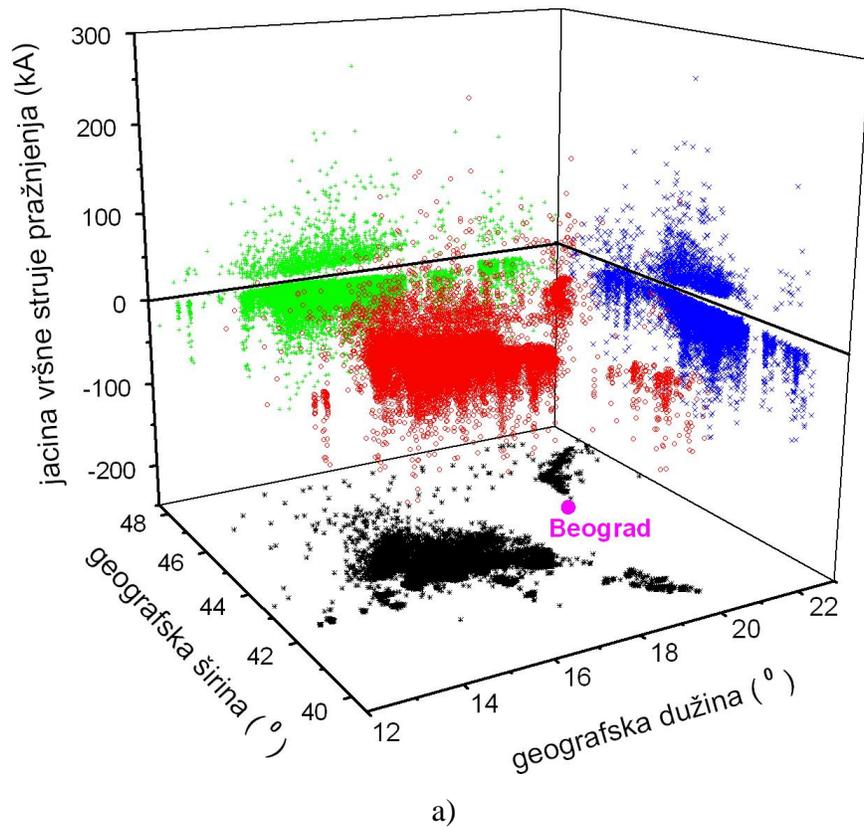
GQD/22.1 kHz											
visina (km)	ΔA_m (dB)	ΔP_m (°)	ΔA_{calc} (dB)	ΔP_{calc} (°)	N_{e1} (m^{-3})	N_{e2} (m^{-3})	M_Q (50 m) (Ckm)	M_Q (100 m) (Ckm)	E (50 m) (MJ)	E (100 m) (MJ)	
I	50	- 0.5	1.2	- 0.6	3.0	$1.02 \cdot 10^3$	$1.41 \cdot 10^3$	-	-	-	-
	75					$1.14 \cdot 10^6$	$1.23 \cdot 10^6$	-	-	-	-
	80					$4.62 \cdot 10^6$	$4.75 \cdot 10^6$	$5.4 \cdot 10^{-3}$	$21.5 \cdot 10^{-3}$	5.4	21.5
II	50	0.86	2.64	0.87	2.9	$9.24 \cdot 10^2$	$1.18 \cdot 10^3$	-	-	-	-
	75					$1.09 \cdot 10^6$	$1.26 \cdot 10^6$	-	-	-	-
	80					$4.46 \cdot 10^6$	$5.04 \cdot 10^6$	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$22.8 \cdot 10^{-3}$	5.7	22.8

Vrednosti momenta električnog dipola M_Q (Ckm) pri povećanju koncentracije elektrona do vrednosti $4.7 \cdot 10^6 m^{-3}$ za I i $5 \cdot 10^6 m^{-3}$ za II primer (Tabela 19), procenjene su na osnovu količine naelektrisanja u pretpostavljenoj cilindričnoj zapremini strimera sprajta, za poluprečnike cilindra 50 i 100 m i visinu 30 km.

Na osnovu procenjenih vrednosti momenta električnog dipola (Tabela 19), procenjena je i ukupna energija deponovana tokom poremećaja izazvanog sprajtom, u slučaju pražnjenja trajanja 1 ms sa vršnom strujom jačine 100 kA. Procenjene vrednosti energija (Tabela 19) su u skladu sa podacima iz literature (Pasko et al., 2012). Višestruki povratni udari tokom atmosferskog pražnjenja mogu usloviti da ukupna deponovana energija tokom trajanja poremećaja premaši vrednosti date u Tabeli 19.

Prema podacima mreže EUCLID, u noći 27 - 28. maja 2009. godine, od 21:00:00.00 UT (27. maja), do 03:00:00.00 UT (28. maja), iznad područja ograničenog koordinatama 12 I - 22 I i 40 S - 48 S, registrovano je ukupno 21797 atmosferskih pražnjenja (\pm CG i IC), sa vršnim strujama jačine od 160 (-CG) do 247 kA (+CG). Atmosferska pražnjenja (Slika 6.2.1.3.a) predstavljena su crvenim kružićima, dok krstići crne, plave i zelene boje predstavljaju projekcije na odgovarajuće ravni. "Negativan predznak" vršne struje znači da se radi o tipu pražnjenja -CG. Ova olujna aktivnost se izdvaja po velikom broju -CG pražnjenja i povratnih udara, sa vršnim strujama koje su po jačini uporedive sa onim kod +CG pražnjenja (Slika 6.2.1.3.b).

Budući da je trasa NAA signala znatno duža od trase GQD signala, a poremećaj se javlja na obe trase, razumna je pretpostavka da je jonosferska neregularnost, koju je prouzrokovao poremećaj, locirana u blizini prijemnika. Upravo zbog toga su modelirani uslovi VLF propagacije samo u delu talasovoda udaljenom nekoliko stotina kilometara od prijemnika, u neporemećenom i poremećenom stanju. Pretpostavljeni položaj jonosferske neregularnosti prikazan je sivom elipsom na Slici 6.2.1.4. Prema podacima mreže EUCLID, u intervalu vremena bliskom pojavi poremećaja izazvanog sprajtom 27. maja 2009. godine, u 22:35:17.3 UT, zabeležena je olujna aktivnost lokalizovana iznad područja sa koordinatama (43.1 S; 15.4 I), sa velikim brojem pražnjenja tipa -CG (12 udara), od kojih je najjače imalo vršnu struju 102.3 kA. Iako lokalizovana na oblast iznad Jadranskog mora, na potezu između Splita i Peskare (crvene tačkice na Slici 6.2.1.4), olujna aktivnost se odrazila intenzivnim perturbovanjem signala na svim trasama.



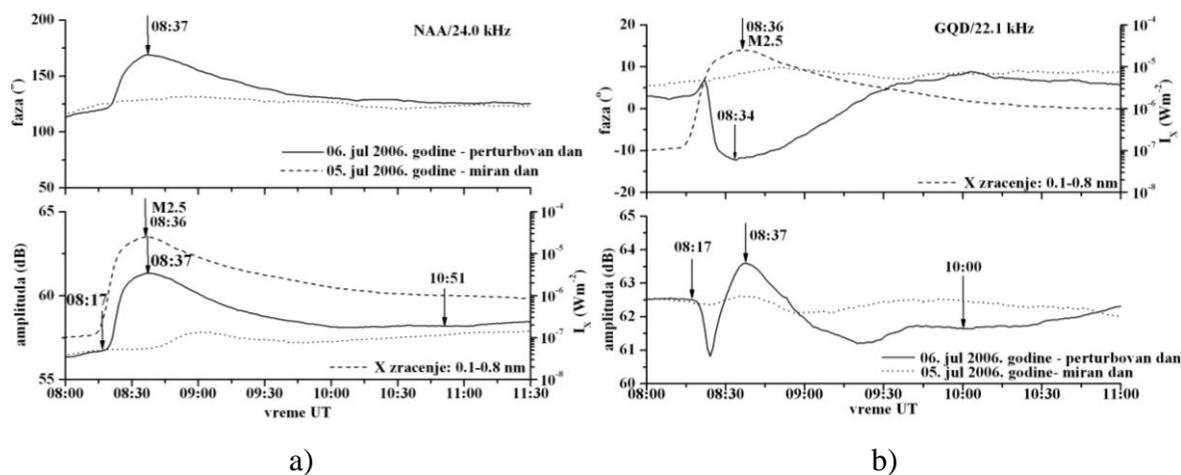
Slika 6.2.1.3. Olujna aktivnost zabeležena EUCLID mrežom iznad područja ograničenog koordinatama 12 I - 22 I i 40 S - 48 S tokom noći 27 - 28. maja 2009. godine:

- a) zabeležena atmosferska pražnjenja i pripadajuće jačine vršnih struja i
- b) zabeleženi tipovi atmosferskih pražnjenja i pripadajuće jačine vršnih struja

Međutim, formiranje strujnog kanala duž sprajta uzrokuje povećanje koncentracije elektrona u okolnom prostoru, što dovodi do rasejanja VLF signala na visini 74 - 75 km. To se naročito odnosi na signale sa dužim putanjama duž velikog kruga GCP, pa će na toj visini amplituda signala imati najveću promenu (za NAA/24.0 kHz, GCP = 6547 km). Signali sa kratkim GCP (kao npr. GQD/22.1 kHz, GCP = 1982 km) emituju se pod većim uglom i reflektuju se na većoj visini, pa samo delimično ulaze u područje povećane koncentracije elektrona. Promene amplitude za takve trase su male, ali ipak uočljive na signalu. U slučajevima visokih vršnih struja atmosferskih pražnjenja i pojave TLE, promena koncentracije elektrona, u noćnim uslovima, je reda veličine promena koncentracije elektrona usled flerova. Bitna razlika između ove dve pojave je u mehanizmu jonizacije, kao i rekombinacije konstituenata atmosfere, što se ogleda u trajanju poremećaja u talasovodu. Trajanje poremećaja izazvano atmosferskim pražnjenjem je nekoliko stotina ms do nekoliko s, a usled flerova, od nekoliko desetina minuta pa do više sati. Model talasovoda LWPM, od koga se polazi prilikom proračuna koncentracije u regularnim dnevnim i noćnim uslovima, isti je u slučaju oba mehanizma nastajanja poremećaja VLF signala. Radi poređenja promena parametara signala u uslovima atmosferskih pražnjenja (tabele 18 i 19), s jedne i solarnih flerova, s druge strane, niže su navedeni rezultati dobijeni postupkom opisanom u odeljku 5.2, za trase NAA/24.0 kHz i GQD/22.1 kHz u uslovima flerova (Kolarski i Grubor, 2014, 2015 i Kolarski et al., 2011).

Promene amplitude i faze dnevnih signala NAA/24.0 kHz i GQD/22.1 kHz, u maksimumu solarnog flera klase M2.5, prikazane su na Slici 6.2.1.5.a, odnosno 6.2.1.5.b. Strelicama su obeležena vremena početka poremećaja, maksimalnog poremećaja amplitude i faze VLF signala, vreme vraćanja na vrednost neporemećenog signala (vreme oporavka signala) i vreme maksimuma X-zračenja. Intenzitet solarnog X-zračenja flera klase M2.5 (desna oordinata) prikazan je isprekidanom linijom, na donjem panelu Slike 6.2.1.5.a za trasu NAA/24.0 kHz i na gornjem panelu Slike 6.2.1.5.b za trasu GQD/22.1 kHz. Parametri promene uslova propagacije dnevnih signala NAA/24.0 kHz i GQD/22.1 kHz tokom maksimuma X-zračenja solarnog flera klase M2.5, registrovanog 06. jula 2006. godine u 08:36 UT i izračunate koncentracije elektrona (opseg visina 50 - 90 km) dati su u Tabeli 20.

Na Slici 6.2.1.5 puna linija označava poremećen signal, a tačkasta neporemećen signal tokom posmatranog mirnog dana.



Slika 6.2.1.5. Poremećaj dnevnog VLF signala tokom maksimuma X-zračenja solarnog flera klase M2.5 registrovanog 06. jula 2006. godine u 08:36 UT na trasi:

- a) NAA/24.0 kHz (Kolarski et al., 2011) i
- b) GQD/22.1 kHz (Kolarski i Grubor, 2014)

Tabela 20. Parametri promene uslova propagacije dnevnih signala NAA/24.0 kHz i GQD/22.1 kHz tokom maksimuma X-zračenja solarnog flera klase M2.5 registrovanog 06. jula 2006. godine u 08:36 UT

Solarni fler $I_{max} = 2.51 \cdot 10^{-5} \text{ Wm}^{-2}$	NAA/24.0 kHz	GQD/22.1 kHz
ΔA_{flare} (dB)	+4.49	+1.0
ΔP_{flare} (°)	+40.01	-20.25
N_{e_flare} (50 km) (m^{-3})	$2.52 \cdot 10^5$	$6.84 \cdot 10^6$
N_{e_flare} (74 km) (m^{-3})	$3.30 \cdot 10^9$	$1.03 \cdot 10^{10}$
N_{e_flare} (90 km) (m^{-3})	$1.83 \cdot 10^{12}$	$1.36 \cdot 10^{12}$

Gde je:

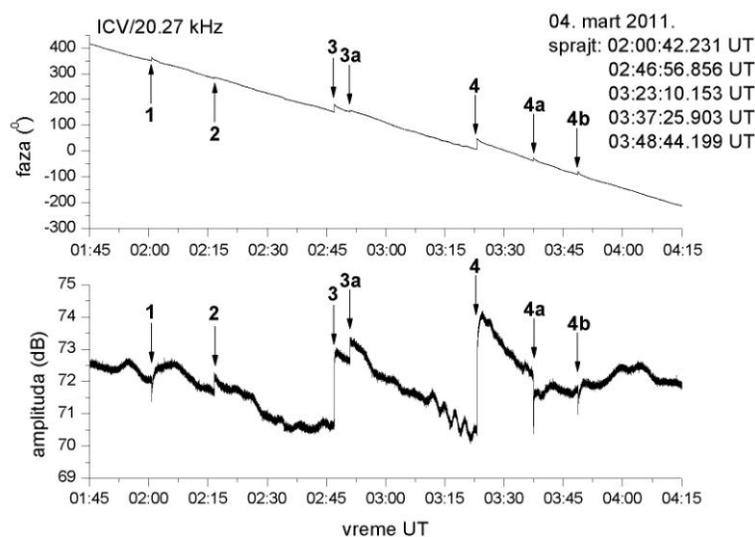
ΔA_{flare} (dB) - maksimalna promena amplitude (dB) VLF signala pod uticajem solarnog X-zračenja,

ΔP_{flare} (°) - maksimalna promena faze (°) VLF signala pod uticajem solarnog X-zračenja i

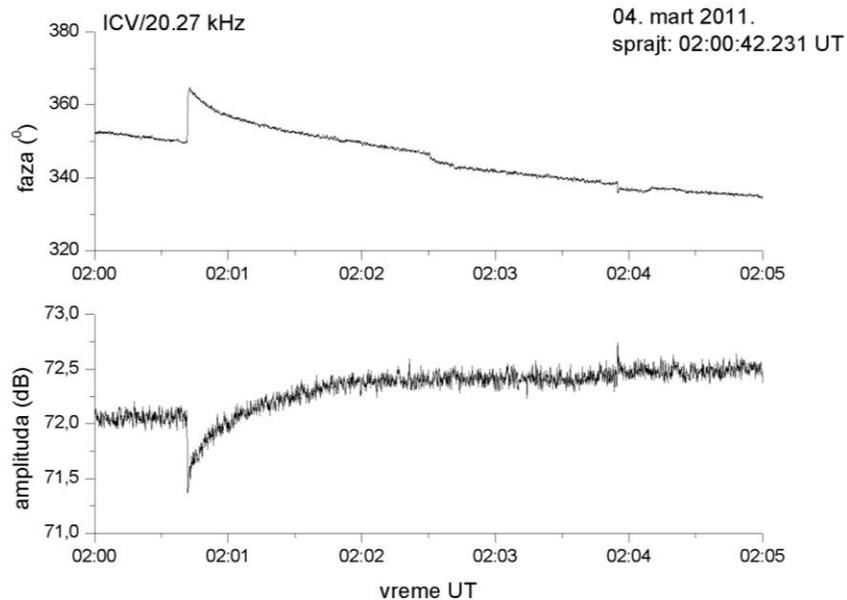
N_{e_flare} (50, 74 i 90 km) (m^{-3}) - izračunata koncentracija elektrona (m^{-3}) na visinama 50, 74 i 90 km, tokom maksimuma solarnog X-zračenja.

6.2.2. Određivanje koncentracije elektrona talasovoda u uslovima VLF poremećaja vezanih za elve

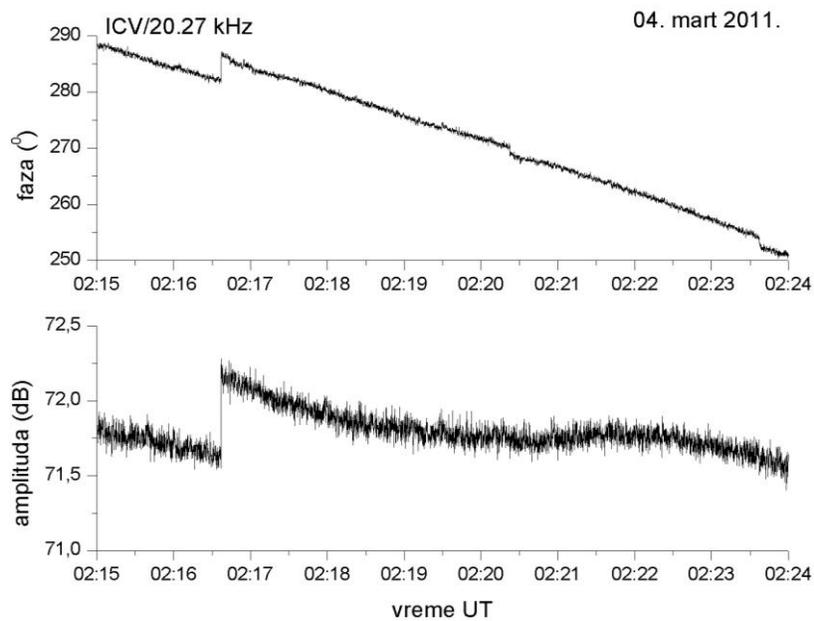
Pregledom podataka u periodu 2008 - 2011. godine, primećeni su poremećaji tipa “ranih događaja dugog oporavka”, tzv. LORE (eng. LOng-Recovery Early events). Za razliku od drugih ranih VLF poremećaja, čije je vreme oporavka signala manje od 100 s, LORE predstavljaju posebnu kategoriju ranih poremećaja sa vremenom oporavka od nekoliko minuta pa do nekoliko desetina minuta (Haldoupis et al., 2012, 2013). LORE mogu da se javе samostalno ili u kombinaciji sa ranim VLF poremećajima. Početak LORE povezan je sa snažnim pražnjenjima nezavisno od polarnosti CG udara (\pm) što ukazuje da je uzrok ove pojave produžena promena jonizacije u gornjim delovima oblasti D, izazvana elektromagnetskim impulsima emitovanim snažnim \pm CG udarima, kada su vršne struje veće od 250 kA. Pri ovakvim uslovima generišu se elvi (Haldoupis et al., 2012, 2013). LORE su detektovane na signalu kada je pražnjenje locirano unutar 250 km od GCP za taj signal. Pojava elva se sa sigurnošću može očekivati kod vršnih struja pražnjenja koje su veće od 300 kA. Višestruki poremećaji tipa LORE u slučaju pojave elva sa sprajtovima, registrovani 04. marta 2011. godine na ICV/20.27 kHz signalu, prikazani su na Slici 6.2.2.1, a pojedinačni poremećaji na Slici 6.2.2.2.



Slika 6.2.2.1. Poremećaji prostiranja ICV/20.27 kHz signala u slučaju pojave elva sa sprajtovima registrovani 04. marta 2011. godine



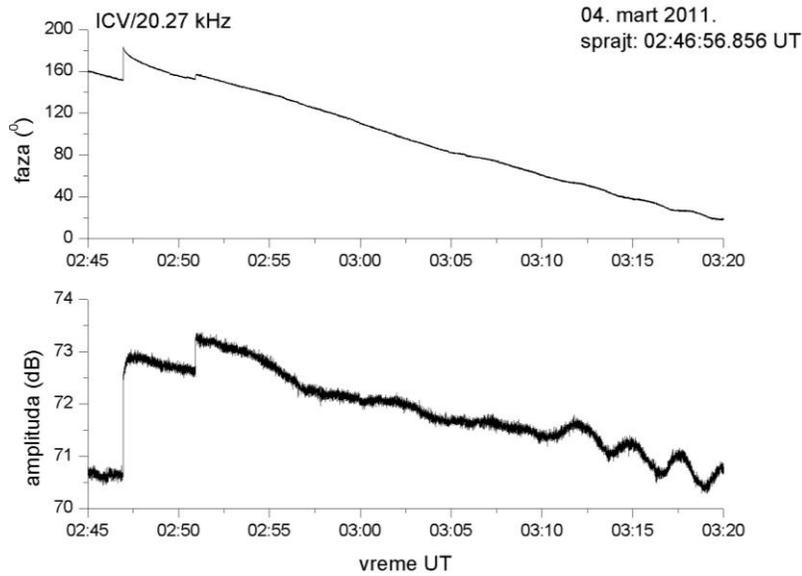
a)



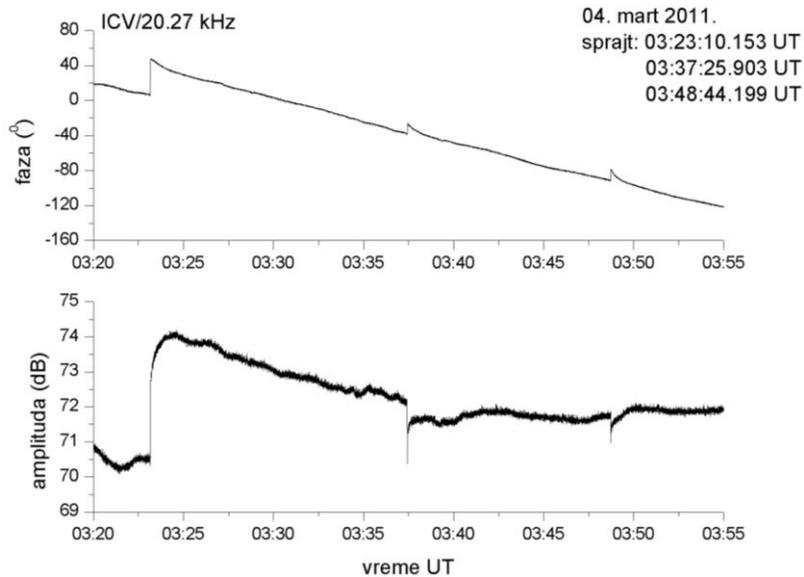
b)

Slika 6.2.2.2. Pojedinačni poremećaji prostiranja ICV/20.27 kHz signala u slučaju pojave elva sa sprajtovima registrovani 04. marta 2011. godine:

- a) rani/spori poremećaj od sprajta obeležen sa 1 na Slici 6.2.2.1 i
- b) LEP poremećaj obeležen sa 2 na Slici 6.2.2.1



c)



d)

Slika 6.2.2.2. Pojedinačni poremećaji prostiranja ICV/20.27 kHz signala u slučaju pojave elva sa sprajtovima registrovani 04. marta 2011. godine nastavak:

c) stepenasti LORE sa istovremenim početkom sprajta obeležen sa 3 na Slici 6.2.2.1 i

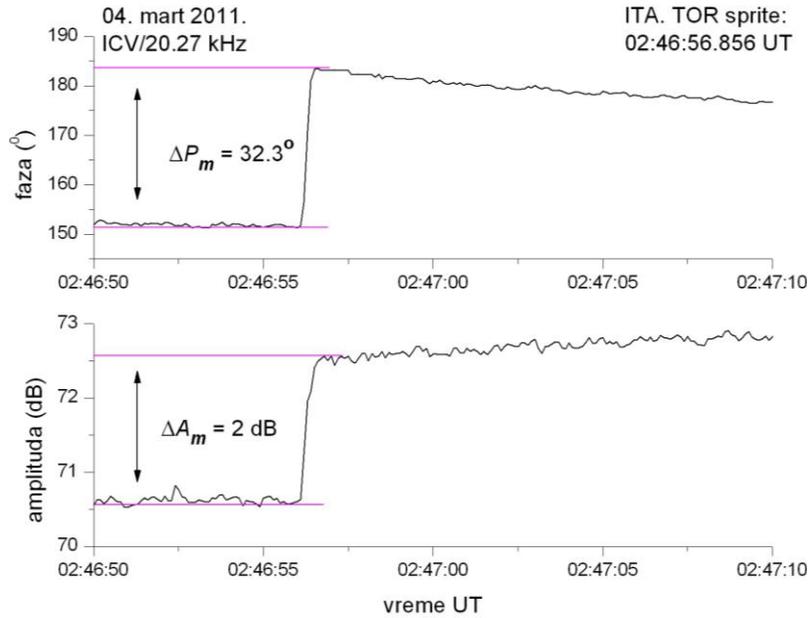
d) LORE sa istovremenim početkom sprajta obeležen sa 4 na Slici 6.2.2.1 i sa LEP-om sa istovremenim početkom sprajta obeleženim sa 4a na Slici 6.2.2.1 i sa ranim/sporim premećajem od sprajta obeleženim sa 4b na Slici 6.2.2.1

LORE poremećaji traju od nekoliko minuta, pa i do više od 30 min (slike 6.2.2.1 i 6.2.2.2). Dugo trajanje ovih pojava objašnjava se procesom disocijativne rekombinacije koja je dominantan proces u nižoj jonosferi. Zavisno od prisutnih jona O_2^+ , NO^+ , O_4^+ i hidratnih jona, koeficijent disocijativne rekombinacije je u opsegu 10^{-12} - 10^{-11} $m^{-3}s$. Prema primerima objavljenim u literaturi, ove pojave imaju malu promenu amplitude, do 2 dB (Haldoupis et al., 2013 i tu citirani radovi). U slučaju poremećaja registrovanog 04. marta 2011. godine (Slika 6.2.2.2.c i d), utvrđeno je da promene amplitude mogu biti i veće, 2 - 4 dB.

Stepenasti LORE premećaji (Slika 6.2.2.2.c), su posledica reflektovanja VLF signala od graničnih zona, široko lateralno rasprostranjenog područja povećane koncentracije elektrona, koje dugo opstaje - elva. Područja povećane koncentracije elektrona gornje oblasti D, nastaju kada snažan elektromagnetski impuls emitovan pražnjenjem podstakne jonizaciju. Mesta refleksije VLF signala su na visinama tog područja, zbog toga se poremećaj jasno vidi na trasi koja kroz njega prolazi. Smatra se da je ključni mehanizam za stvaranje uslova u talasovodu, za pojavu stepenastih LORE poremećaja na VLF signalima, javljanje u kombinaciji elva i sprajta (sa ili bez halo-a) na velikim visinama, kada je omogućena dodatna jonizacija. Tada se na visini elva formira kvazi-elektrostatičko polje koje omogućava dalje proticanje jakih struja (Inan et al., 2010).

Određivanje vrednosti ΔA_m i ΔP_m za slučaj LORE poremećaja, registrovanog 04. marta 2011. godine na ICV/20.27 kHz trasi sa početkom u 02:46:56.0 UT izazvanog pojavom elva, prikazano je na Slici 6.2.2.3 linijama roze boje. Određivanje koncentracije elektrona u slučaju LORE poremećaja izvršeno je po istom principu kao i u slučaju NAA/24.0 kHz i GQD/22.1 kHz trase (odeljak 6.2.1). Proračun koncentracije elektrona primenjen je na drugačiju geometriju prostora u kome se vrši deponovanje energije snažnog elektromagnetskog impulsa pražnjenja, koji dopire do visine elva (80 km). U neporemećenim noćnim uslovima, realna visina na kojoj dolazi do reflektovanja signala ICV/20.27 kHz je oko 80 km. U poremećenim uslovima, dodatna jonizacija utiče na povećanje koncentracije elektrona za oko red veličine, u opsegu posmatranih visina.

Parametri promene uslova propagacije za primer LORE poremećaja dati su u Tabeli 21.



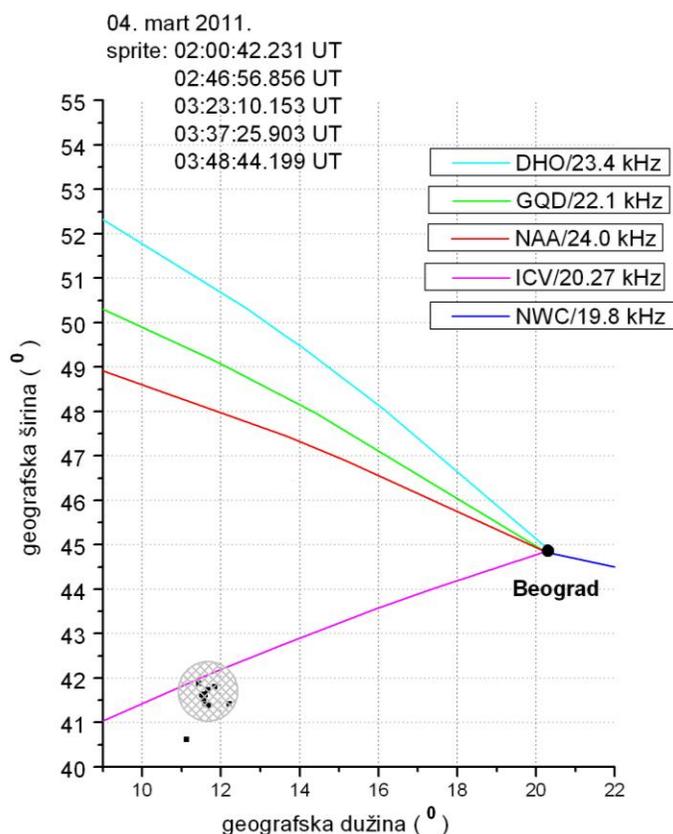
Slika 6.2.2.3. Određivanje izmerenih vrednosti ΔA_m i ΔP_m u slučaju ICV/20.27 kHz signala

Tabela 21. Parametri promene uslova propagacije ICV/20.27 kHz signala tokom LORE poremećaja registrovanog 04. marta 2011. godine sa početkom u 02:46:56.0 UT

ICV/20.27 kHz								
visina (km)	ΔA_m (dB)	ΔP_m (°)	ΔA_{calc} (dB)	ΔP_{calc} (°)	N_{e1} (m ⁻³)	N_{e2} (m ⁻³)	M_Q (Ckm)	E (GJ)
50	2.0	32.3	2.3	31.8	$8.09 \cdot 10^2$	$1.13 \cdot 10^4$	-	-
75					$1.16 \cdot 10^6$	$1.63 \cdot 10^7$	-	-
80					$4.96 \cdot 10^6$	$6.96 \cdot 10^7$	$\sim 23.5 \cdot 10^3$	~ 6

Procena vrednosti momenta električnog dipola M_Q i disipirane energije izvršena je na osnovu maksimalne koncentracije elektrona na visini 80 km, gde se javlja elv koji može imati uticaja na radiopropagaciju. Vrednosti momenta električnog dipola M_Q pri povećanju koncentracije elektrona do vrednosti $6.96 \cdot 10^7$ m⁻³ (Tabela 21), procenjene su na osnovu količine naelektrisanja u pretpostavljenoj zapremini elva oblika diska sa poluprečnikom 150 km i visine 10 km. Na osnovu izračunate vrednosti momenta električnog dipola (Tabela 21), procenjena je i ukupna energija deponovana tokom LORE poremećaja, u slučaju pražnjenja trajanja 1 ms sa vršnom strujom jačine 300 kA. Procenjene vrednosti energija su u skladu sa podacima iz literature (Inan et al., 2010; Pasko et al., 2012).

Pretpostavljeni položaj jonosferske neregularnosti za slučaj LORE poremećaja registrovanog 04. marta 2011. godine sa početkom u 02:46:56.0 UT, prikazan je sivom elipsom na Slici 6.2.2.4. Prema podacima mreže WWLLN, u intervalu registrovanih LORE poremećaja, kada su registrovani i sprajtovi (Slika 6.2.2.1) 04. marta 2011. godine, zabeležena je veoma snažna olujna aktivnost, sa velikim energijama pražnjenja od nekoliko desetina hiljada, pa do preko 10^5 J, iznad područja sa koordinatama (40.61 S; 11.13 I), (41.81 S; 11.85 I) i (41.41 S, 12.21 I). LORE poremećaji su zabeleženi jedino na trasi ICV/20.27 kHz, što se može objasniti činjenicom da je olujna aktivnost bila lokalizovana iznad Tirenskog mora i priobalja između Sardinije i zapadne obale Italije, u nivou Rima (crni kvadratići na Slici 6.2.2.4).



Slika 6.2.2.4. Pretpostavljeni položaj jonosferske neregularnosti u slučaju LORE poremećaja registrovanih na ICV/20.27 kHz trasi 04. marta 2011. godine prikazan je sivom elipsom (atmosferska pražnjenja prikazana su crnim kvadratićima)

ZAKLJUČAK

Dijagnostika oblasti D jonosfere VLF (eng. Very Low Frequency) talasima veoma je resprostranjena i dugo korišćena. Poslednjih 20 godina koristi se za dijagnostiku promena u delu jonosfere kojoj pripada talasovod Zemlja-jonosfera, a koje se dešavaju usled atmosferskih pražnjenja. Rezultati istraživanja naučne radne grupe VERSIM (IAGA/URSI joint working group focused on VLF/ELF Remote Sensing of Ionospheres and Magnetospheres), dostupni su preko naučnih skupova i literature, što je omogućilo da se rezultati ove doktorske disertacije uporede sa već potvrđenim i prihvaćenim rezultatima u nauci. Takođe, otvorena je mogućnost da se istraživanja započnu i u novim pravcima. VLF dijagnostikom detektuju se i poremećaji u jonosferi izazvani procesima na Suncu kao što su solarni X-flerovi, ali i neke vrlo retke pojave, kao što su uticaji emisije X zračenja i gama zračenja koja potiču od magnetar zvezda, na talasovod Zemlja-jonosfera i Geoprostor uopšte. Mehanizam formiranja elva, TLE (eng. Transient Luminous Events) pojava na granici oblasti D i E jonosfere, međusobne interakcije između različitih tipova TLE pojava, kao i efekti relativističkih elektrona, koji se emituju kod atmosferskih pražnjenja, predmet su aktuelnih istraživanja.

Promene parametara propagacije VLF talasa, amplitude i faze, početak, vreme dostizanja maksimuma poremećaja i trajanje poremećaja daju informacije o sredini koja je promenjena atmosferskim pražnjenjem. U ovoj doktorskoj disertaciji su prikazani poremećaji VLF signala, registrovani AbsPAL (Absolute Phase and Amplitude Logger) prijemnim sistemom lociranim u Institutu za fiziku u Beogradu, iz baze podataka koja postoji od 2004. godine.

Identifikovani su poznati i opisani u literaturi tipovi VLF poremećaja, koji se javljaju na više trasa istovremeno. Pored toga, identifikovani su i primeri VLF signatura sprajtova koji su posledica višestrukih povratih udara negativnog tipa pražnjenja oblak - tlo, a za koje nisu pronađeni slični primeri u literaturi.

Pregledom VLF snimka zapažene su signature elva, sa promenama amplitude iznad 2 dB, što su veoma retki slučajevi. Detaljna analiza takvih primera će doprineti boljem razumevanju mehanizma formiranja ovih TLE pojava i njihove povezanosti sa sprajtovima, tj. određivanja na koji način se energija emitovana atmosferskim pražnjenjima prenosi u prostor niske jonosfere i modifikuje je.

TLE pojave se često javljaju kombinovane sa LEP (eng. Lightning-induced Electron precipitation) pojavama, tako da signali rezultuju raznovrsnim formama koje ukazuju ne samo na pojavu sprajtova, odnosno atmosferskih pražnjenja kao njihovih uzroka, već i na pojavu područja povećane koncentracije elektrona LIE (eng. Localised Ionisation Enhancement), koje su posledica interakcije tipa talas-čestica, u kojoj učestvuju elektromagnetski talasi vrlo niskih frekvencija “zviždući” atmosferici, emitovani tokom atmosferskog pražnjenja. Područja LIE izazivaju poremećaje na trasama VLF signala koje prolaze kroz njih ili u njihovoj blizini. Signature tih područja su LEP efekti na trasama posmatranih signala. LEP poremećaji se jasno prepoznaju na VLF zapisima, ali ako su u kombinaciji sa sprajtovima koji potiču od istog pražnjenja, nisu uvek prepoznatljiviji. U ovoj doktorskoj disertaciji su identifikovani kombinovani poremećaji na svim posmatranim trasama. Superpozicijom tipičnog poremećaja koji odgovara sprajtu i tipičnog LEP poremećaja dobijen je sintetički poremećaj koji po formi odgovara kombinovanim poremećajima najčešće identifikovanim na trasama registrovanih VLF signala.

Za karakteristične primere, korišćenjem programskog paketa LWPC (Long Wave Propagation Capability) za izračunavanje parametara propagacije, simulirane su promene vrednosti amplitude i faze signala u uslovima izmenjene koncentracije elektrona. Određivanjem parametara oštine gornje granice talasovoda i visine reflektovanja signala na osnovu modela koje koristi program, simulirane su i izračunate promene koncentracije elektrona u talasovodu koje odgovaraju pojavi sprajta i elva, izazvanih atmosferskim pražnjenjima i upoređene sa promenama usled solarnih X-flerova. Na osnovu izračunate koncentracije elektrona procenjena je promena momenta naelektrisanja električnog dipola, a odatle i disipirana energija.

Dobijeni rezultati su saglasni sa proračunima drugih modela niske jonosfere, kao i sa merenjima korišćenjem različitih tehnika, sa tla i “in situ”.

Rezultati ove doktorske disertacije su pokazali da podaci VLF registracija prikupljeni sistemom AbsPAL i upotpunjeni simulacijom propagacije VLF signala programskim paketom LWPC, daju prilično realnu sliku električnih i energijskih parametara niske jonosfere u toku atmosferskog pražnjenja. Informacije o atmosferskim pražnjenjima i uspostavljanju globalnog strujnog kola su značajne za ispitivanje procesa prenosa energije u najbližoj okolini Zemlje.

Literatura:

- Armstrong, R. A., Lyons, W. A. (2000). Satellite and ground-based data exploitation for NUDET discrimination, characterizing atmospheric electrodynamic emissions from lightning, sprites, jets and elves. Final Report, DOE Contract #DE-AC04-98AL79469, page 213.
- Bajčetić, J., Nina, A., Čadež, V. M., Todorović, B. M. (2015). Ionospheric D-Region Temperature Relaxation and Its Influences on Radio Signal Propagation After Solar X-Flares Occurrence, *Therm. Sci.*, **9**, pp. 299-309.
- Baker, D. N. (2000). Effects of the Sun on the Earth's environment. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **62**, pp. 1669-1681.
- Barrington-Leigh, C. P., Inan, U. S., Stanley, M. (2001). Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry. *J. Geophys. Res.*, **106**, pp.1741.
- Barrington-Leigh, C. P., Inan, U. S., Stanley, M., Cummer, S. A., Sprites triggered by negative lightning discharges, (1999). *Geophys. Res. Lett.*, **26** (24), pp. 3605-3608.
- Bedard Jr., A. J., Lyons, W. A., Armstrong, R. A., Nelson, T. E., Hill, B., Gallagher, S. (1999). A search for low-frequency atmospheric acoustic waves associated with sprites, blue jets, elves and storm electrical activity. *EOS Trans. AGU, Fall Meet. Suppl.*, **80**(46).
- Bering, E. A. III, Benbrook, J. R., Bhusal, L., Garrett, J. A., Paredes, A. M., Wescott, E. M., Moudry, D. R., Sentman, D. D., Stenbaek-Nielsen, H. C., Lyons, W. A. (2004). Observations of transient luminous events (TLEs) associated with negative cloud-to-ground (-CG) lightning strikes. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/2003GL018659.
- Betz, H. D., Schumann, U., Laroche, P. (Eds.) (2009). *Lightning: Principles, Instruments and Applications, Review of Modern Lightning Research*. Springer Science+Business Media B.V.
- Blanc, E., Farges, T., Roche, R., Brebion, D., Hua, T., Labarthe, A., Melinkov, V. (2004). Nadir observations of sprites from the International Space Station. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JA009972.
- Blecki, J., Parrot, M., Wronowski, R. (2009). ELF and VLF signatures of sprites registered onboard the low altitude satellite DEMETER, *Ann. Geophys.*, **27**, pp. 2599–2605.

- Boccippio, D. J., Williams, E. R., Hecman, S. J., Lyons, W. A., Baker, I., Boldi, R. (1995). Sprites, ELF transients and positive ground strokes. *Science*, **269**, pp. 1088–1091.
- Boeck, W. L., O. H. Vaughan, Jr., Blakeslee, R. J., Vonnegut, B., Brook, M., McKune, J. (1995). Observations of lightning in the stratosphere. *J. Geophys. Res.*, **100**, pp. 1465.
- Boys, C. V. (1926). Progressive lightning. *Nature*, **118**, pp. 749.
- Budden, K. G. (1961). *Radio Waves in the Ionosphere*. Cambridge University Press.
- Chern, R., Jeng-Shing; Lin, Shin-Fa; Wu, An-Ming (2015). Ten-year transient luminous events and Earth observations of FORMOSAT-2. NASA Astrophysics Data System (ADS).
- Cho, M., Rycroft, M. J. (2001). Non-uniform ionisation of the upper atmosphere due to the electromagnetic pulse from a horizontal lightning discharge. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **63**, pp. 559–580.
- Cohen, M., Cotts, B. (2009). Lightning Activity. *IHY Workshop on Advancing VLF through the Global AWESOME Network*.
- Cohen, M. B., Inan, U. S., Said, R. K., Briggs, M. S., Fishman, G. J., Connaughton, V., Cummer, S. A. (2010). A lightning discharge producing a beam of relativistic electrons into space. *Geophys. Res. Lett.*, **37**(L18806), doi:10.1029/2010GL044481.
- Croizé, L., Payan, S., Bureau, J., Duruisseau, F.; Huret, N. (2014). HALESIS projet: High Altitude Luminous Events Studied by Infrared Spectro-imagery. NASA Astrophysics Data System (ADS).
- Cummer, S. A. (2000). Modeling electromagnetic propagation in the earth-ionosphere waveguide. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **48**(9), pp. 1420–1429.
- Cummer, S. A. (2003). Current moment in sprite-producing lightning. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **65**, pp. 499–508.
- Cummer S. A., Briggs M. S., Dwyer J. R., Xiong S., Connaughton V., Fishman G. J., Lu G., Lyu F., Solanki R. (2014). The source altitude, electric current, and intrinsic brightness of terrestrial gamma ray flashes, *Geophys. Res. Lett.*, **41**(23).
- Cummer, S. A., Inan, U. S., Bell, T. F., BarringtonLeigh, C. P. (1998). ELF radiation produced by electrical currents in sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, pp. 1281–1284.

- Cummer, S. A., Lyons, W. A. (2004). Lightning charge moment changes in U.S. high plains thunderstorms. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/-2003GL019043.
- Cummer, S. A., Lyons, W. A. (2005). Implications of impulse charge moment changes in sprite-producing and non-sprite-producing lightning. *J. Geophys. Res.*, **110**(A40304), doi:10.1029/2004JA010812.
- Cummer, S. A., Lyu, F., Briggs, M. S., Fitzpatrick, G., Roberts, O. J., Dwyer, J. R. (2015). *Lightning leader altitude progression in terrestrial gamma-ray flashes*, *Geophys. Res. Lett.*, **42**(18), pp. 7792-7798., doi: 10.1002/2015GL065228
- Cummer, S. A., Zhai, Y., Hu, W., Smith, D. M., Lopez, L. I., Stanley, M. A. (2005). Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma-ray flashes. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(L08811), doi:10.1029/2005GL022778.
- Davidson, J. E. (1893). Thunderstorms and the auroral phenomena. *Nature*, 47:582.
- Dowden, R. L., Adams, C. D. D., Brundell, J. B., Dowden, P. E. (1994). Rapid onset, rapid decay (RORD), phase and amplitude perturbations of VLF subionospheric transmissions. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **56**(11), pp. 1513-1527.
- Dwyer, J. R. (2004). Implications of X-ray emission from lightning. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(L12102), doi: 10.1029/2004GL019795.
- Dwyer, J. R. (2005). Gamma-ray events from thunderclouds. In *2005 Seminar Series on Terrestrial Gamma Ray Flashes and Lightning Associated Phenomena*, Space Science Laboratory, University of California, Berkeley.
- Dwyer, J. R., Rassoul, H. K., Al-Dayeh, M., Caraway, L., Chrest, A., Wright, B., Kozak, E., Jerauld, J., Uman, M. A., Rakov, V. A., Jordan, D. M., Rambo, K. J. (2005). X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2004GL021782.
- Dwyer, J. R., Rassoul, H. K., Al-Dayeh, M., Caraway, L., Wright, B., Chrest, A., Uman, M. A., Rakov, V. A., Rambo, K. J., Jordan, D. M., Jerauld, J., Smyth, C. (2004a). A ground level gamma-ray burst observed in association with rocket-triggered lightning. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(L05119), doi:10.1029/2003GL018771.

- Dwyer, J. R., Rassoul, H. K., Al-Dayeh, M., Caraway, L., Wright, B., Chrest, A., Uman, M. A., Rakov, V. A., Rambo, K. J., Jordan, D.M., Jerauld, J., Smyth, C. (2004b). Measurements of X-ray emission from rocket-triggered lightning. *Geophys. Res. Lett.*, **31**(L05118), doi: 10.1029/2003GL018770.
- Dwyer, J. R., Smith, D. M., Cummer, S. A. (2012). High-Energy Atmospheric Physics: Terrestrial Gamma-Ray Flashes and Related Phenomena, *Space Sci. Rev.*, doi: 10.1007/s11214-012-98
- Dwyer, J. R., Uman, M. A., Rassoul, H. K., Al-Dayeh, M., Caraway, L., Jerauld, J., Rakov, V. A., Jordan, D. M., Rambo, K. J., Corbin, V., Wright, B. (2003). Energetic radiation produced during rocket-triggered lightning. *Science*, **299**, pp. 694–697.
- Everett, W. H. (1903). Rocket lightning. *Nature*, **68**, page 599.
- Farges, T., Blanc, E., Le Pichon, A., Neubert., T., Allin, T. H. (2005). Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite2003 campaign. *Geophys. Res. Lett.*, **32**(1), doi:10.1029/2004GL021212.
- Ferguson, A. J. (1998). Computer Programs for Assessment of Long-Wavelength Radio Communications, Version 2.0. Technical document 3030, Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego CA 92152-5001.
- Franz, R. C., Nemzek, R. J., Winckler, J. R. (1990). Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system. *Science*, **249**(4964), pp. 48–51.
- Frey, H., Mende, S., Hsu, R. R., Su, H. T., Chen, A., Lee, L. C., Fukunishi, H., Takahashi, Y. (2004). The spectral signature of transient luminous events (TLE, sprite, elve, halo) as observed by ISUAL. *Eos Trans. AGU-Fall Meet. Suppl.*, **85**(47), AE51A–05.
- Fukunishi, H., Takahashi, Y., Kubota, M., Sakanoi, K., Inan, U. S., Lyons, W. A. (1996). Elves, lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, pp.2157–2160.
- Füllekrug, M., Mareev, E. A., Rycroft, M. J. (eds) (2006). *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*. Springer, Printed in the Netherlands.
- Gerken, E. A., Inan, U. S. (2002). A survey of streamer and diffuse glow dynamics observed in sprites using telescopic imaging. *J. Geophys. Res.*, **107**(S1A), pp. 4–1.

- Gerken, E. A., Inan, U. S. (2003). Observations of decameter-scale morphologies in sprites. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **65**, pp. 567–572.
- Gerken, E. A., Inan, U. S. (2004). Comparison of photometric measurements and charge moment changes in two sprite-producing storms. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/2003GL0118751.
- Gerken, E. A., Inan, U. S. (2005). Streamers and diffuse glow observed in upper atmospheric electrical discharges. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **33**(2), pp. 282–283.
- Gerken, E. A., Inan, U. S., Barrington-Leigh, C. P. (2000). Telescopic imaging of sprites. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, pp. 2637–2640.
- Grubor, D., Šulić, D. (1997). *Koncentracija i temperatura elektrona kao parametri plazme geoprostora, poglavlje u monografiji: Elektron-sto godina od otkrića*, sveska šesta, SANU.
- Grubor, D. P., Šulić, D. M., Žigman, V. (2008). Classification of X-ray solar flares regarding their effects on the lower ionosphere electron density profile, *Ann. Geophys.*, **26** (7), pp. 1731-1740.
- Golde, R. H. (1977). *Lightning, volume 1*, Physics of lightning. Academic Press, London. page 496.
- Golkowski, M., Cohen, M., Kubicki, M. (2009). Global Lightning Activity and the Atmospheric Electric Field. *IHY Workshop on Advancing VLF through the Global AWESOME Network*.
- Goodman, J. M. (2005). *Space Weather & Telecommunications*. Springer Science + Business Media Inc., New York.
- Haldoupis, C., Cohen, M., Arnone, E., Cotts, B., Dietrich, S. (2013). The VLF fingerprint of elves: Step-like and long-recovery early VLF perturbations caused by powerful \pm CG lightning EM pulses, *J. Geophys. Res: SPACE PHYSICS*, **118**, pp. 1–11, doi:10.1002/jgra.50489.
- Haldoupis, C., Cohen, M., Cotts B., Arnone, E., Inan, U. (2012). Long-lasting D-region ionospheric modifications, caused by intense lightning in association with elve and sprite pairs, *Geoph. Res. Lett.*, **39**(L16801), doi:10.1029/2012GL052765.

- Hardman, S. F., Dowden, R. L., Brundell, J. B., Bahr, J. L., Kawasaki, Z., Rodger, C. J. (2000). Sprite observations in the Northern Territory of Australia. *J. Geophys. Res.*, **105**, pp. 4689–4697.
- Hargreaves, J. K. (1992). *The Solar-Terrestrial Environment*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Harrison, R. G. (2004). The global atmospheric electrical circuit and climate. *Surv. Geophys.*, **25**, pp. 441-484.
- Harrison, R. G., Carslaw, K. S. (2003). Ion-aerosol-cloud processes in the lower atmosphere, *Rev. Geophys.*, **41**, doi:10.1029/2002RG000114.
- Heavner, M. J., Sentman, D. D., Moudry, D. R., Wescott, E. M. (2000). Sprites, blue jets, and elves: Optical evidence of energy transport across the stratopause. In Siskind, D.E., Eckermann, S.D., and Summers, M.E., editors, *Atmospheric Science Across the Stratopause*, Vol. 123 of Geophysical Monograph Series, pp. 69–82. AGU.
- Hoffman, K. (1923). Bericht über die in Ebeltoft auf Spitzbergen in den Jahren 1913/4 durchgeführten luftelektrischen Messungen. *Beitr. Phys. Atmos.*, **11**(1). Leipzig.
- Holzworth, R. H., McCarthy, M. P., Thomas, J. N., Chin, J., Chinowsky, T. M., Taylor, M. J., Jr., O. Pinto (2005). Strong electric fields from positive lightning strokes in the stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, doi:10.1029/2004GL021554.
- Hu, W., Cummer, S., Lyons, W. A., Nelson, T. E. (2002). Lightning charge moment changes for the initiation of sprites. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, doi:10.1029/2001GL014593.
- Huang, E., Williams, E., Boldi, R., Heckman, S., Lyons, W., Taylor, M., Nelson, T., Wong, C. (1999). Criteria for sprites and elves based on Schumann resonance observations. *J. Geophys. Res.*, **104**, pp. 16943–16964.
- Inan, U. S., Cohen, M., Said, R. (2005). Terrestrial gamma ray flashes and VLF radio atmospherics. In *2005 Seminar Series on Terrestrial Gamma Ray Flashes and Lightning Associated Phenomena*, Space Science Laboratory, University of California, Berkeley.
- Inan, U. S., Cummer, S. A., Marshall, R. A. (2010). A survey of ELF and VLF research on lightning ionosphere interactions and causative discharges. *J. Geophys. Res.*, **115** (A00E36), doi:10.1029/2009JA014775.

- Isrealevich, P. L., Yair, Y., Devir, A., Joseph, J., Levin, Z., Mayo, I., Moalem, M., Price, C., Ziv, B., Sternlieb, A. (2004). Transient airglow enhancements observed from the space shuttle Columbia during the MEIDEX sprite campaign. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, doi:10.1029/2003GL019110.
- Jackson, J. D. (1967), *Classical Electrodynamics*. John Wilay & Sons, Inc., New York.
- Jayarante, R. (2003). Thunderstorm electrification mechanisms. In Cooray, V., editor, *The Lightning Flash*, pp. 17-44. The Institution of Electrical Engineers.
- Kartalev, M. D., Rycroft, M. J., Papitashvili, V. O. (2004). A quantitative model of the effect of global thunderstorms on the global distribution of ionospheric electrostatic potential, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **66**(13-14), pp.1233-1240.
- Kolarski, A.** (2009). Dijagnostika niske jonosphere radio talasima vrlo niskih frekvencija (VLF), Magistarska teza, Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Kolarski, A.**, Grubor, D. (2014). Sensing the Earth's low ionosphere during solar flares using VLF signals and goes solar X-ray data, *Adv. Space Res.*, **53**(11), pp. 1595-1602.
- Kolarski, A.**, Grubor, D. (2015). Comparative Analysis of VLF Signal Variation along Trajectory Induced by X-ray Solar Flares, *J. Astrophys. Astr.*, **36**(4), pp. 565-579.
- Kolarski, A.**, Grubor, D., Šulić, D. (2011). Diagnostics of the Solar X-Flare Impact on Lower Ionosphere Through the Vlf-Naa Signal Recordings, *Balt. Astron.*, **20**(4), pp. 591-595.
- Lang, T. J., Lyons, W. A., Rutledge, S. A., Meyer, J. D., MacGorman, D. R., Cummer, S. A. (2010). Transient luminous events above two mesoscale convective systems: Storm structure and evolution. NASA Astrophysics Data System (ADS).
- Lang, T. J., Miller, L. J., Weisman, M., Rutledge, S. A., Barker III, L. J., Bringi, V. N., Chandrasekar, V., Detwiler, A., Doeskin, N., Helsdon, J., Knight, C., Krehbiel, P., W. A. Lyons, CCM, MacGorman, D., Rasmussen, E., Rison, W., Rust, W. D., Thomas, R. J. (2004). The Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study (STEPS). *Bull. Am. Met. Soc.*, **85**(8), page 1107.
- Lang, T. J., Rutledge, S. A., Lyons, W., Cummer, S., Meyer, J., Holzworth, R., Macgorman, D. (2008). Transient Luminous Events and the 9 May 2007 Oklahoma Mesoscale Convective System. NASA Astrophysics Data System (ADS).

- Lefeuvre, F., Marshall, R., Pinçon, J. L., Inan, U. S., Lagoutte, D., Parrot, M., Berthelier, J. J. (2009). On remote sensing of transient luminous events' parent lightning discharges by ELF/VLF wave measurements on board a satellite. NASA Astrophysics Data System (ADS).
- Liszka, L. (2004). On the possible infrasound generation by sprites. *J. Low Freq. Noise, Vibration and Active Cont.*, **23**(2), pp. 5–93.
- Lu, G., Cummer, S. A., Lyons, W. A., Krehbiel, P. R., Li, J., Rison, W., Thomas, R. J., Edens, H., Beasley, W., Stanley, M. A., MacGorman, D. R., van der Velde, O. A., Cohen, M. B., Lang, T. J., Rutledge, S. A. (2011). Lightning development associated with two negative gigantic jets, *Geophys. Res. Lett.*, **38**(L12801).
- Lyons, W. A. (1996). Sprite observations above the U.S. High Plains in relation to their parent thunderstorm systems. *J. Geophys. Res.*, **101**, pp. 29641–29652.
- Lyons, W. A., Nelson, T. E., Armstrong, R. A., Pasko, V. P., Stanley, M. A. (2003a). Upward electrical discharges from thunderstorm tops. *Bull. Am. Met. Soc.*, **84**(4), pp. 445–454.
- Lyons, W. A., Nelson, T. E., Faires, A. (2001). Electrical discharges into the stratosphere from the tops of intense thunderstorms. *EOS Trans. AGU - Fall Meet. Suppl.*, **82**, page 47. Abstract AE22A-02.
- Lyons, W. A., Nelson, T. E., Williams, E. R., Cummer, S. A., Stanley, M. A. (2003b). Characteristics of sprite-producing positive cloud-to-ground lightning during the 19 July 2000 STEPS mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, pp. 2417–2427.
- Lyons, W. A., Williams, E. R. (1993). Preliminary investigations of the phenomenology of cloud-to-stratosphere lightning discharges. In *Conference on Atmospheric Electricity*, pp. 725–732, Boston. American Meteorological Society. Preprint.
- MacGorman, D. R., Rust, W. D. (1998). *The Electrical Nature of Storms*. Oxford University Press.
- MacKenzie, T., Toynbee, H. (1886). Meteorological phenomena. *Nature*, **33**(26).
- Markson, R. (1985). Aircraft measurements of the atmospheric electric global circuit during the period 1971–1984. *J. Geophys. Res.*, **90**, pp. 5967–5977.

- Marshall, R. A., Inan, U. S., Chevalier, T. W. (2008). Early VLF perturbations caused by lightning EMP-driven dissociative attachment. *Geophys. Res. Lett.*, **35**(L21807), doi:10.1029/2008GL035358.
- Mauchly, S. J. (1923). Diurnal variations of the potential gradient of atmospheric electricity. *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, **28**, pp. 61–81.
- Mazur, V., Shao, X.-M., Krehbiel, P. R. (1998). “Spider” lightning in intracloud and positive cloud-to-ground flashes. *J. Geophys. Res.*, **103**, pp. 19811–19822.
- Mende, S., Frey, H., R. R. Hsu, H. T. Su, Chen, A., Lee, L. C., Fukunishi, H., Takahashi, Y. (2004). Sprite imaging results from the ROCSAT-2 ISUAL instrument. *Eos. Trans. AGU, Fall Meet. Suppl.*, AE51A-02, **85**(47).
- Mika, A., Haldoupis, C., Marshall, R. A., Neubert, T., Inan, U.S. (2005). Subionospheric VLF signatures and their association with sprites observed during EuroSprite-2003. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **67**, pp. 1580-1597.
- Milić, S. B. (1989). *Osnove fizike gasne plazme*, Građevinska knjiga, Beograd.
- Milikh, G.M., Guzdar, P. N., Sharma, A. S. (2005). Gamma ray flashes due to plasma processes in the atmosphere: Role of whistler waves. *J. Geophys. Res.*, **110**(A02308), doi: 10.1029/ 2004JA010681.
- Miyasato, R., Fukunishi, H., Fukunishi, Y., Taylor, M. J. (2003). Energy estimation of electrons producing sprite halos using array photometer data. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **65**, pp. 573–581.
- Miyasato, R., Taylor, M. J., Fukunishi, H., Stenbaek-Nielsen, H. C. (2002). Statistical characteristics of sprite halo events using coincident photometric and imaging data. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(21), doi:10.1029/2001GL014480.
- Moore, C. B., Eack, K. B., Aulich, G. D., Rison, W. (2001). Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, pp. 2141–2144.
- Moore, R. C., Barrington-Leigh, C. P., Inan, U. S., Bell, T. F. (2003). Early/fast VLF events produced by electron density changes associated with sprite halos. *J. Geophys. Res.*, **108**(A10), doi:10.1029/2002JA009816.

- Moudry, D., Stenbaek-Nielsen, H., Sentman, D., Wescott, E. (2003). Imaging of elves, halos and sprite initiation at 1 ms time resolution. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys*, **65**, pp. 509–518.
- National Research Council (1986). *The Earth's Electrical Environment*. Studies in Geophysics. National Academy Press, Washington, DC. page 263.
- Neubert, T., Rycroft, M., Farges, T., Blanc, E., Chanrion, O., Arnone, E., Odzimek, A., Arnold, N., Ennel, C.-F., Turunen, E., Böisinger, T., Mika, Á., Haldoupis, C., Steiner, R. J., van der Velde, O., Soula, S., Berg, P., Boberg, F., Thejll, P., Christiansen, B., Ignaccio, M., Füllekrug, M., Verronen, P. T., Montanya, J., Crosby, N. (2008). Recent Results from Studies of Electric Discharges in the Mesosphere, *Surv. Geophys.* doi: 10.1007/s10712-008-9043-1.
- Ney, E. P. (1959). Cosmic radiation and the weather. *Nature*, **183**, pp. 451-452.
- Nina, A. (2014). Dijagnostika plazme jonosferske D oblasti elektromagnetnim VLF talasima, Doktorska disertacija, Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Nina, A., Čadež, V. (2013). Detection of acoustic-gravity waves in lower ionosphere by VLF radio waves, *Geophys. Res. Lett.*, **40**(18), pp. 4803-4807.
- Nina, A., Čadež, V. (2014). Electron production by solar Ly-alpha line radiation in the ionospheric D-region, *Adv. Space Res.*, **54**(7), pp. 1276-1284.
- Nina, A., Čadež, V., Srećković, V. A., Šulić, D. M. (2011). The Influence of Solar Spectral Lines on Electron Concentration in Terrestrial Ionosphere, *Balt. Astr.* **20**(4), pp. 609-612.
- Nina, A., Čadež, V. M., Srećković, V. A., Šulić, D. M. (2012a). Altitude distribution of electron concentration in ionospheric D-region in presence of time-varying solar radiation flux, *Nucl. Instrum. Meth.* **B 279**, pp. 110-113.
- Nina, A., Čadež, V. M., Šulić, D. M., Srećković, V. A., Žigman, V. (2012b). Effective electron recombination coefficient in ionospheric D-region during the relaxation regime after solar flare from February 18, *Nucl. Instrum. Meth.* **B 279**, pp.106-109.
- Nina, A., Simić, S. Z., Srećković, V. A., Popović L. C. (2015). Detection of short-term response of the low ionosphere on gamma ray bursts, *Geophys. Res. Lett.*, **42**(19), pp. 8250-8261.

- Nunn, D. (1997). On the numerical modelling of the VLF Trimpf effect, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **59**(5), pp. 537–560.
- Parrot, M., Sauvaud, J. A., Soula, S., Pinçon, J. L., van der Velde, O. (2013). Ionospheric density perturbations recorded by DEMETER above intense thunderstorms. *J. Geophys. Res: SPACE PHYSICS*, **118**, pp. 5169-5176, doi:10.1002/jgra.50460,
- Pasko, V. P. (2003). Electric jets. *Nature*, **423**, pp. 927–929.
- Pasko, V. P., George, J. J. (2001). Three-dimensional modeling of blue jets and blue starters. *EOS Trans. AGU - Fall Meet. Suppl.*, **82**(47).
- Pasko, V. P., Inan, U. S., Bell, T. F., Reising, S. C. (1998). Mechanism of ELF radiation from sprites, *Geophys. Res. Lett.*, **25**(18), pp. 3493-3496.
- Pasko, V. P., Stanley, M. A., Mathews, J. D., Inan, U. S., Wood, T. G. (2002). Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere. *Nature*, **416**, pp. 152–154.
- Pasko, V. P., Stenbaek-Nielsen, H. C. (2002). Diffuse and streamer regions of sprites. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(A10), doi:10.1029/2001GL014241.
- Pasko, V. P., Yair, Y., Kuo C. – L. (2012). Lightning related transient luminous events at high altitude in the Earth's atmosphere: Phenomenology, mechanisms and effects, *RSpace Sci.*, **168**, doi:10.1007/s11214-011-9813-9.
- Price, C., Greenberg, E., Yair, Y., Satori, G., Bor, J., Fukunishi, H., Sato, M., Israelevich, P., Moalem, M., Devir, A., Levin, Z., Joseph, J. H., Mayo, I., Ziv, B., Sternlieb, A. (2004). Ground-based detection of TLE-producing intense lightning during the MEIDEX mission on board the space shuttle Columbia. *Geophys. Res. Lett.*, **31**. doi:10.1029/2004GL020711.
- Rairden, R. L., Mende, S. B. (1995). Time resolved sprite imagery. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, page 3465.
- Rakov, V. A., Uman, M. A. (2003). *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press., page 687.
- Rycroft, M. J. (2003). The Earth and its atmosphere. In Davies, M., editor, *The standard handbook for aeronautical and astronautical engineers*, pp. 16.1-16.12. McGraw-Hill.

- Rycroft, M. J., Harrison, R. G. (2012). Electromagnetic atmosphere-plasma coupling: the global atmospheric electric circuit. *Space Science Reviews*, **168** (1). pp. 363-384. ISSN 0038-6308, doi: 10.1007/s11214-011-9830-8
- Rycroft, M. J., Israelsson, S., Price, C. (2000). The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **62**, pp.1563-1576.
- São Sabbas, F. T., Sentman, D. D., Wescott, E. M., Jr., Pinto, O. P., Jr., Mendes, O., Taylor, M. J. (2003). Statistical analysis of space time relationships between sprites and lightning. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **65**, pp. 525–535.
- Schunk, R. W., Nagy, A. F. (2000). *Ionospheres: physics, plasma physics and chemistry*. Cambridge University Press. 570 pp.
- Schwenn, R. (2006). *Space Weather: The Solar Perspective*. Living Rev. Solar Phys., **3**, 2.
- Sentman, D. D., Wescott, E.M., Osborne, D. L., Hampton, D. L., Heavner, M. J. (1995). Preliminary results from the Sprites 94 aircraft campaign: 1. Red sprites. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, pp.1205–1208.
- Smith, D. M., Lopez, L. I., Lin, R. P., Barrington-Leigh, C. P. (2005). Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 MeV. *Science*, **307**, pp. 1085–1088.
- Stanley, M., Krehbiel, P., Brook, M., Moore, C., Rison, W. (1999). High speed video of initial sprite development. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, pp. 3201–3204.
- Stenbaek-Nielsen, H. C., Moudry, D. R., Wescott, E. M., Sentman, D. D., Sabbas, F. T. Sao (2000). Sprites and possible mesospheric effects. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, pp. 3829–3832.
- Strangeways, H. J. (1996). *Lightning, Trimpis and Sprites*. Reviews of Radio Science, Stone, R., (Ed.), Oxford University Press, Oxford, 1996.
- Su, H. T., Hsu, R. R., Chen, A. B., Lee, Y. J., Lee, L. C. (2002). Observation of sprites over the Asian continent and over oceans around Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(4). doi:10.1029/2001GL013737.
- Su, H. T., Hsu, R. R., Chen, A. B., Wang, Y. C., Hsiao, W. S., Lai, W. C., Lee, L. C., Sato, M., Fukunishi, H. (2003). Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere. *Nature*, **423**, pp. 974–976.

- Taylor, M. J., Bailey, M. A., Pautet, P. D., Cummer, S. A., Jaugey, N., Thomas, J. N., Solorzano, N. N., Sao Sabbas, F., Holzworth, R. H., Pinto, O., Schuch, N. J. (2008). Rare measurements of a sprite with halo event driven by a negative lightning discharge over Argentina, *Geoph. Res. Lett.*, **35** (L14812), doi:10.1029/2008GL033984.
- Thomson, N. R., Clilverd, M. A., McRae, W. M. (2007). Nighttime D region parameters from VLF amplitude and phase. *J. Geophys. Res.* **112**(A07304), doi:10.1029/2007JA012271.
- Uman, M. A (1987). *The lightning discharge*. Number 39 in International Geophysics Series. Academic Press, Orlando.
- van der Velde, O. A., Bor, J., Li, J., Cummer, S. A., Armone, E., Zannotti, F., Fullekrug, M., Haldoupis, C., NaitAmor, S., Farges, T. (2010), Multiinstrument observations of a positive gigantic jet produced by a winter thunderstorm in Europe, *J. Geophys. Res.*, **115** (D24301), doi:10.1029/2010JD014442.
- van der Velde, O. A., Mika, A., Soula, S., Haldoupis, C., Neubert, T., Inan, U. S. (2006). Observations of the relationship between sprite morphology and in-cloud lightning processes, *J. Geophys. Res.*, **111**(D15203), doi:10.1029/2005JD006879.
- Vaughan Jr., O. H., Blakeslee, R., Boeck, W. L., Vonnegut, B., Brook, M., Jr., J. McKune (1992). A cloud-to-space lightning as recorded by the Space Shuttle payload bay TV cameras. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, pp. 1459–1461.
- Vaughan, O. H. Jr., Vonnegut, B. (1989). Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the clear air above. *J. Geophys. Res.*, **94**, pp. 13179–1382.
- Volland, H. (1982). *Handbook of Atmospheric*, volume 1. CRC Press, Boca Raton, FL. 377 pp.
- Wait, R. J., Spies, K. P. (1964). *Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves*. NBS Technical Note.
- Wescott, E. M., Sentman, D. D., Heavner, M. J., Hampton, D. L., Osborne, D. L., and Vaughan Jr., O. H. (1996). Blue starters: Brief upward discharges from an intense Arkansas thunderstorm. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, pp. 2153–2156.

- Wescott, E. M., Sentman, D. D., Heavner, M. J., Hampton, D. L., Vaughan Jr., O. H. (1998). Blue jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **60**, pp. 713–724.
- Wescott, E. M., Sentman, D., Osborne, D., Hampton, D., Heavner, M. (1995). Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, pp. 1209–1212.
- Wescott, E. M., Sentman, D. D., Stenbaek-Nielsen, H. C., Huet, P., Heavner, M. J., Moudry, D. R. (2001). New evidence for the brightness and ionization of blue starters and blue jets. *J. Geophys. Res.*, **106**, pp. 21549–21554.
- Whitten, R. C., Poppoff, I. G. (1965). *Physics of the Lower Ionosphere*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Williams, E. R. (1988). The electrification of thunderstorms. *Sci. Am.*, **259**, pp. 88–99.
- Williams, E. R. (2001). Sprites, elves, and glow discharge tubes. *Phys. Today*, **54**, pp. 41–47.
- Williams, E. R. (2002). Global electric circuit. In *Encyclopedia of Atmospheric Science*. Academic Press.
- Winckler, J. R., Lyons, W. A., Nelson, T. E., and Nemzek, R. J. (1996). New high-resolution ground-based studies of sprites. *J. Geophys. Res.*, **101**, pp. 6997.
- Yair, Y., Israelevich, P., Devir, A. D., Moalem, M., Price, C., Joseph, J. H., Levin, Z., Ziv, B., Sternlieb, A., Teller, A. (2004). New observations of sprites from the space shuttle. *J. Geophys. Res.*, **109**, doi:10.1029/2003JD004497.
- Yair, Y., Price, C., Levin, Z., Joseph, J., Israelevitch, P., Devir, A., Moalem, M., Ziv, B., Asfur, M. (2003). Sprite observations from the space shuttle during the Mediterranean Israeli dust experiment (MEIDEX). *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, **65**(5), pp. 635–642, doi:10.1016/S1364–6826(02)00332–2.
- Záhlava, J., Němec, F., Santolík, O., Kolmašová, I., Parrot, M., Rodger, C. J. (2015). Very low frequency radio events with a reduced intensity observed by the low-altitude DEMETER spacecraft, *J. Geophys. Res.*, **120**, 9781–9794, doi:10.1002/2015JA021607.

- Žigman, V., Grubor, D., Šulić, D. (2007). D-region electron density evaluated from VLF amplitude time delay during X-ray solar flares, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **69**(7), pp. 775-792.
- Žigman, V., Kudela, K., Grubor, D. (2014). Response of the Earth's lower ionosphere to the Ground Level Enhancement event of December 13, *Adv. Space Res.*, **53**(5), pp. 763-775.
- Šulić, D. M. (1987). Zviždući atmosferici i njihova primena u istraživanju plazmasfere, Doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Šulić, D. M., Čadež, V. M., Grubor, D., Žigman, V. (2006). Space weather signatures on VLF radio waves recorded in Belgrade, *Proceedings of the 14th National Conference of Astronomers of Serbia and Montenegro*, **80**, pp. 191-195.
- Šulić, D., Nina, A., Srećković, V. (2010). Numerical Simulations Of The Effect Of Localised Ionospheric Perturbations On Subionospheric VLF Propagation. 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, 391-395.

Internet adrese:

- Film razvoj klastra sprajtova:
<http://www.wired.com/2013/07/transient-luminous-events/>
- I.M.T.N. mreža: <http://www.imtn.it/>
- Lokacije atmosferskih pražnjenja u realnom vremenu registrovane EUCLID mrežom:
<http://www.euclid.org/realtime.html>
- Orijentacije kamera I.M.T.N. mreže: http://www.imtn.it/dove_siamo.htm
- Razvoj gigantskog plavog mlaza: <https://vimeo.com/136192846>
- Razvoj plavog mlaza: <http://elf.gi.alaska.edu/movies/output.mpg>
- Shematski prikaz područja koje zahvataju kamere I.M.T.N. mreže:
<http://meteore.forumattivo.com/t861-ultimo-aggiornamento-fov-imtn-04-11-2010>
- Slika sprajtova generisanih intenzivnom olujnom aktivnošću:
<http://spaceweathergallery.com>
- Spektrogram sferika u VLF opsegu, registrovanih WWLLN mrežom, stanica Tel Aviv:
<http://wwlln.net/new/spectra/>
- TARANIS satellite to study lightning, CNES, 2011:
<https://taranis.cnes.fr/en/TARANIS/index.htm>
- TLE pojave slika:
<http://www.cnes.fr/web/CNES-en/9128-gp-taranis-satellite-to-study-lightning.php>
- VLF transmiteri: http://radioastronomy.me.uk/VLF_Transmitters_List.pdf i
http://nova.stanford.edu/~vlf/IHY_Test/TechDocs/AWESOME%20Transmitters.pdf
- WWLLN (World Wide Lightning Location Network) mreža: <http://wwlln.net/new/>

PRILOZI

PRILOG 1A. Raspored registrovanih VLF signala po kanalima sistema AbsPAL tokom 2008. i 2009. godine; kontrolni signal (30.0 kHz) za sinhronizaciju sa GPS signalom, uvek je na prvom kanalu; registrovani VLF poremećaji izabrani za dalju analizu napisani su masnim slovima.

Tabela 1A. Raspored VLF signala po kanalima sistema AbsPAL (2008 - 2009)

godina	datum	kod i frekvencija registrovanih VLF signala (kHz) po kanalima sistema AbsPAL					broj VLF poremećaja	
		2	3	4	5	6	ukup.	izabr.
2008	24. mar.	GBZ/19.6	HWU/18.3	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	18. apr.	FTA/20.9	HWU/21.75	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	19. apr.	FTA/20.9	HWU/21.75	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	12. sep.	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	04. nov.	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	1
	11. dec.	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	4	
	17. dec.	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	1
	18. dec.	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
broj dana	ukup.	8					13	
	izabr.	2						2
2009	02. maj	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	2
	27. maj*	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	27 (40 *)	27 (40 *)
	28. maj*	FTA/20.9	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	24 (41 *)	24 (41 *)
	20. jun	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	2	2
	21. jun	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	2
	10. jul	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	24. jul	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	
	27. jul	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	4	3
	10. avg.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	1
	05. sep.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	
	13. sep.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	1
	14. sep.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	
	01. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	1
	09. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	
	10. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	3	2
	13. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	8	7
	14. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	7	7
	15. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	
	17. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	11	6
08. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	2	2	
10. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NDT/22.2	NAA/24.0	1	1	
08. dec.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1		
12. dec.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	2	
broj dana	ukup.	23					54+51*=105 (54+81*= 135)	
	izabr.	16						39+51*=90 (39+81*= 120)

* VLF poremećaji tokom noći 27 - 28. maja 2009. godine, izdvojeni na osnovu TLE pojava (sprajtova i mogućih halo-a, zabeleženih video snimkom rezolucije 0.1 s), analizirani su zasebno (podvučene vrednosti u tabeli).

PRILOG 1B. Raspored registrovanih VLF signala po kanalima sistema AbsPAL tokom 2010. i 2011. godine; kontrolni signal (30.0 kHz) za sinhronizaciju sa GPS signalom, uvek je na prvom kanalu; registrovani VLF poremećaji izabrani za dalju analizu napisani su masnim slovima.

Tabela 1B. Raspored VLF signala po kanalima sistema AbsPAL (2010 - 2011)

godina	datum	kod i frekvencija registrovanih VLF signala (kHz) po kanalima sistema AbsPAL					broj VLF poremećaja	
		2	3	4	5	6	ukup.	izabr.
2010	09. jan.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	10. jan.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1
	01. feb.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	20. feb.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1
	30. mar.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	5	3
	31. mar.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1
	05. maj	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	5	4
	06. maj	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	3	1
	09. sep.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	13. sep.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	4	
	28. sep.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	
	03. okt.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	10. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	3	3
	16. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	
	17. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	16	7
	19. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	21. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	
	23. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	10	4
	24. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	6	4
	25. nov.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	6	3
04. dec.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1	
12. dec.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1	
17. dec.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1	
18. dec.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	5	5	
broj dana	ukup.	24					80	
	izabr.	15						40
2011	26. jan.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	2	2
	04. mar.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	5	5
	20. mar.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1
	05. apr.	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1
	04. maj	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	
	03. jun	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1	1
	05. jun	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	7	7
	09. jun	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	3	
29. jun	ICV/20.27	DHO/23.4	GQD/22.1	NWC/19.8	NAA/24.0	1		
broj dana	ukup.	9					22	
	izabr.	6						17
analizirano ukupno 250 poremećaja tokom 64 dana								
IZABRANO ukupno 179 poremećaja tokom 39 dana								

PRILOG 1C. TLE pojave registrovane kamerama mreže I.M.T.N. u periodu od 2008. do 2011. godine izabrane za analizu.

Tabela 1C. Izabrane TLE pojave (2008 - 2011)

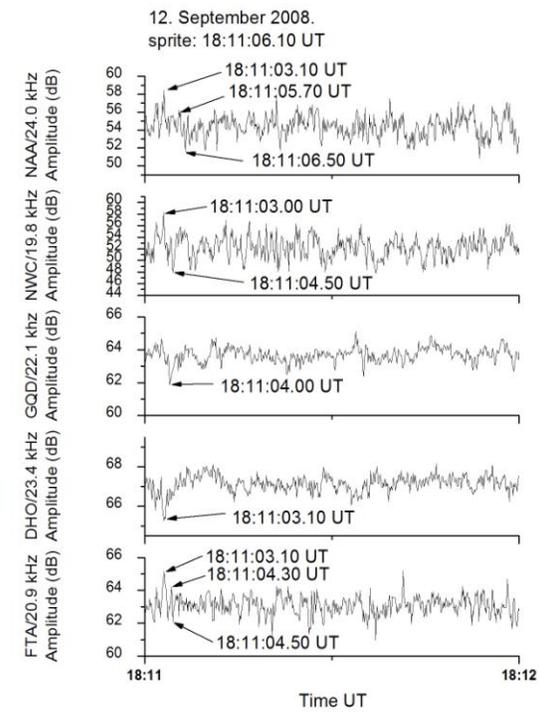
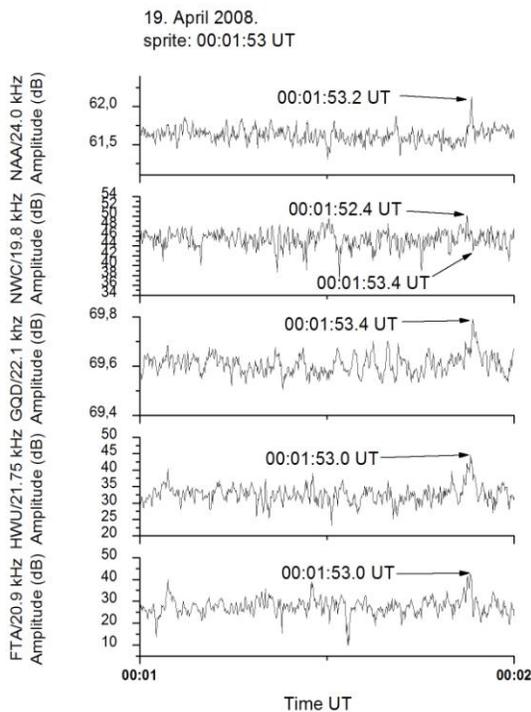
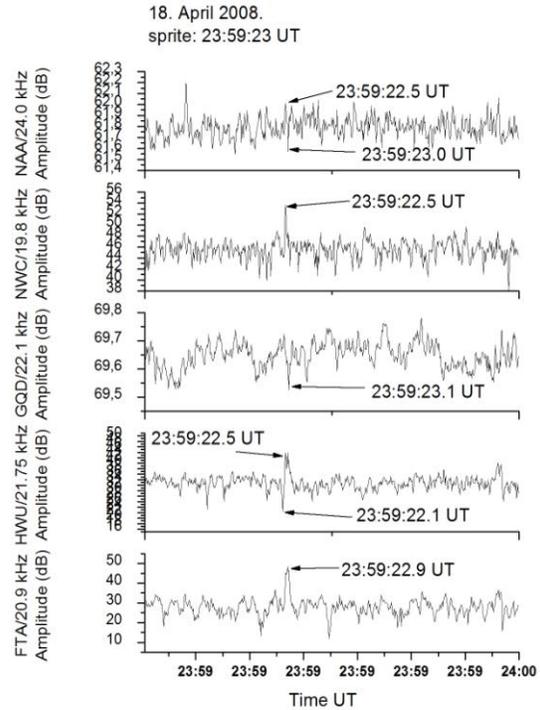
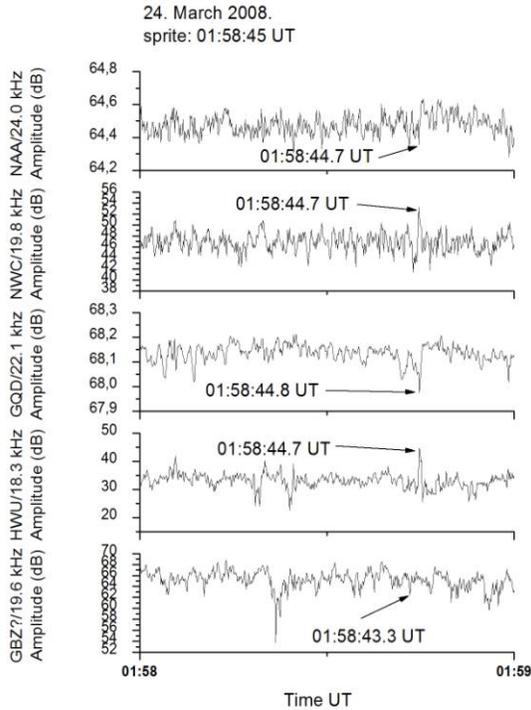
redni broj	izabrani sprajtovi			redni broj	izabrani sprajtovi			
	datum	vreme UT	kamera		datum	vreme UT	kamera	
1.	04. nov. 2008.	20:24:37	SOSO Idice BO	42.	28. maj 2009.	01:37:23	Ferrara	
2.	17. dec. 2008.	21:36:42	OAMH2	43.		01:41:25		
3.	02. maj 2009.	22:58:02.00	SOSO	44.		01:43:33		
4.		23:20:32.00	Idice BO	45.		01:48:02		
5.	27. maj 2009.	21:10:57	Ferrara	46.		01:50:09		
6.		21:38:49		47.		01:55:04		
7.		21:42:11		48.		02:00:51		
8.		21:45:29		49.		02:03:49		
9.		21:55:38		50.		02:09:19		
10.		22:00:27		51.		02:14:42		
11.		22:03:04		52.		02:18:55		
12.		22:06:13		53.		01:51:23		
13.		22:20:01		54.		01:23:05		
14.		22:35:17		55.		01:23:58		
15.		22:39:19		56.		21:39:34		20. jun 2009.
16.		22:44:22		57.	20:11:33	21. jun 2009.	20:27:25	
17.		22:46:40		58.	20:28:55.424		27. jul 2009.	20:33:15.987
18.		22:52:35		59.	20:55:43.411			
19.		23:05:54		60.	02:38:51	10. avg. 2009.		02:38:51
20.		23:15:56		61.	23:03:48.16	13. sep. 2009.	23:03:48.16	Medicina
21.		23:25:54		62.	23:30:43.01	01. okt. 2009.	23:30:43.01	Medicina
22.	23:34:09	63.	00:57:26.0	10. okt. 2009.	00:57:26.0	Ferrara		
23.	23:34:25	64.	03:55:14.03		03:55:14.03	SOSO Idice BO		
24.	23:44:19	65.	13. okt. 2009.	01:37:29.1	Ferrara			
25.	23:45:01	66.		01:40:28.3				
26.	23:48:56	67.		01:50:17.7				
27.	23:51:37	68.		02:07:06.6				
28.	23:00:07	69.		02:12:49.7				
29.	22:56:48	70.	21:54:52	Ferrara; mogući elv				
30.	22:41:23	71.	22:40:39.4	Ferrara				
31.	22:41:58	72.	14. okt. 2009.	00:34:48.4	Ferrara			
32.	00:45:06	73.		00:34:49.9				
33.	00:49:41	74.		00:48:09.0				
34.	00:54:00	75.		00:48:09.3				
35.	00:58:11	76.		01:15:30.9				
36.	00:58:24	77.		01:23:18.4				
37.	01:09:06	78.		01:28:15.9				
38.	01:14:28	79.						
39.	01:27:20	80.						
40.	01:32:16	81.						
41.	01:35:13							

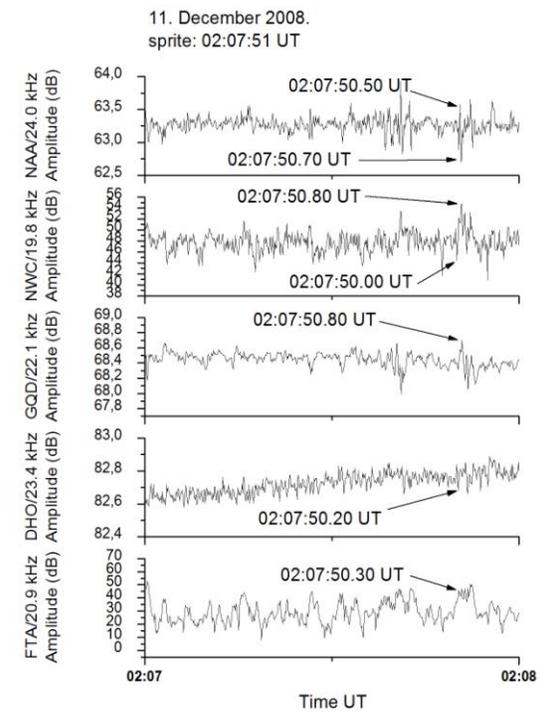
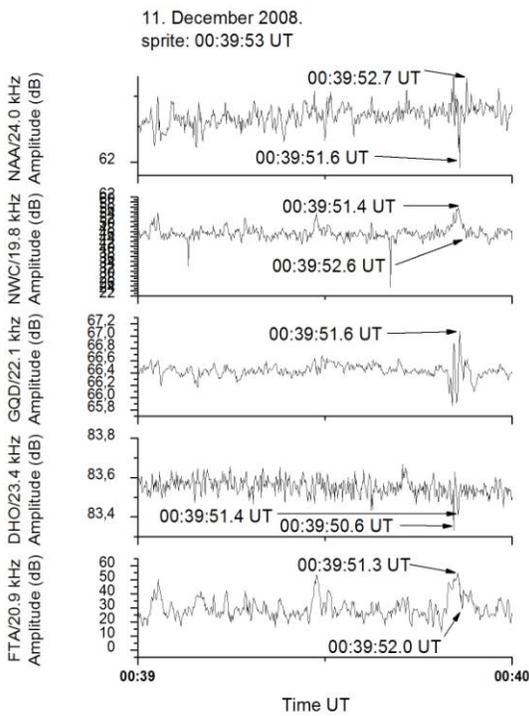
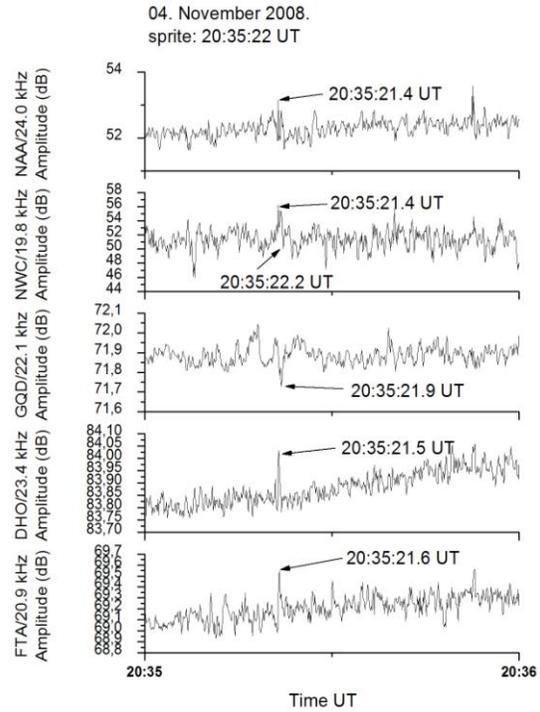
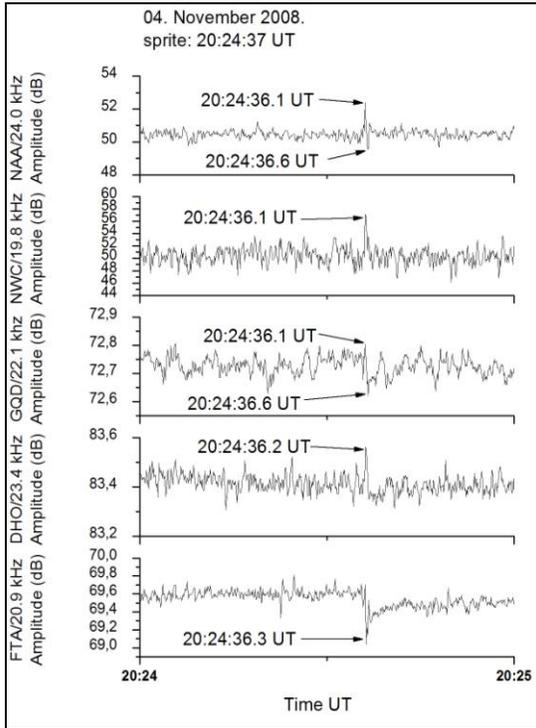
PRILOG 1C. TLE pojave registrovane kamerama mreže I.M.T.N. u periodu od 2008. do 2011. godine izabrane za analizu.

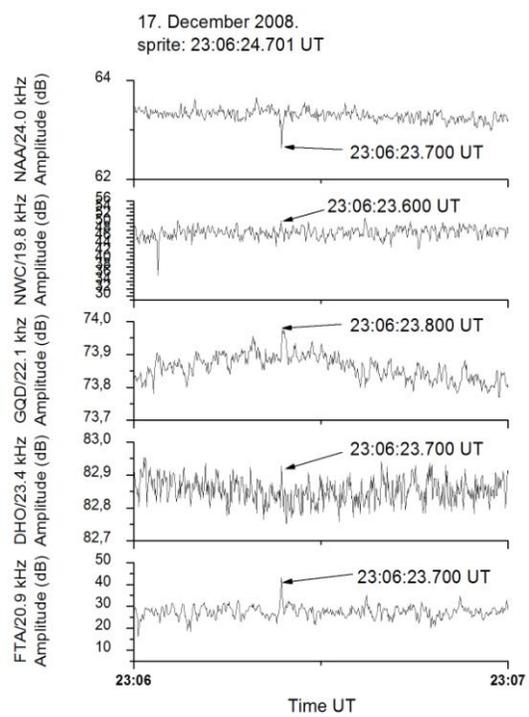
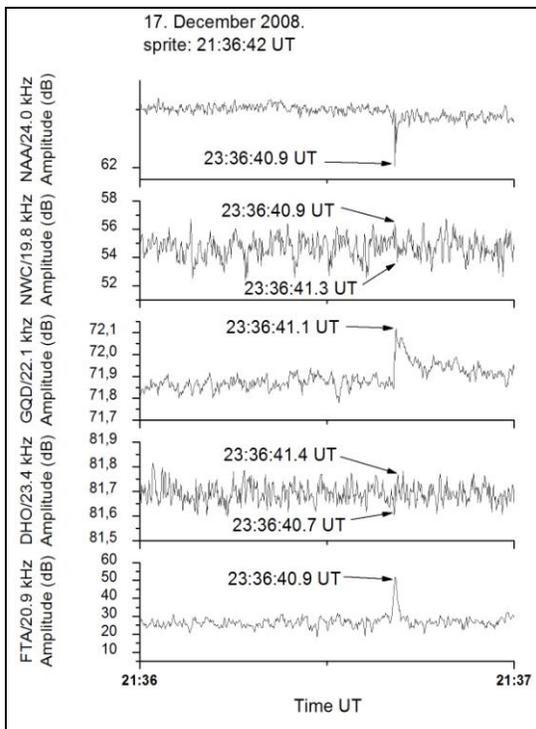
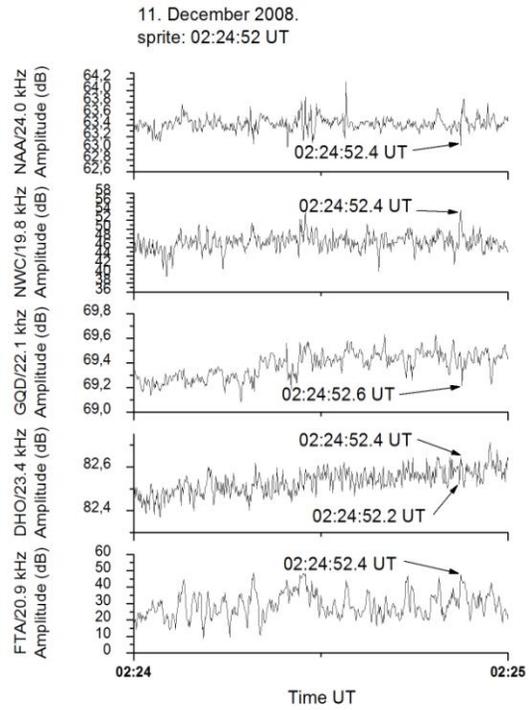
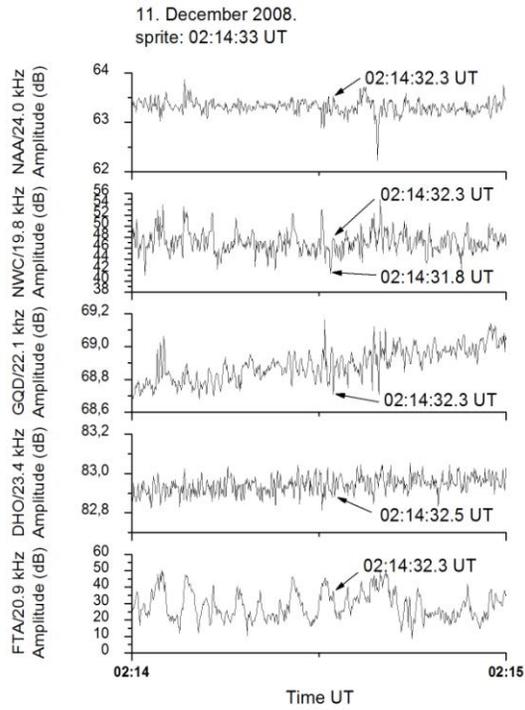
Tabela 1C. Izabrane TLE pojave (2008 - 2011)

redni broj	izabrani sprajtovi			redni broj	izabrani sprajtovi			
	datum	vreme UT	kamera		datum	vreme UT	kamera	
82.	17. okt. 2009.	03:44:07.493	Croara BO	121.	24. nov. 2010.	04:43:30.127	Cuneo	
83.		03:44:07.625	Sarm C2	122.	25. nov. 2010.	18:14:27.133	Cuneo	
84.		03:58:14.889	Croara BO	123.		22:43:19.1	Ferrara	
85.		04:02:05.343		124.		23:13:44.7		
86.		17. okt. 2009.	04:10:38.067	Sarm C2	125.	04. dec. 2010.	05:35:35.937	OAMH3
87.	20:47:28		Sarm	126.	12. dec. 2010.	17:56:03.1	Ferrara	
88.	08. nov. 2009.	20:01:16.90	Medicina	127.	17. dec. 2010.	19:12:55.17	Cuneo	
89.		23:09:26.90			128.	18. dec. 2010.	01:26:44.1	Ferrara
90.	10. nov. 2009.	22:11:52.246	Ferrara	129.	01:37:40.877			
91.	12. dec. 2009.	03:40:10.0	Ferrara	130.	01:39:17.0			
92.		03:51:15.3			131.		01:39:17.073	
93.	10. jan. 2010.	03:41:55.8	Ferrara	132.	01:54:15.958			
94.	20. feb. 2010.	21:29:34.096	Ferrara	133.	26. jan. 2011.	02:15:45.8	Ferrara	
95.	30. mar. 2010.	22:09:45.654	-	134.		02:19:53.5		
96.		22:09:46.004			135.	04. mar. 2011.	02:00:42.231	ITA. TOR
97.		22:09:46.644			136.		02:46:56.856	
98.		31. mar. 2010.		20:10:03.11	Medicina		137.	
99.	05. maj 2010.	22:42:54.02	Medicina	138.	03:37:25.903			
100.		22:51:50.08			139.		03:48:44.199	
101.		23:10:20.04			140.	20. mar. 2011.	00:54:35.8	Ferrara
102.		23:36:01.949		Ferrara	141.	05. apr. 2011.	20:14:19.26	ITA. TOR
103.	06. maj 2010.	23:43:20.666	Ferrara	142.	03. jun 2011.	00:41:18.916	Ferrara	
104.	10. nov. 2010.	18:39:29.8	Ferrara	143.	05. jun 2011.	02:01:41.404	OAMH2 C2	
105.		18:39:29.956				144.		21:37:15.0
106.		19:25:02.7				145.		22:29:27.1
107.	17. nov. 2010.	01:13:34.276	Ferrara	146.		23:29:29.4	Ferrara	
108.		01:24:24.263	OAMH3	147.		23:34:30.8	ITA. TOR	
109.		01:24:25.188	Ferrara	148.	23:37:40.2	Ferrara		
110.		01:54:09.795			149.		23:42:29.0	
111.		02:29:42.491						
112.		02:38:17.499	ITA. TOR					
113.		02:38:17.535						
114.	23. nov. 2010.	22:49:22.290	Cuneo					
115.		22:49:22.780	Croara					
116.		22:58:04.819	Cuneo					
117.		22:58:05.296	Croara					
118.	24. nov. 2010.	04:08:28.473	Cuneo					
119.		04:20:16.973						
120.		04:31:10.365						

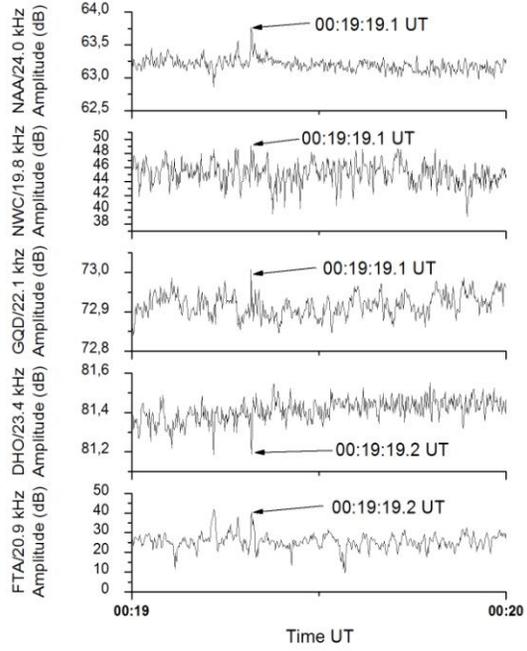
PRILOG 2A. Poremećaji na noćnim VLF signalima snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2008. godine izabrani su za dalju analizu; obeležena su vremena maksimalnog poremećaja signala.



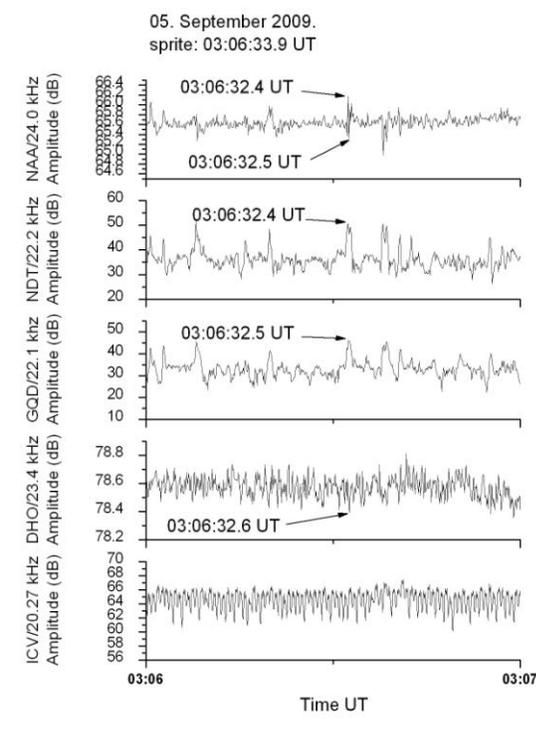
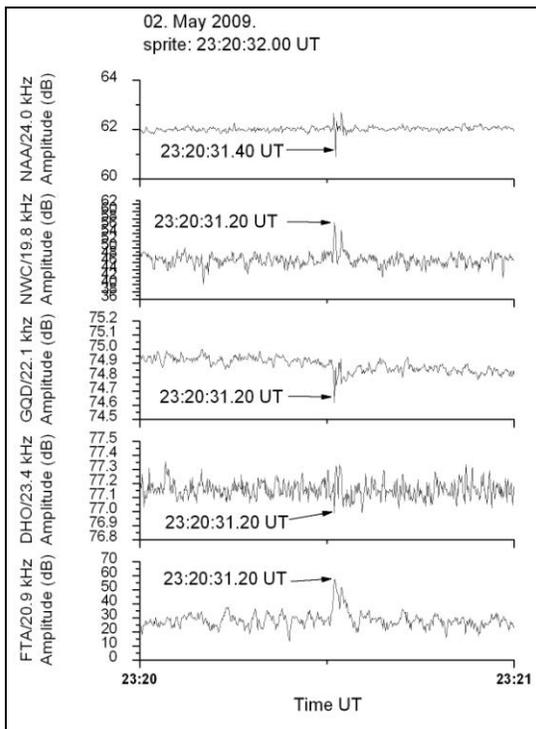
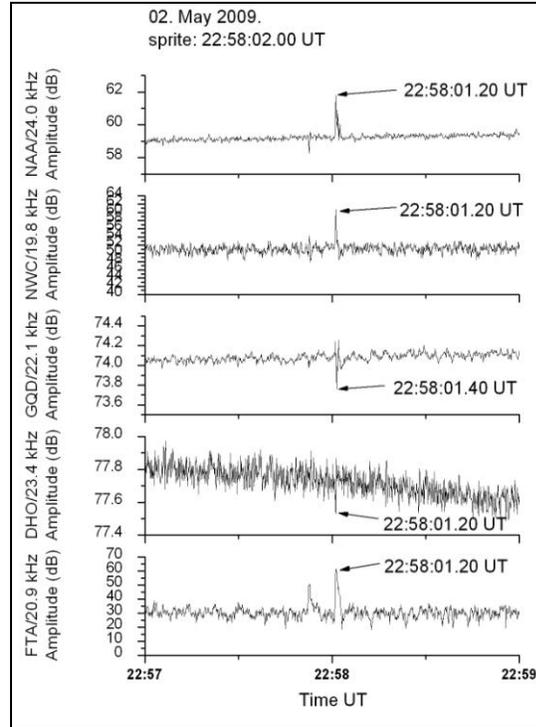
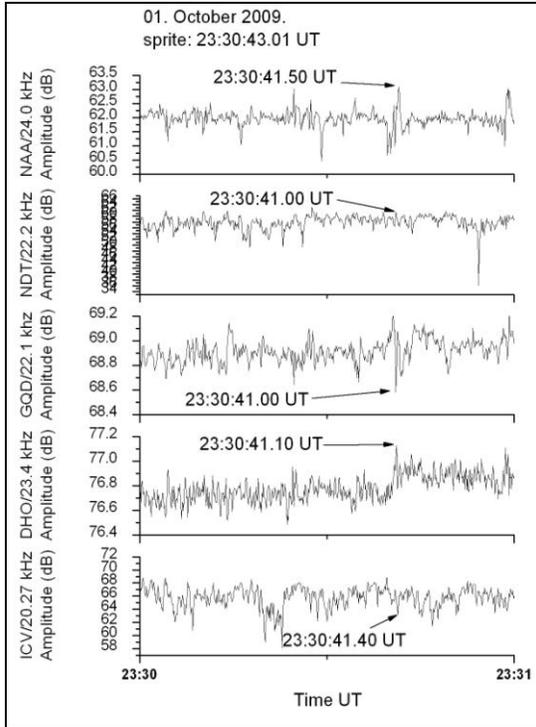


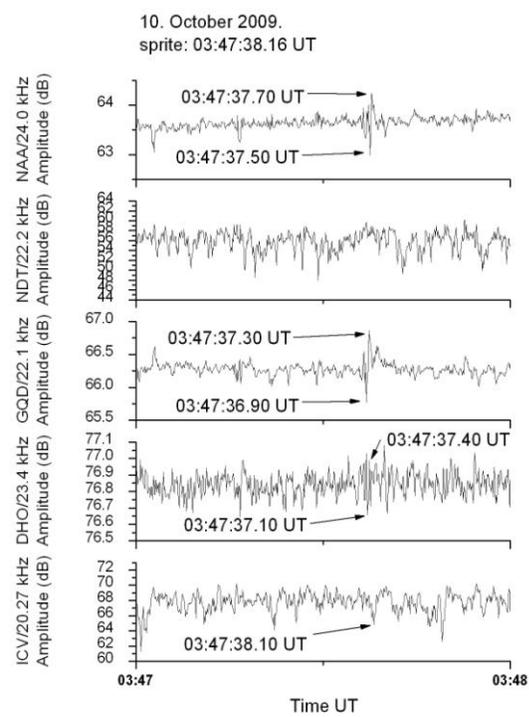
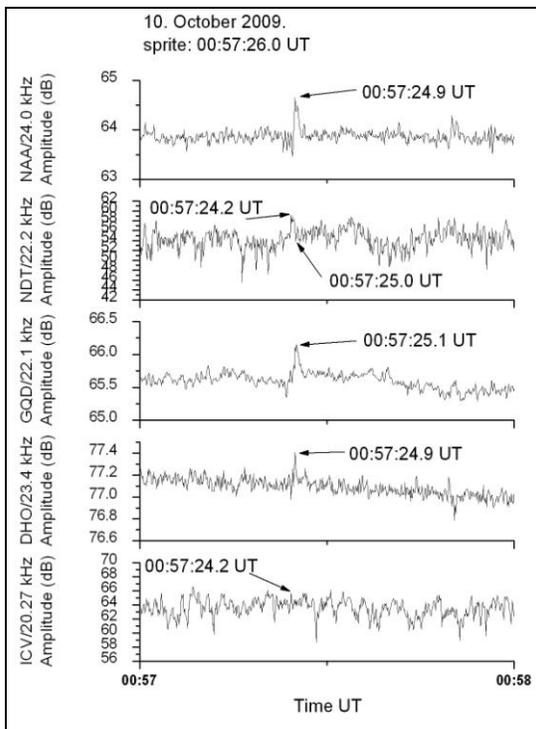
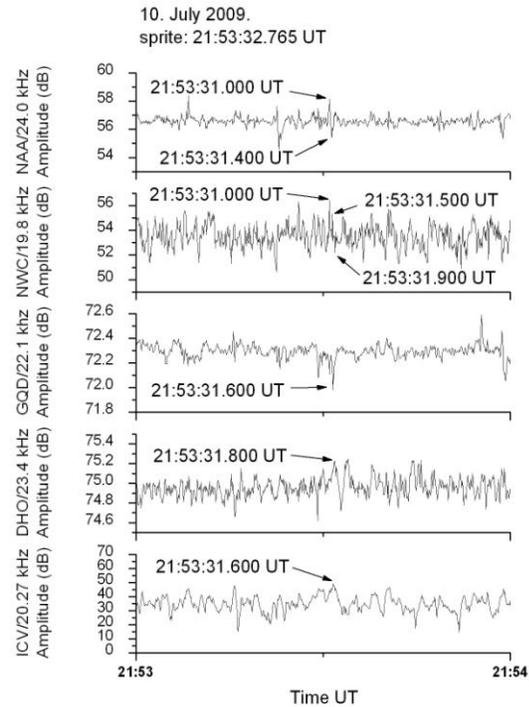
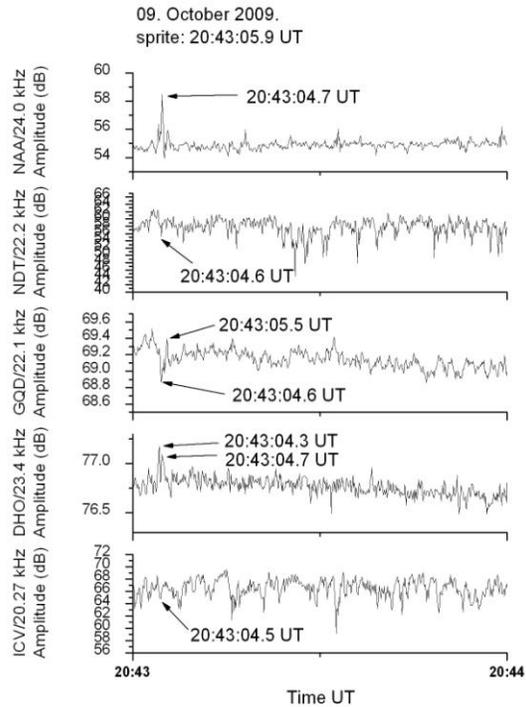


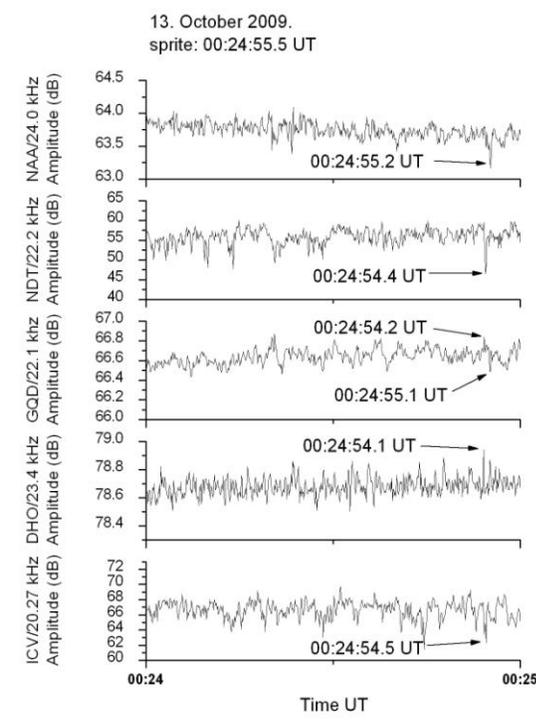
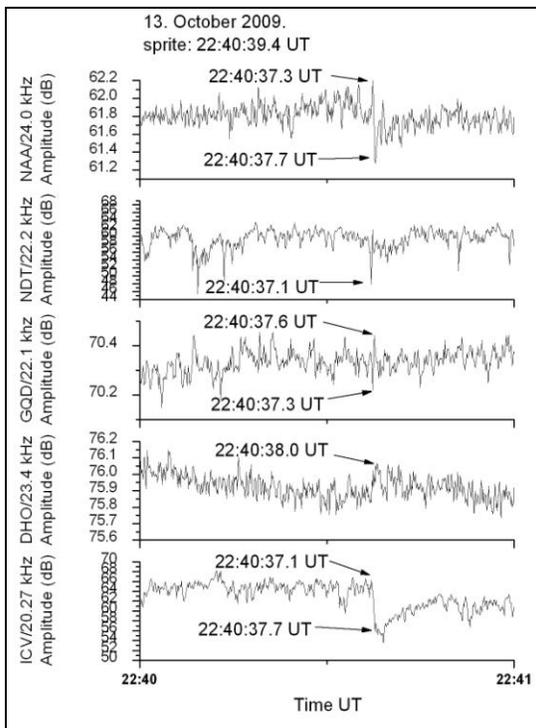
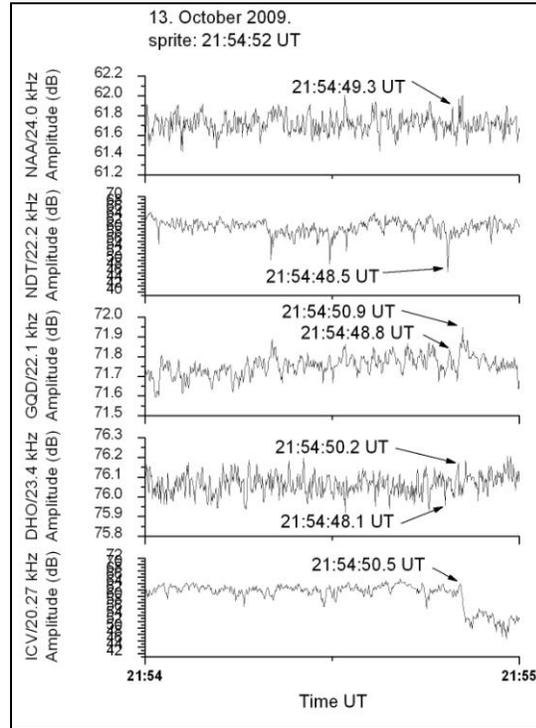
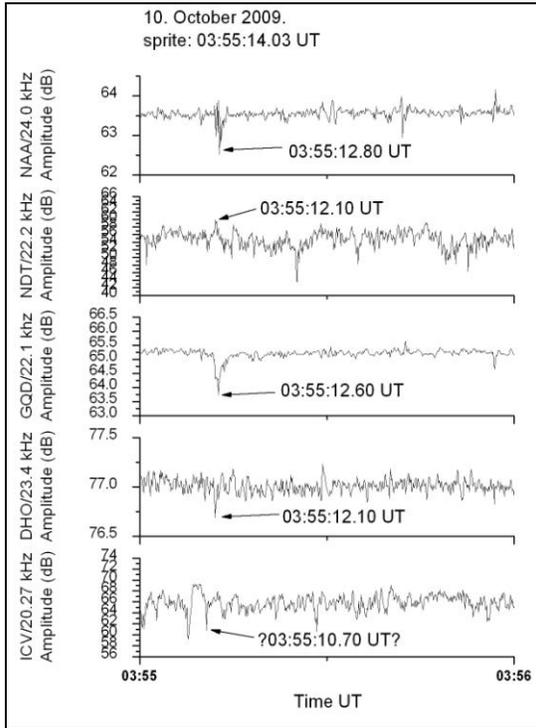
18. December 2008.
sprite: 00:19:20 UT

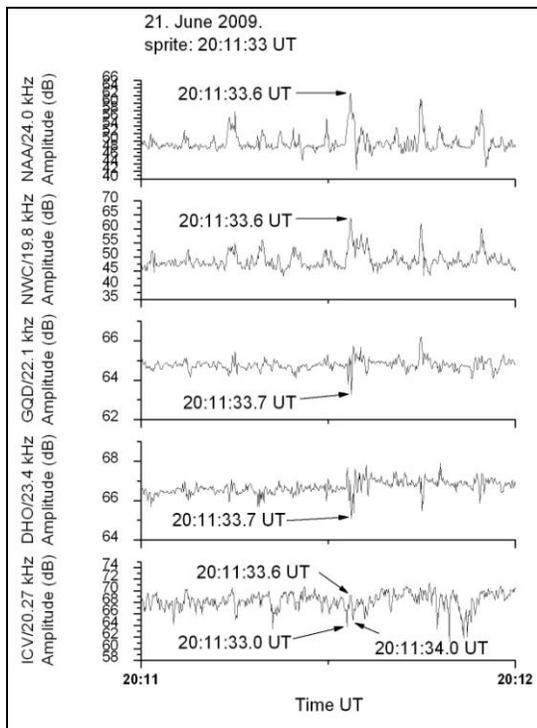
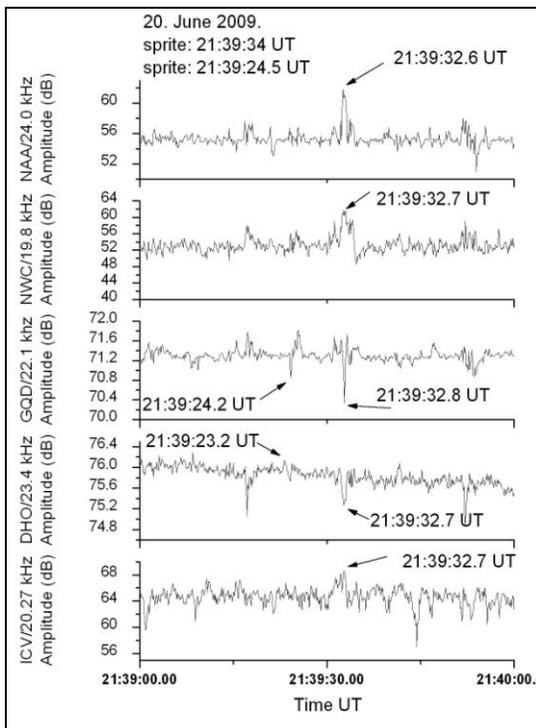
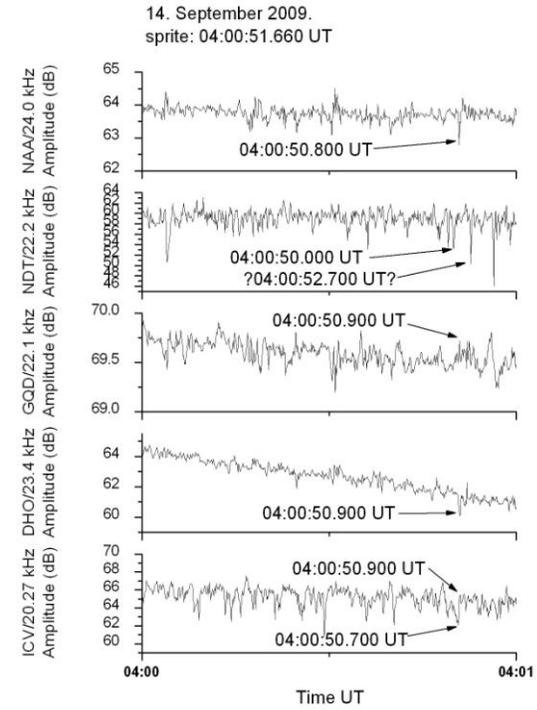
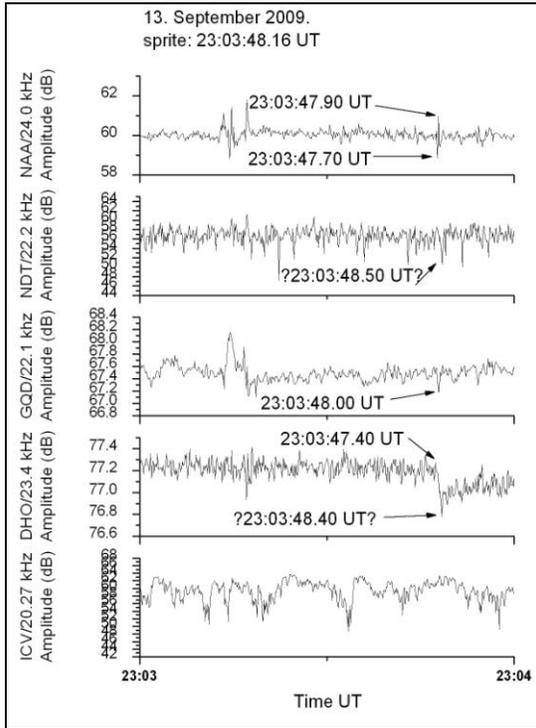


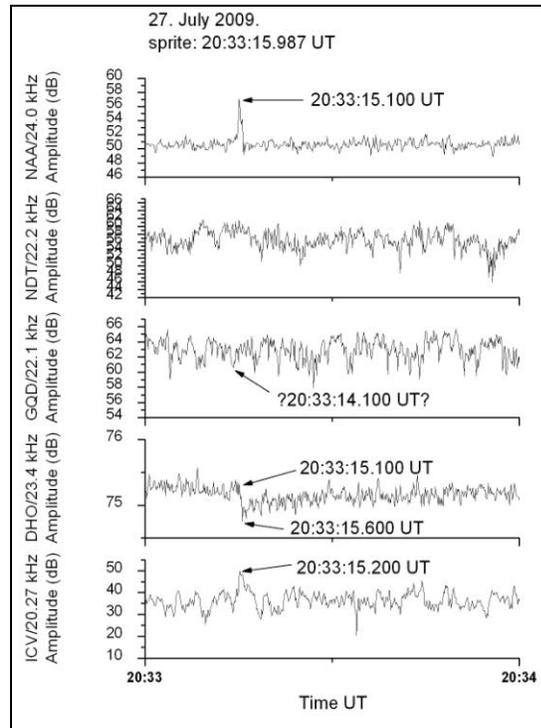
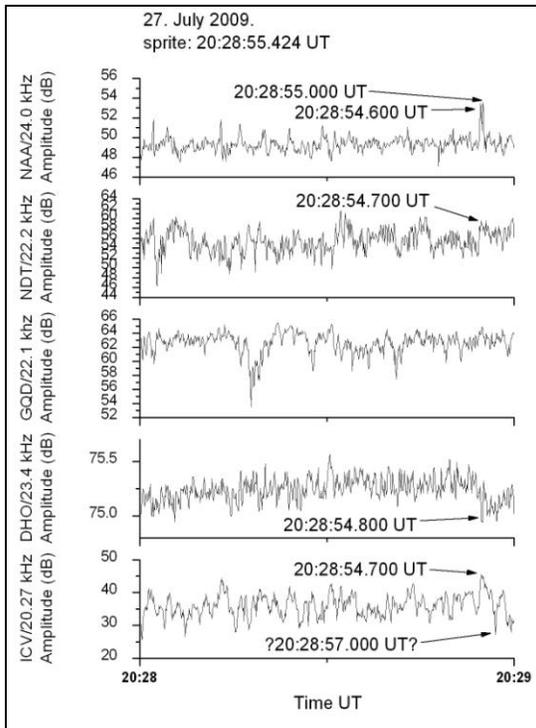
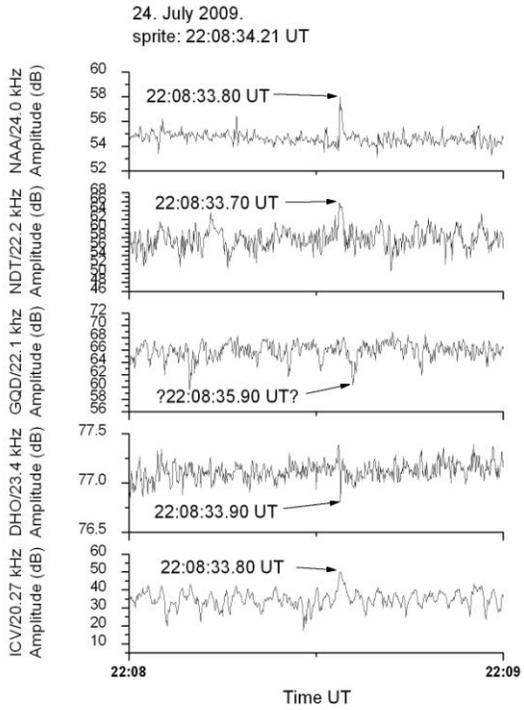
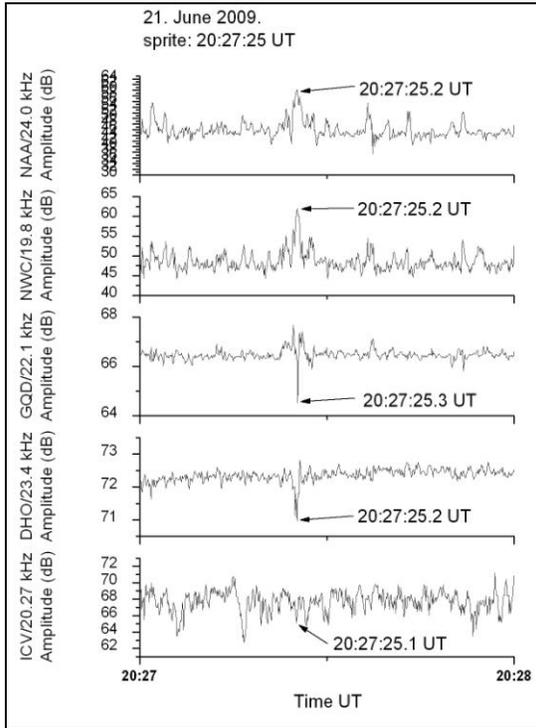
PRILOG 2B. Poremećaji na noćnim VLF signalima snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2009. godine izabrani su za dalju analizu; obeležena su vremena maksimalnog poremećaja signala.

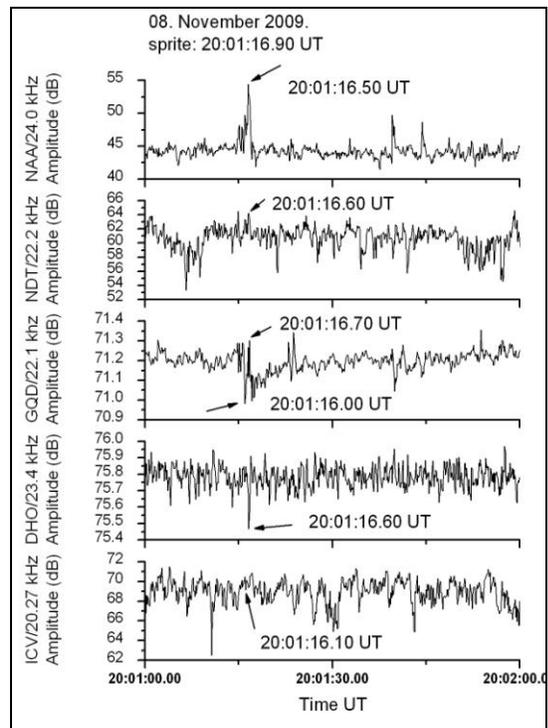
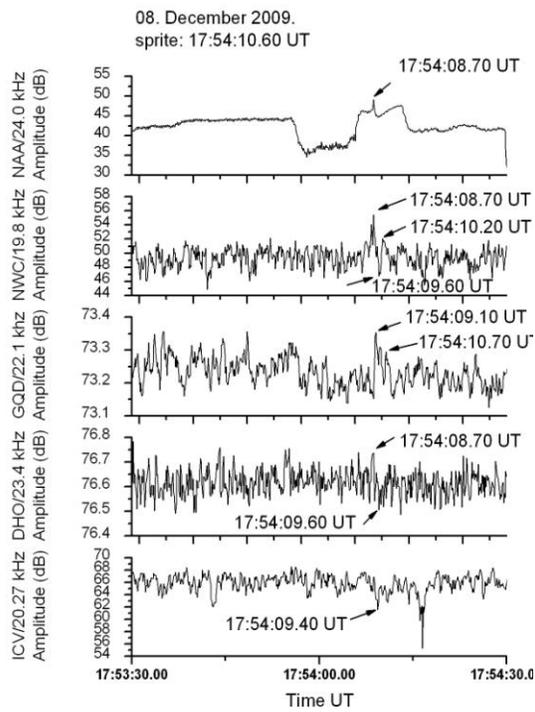
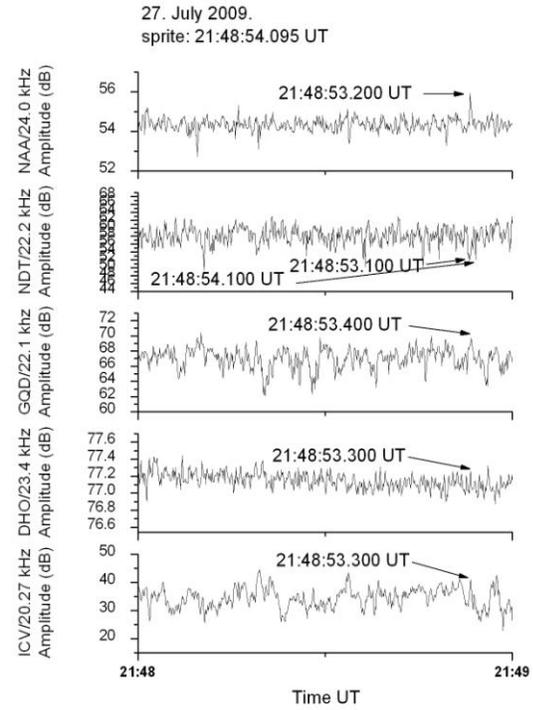
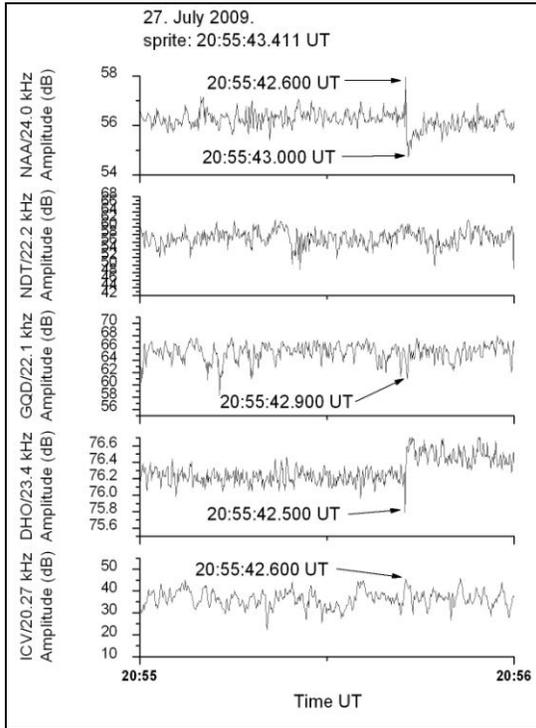


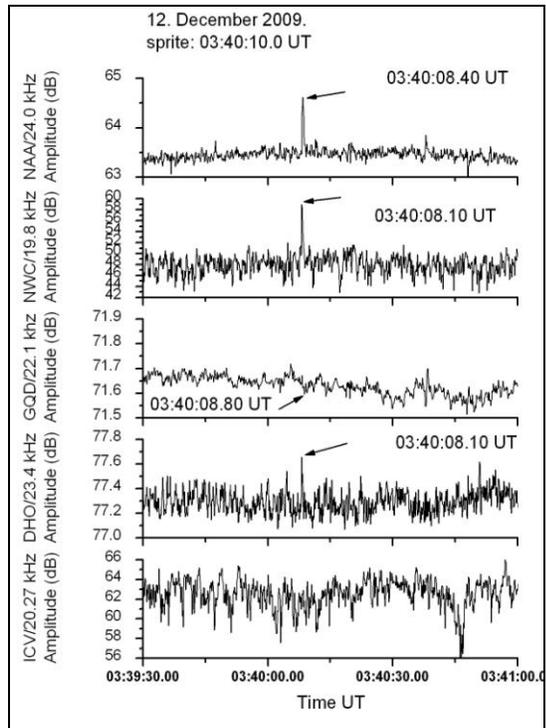
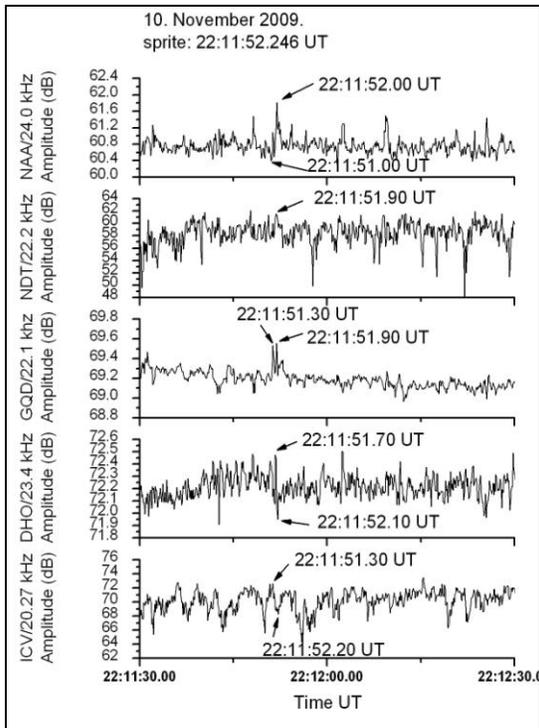
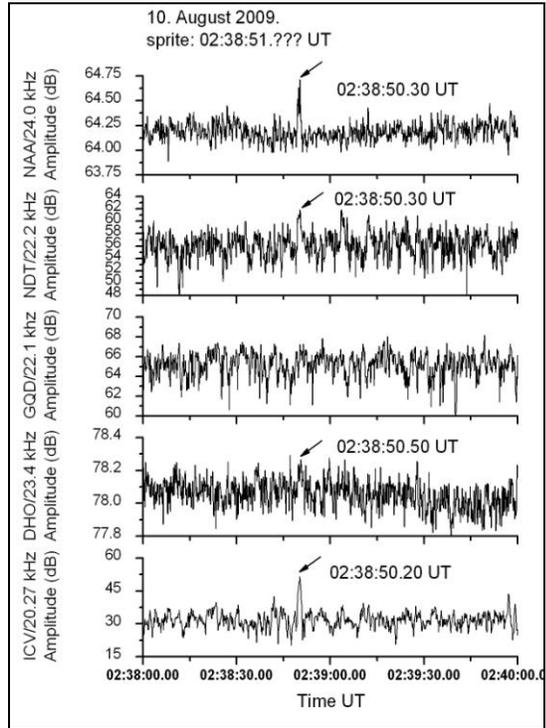
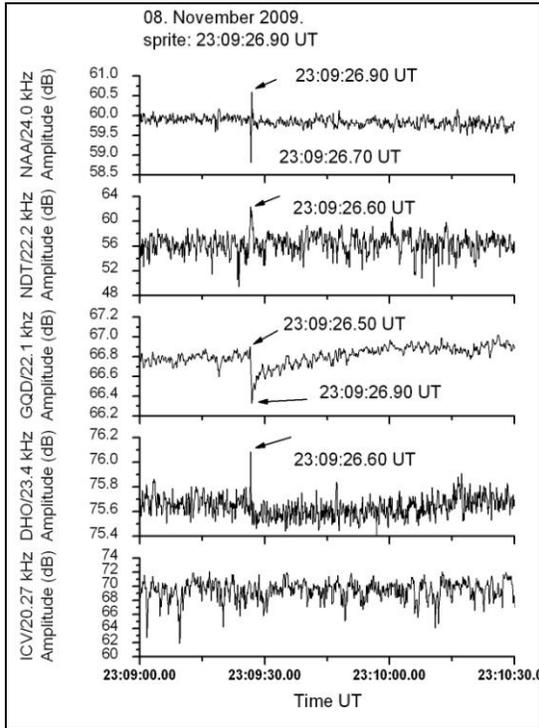


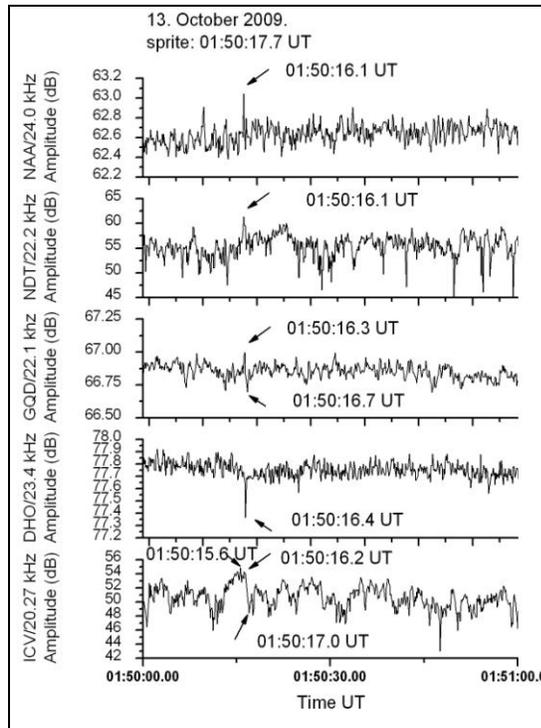
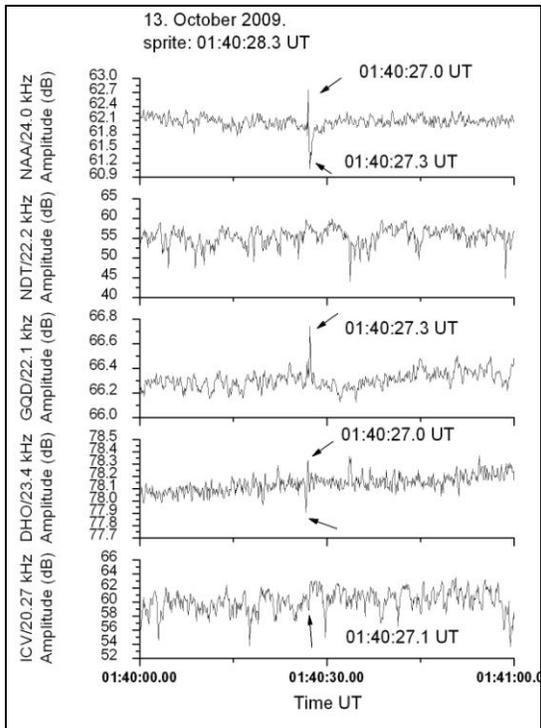
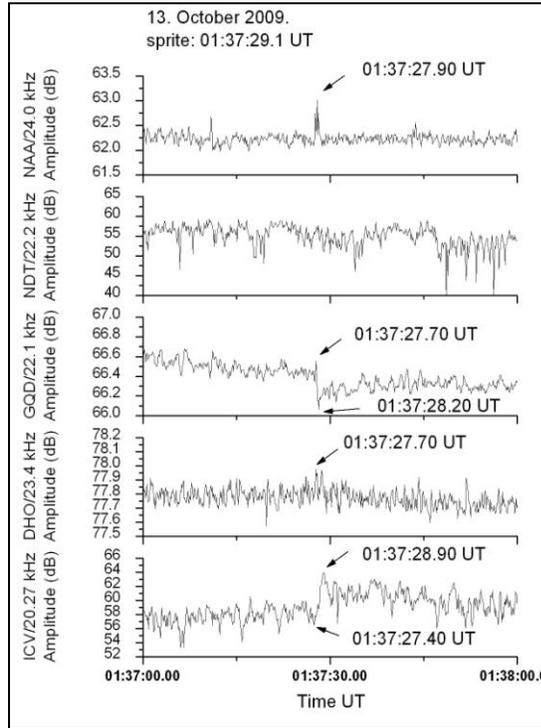
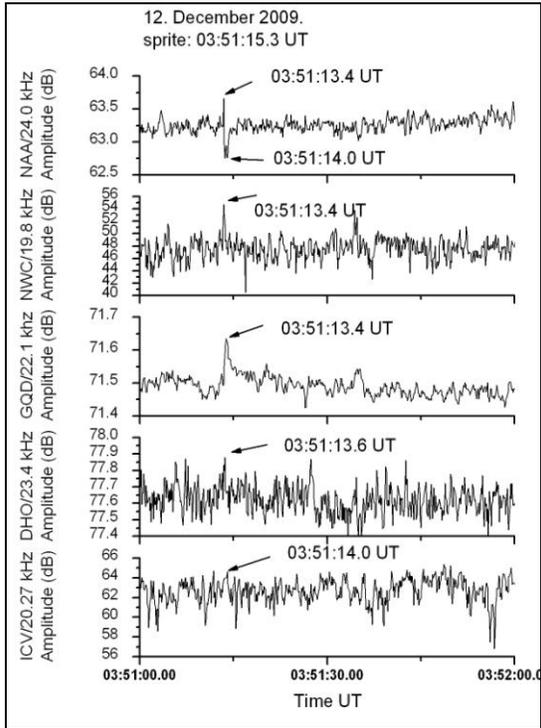


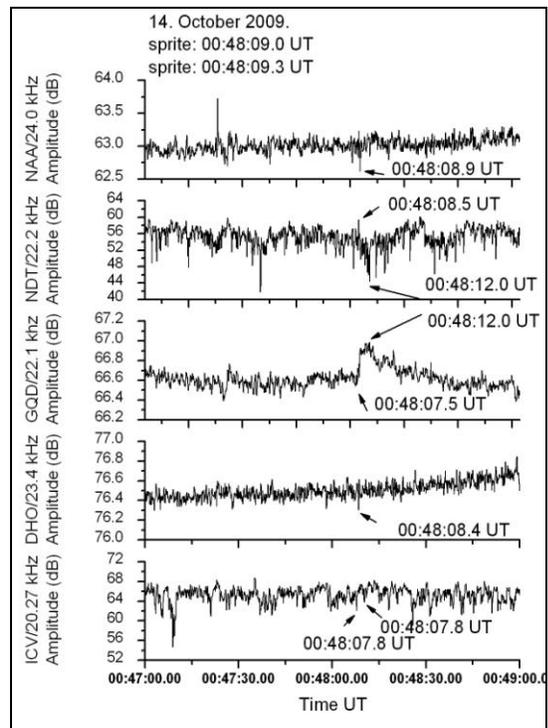
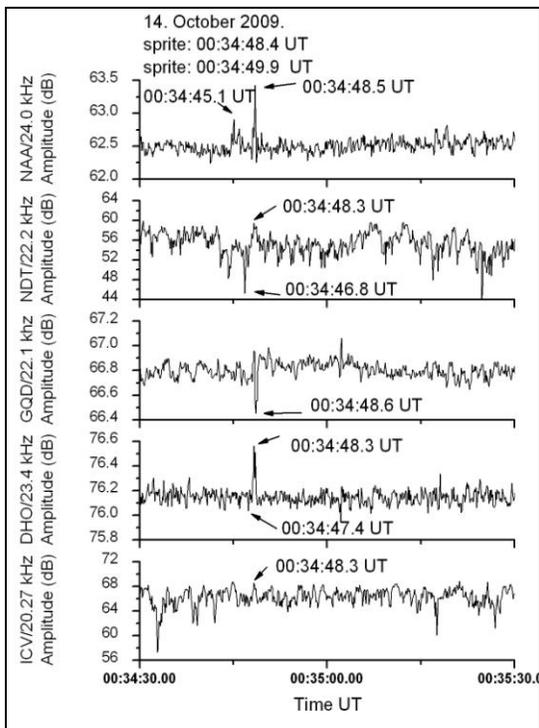
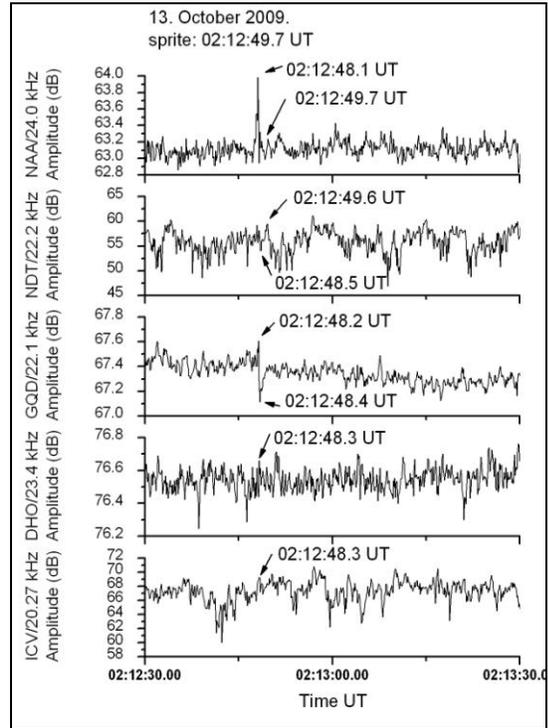
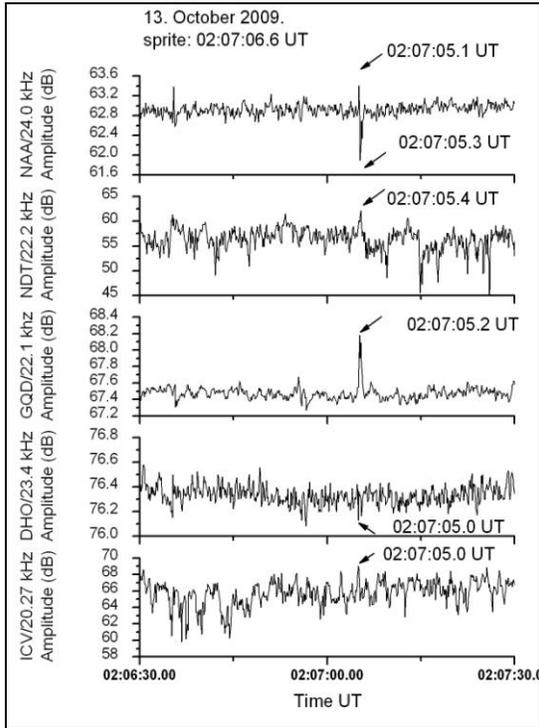


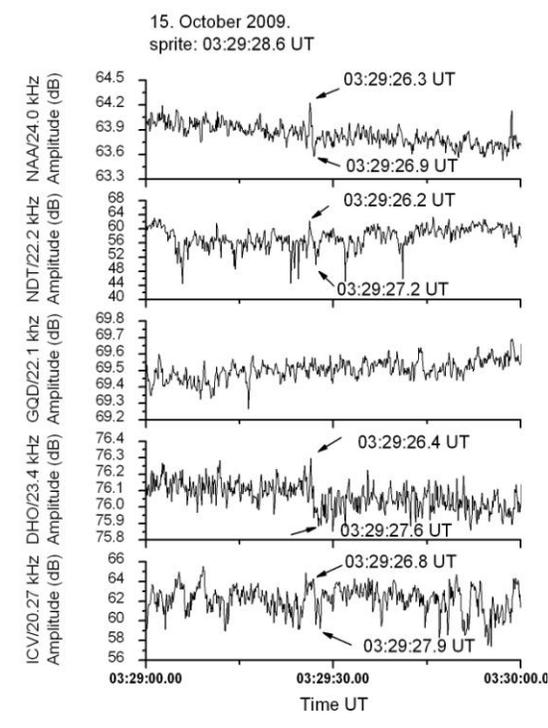
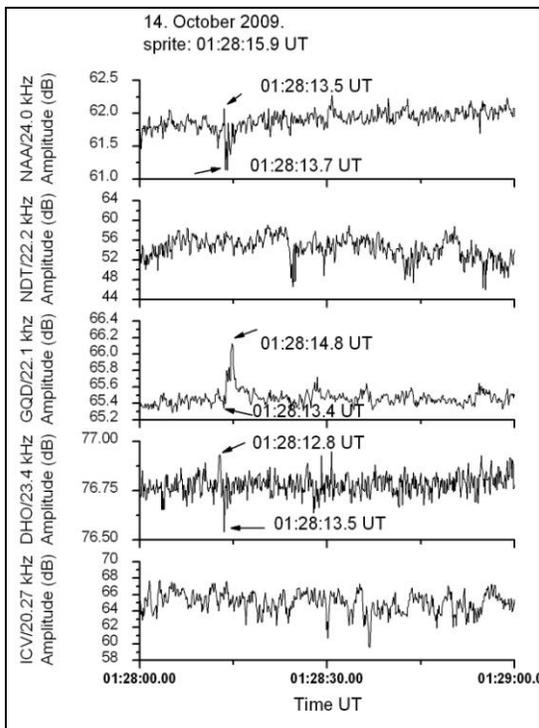
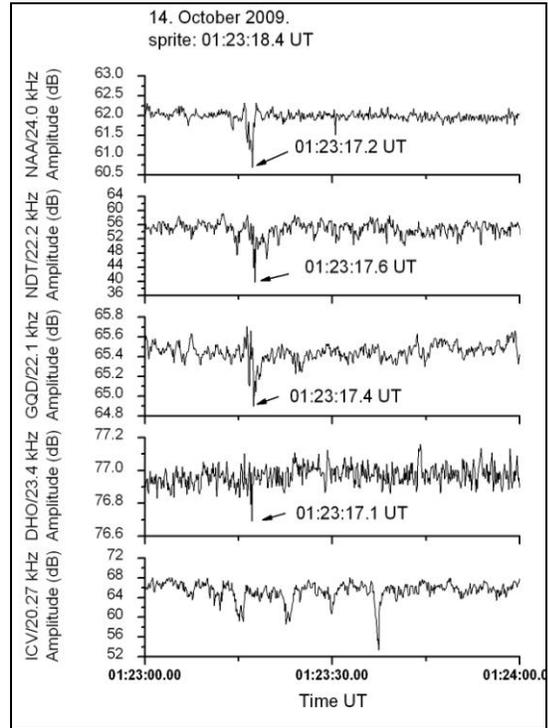
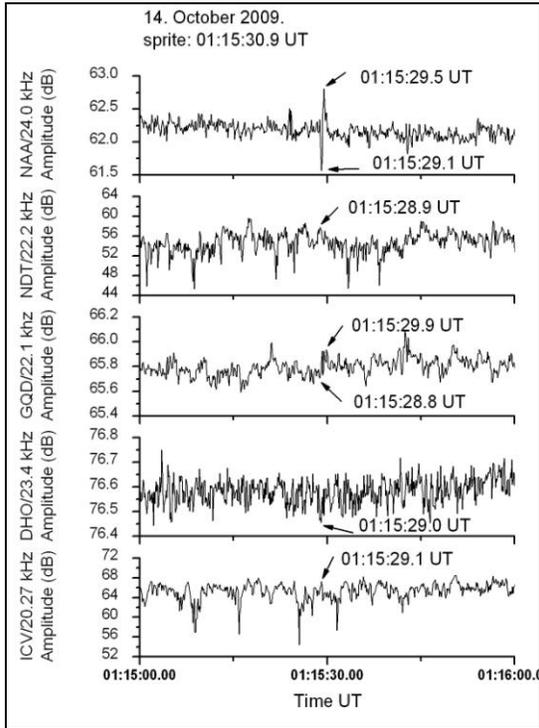


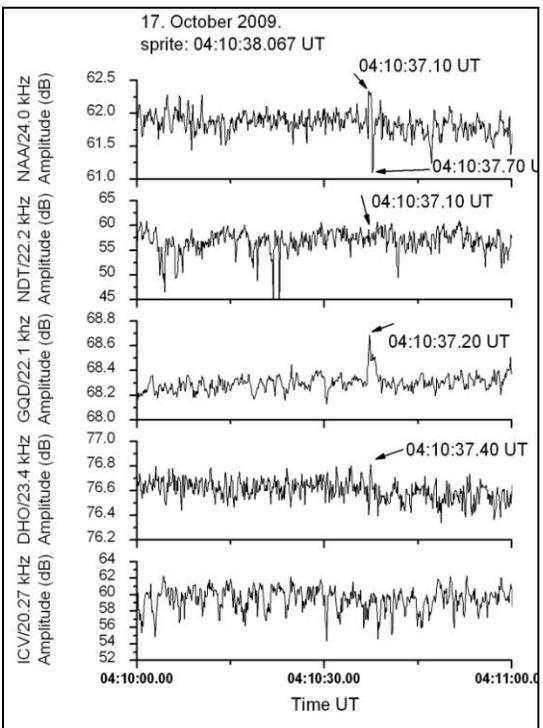
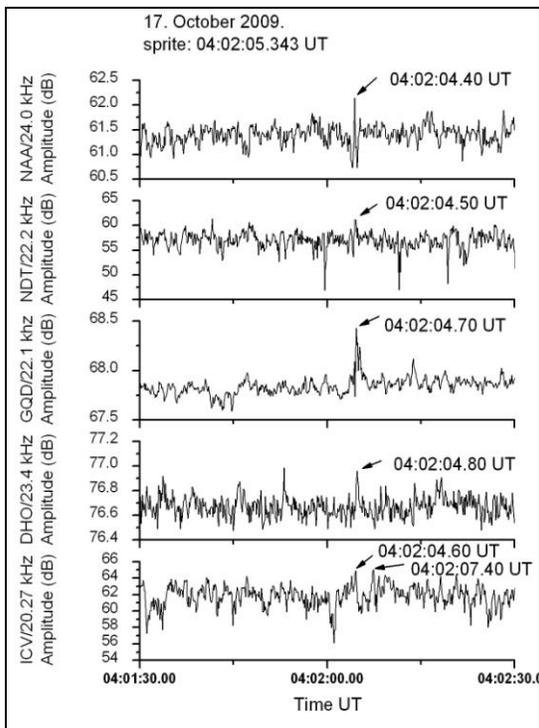
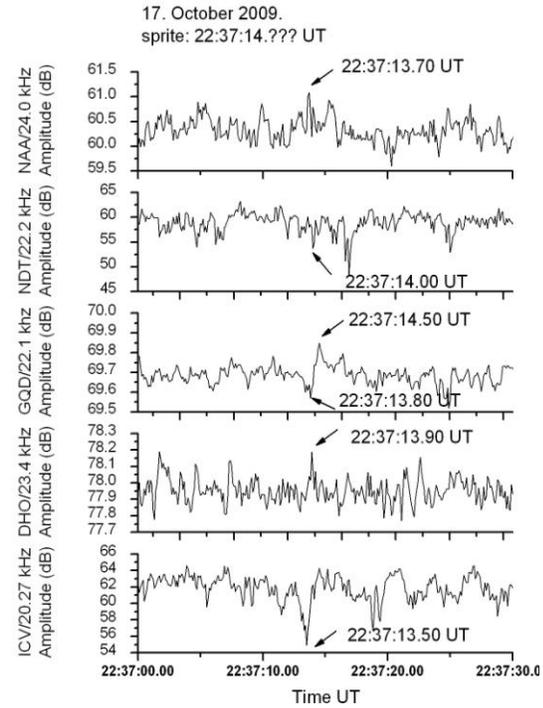
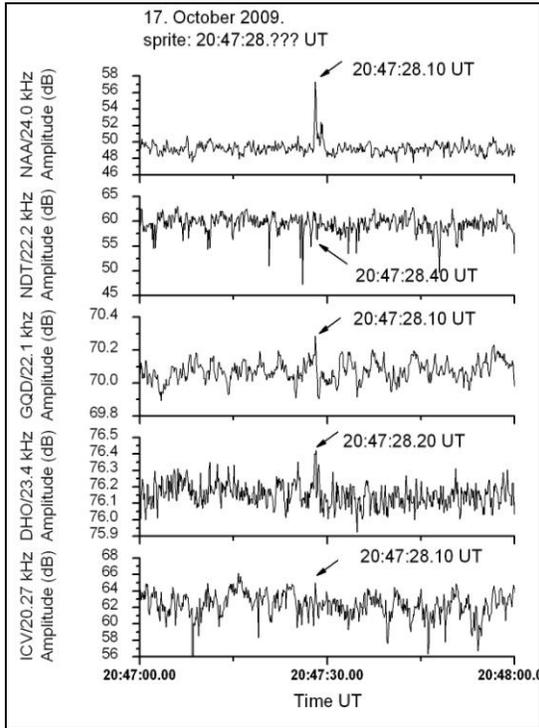


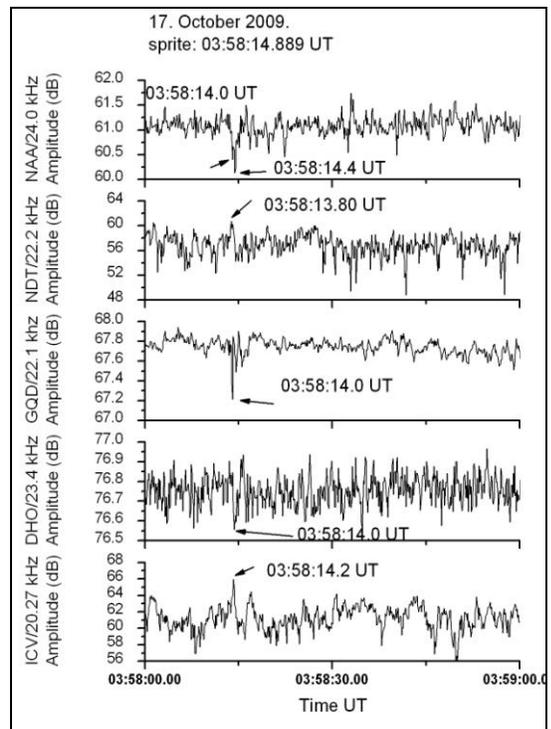
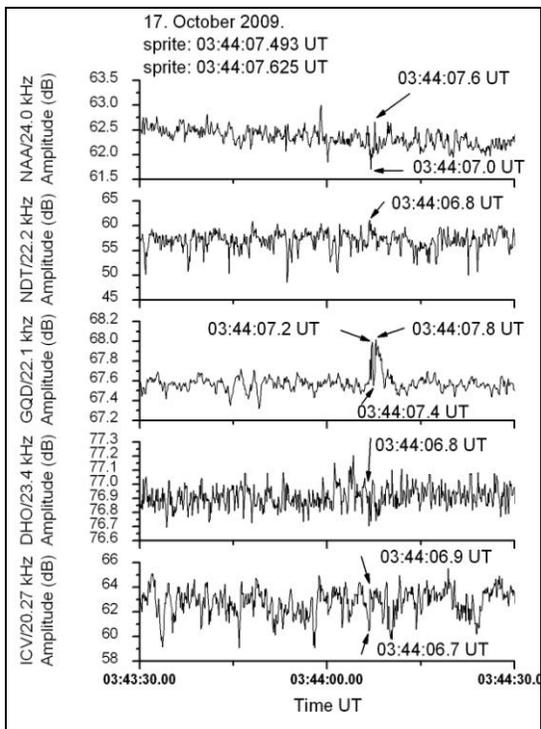
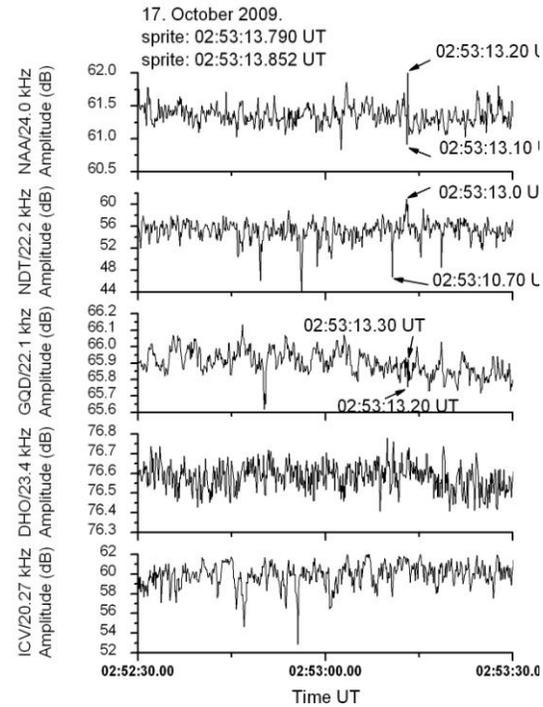
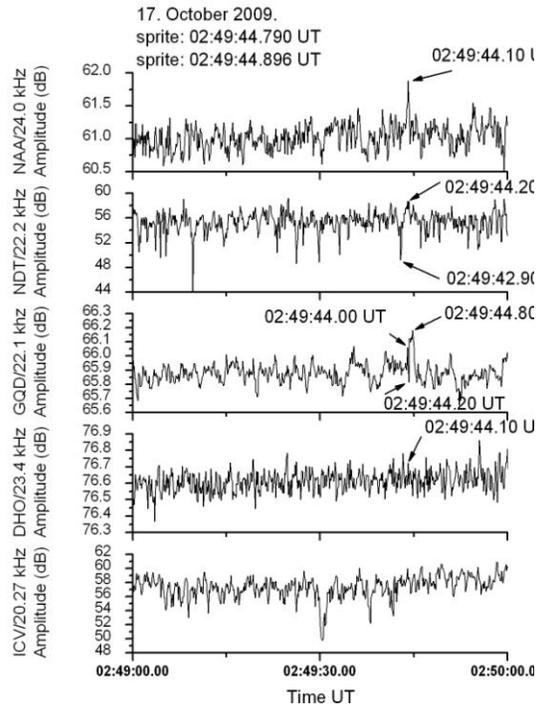


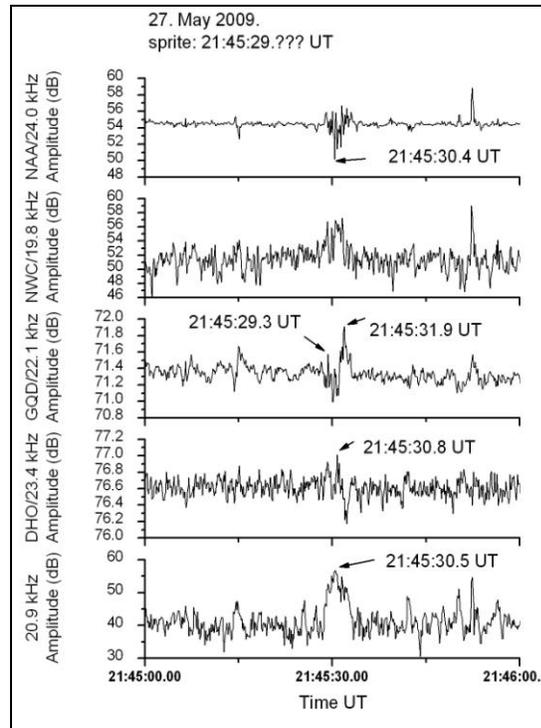
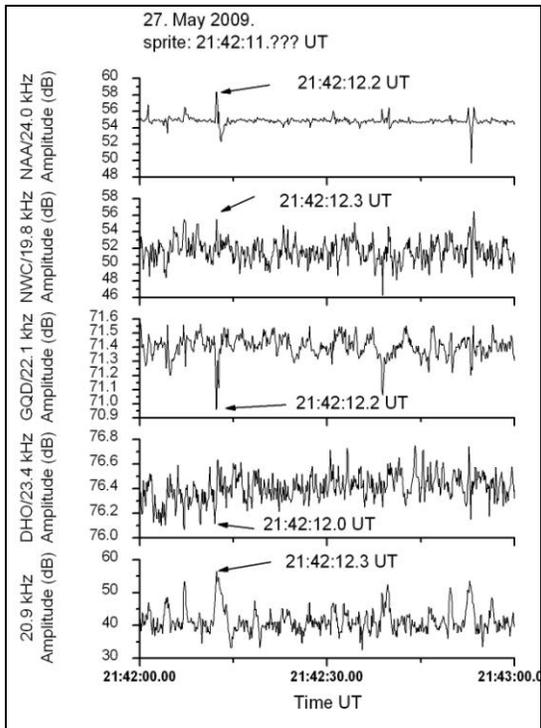
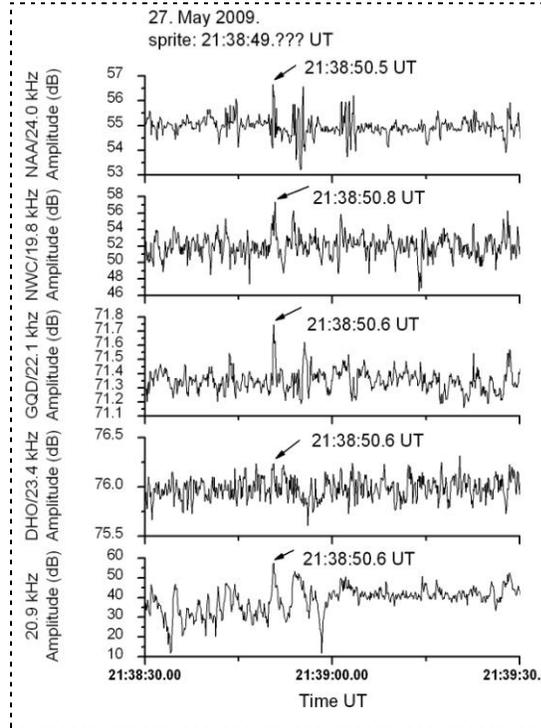
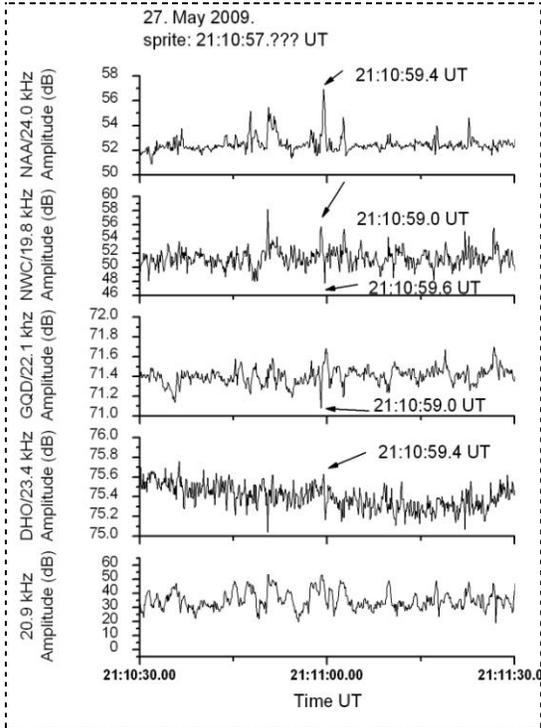


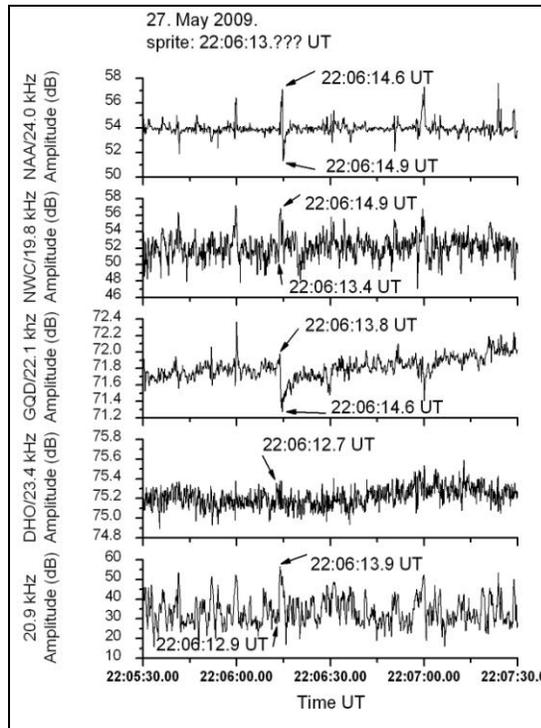
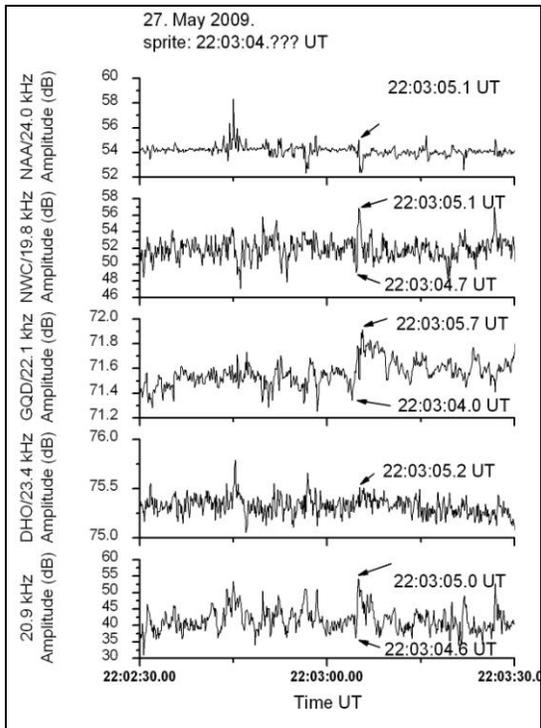
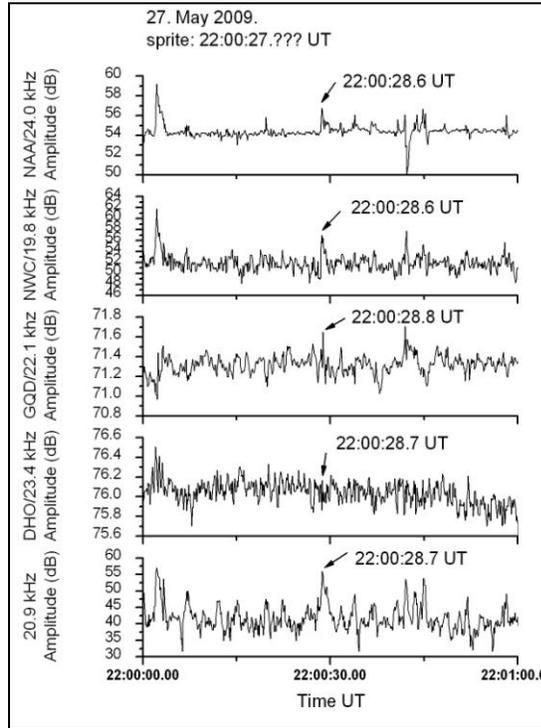
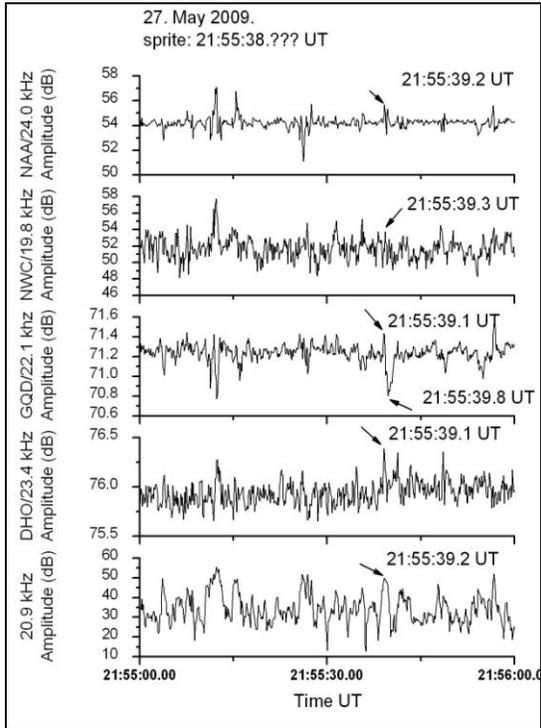


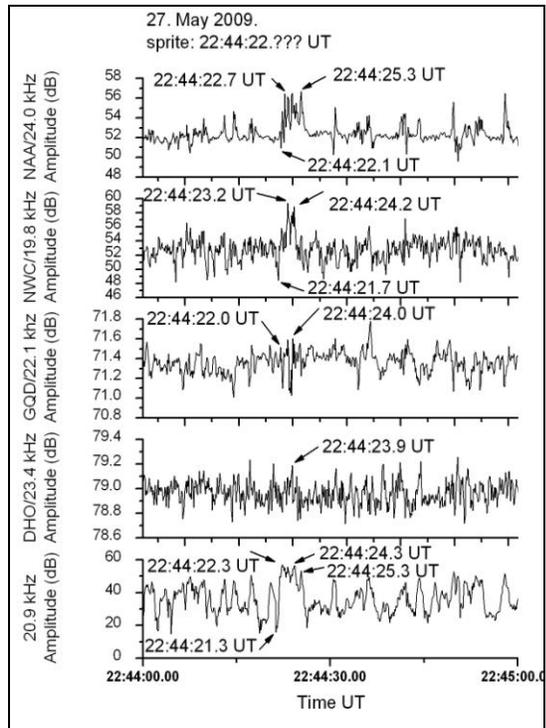
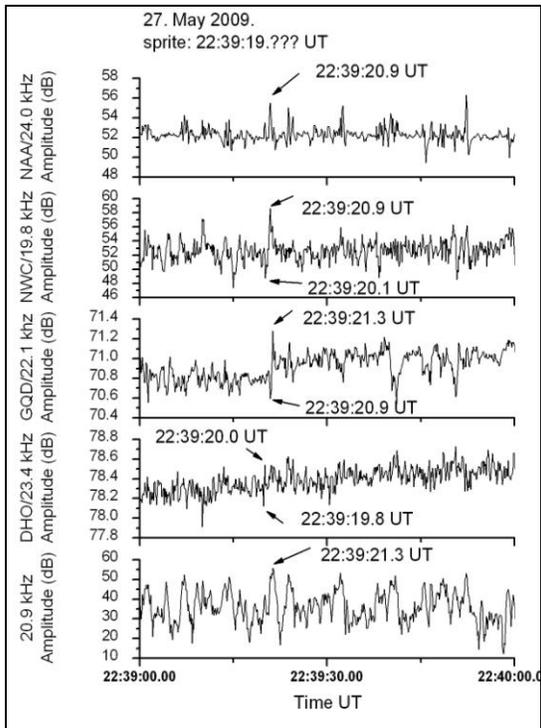
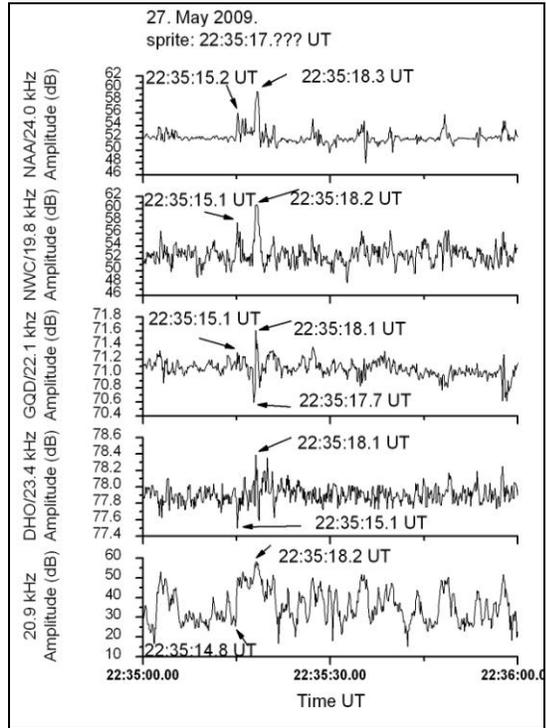
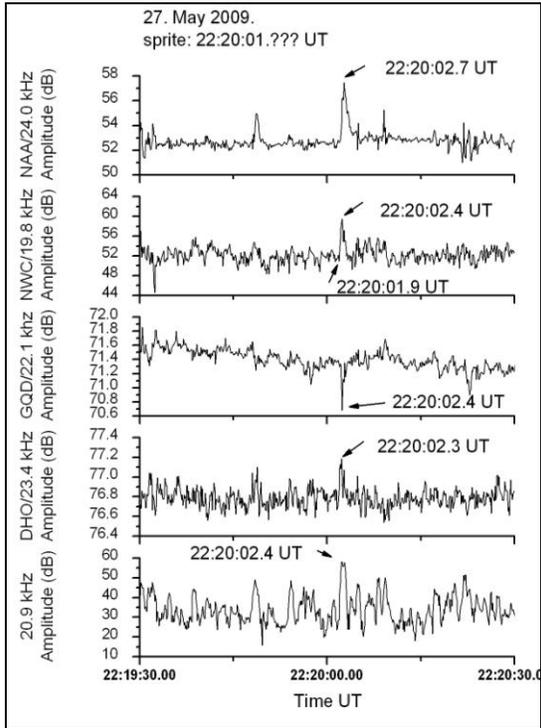


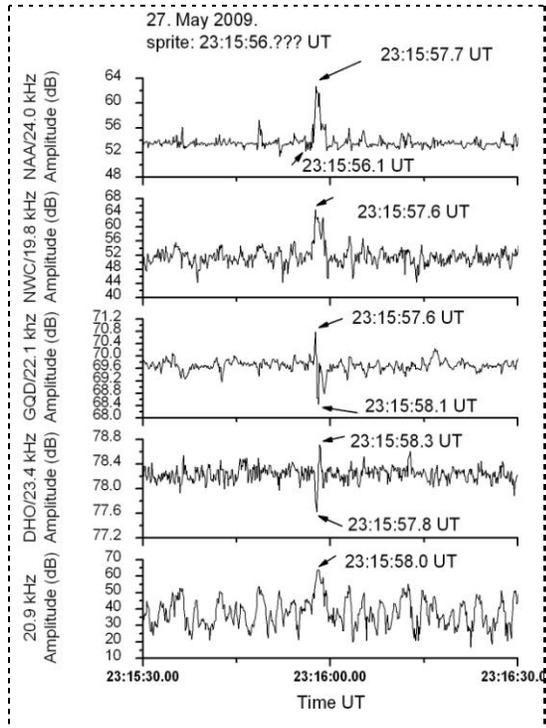
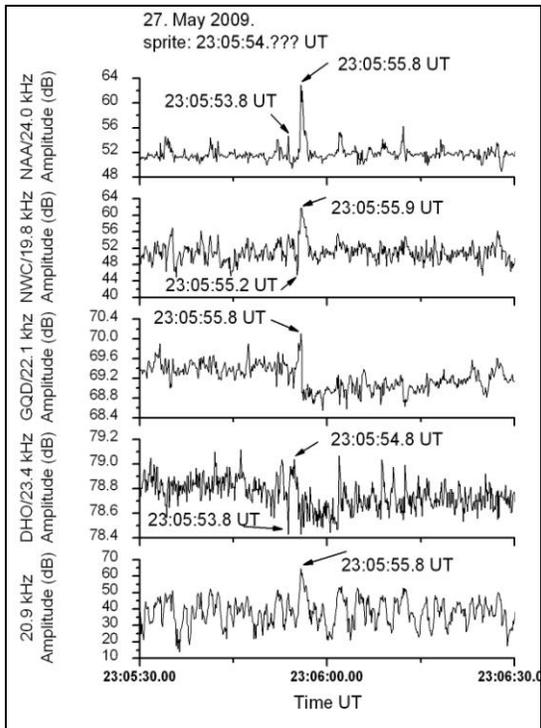
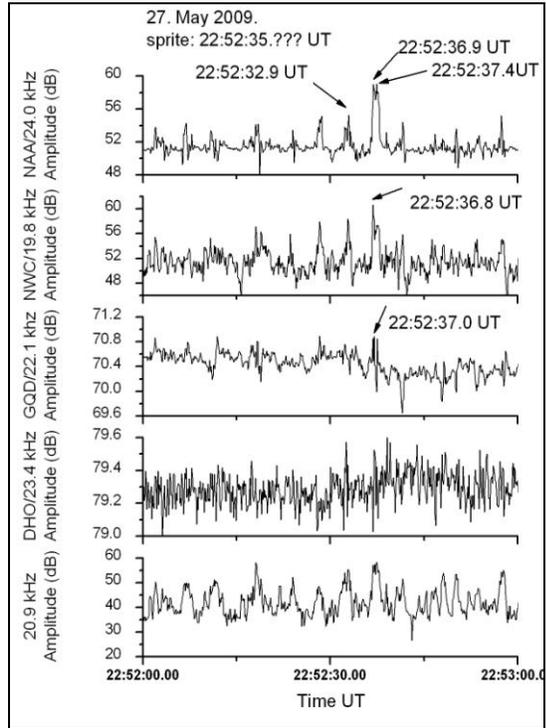
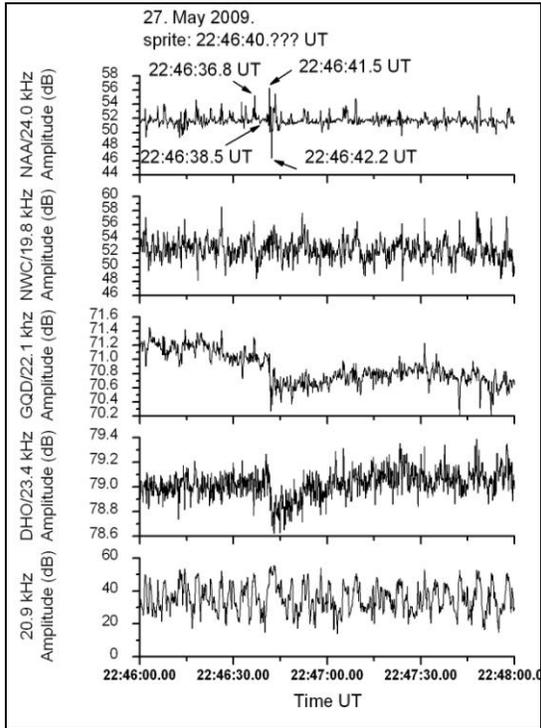


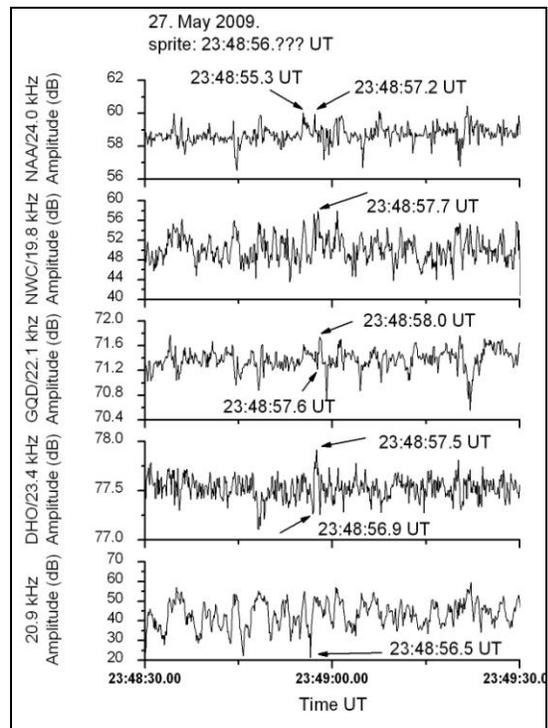
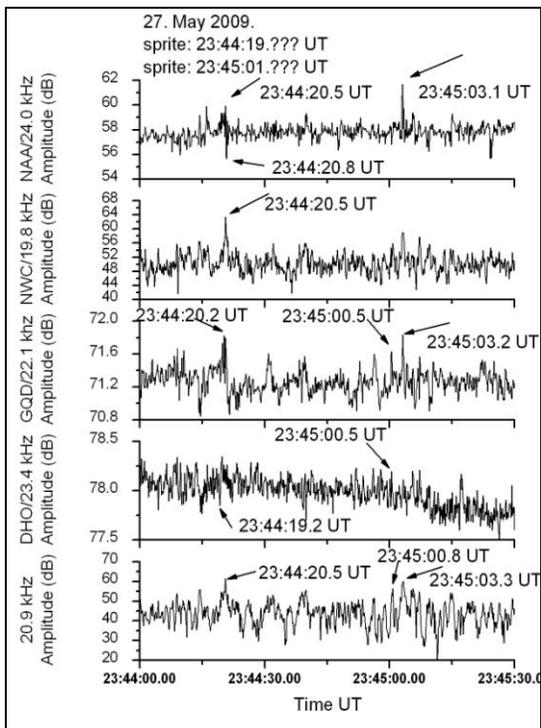
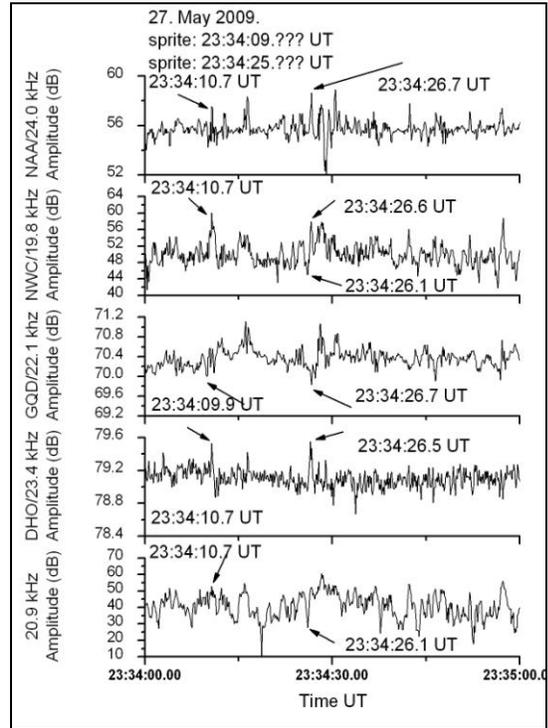
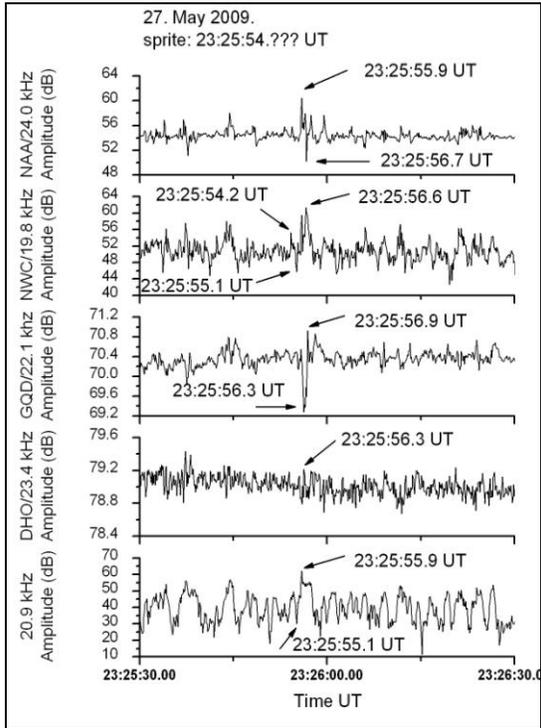


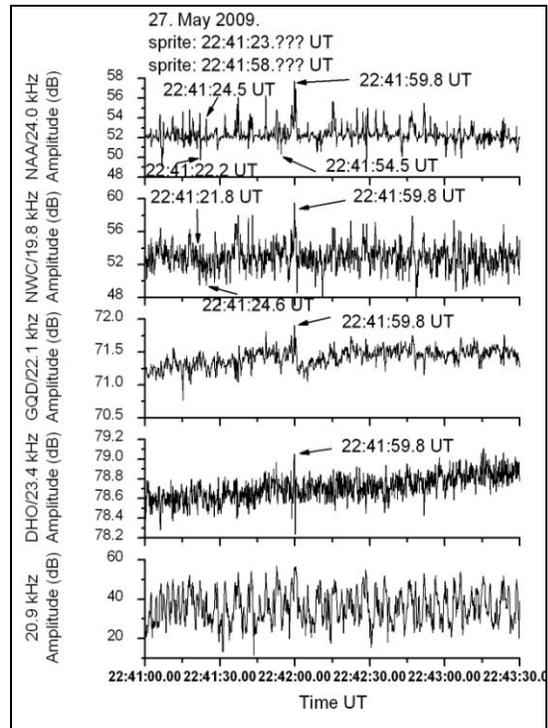
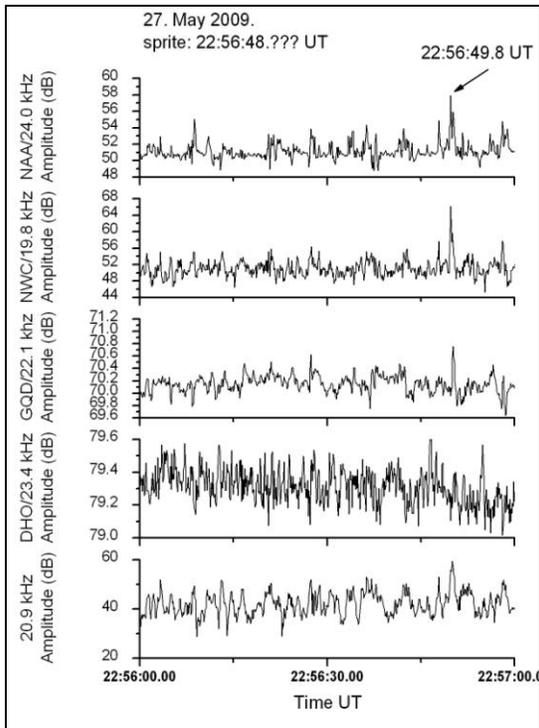
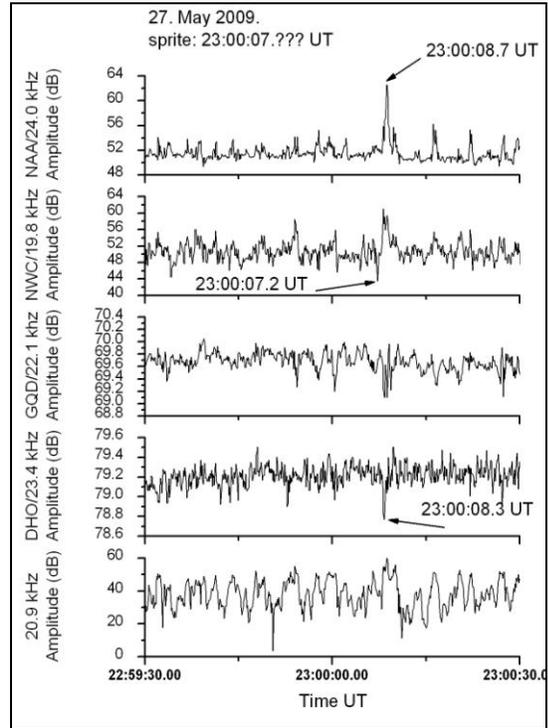
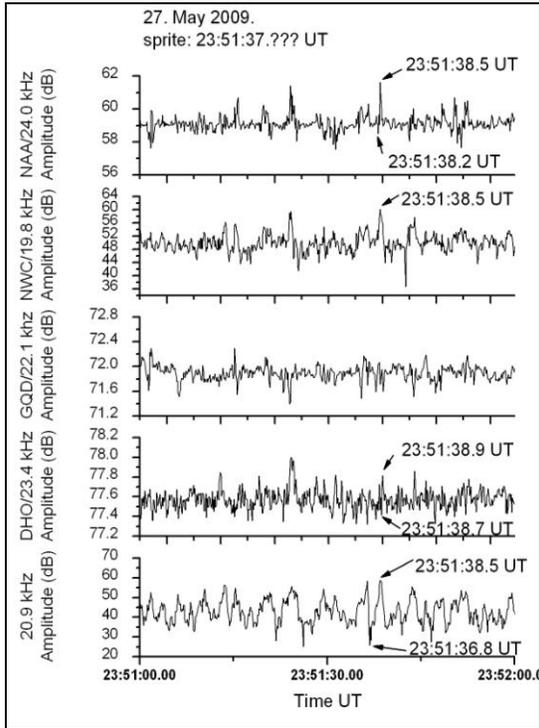


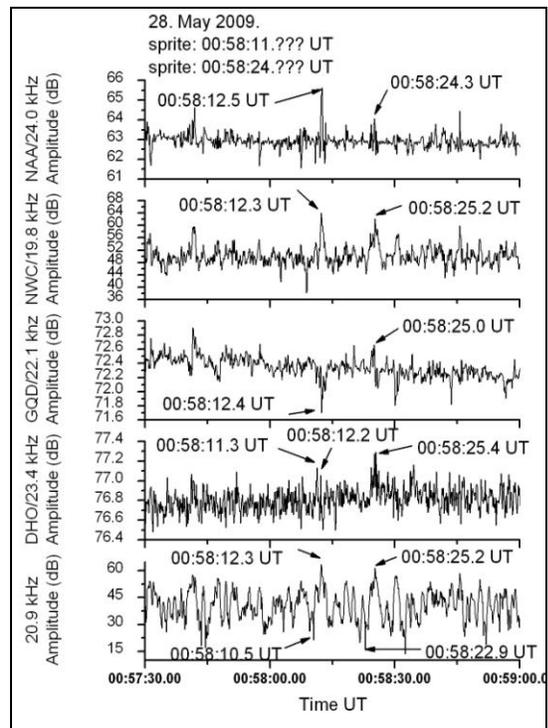
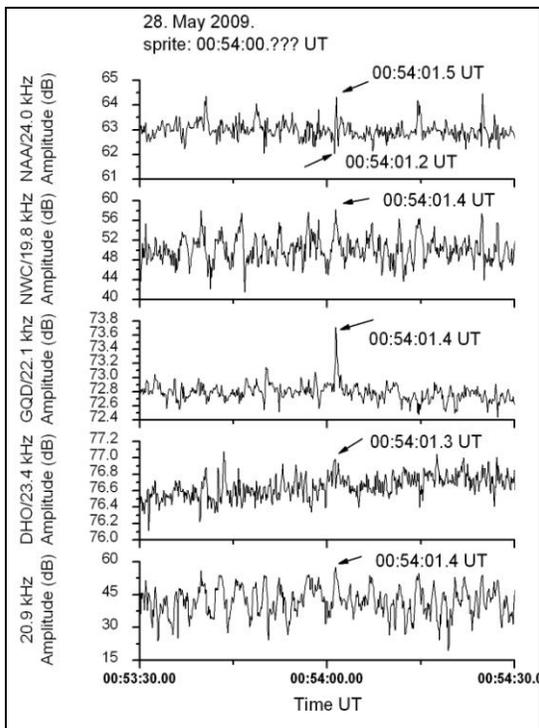
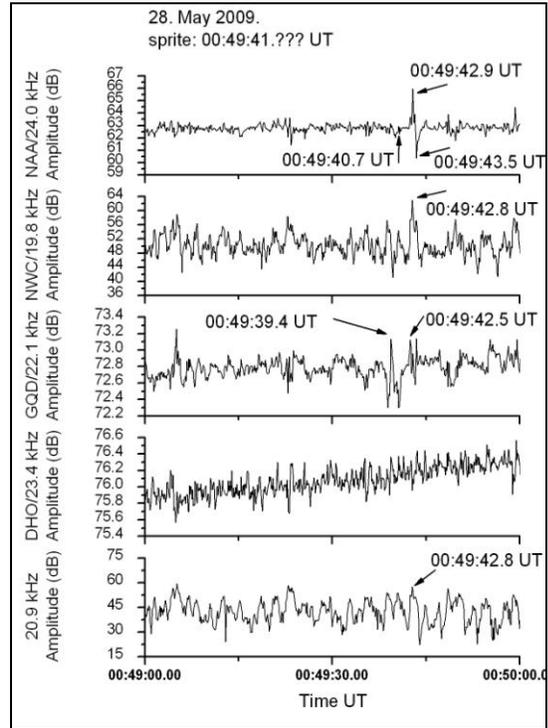
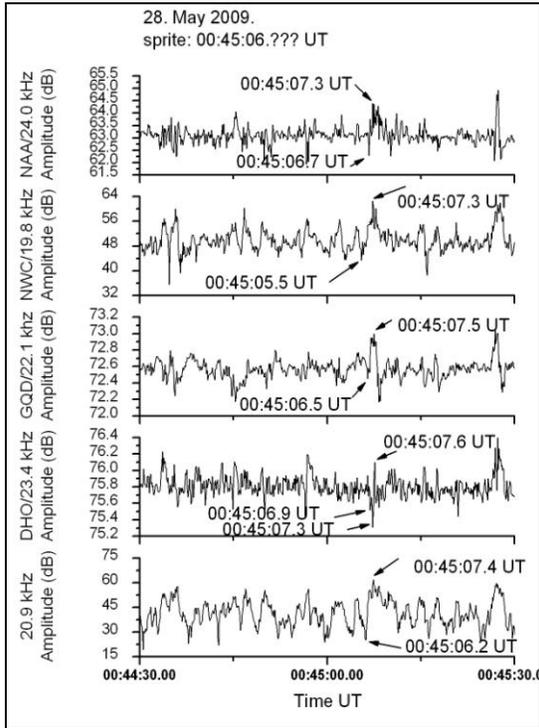


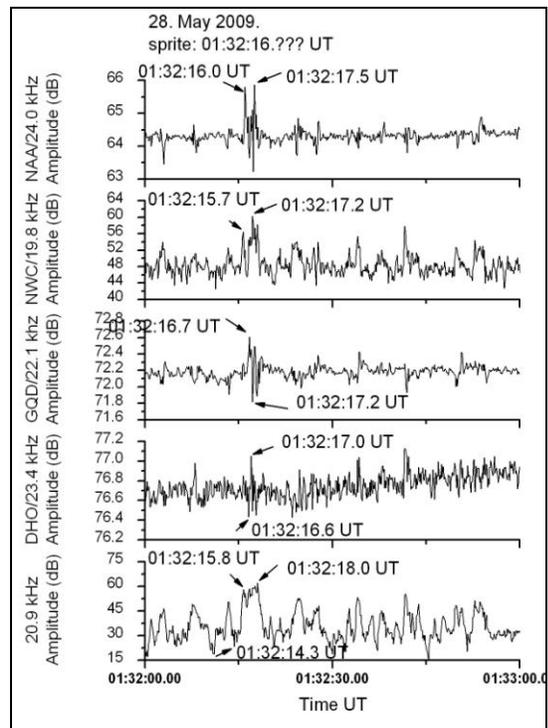
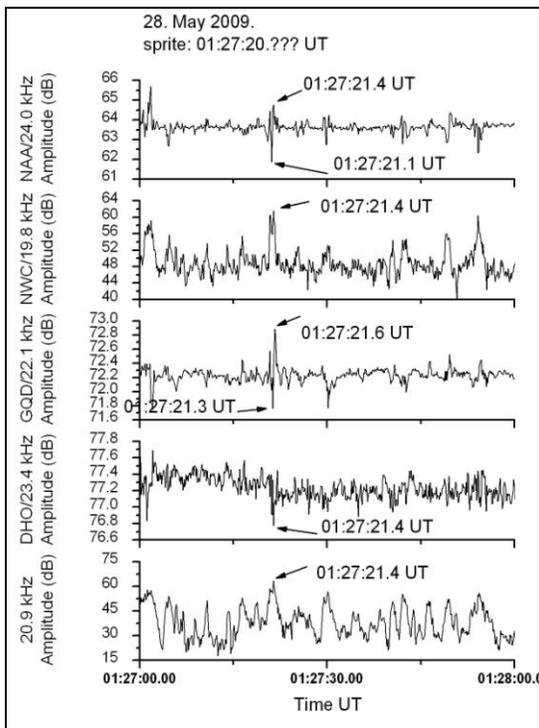
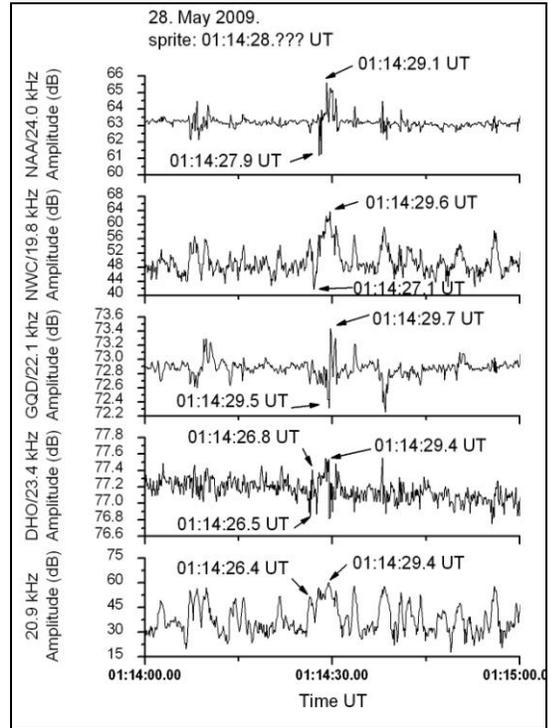
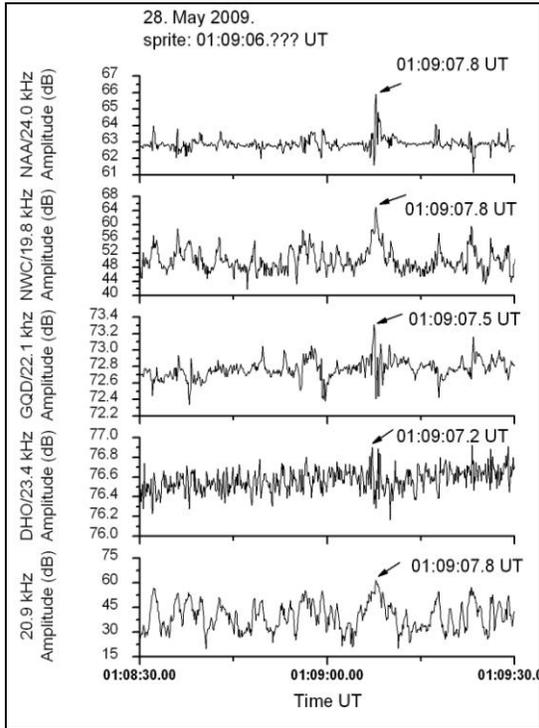


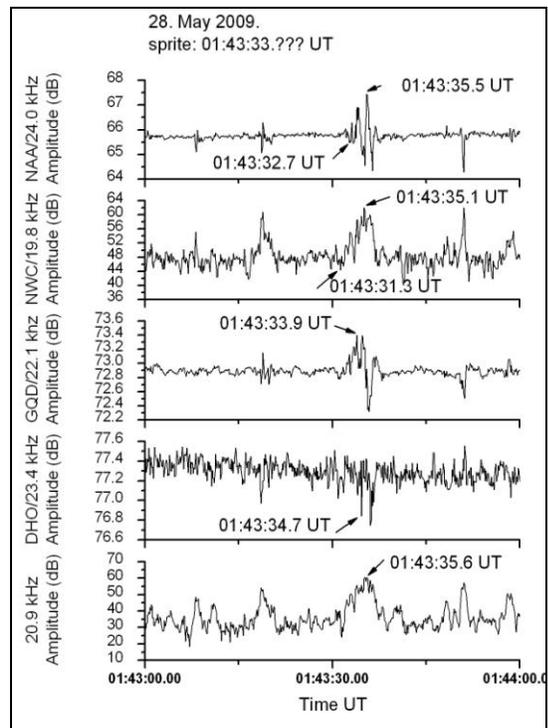
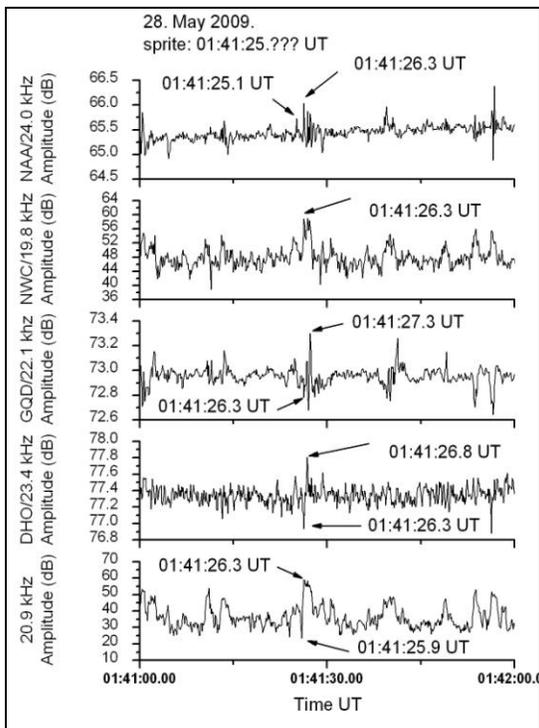
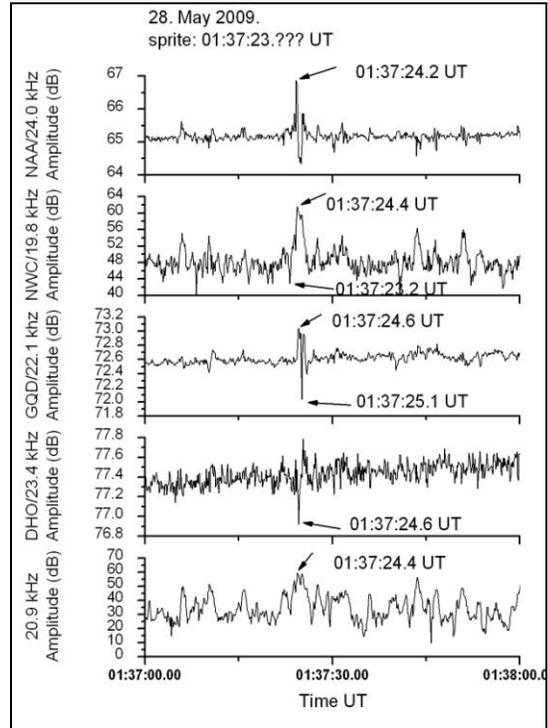
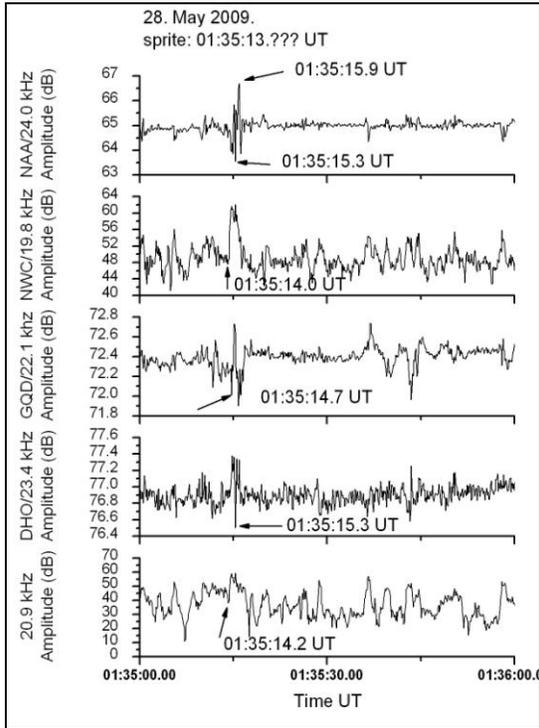


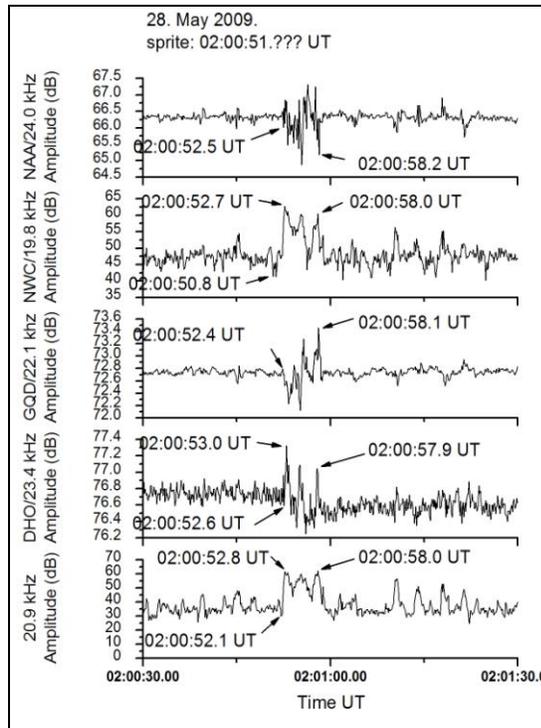
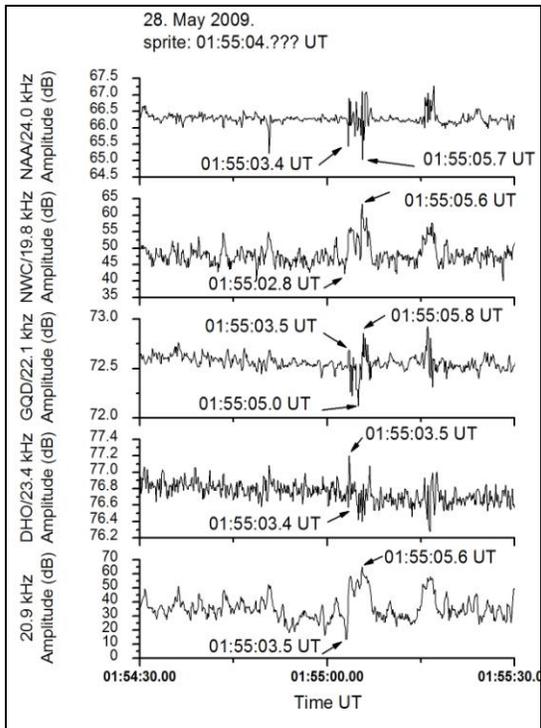
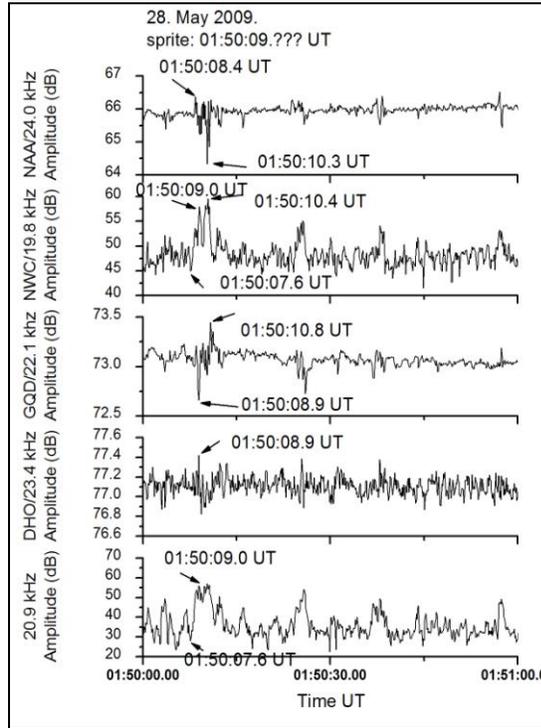
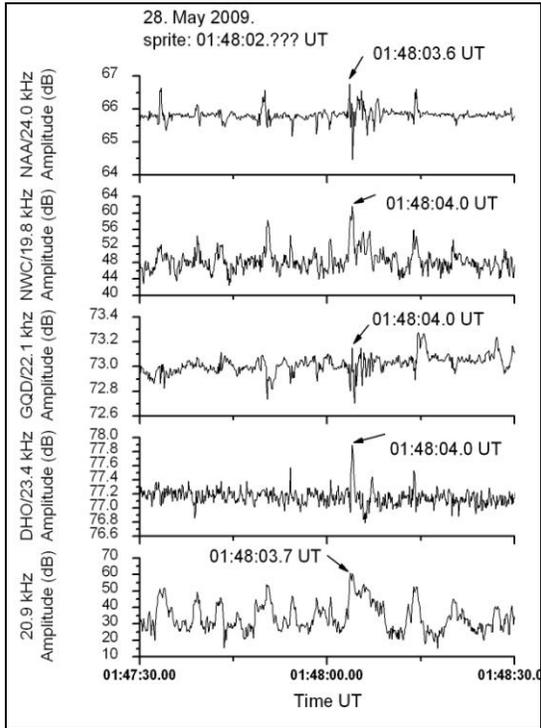


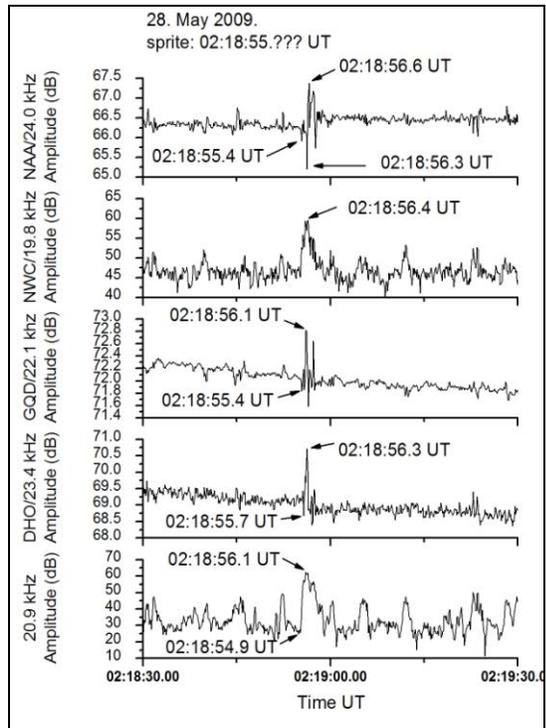
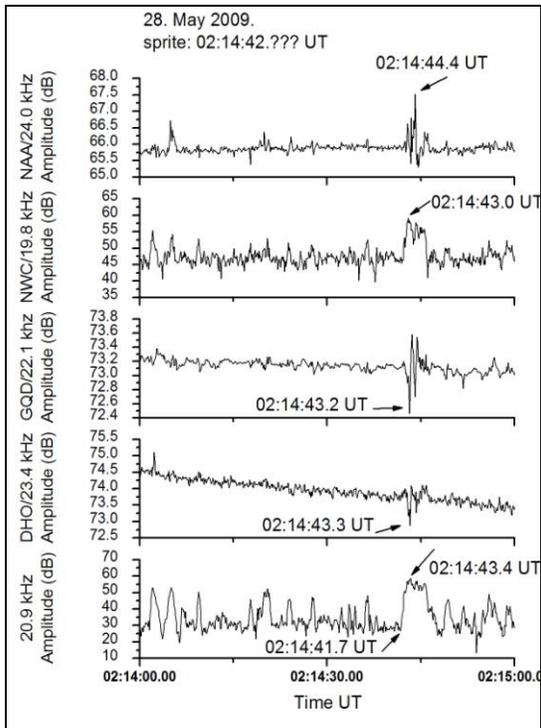
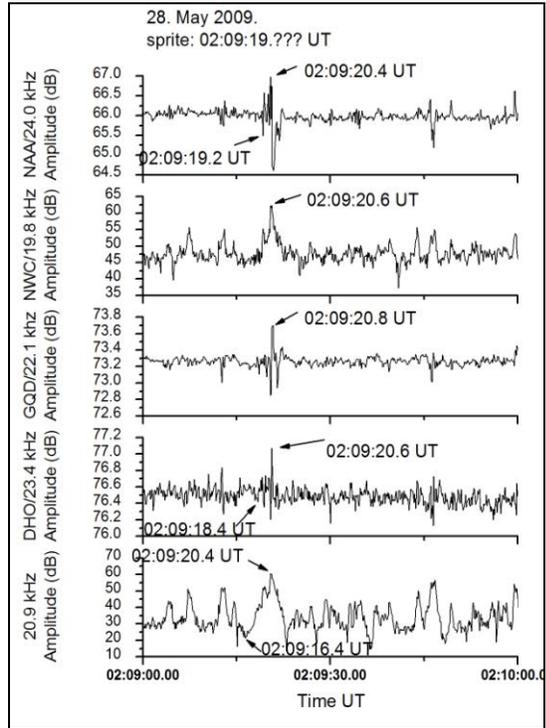
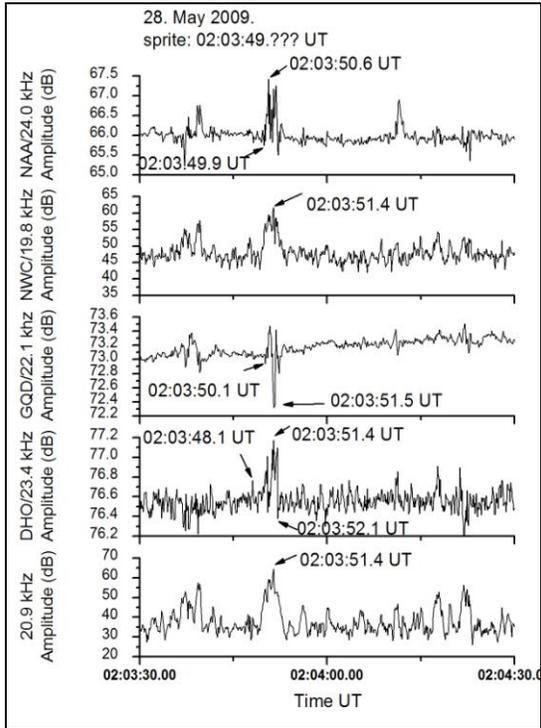


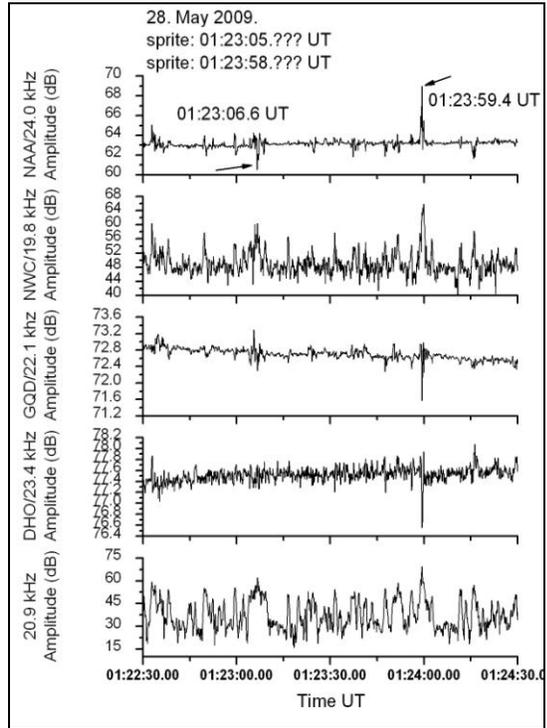
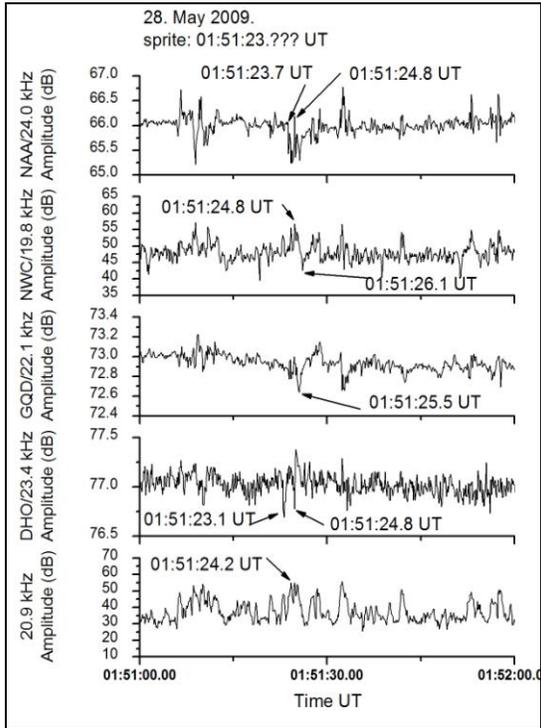




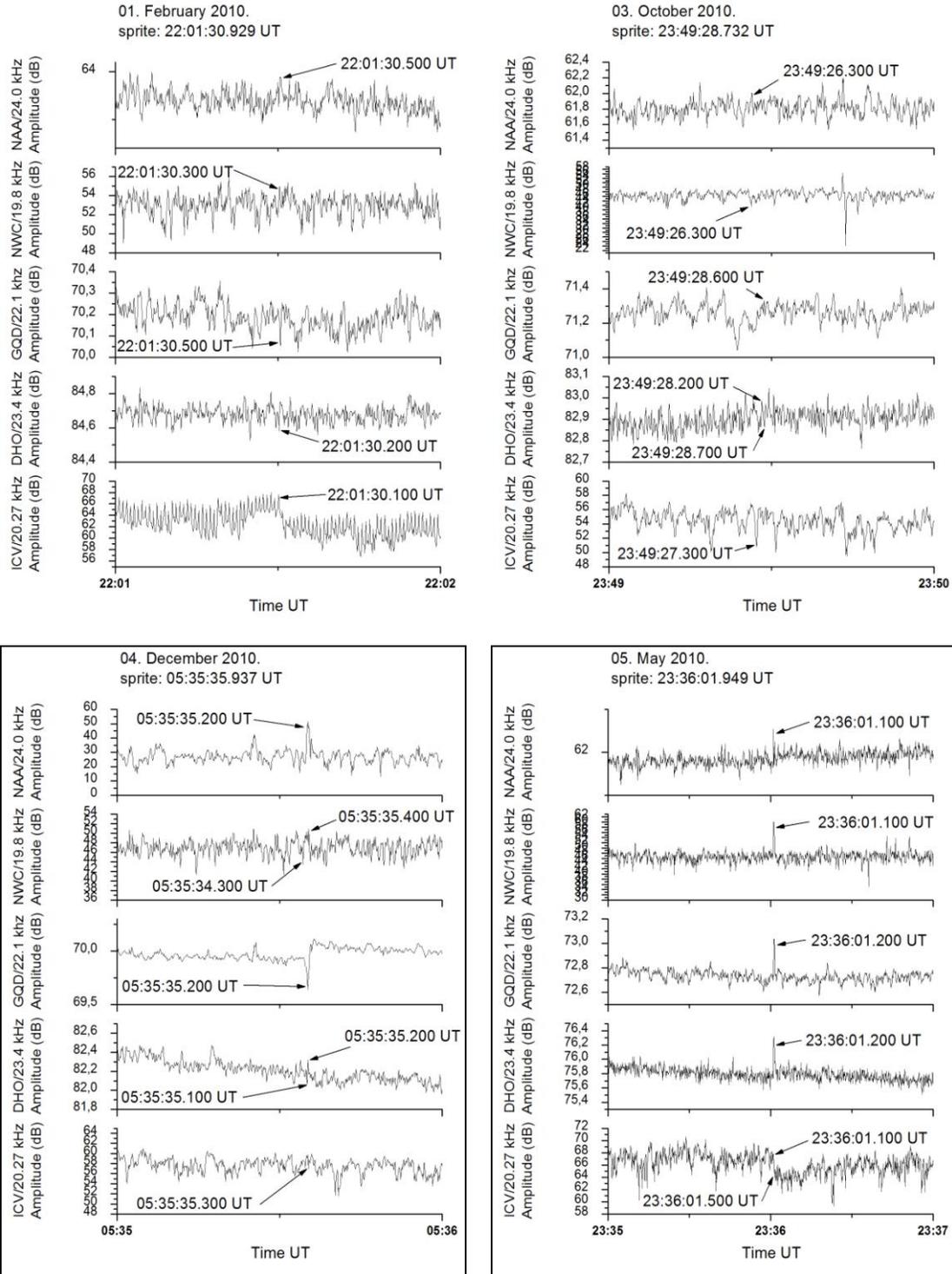


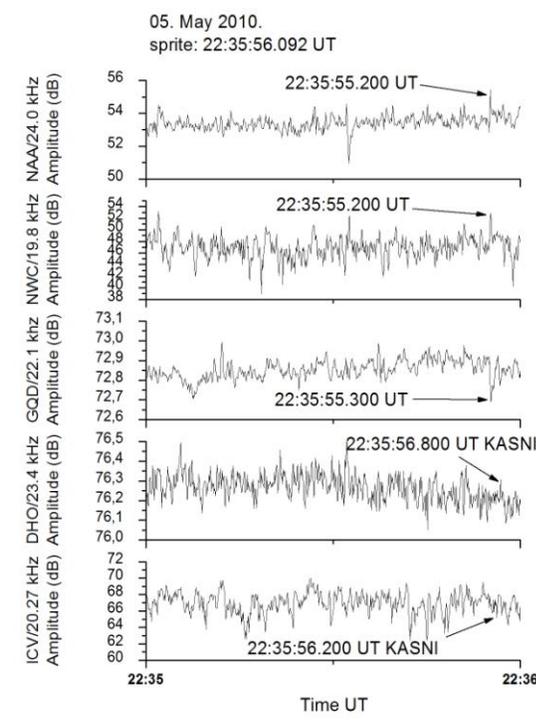
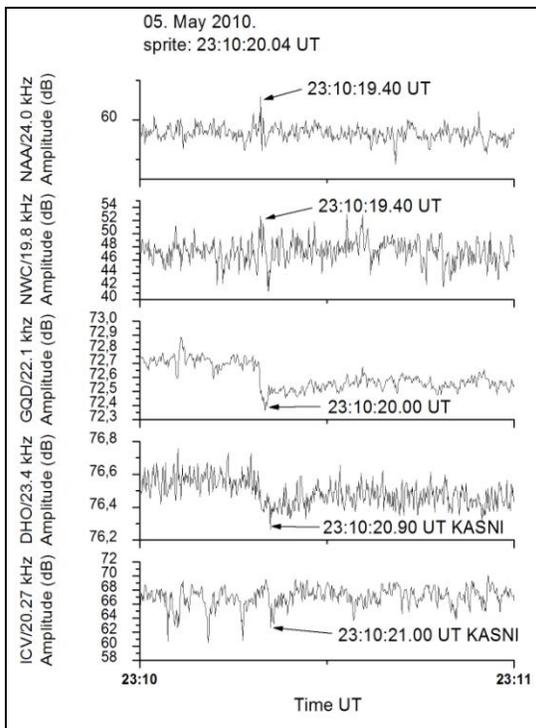
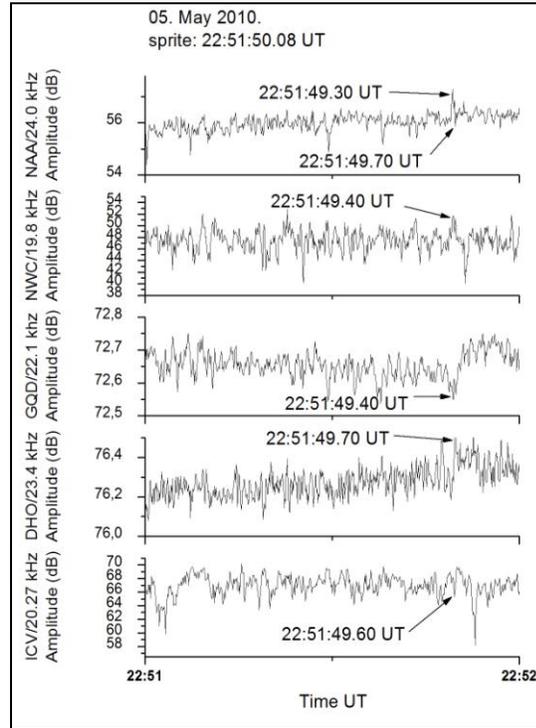
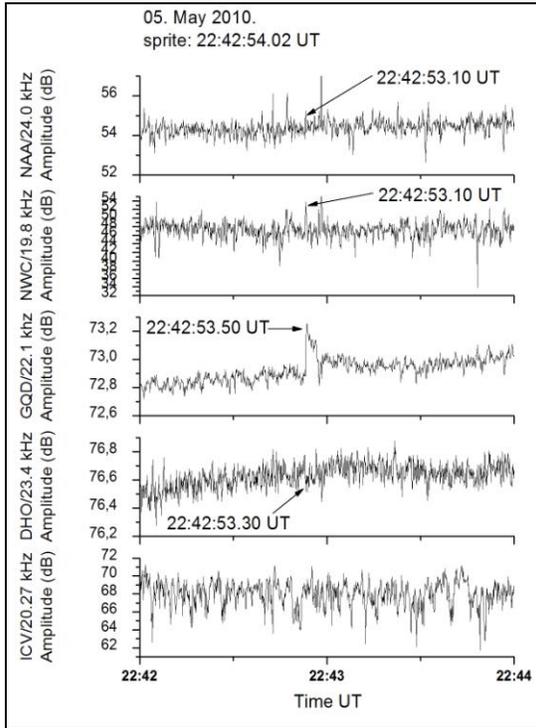


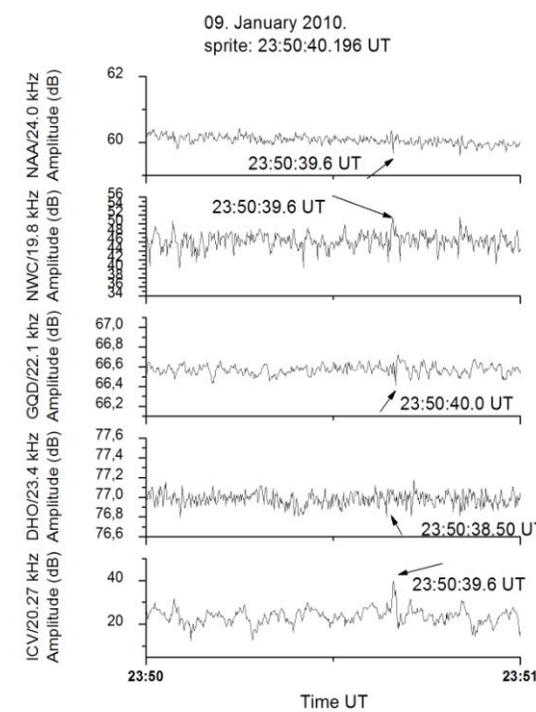
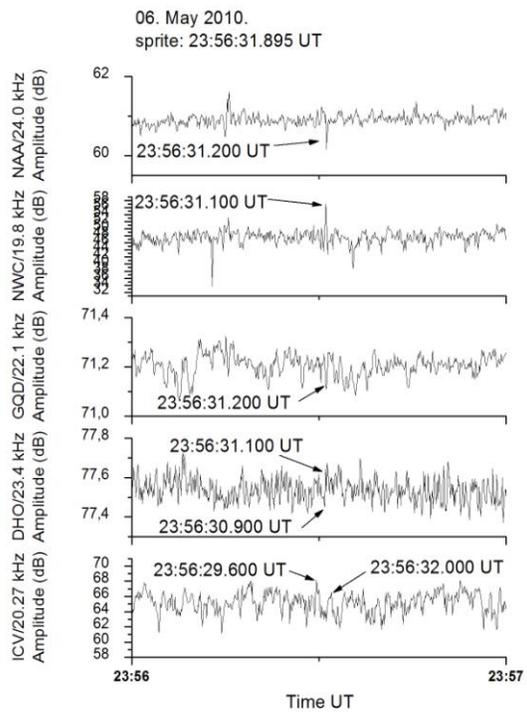
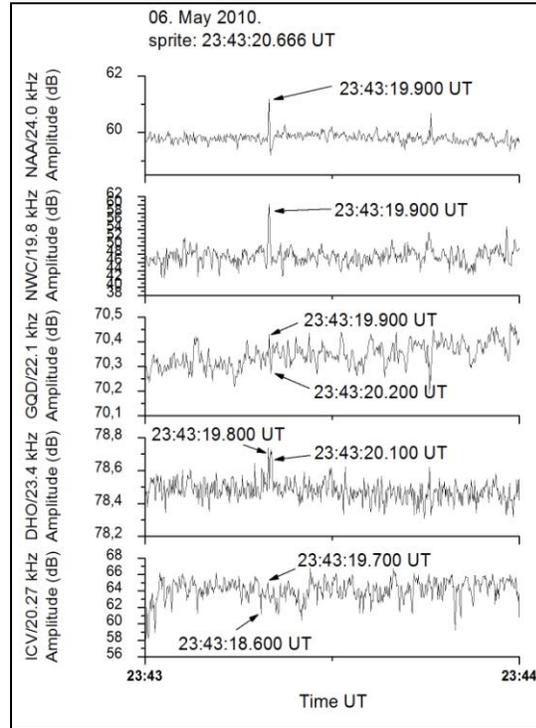
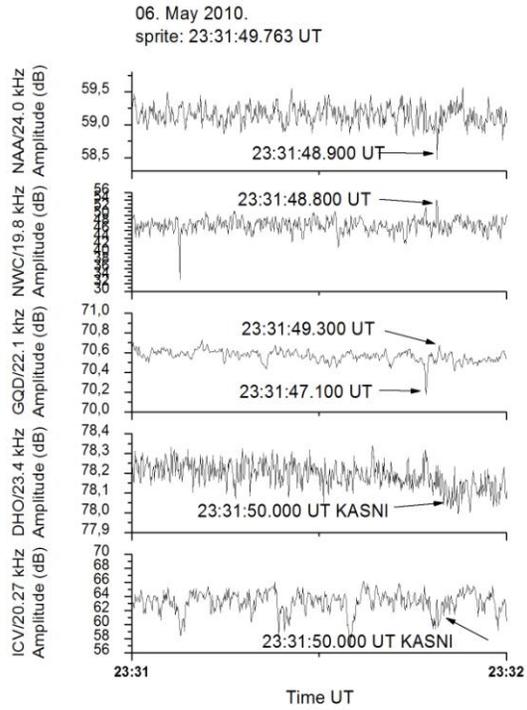


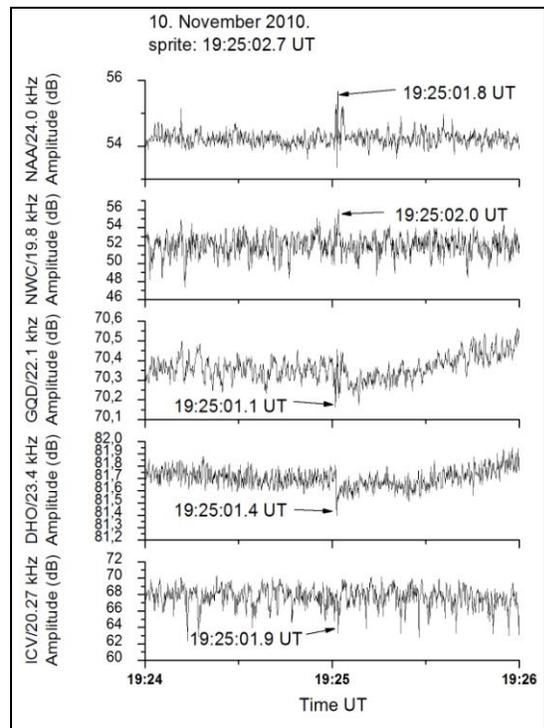
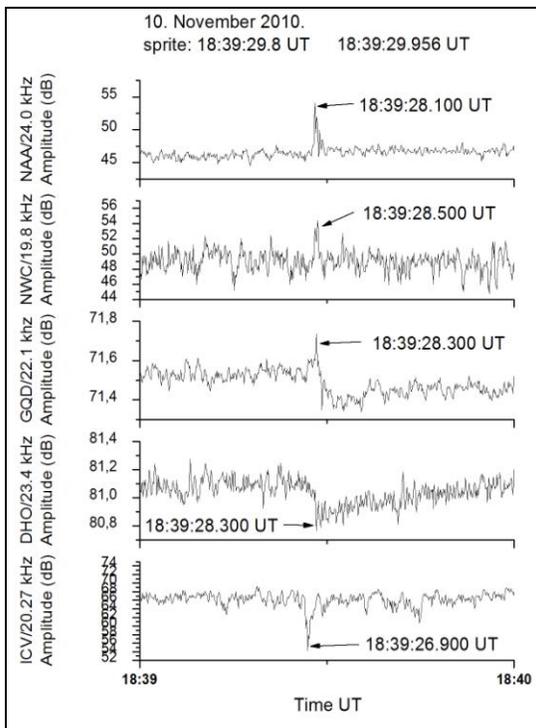
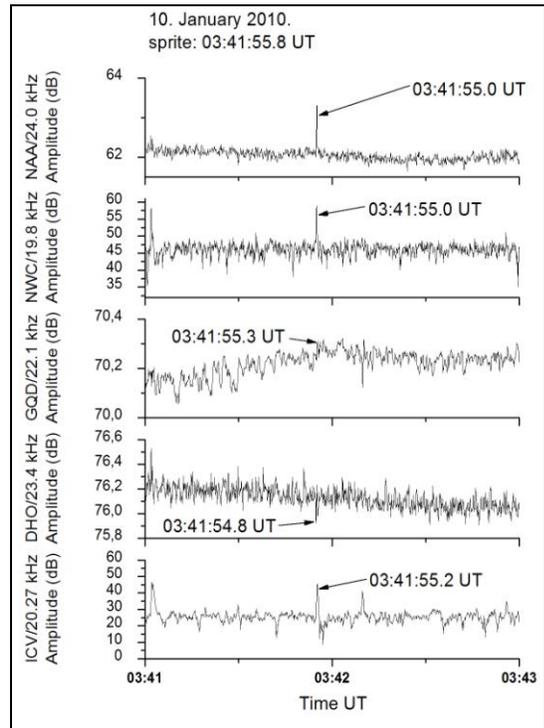
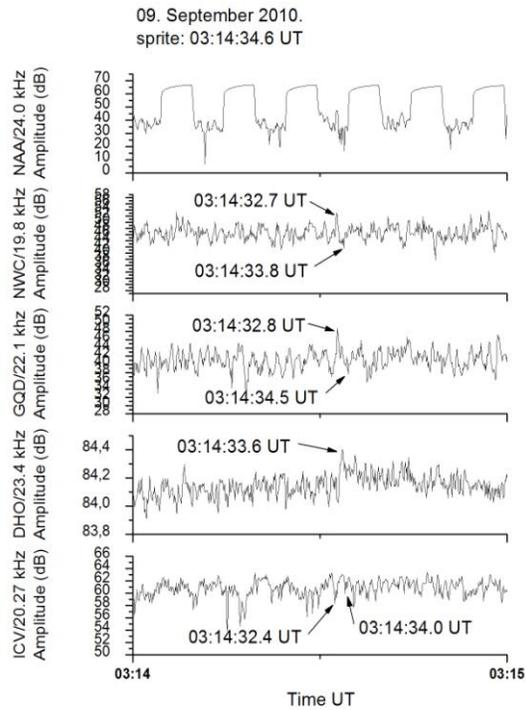


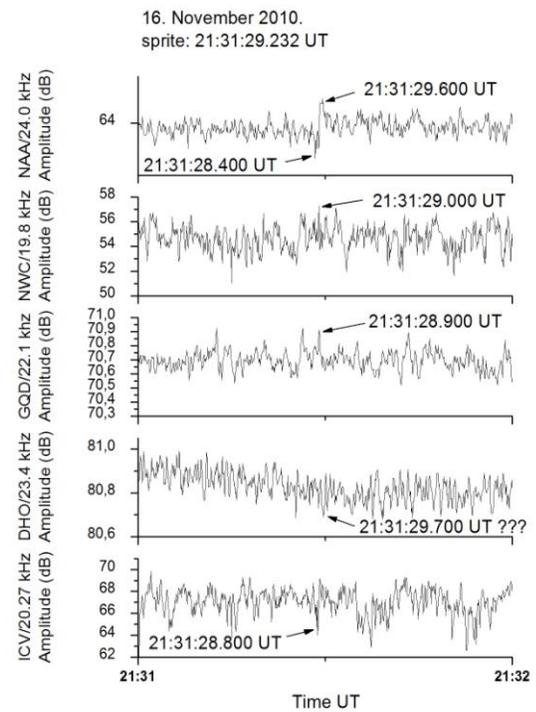
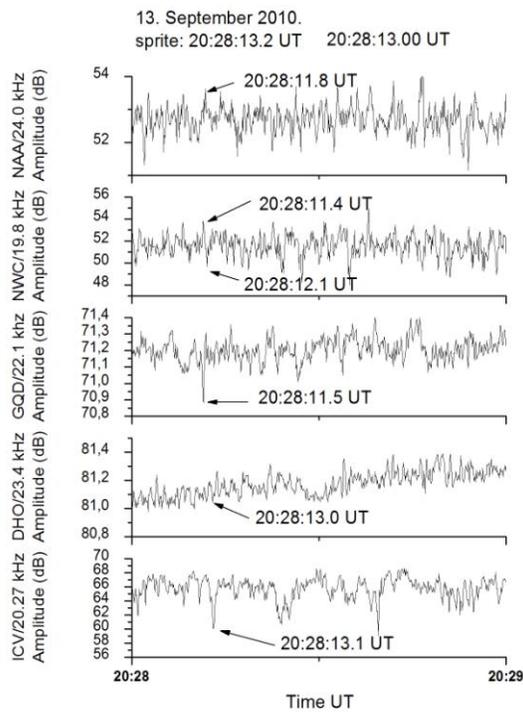
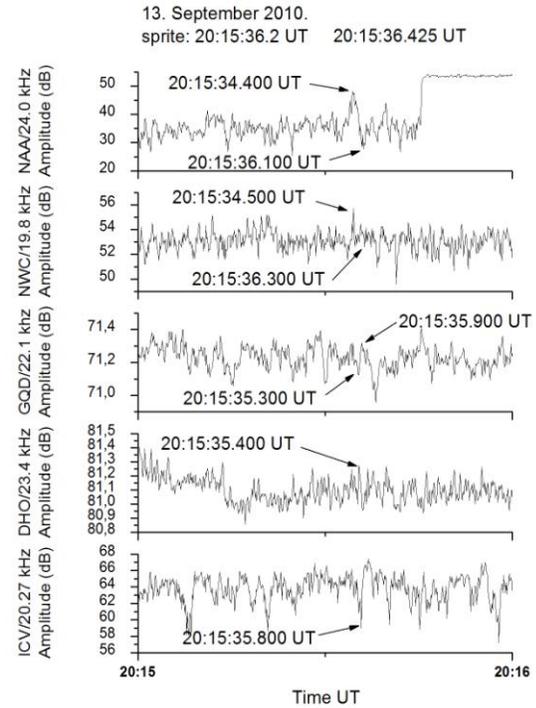
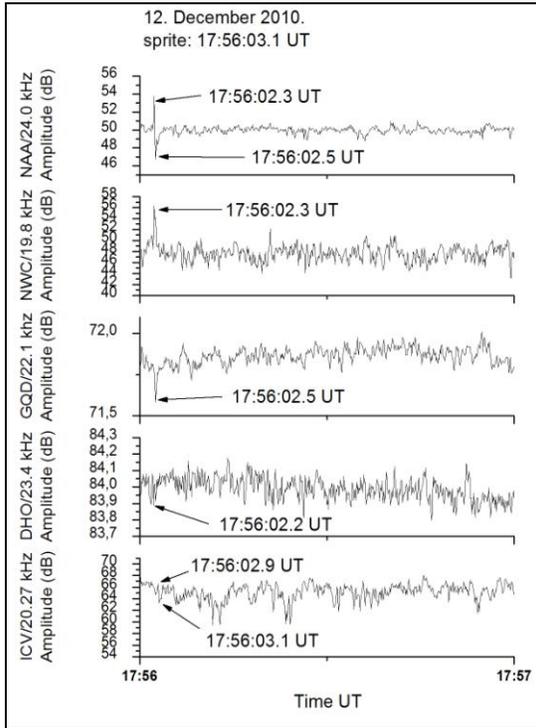
PRILOG 2C. Poremećaji na noćnim VLF signalima snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2010. godine izabrani su za dalju analizu; obeležena su vremena maksimalnog poremećaja signala.

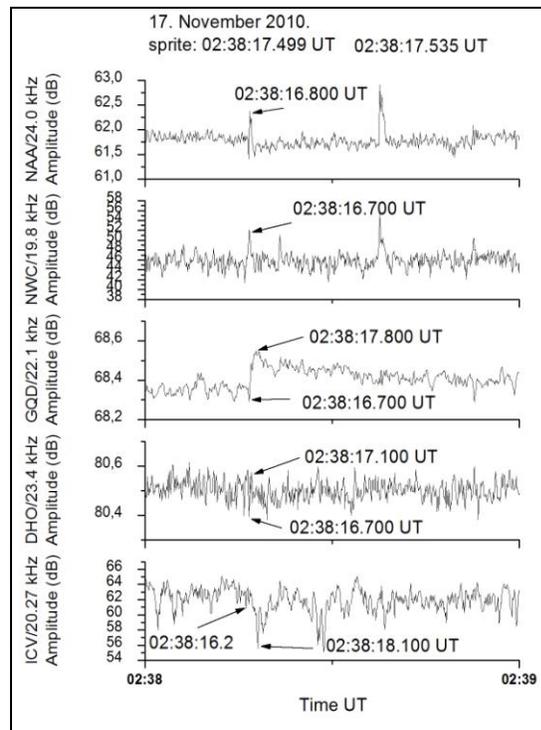
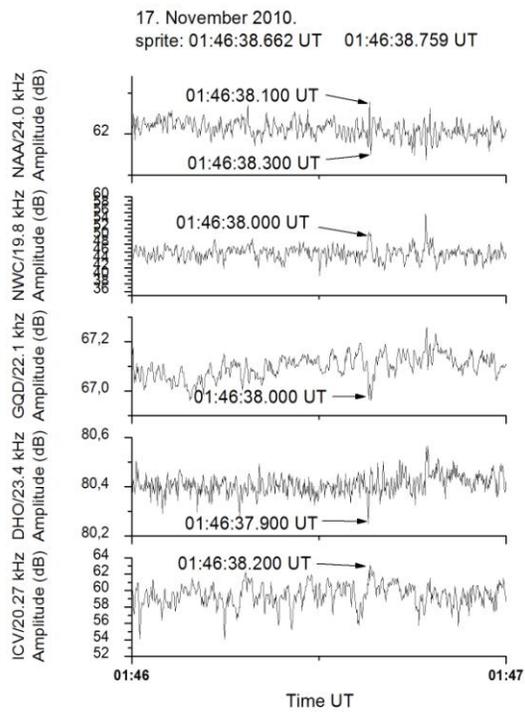
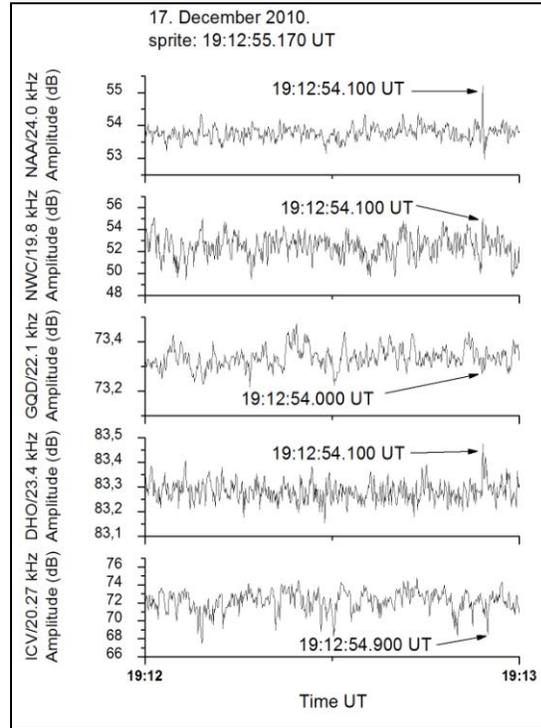
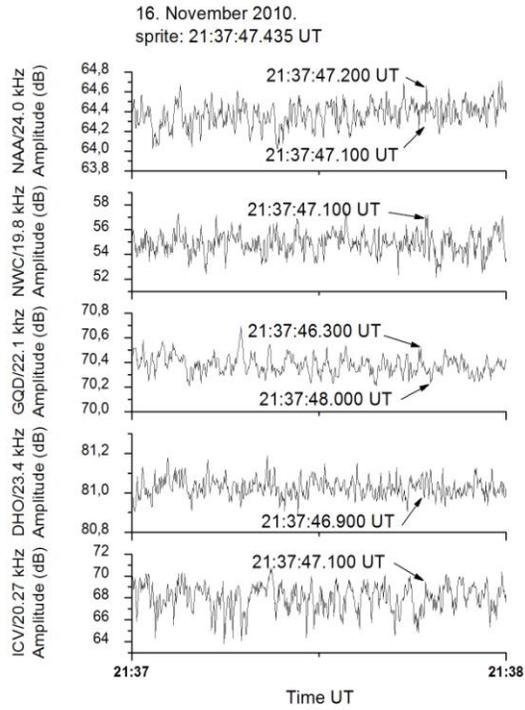


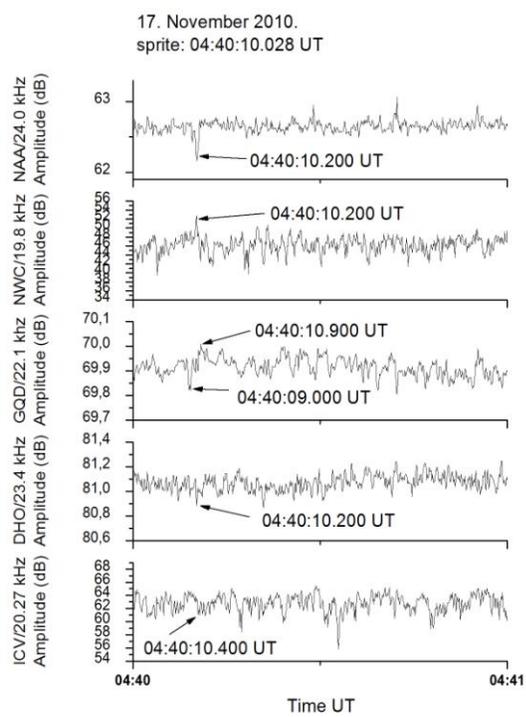
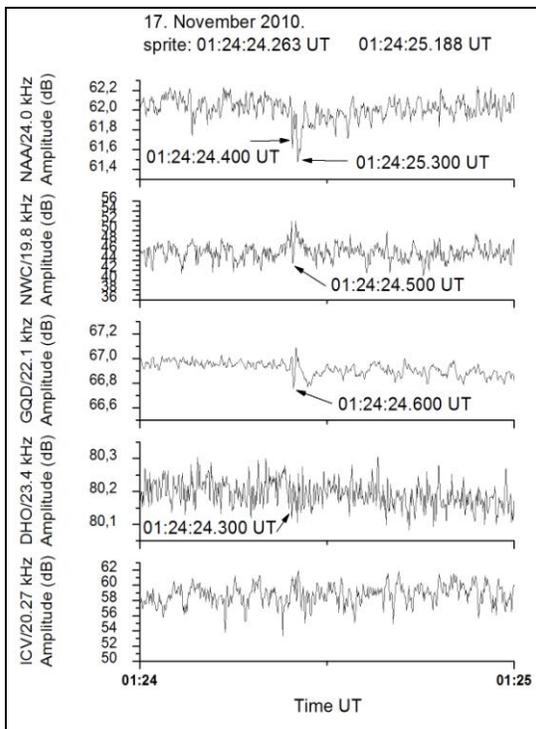
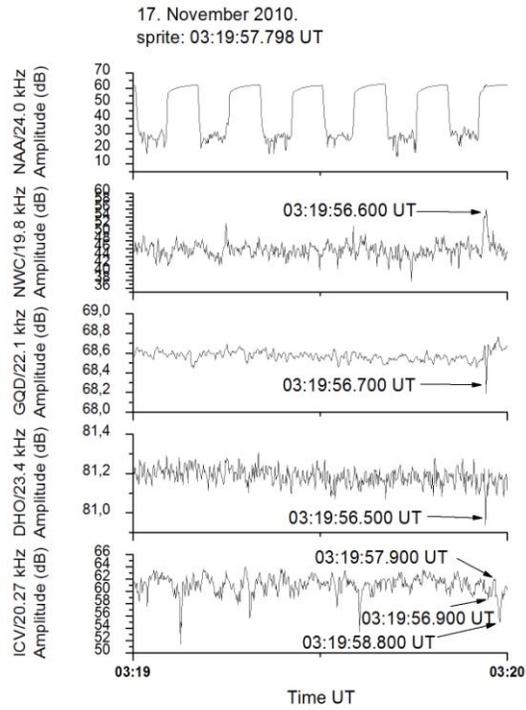
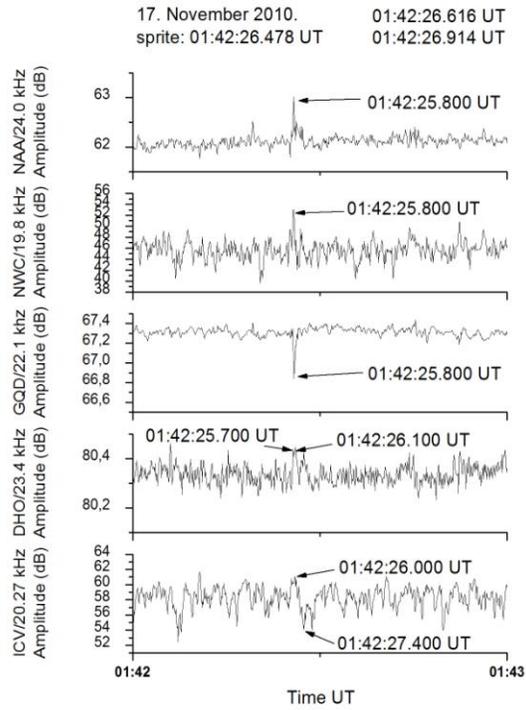


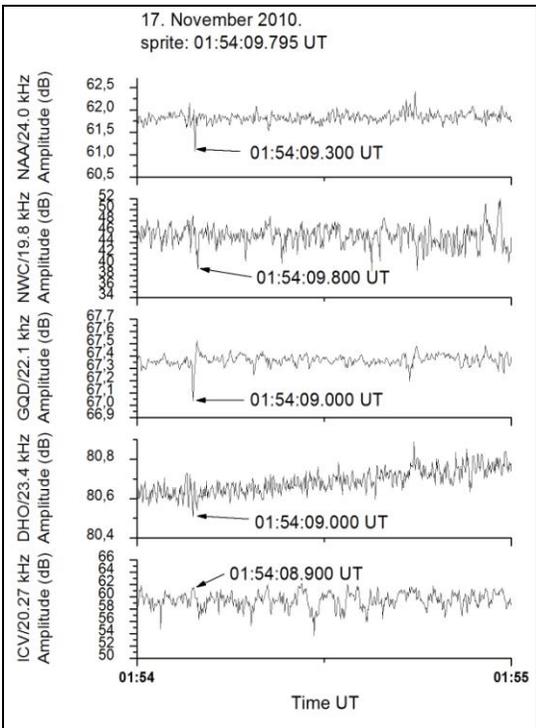
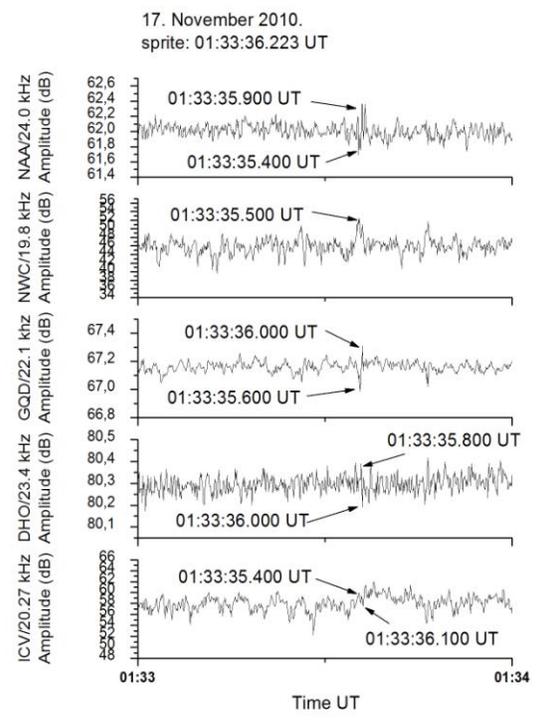
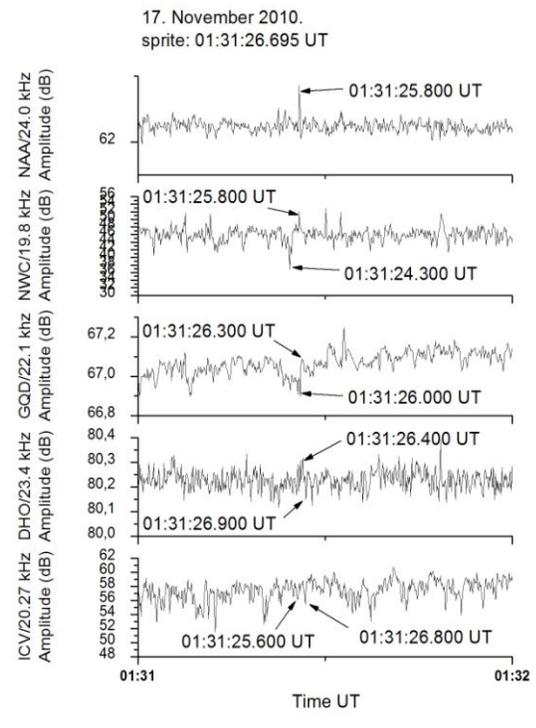
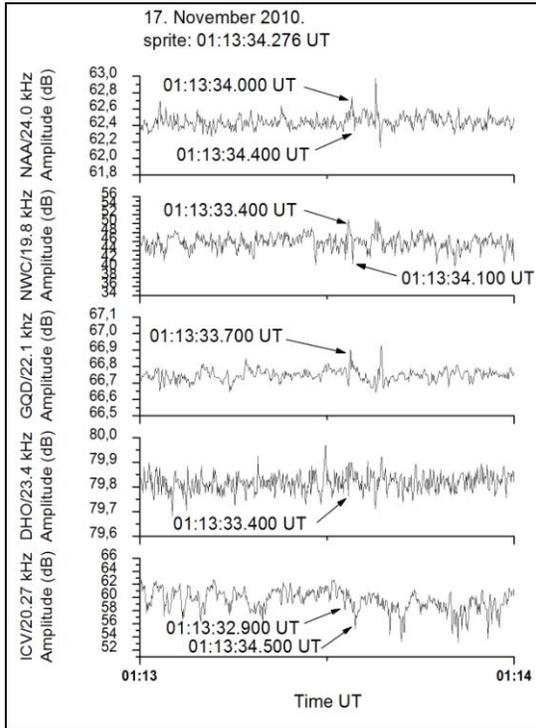


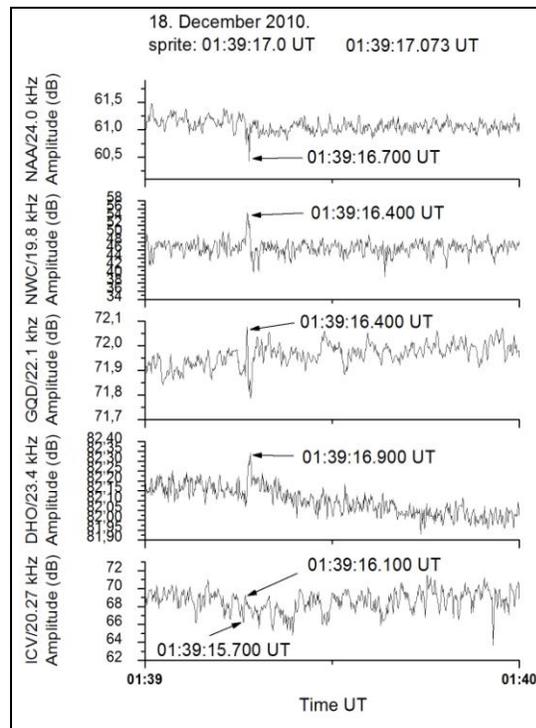
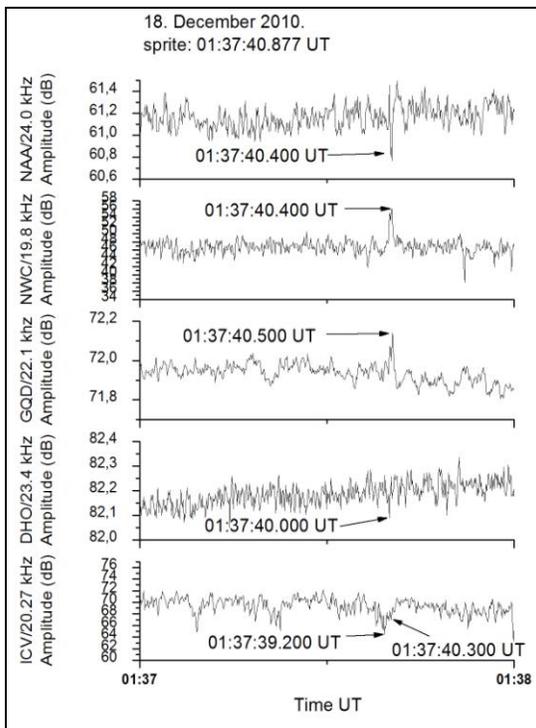
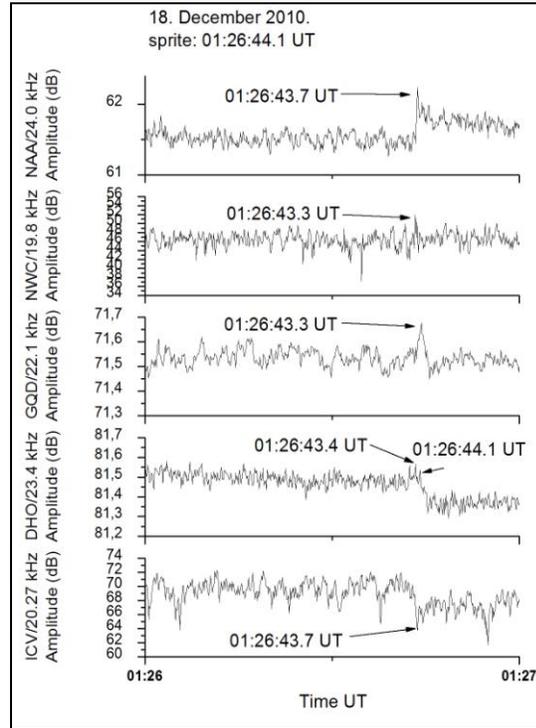
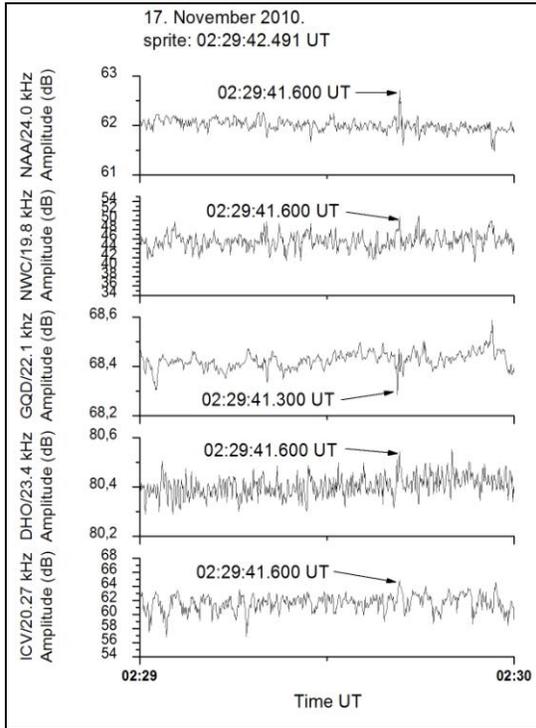


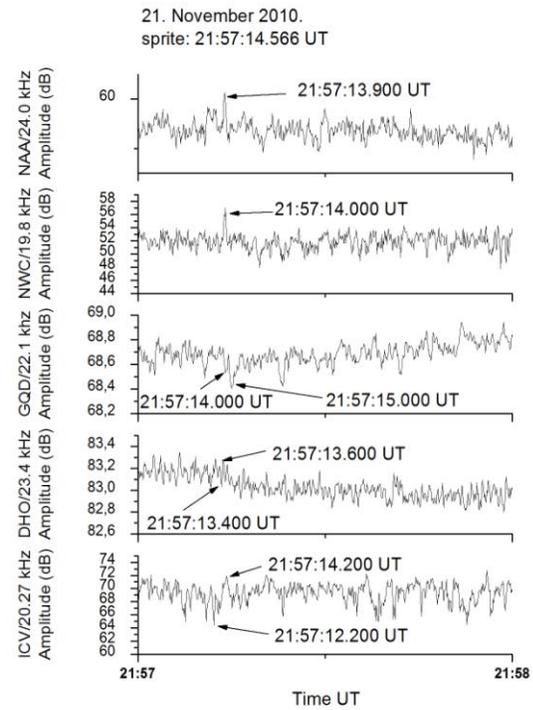
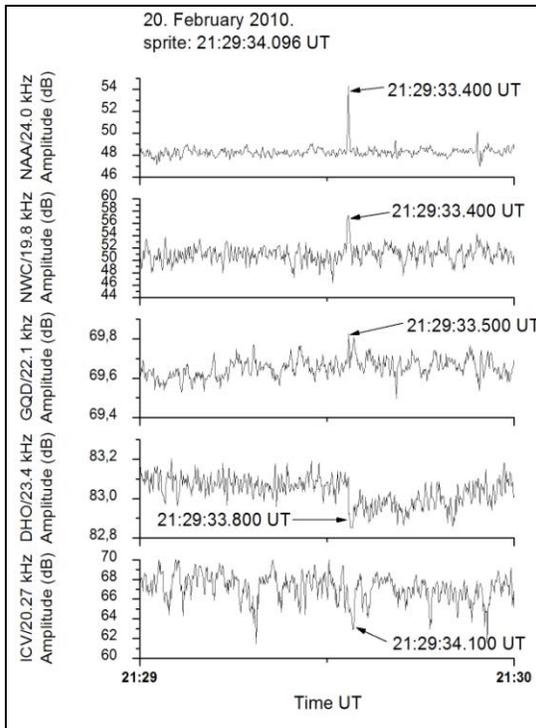
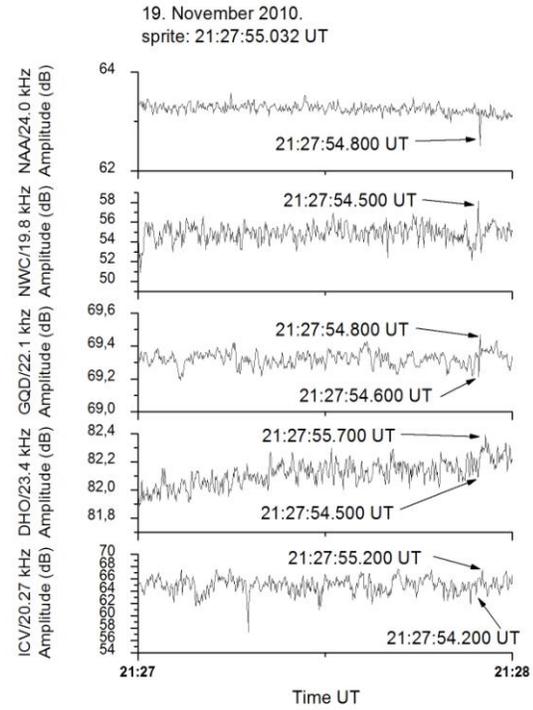
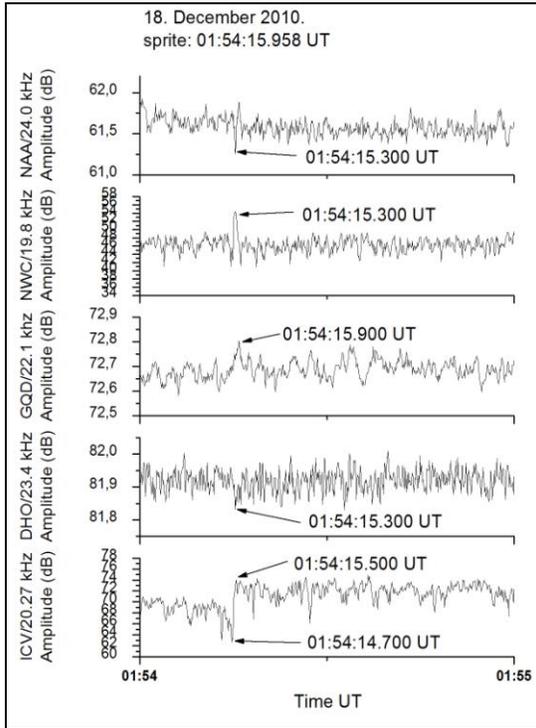


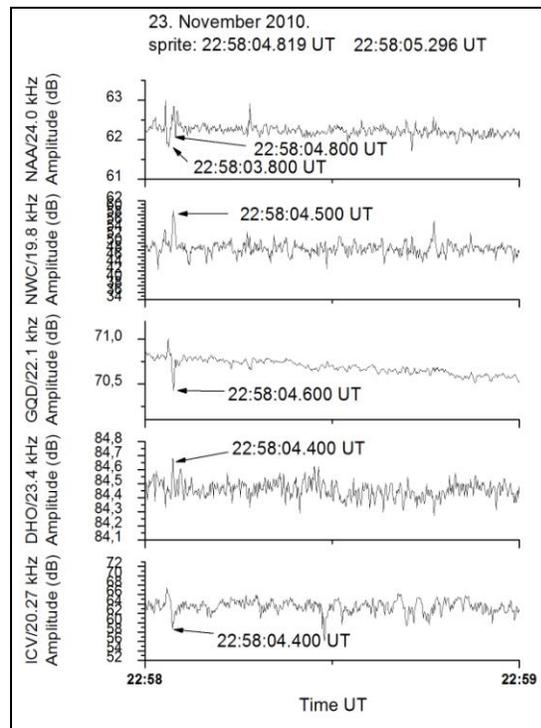
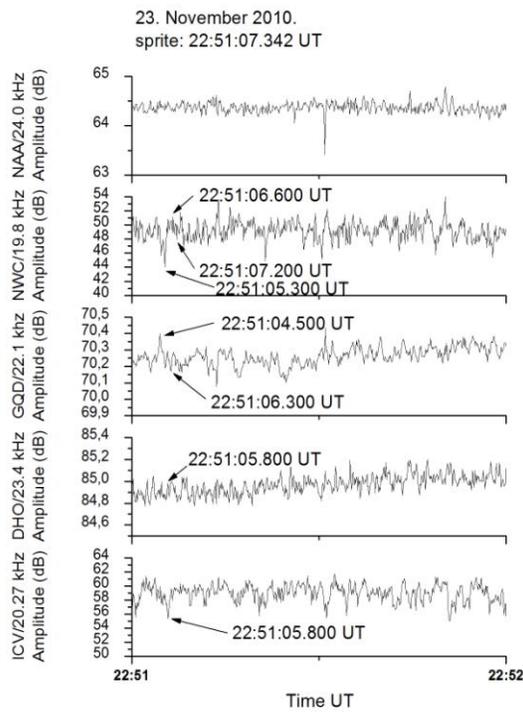
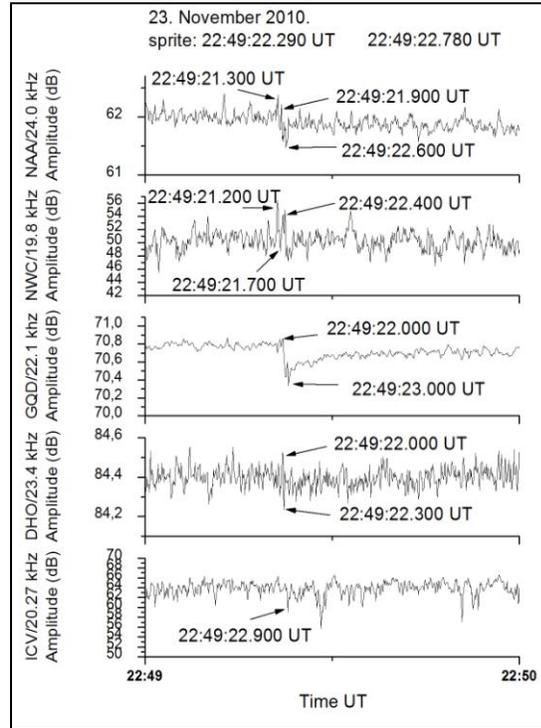
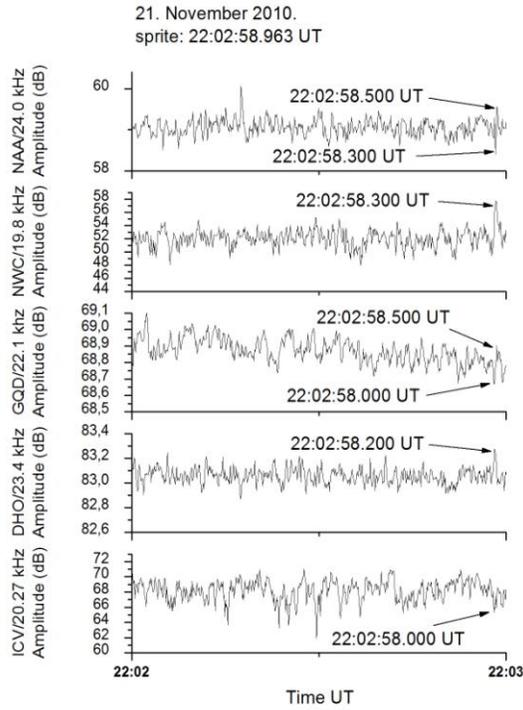


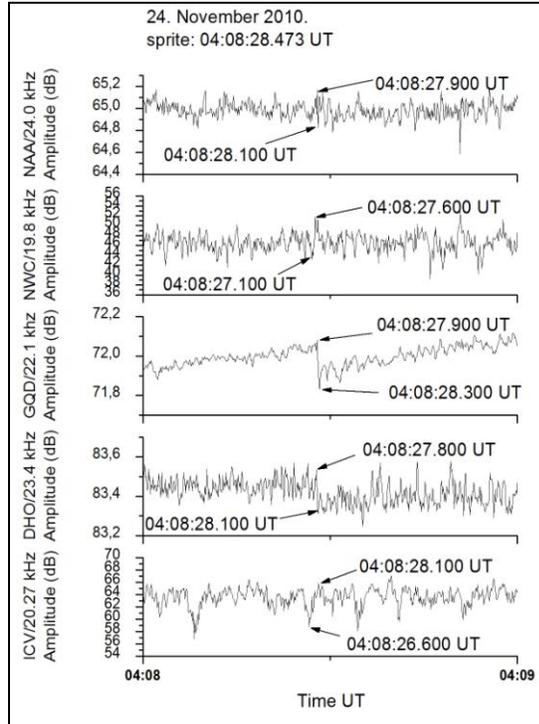
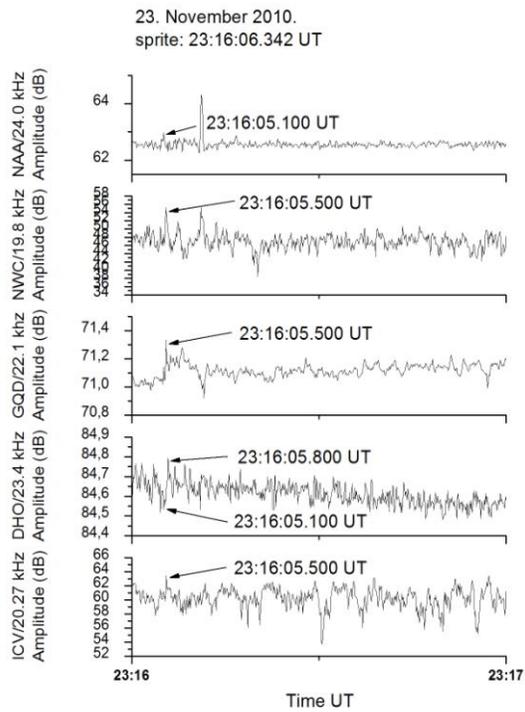
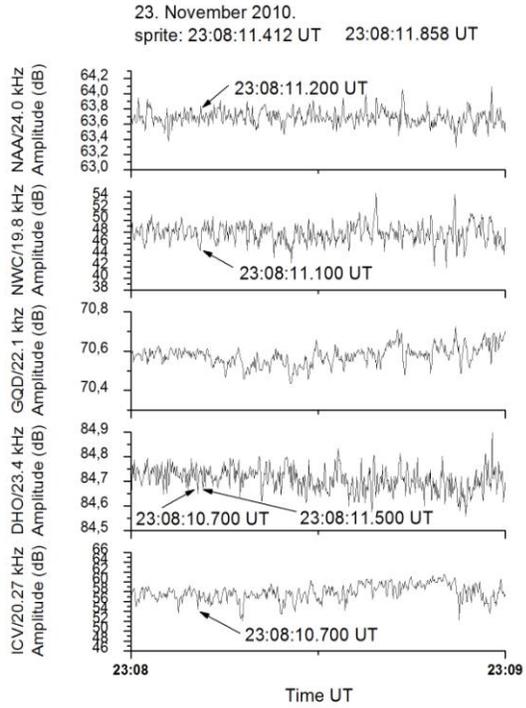
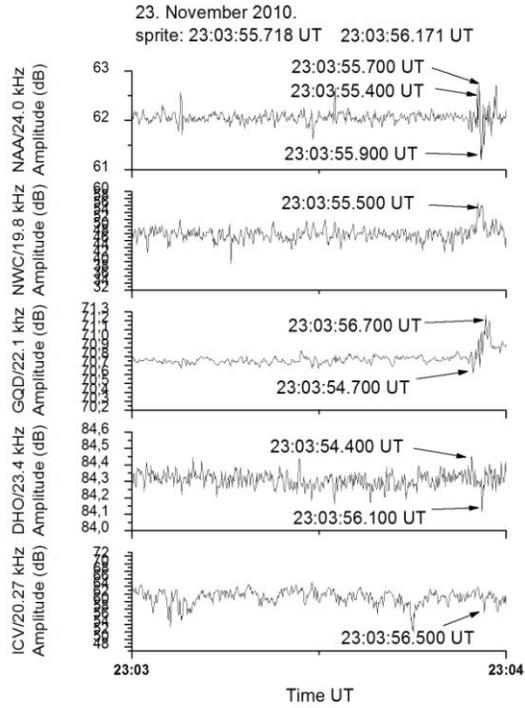


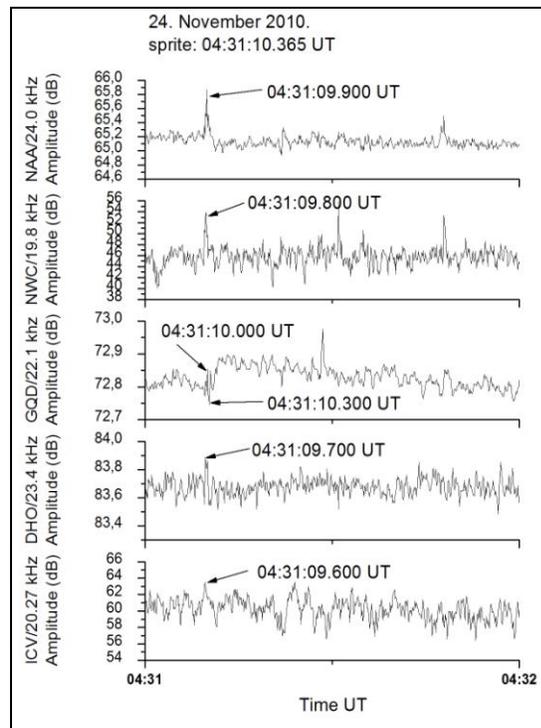
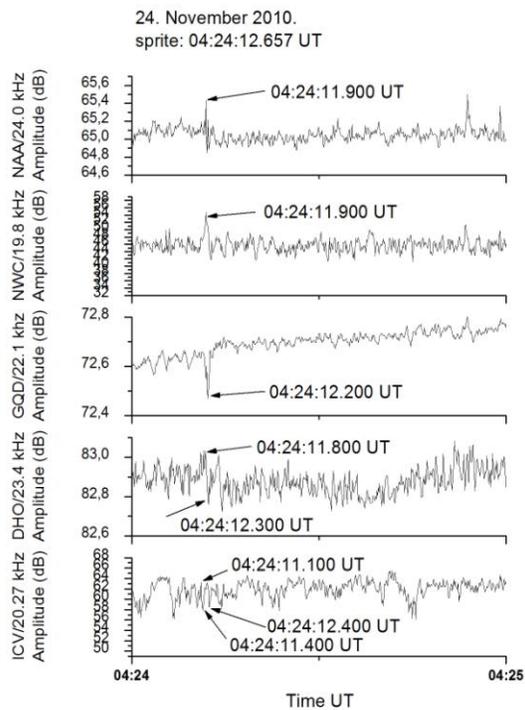
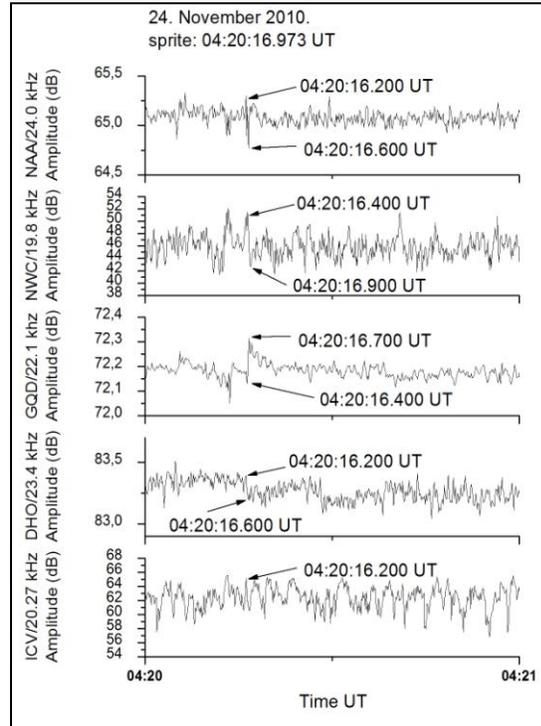
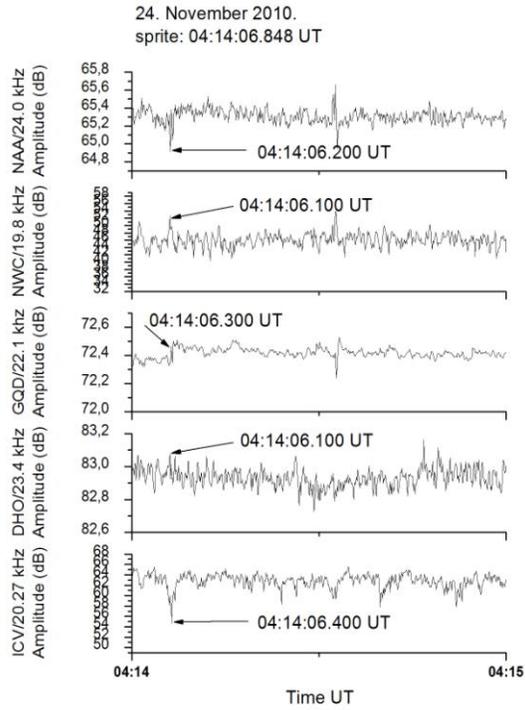


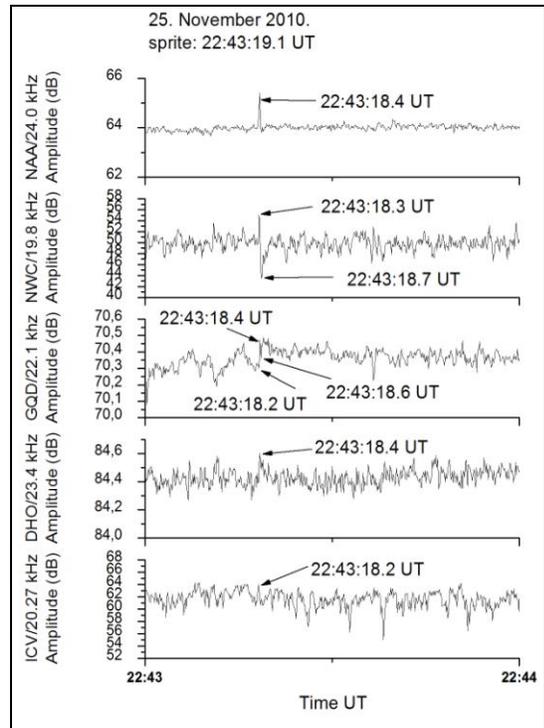
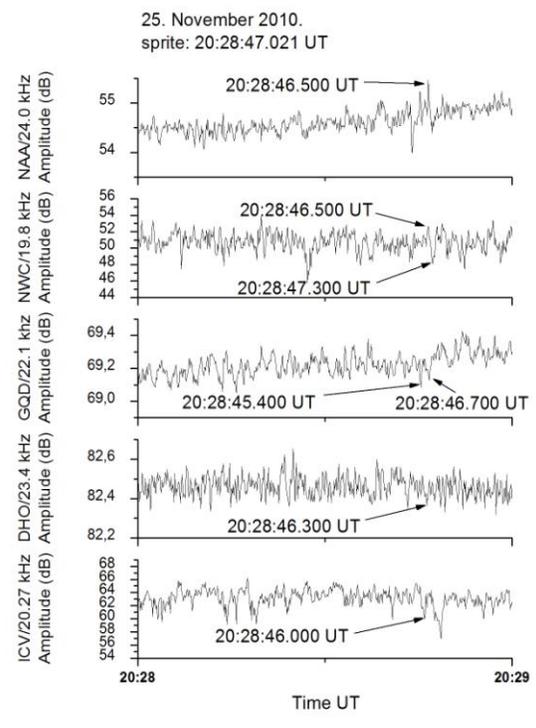
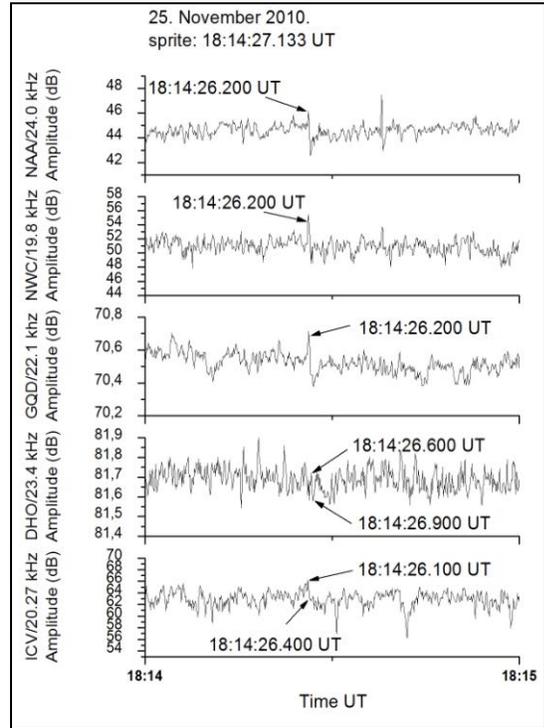
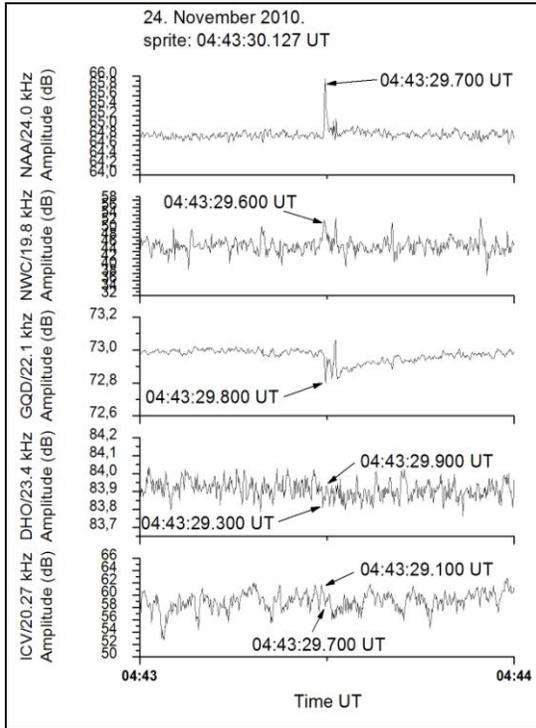


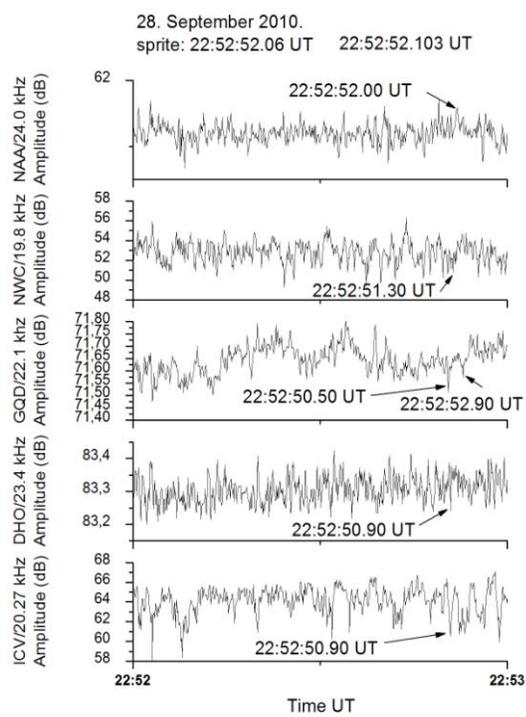
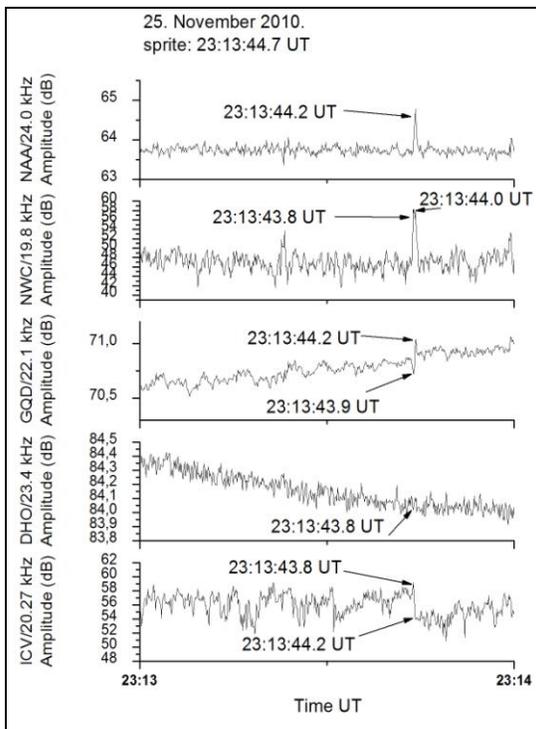
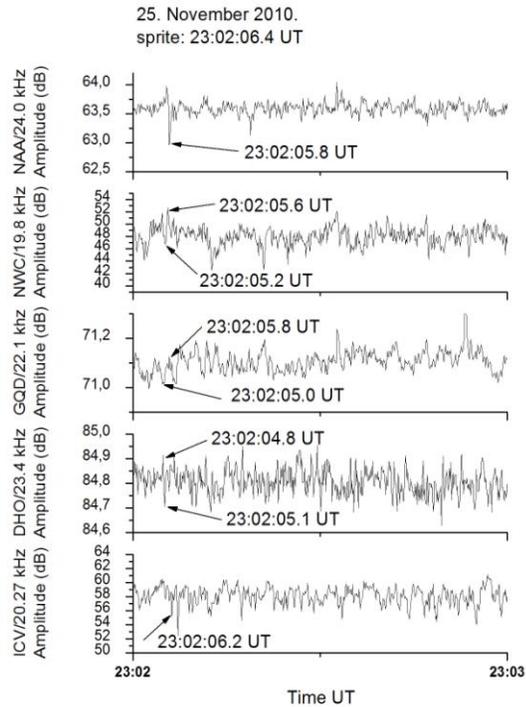
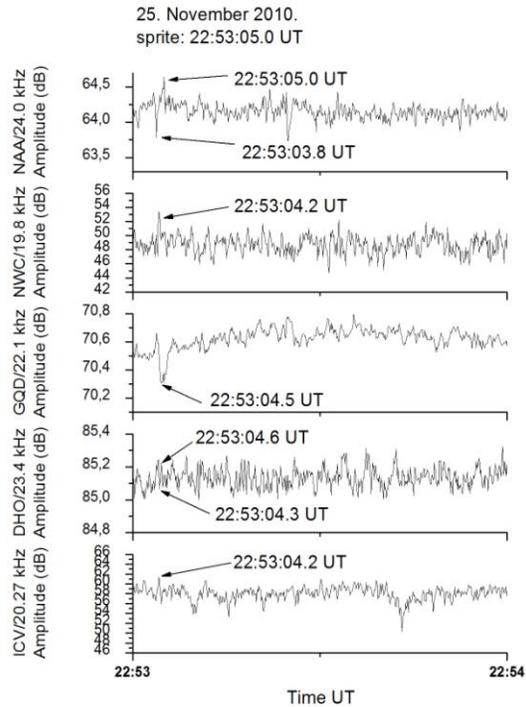


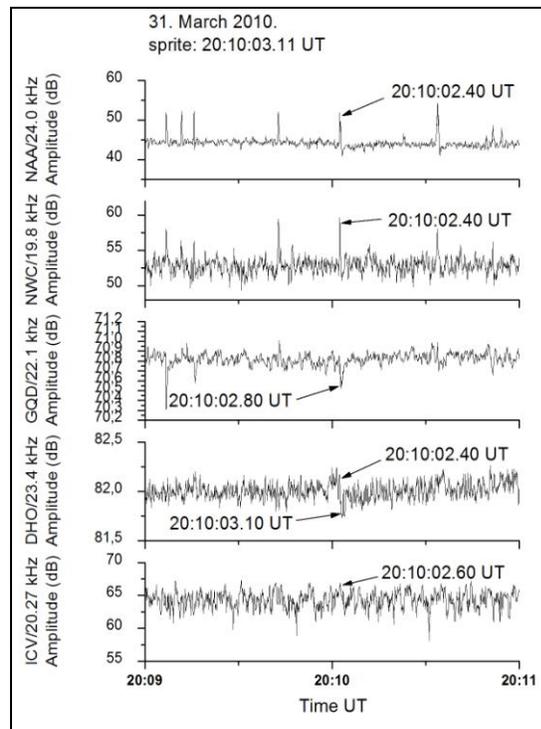
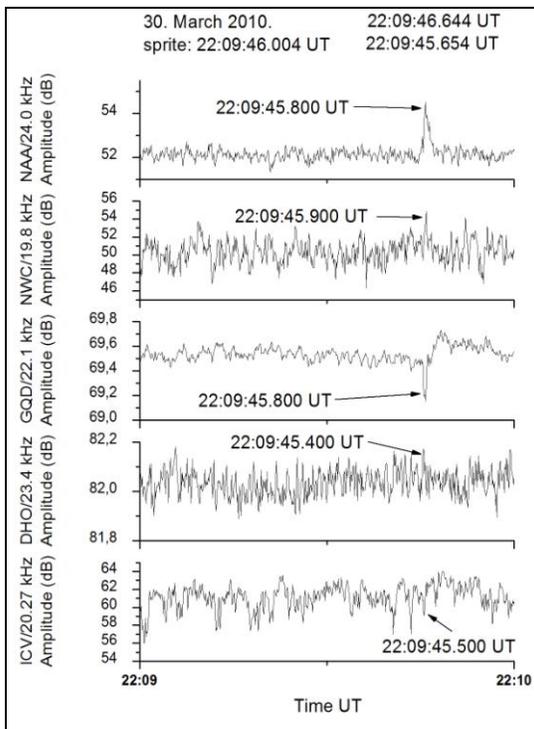
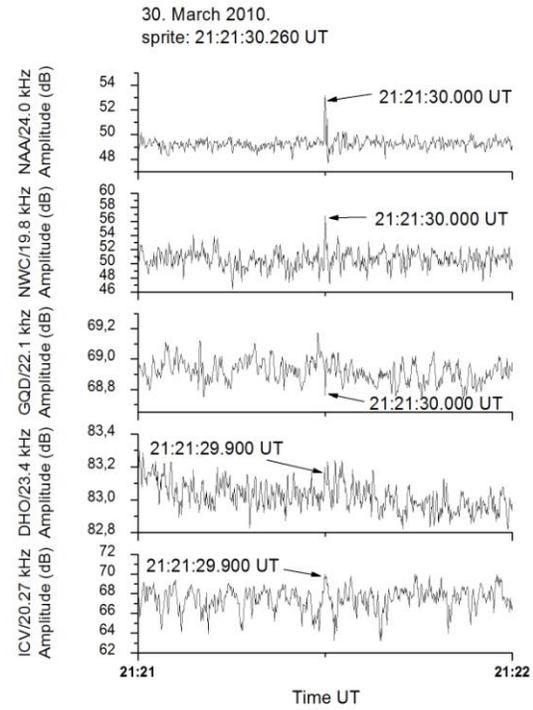
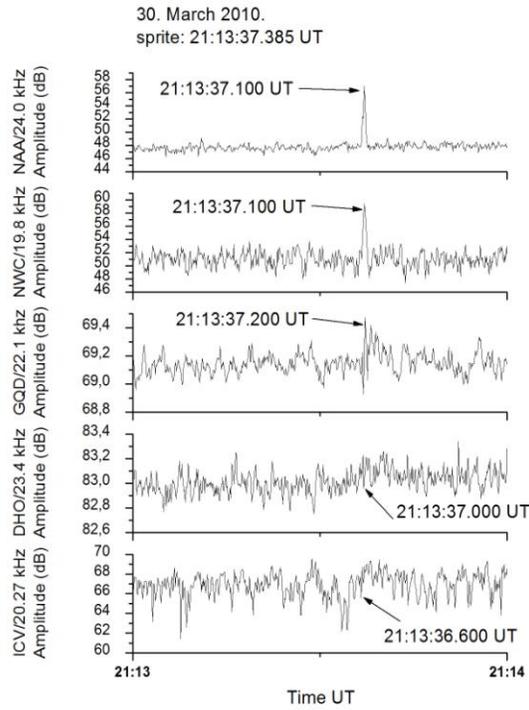




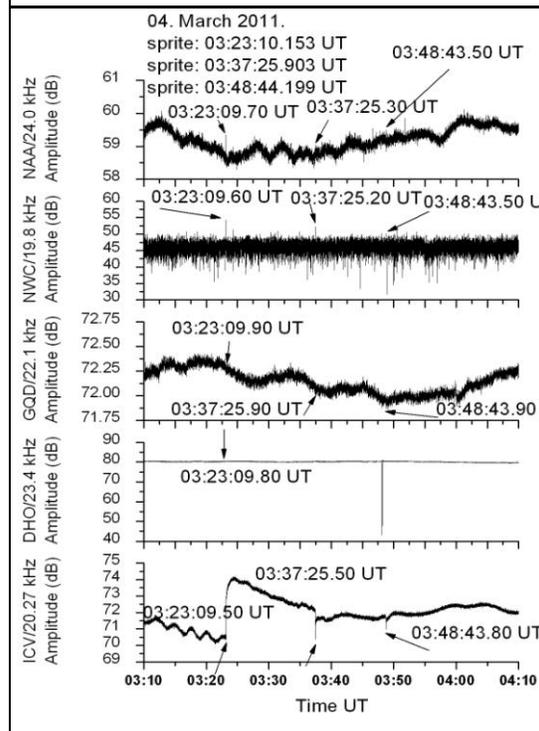
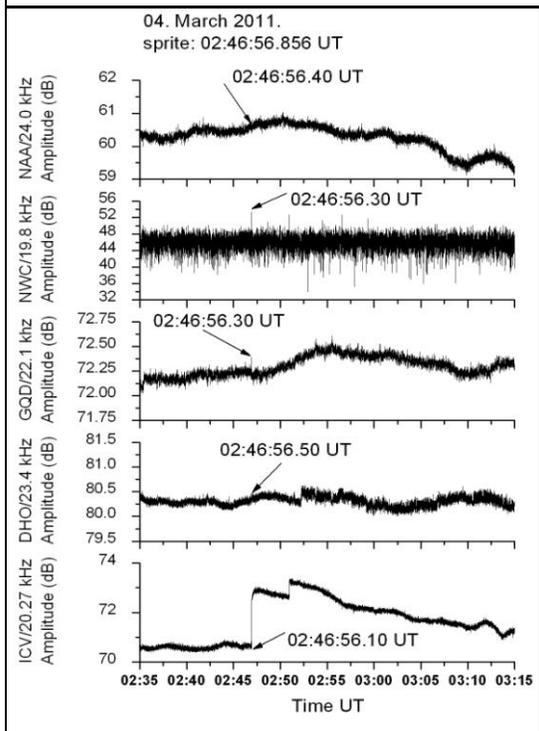
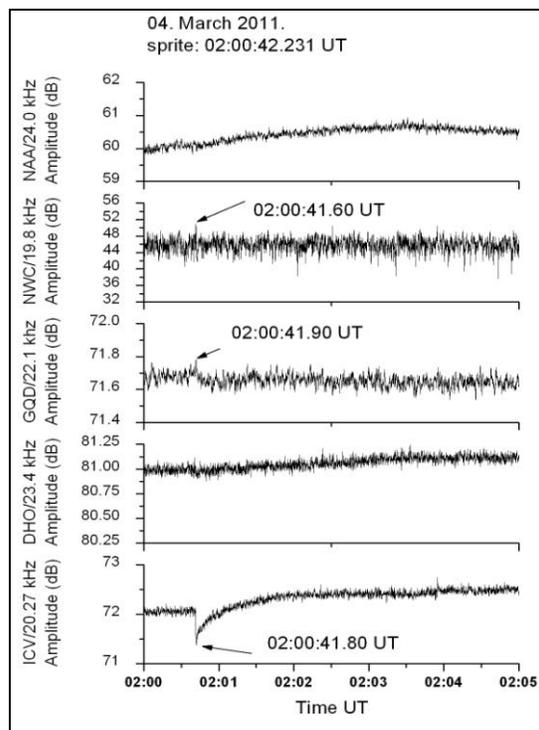
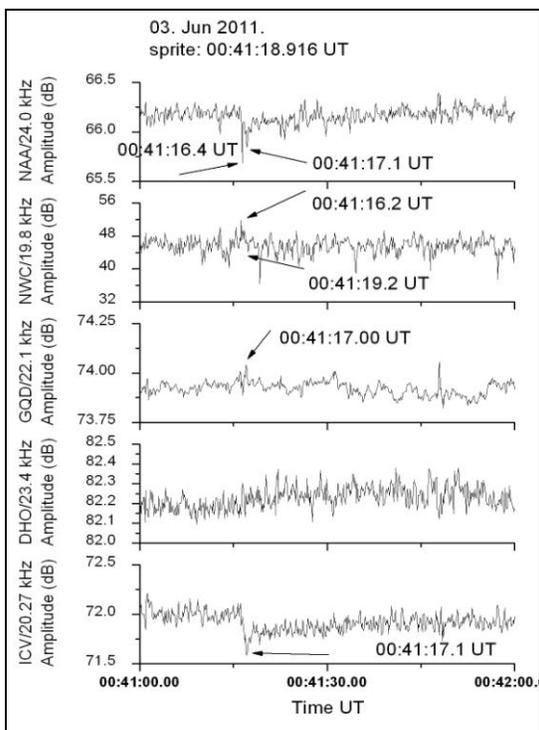


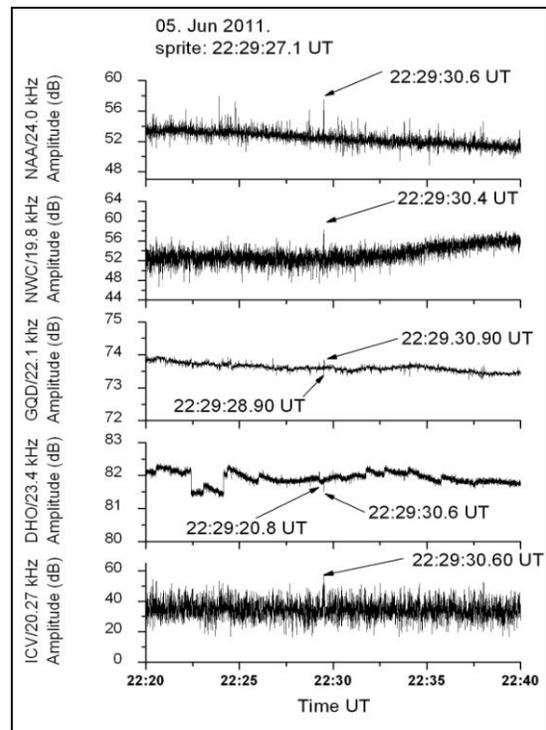
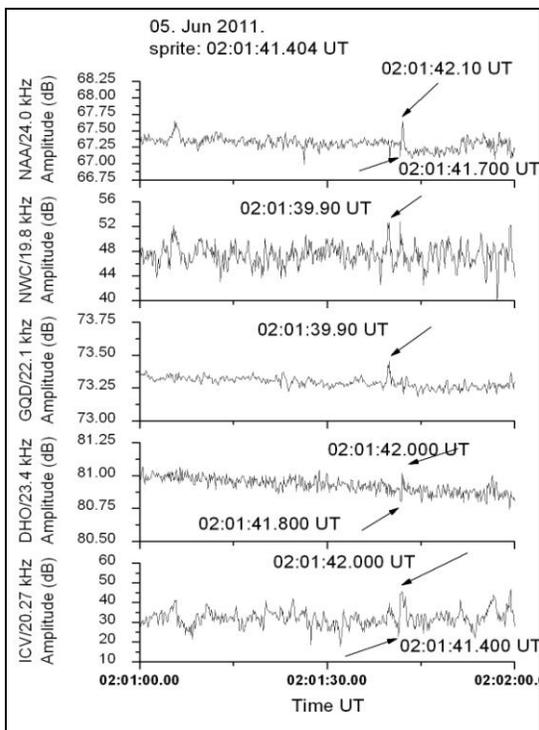
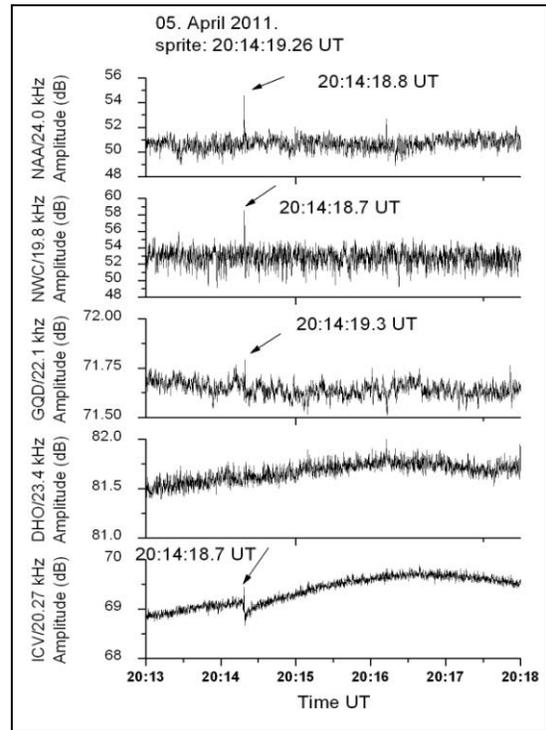
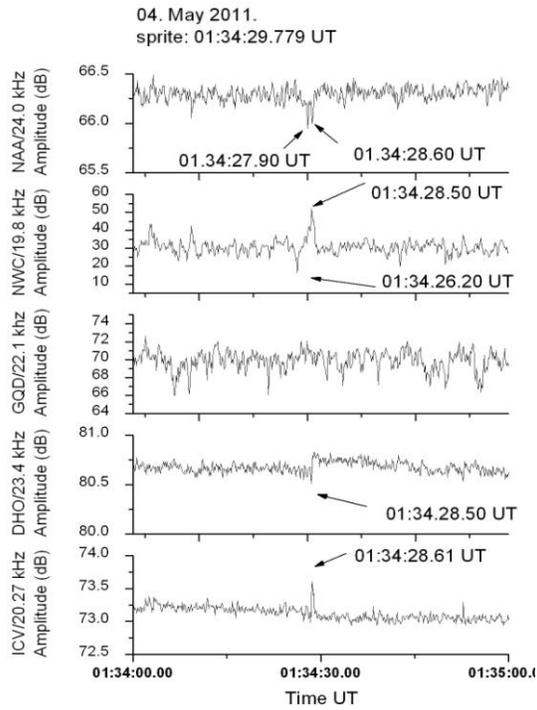


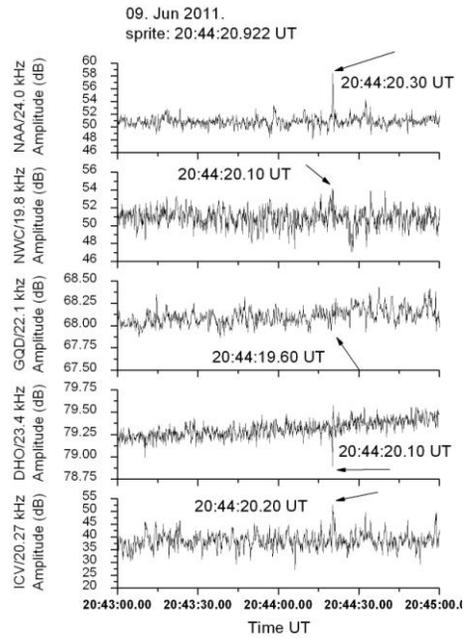
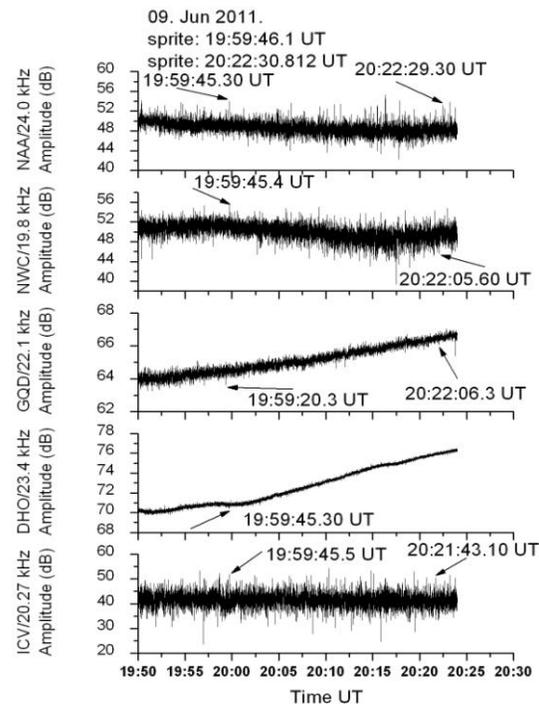
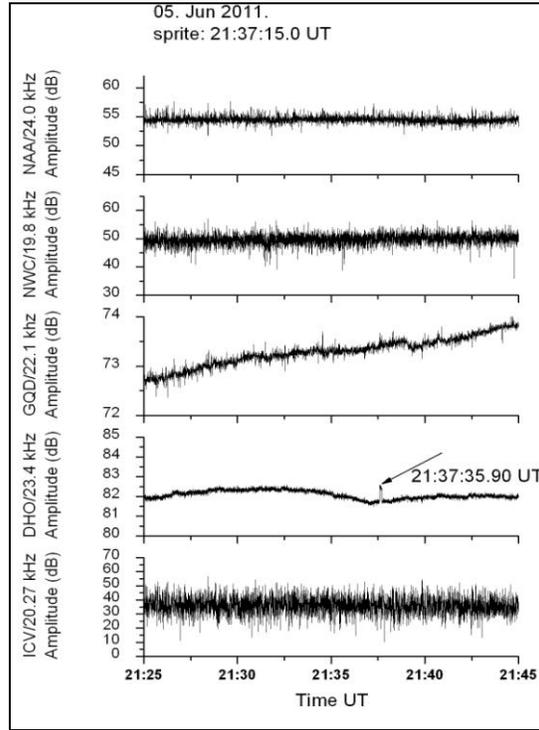
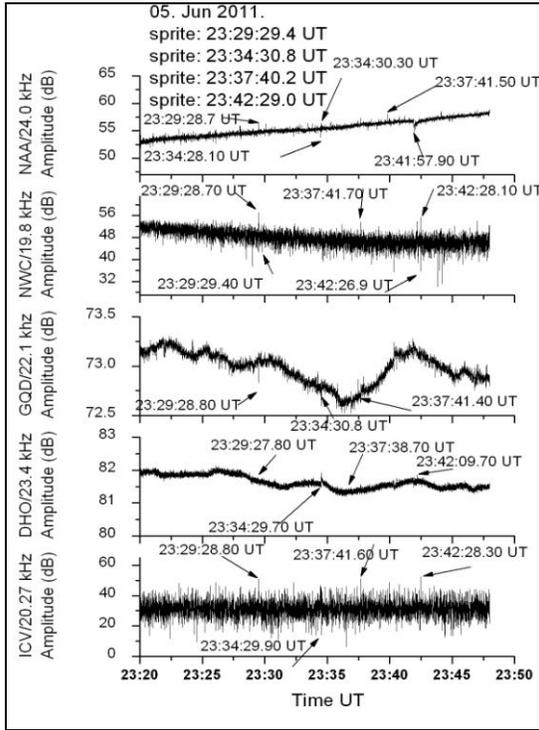


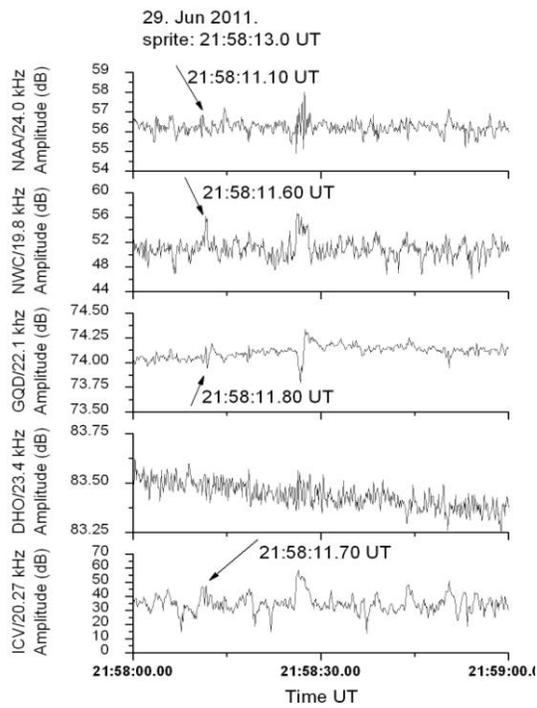
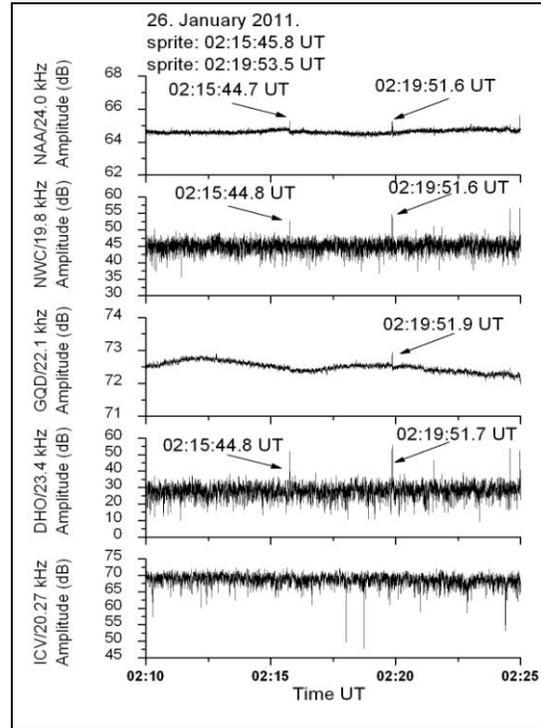
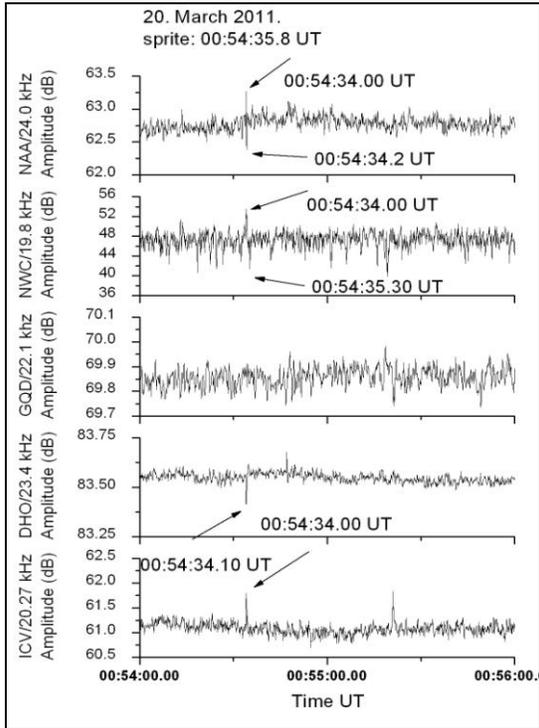


PRILOG 2D. Poremećaji na noćnim VLF signalima snimljeni u periodu od marta 2008. do juna 2011. godine sistemom AbsPAL u Beogradu; uokvireni primeri iz 2011. godine izabrani su za dalju analizu; obeležena su vremena maksimalnog poremećaja signala.

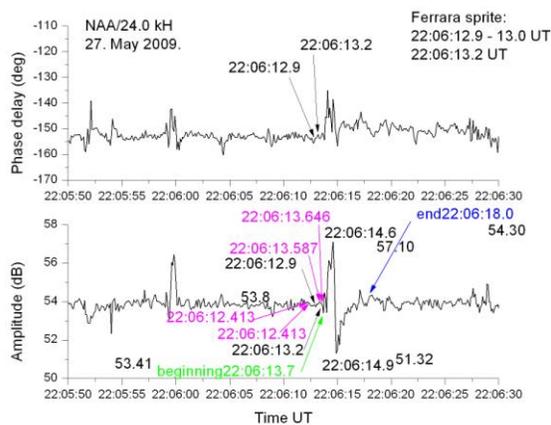
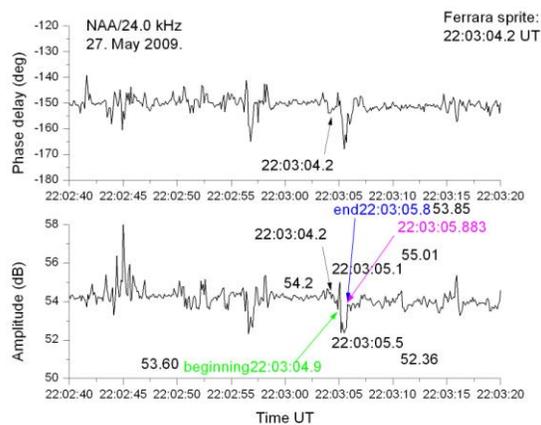
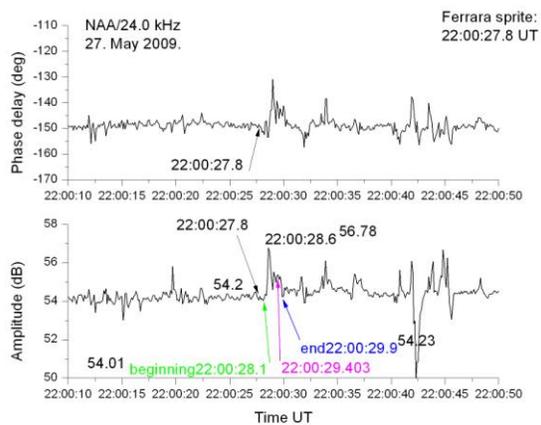
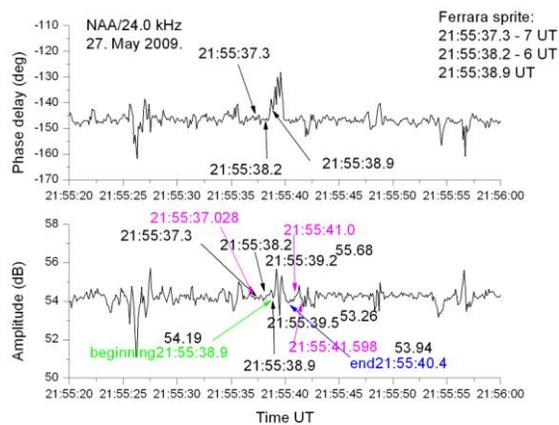
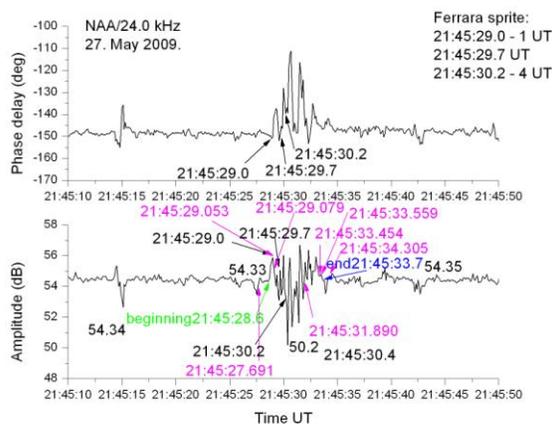
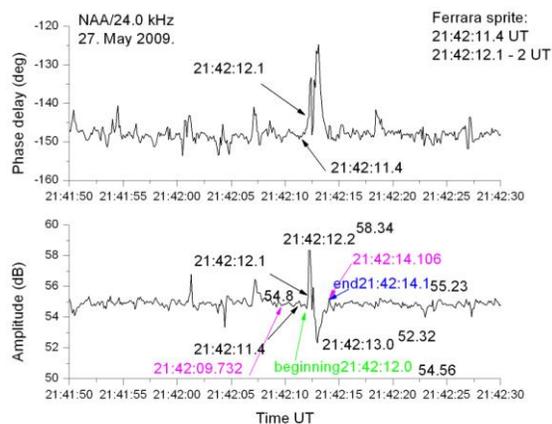


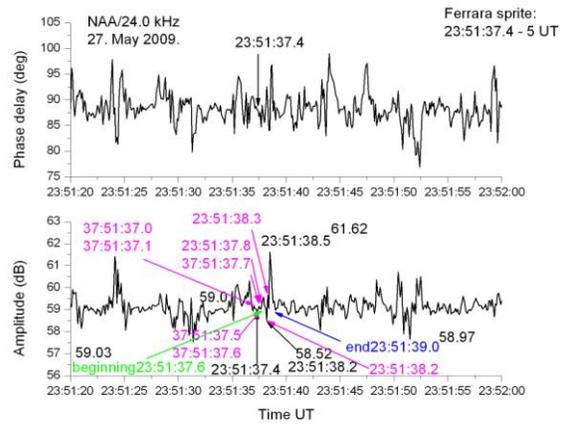
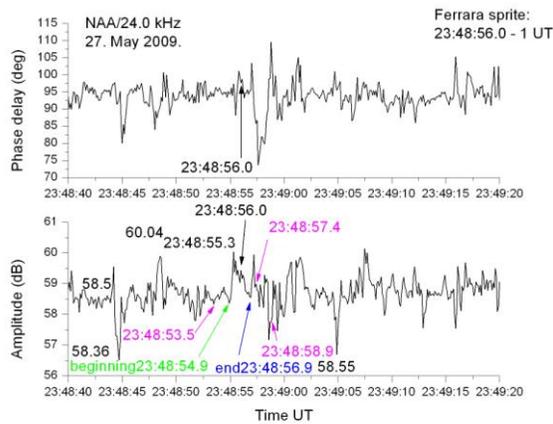
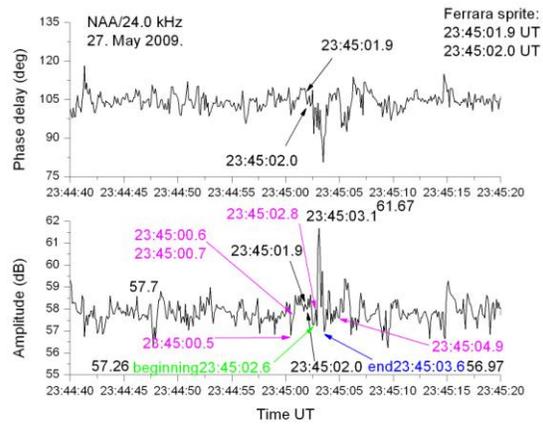
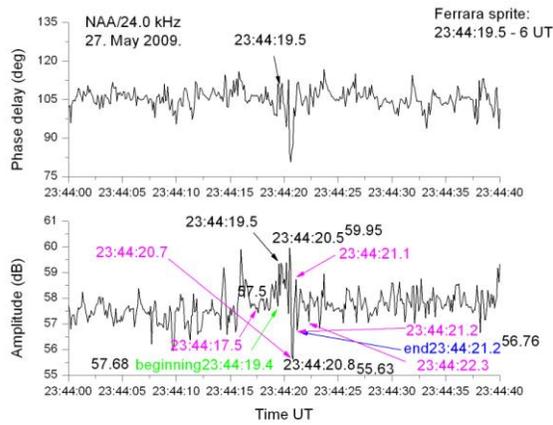
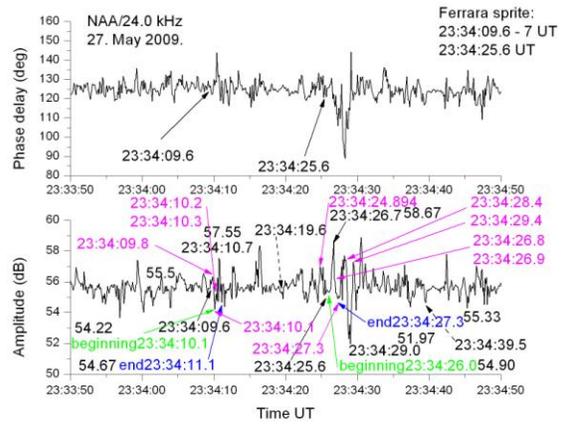
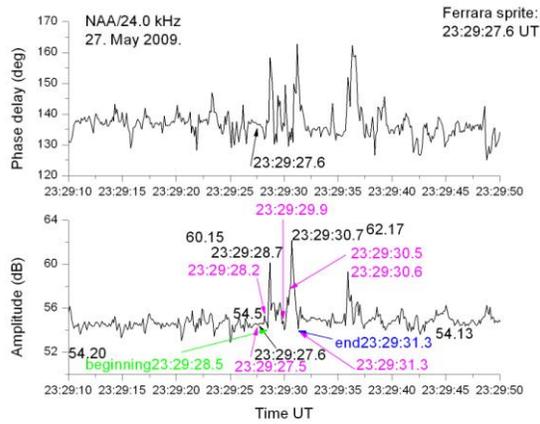


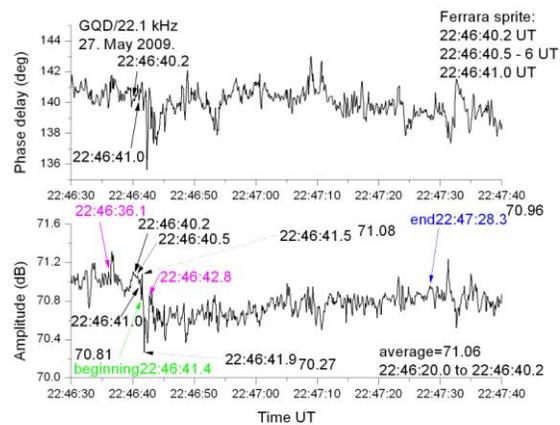
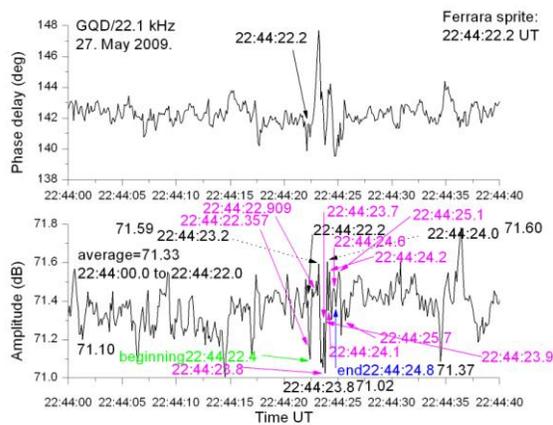
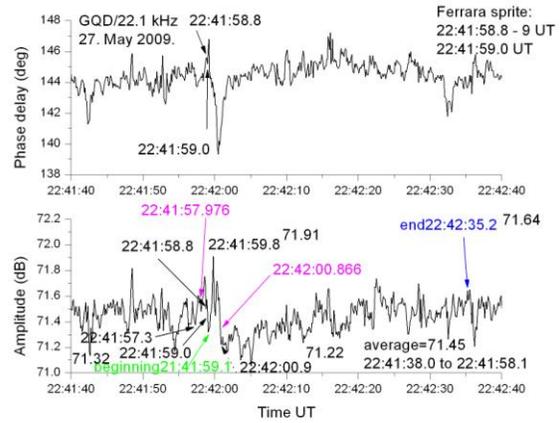
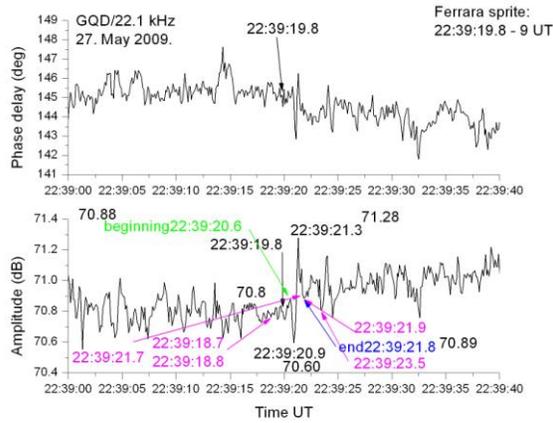
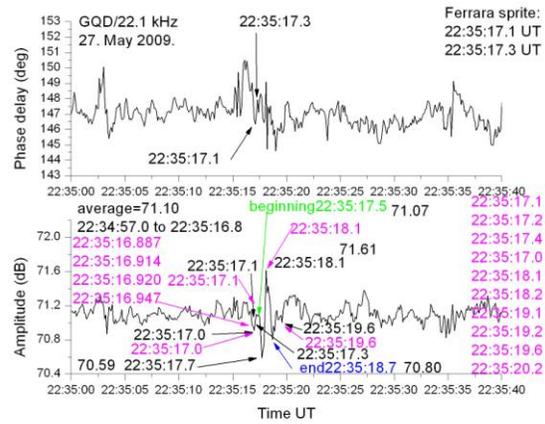
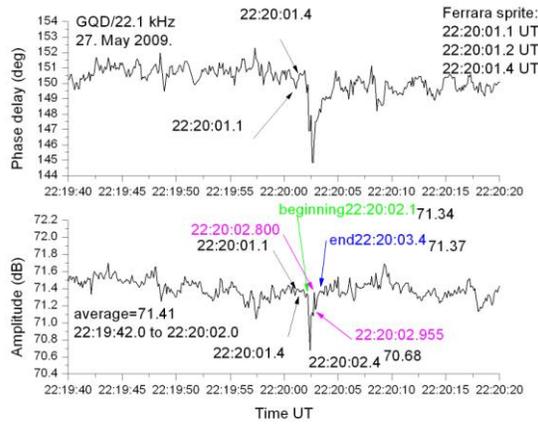


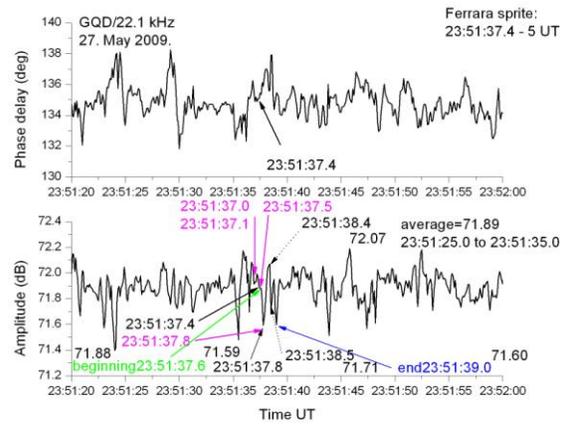
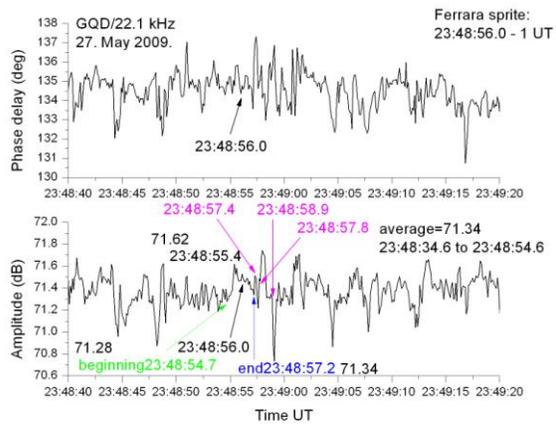
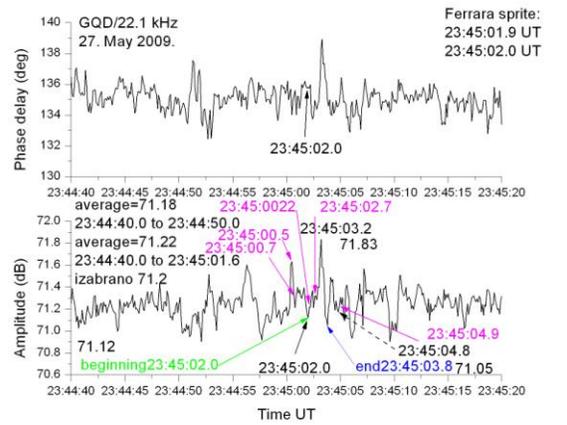
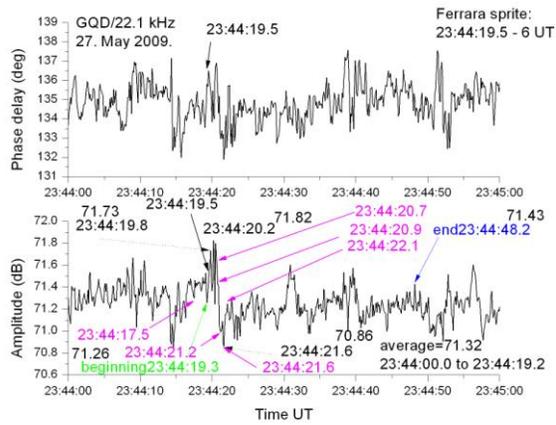
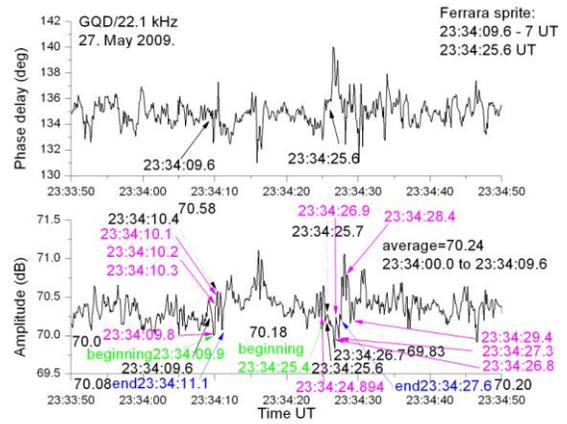
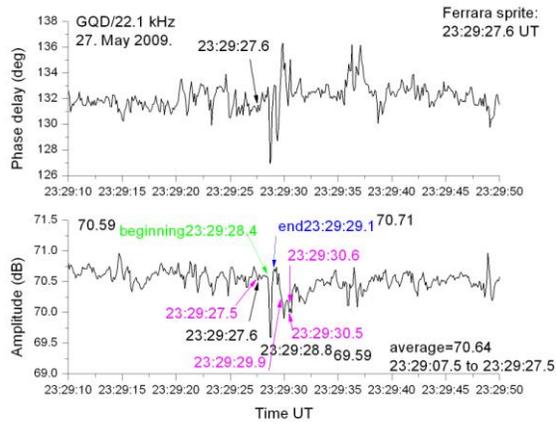


PRILOG 3A. Poremećaji na noćnom NAA/24.0 kHz signalu snimljeni 27. maja 2009. godine u Beogradu; na donjem panelu, y osa je amplituda signala (dB), a na gornjem panelu, faza ($^{\circ}$) signala trase; na oba panela, x osa je UT vreme. Strelice prikazuju UT vremena: roze boja - atmosfersko pražnjenje, crna boja - sprajt i VLF poremećaj (zelena boja - početak, plava boja kraj poremećaja).

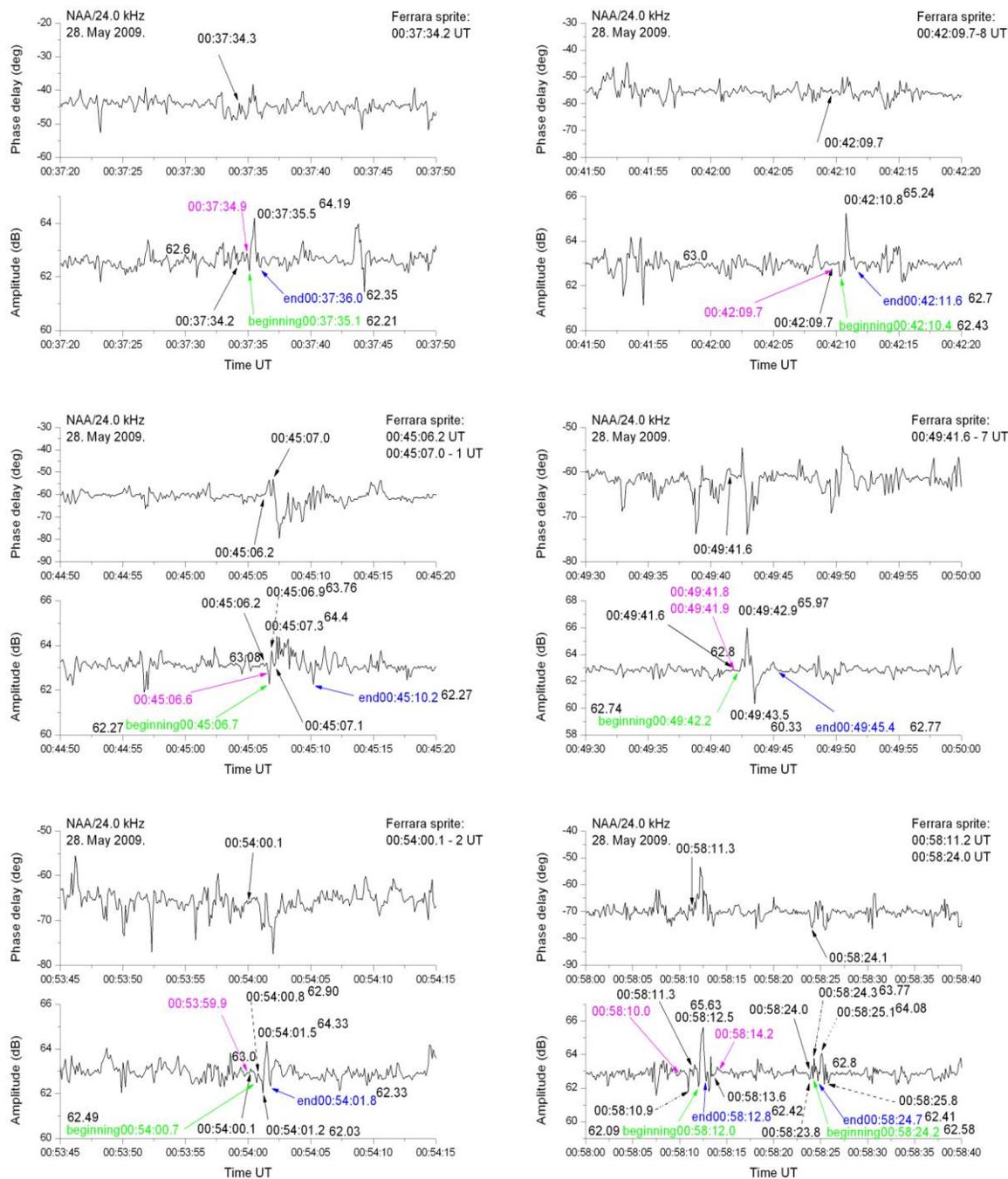


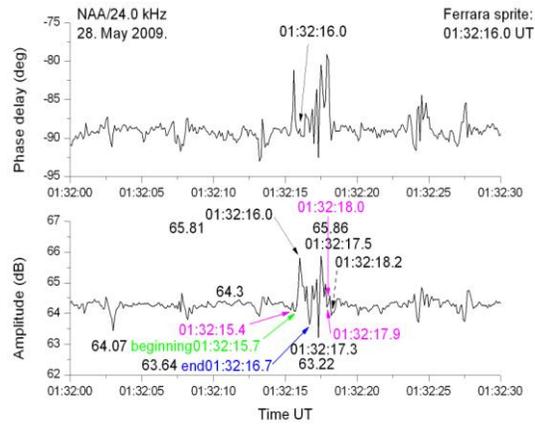
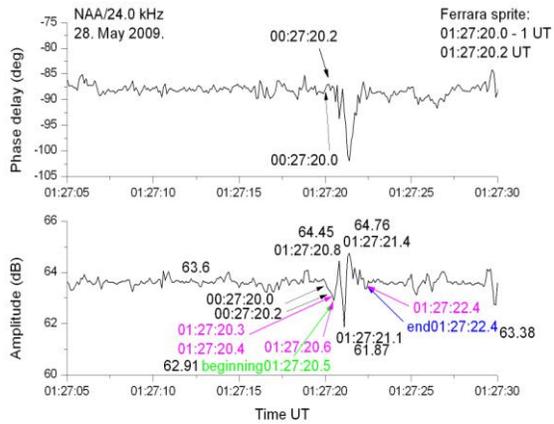
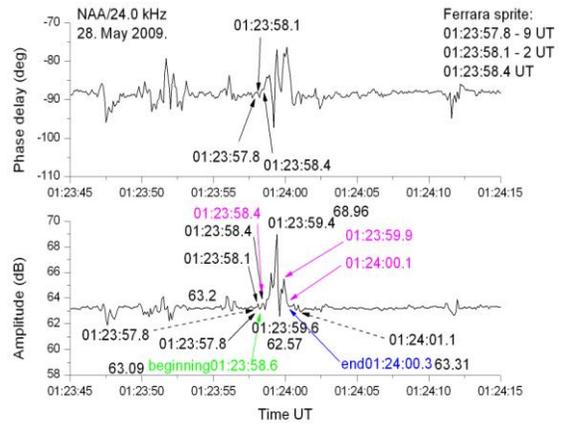
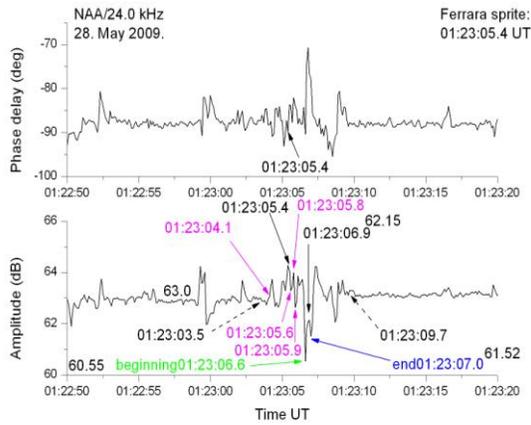
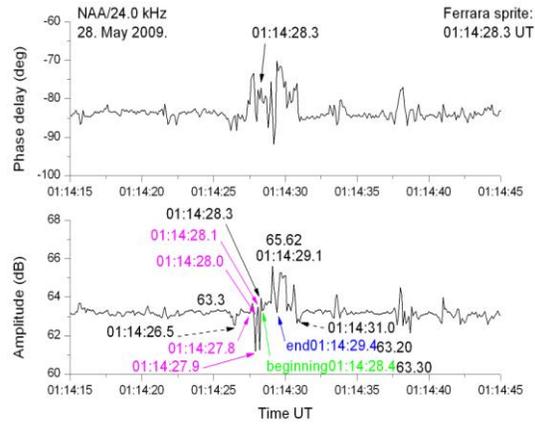
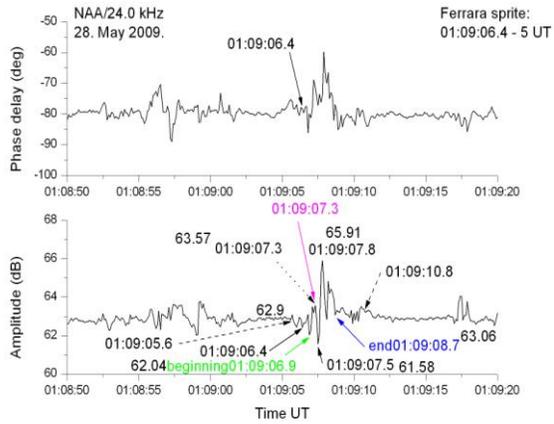


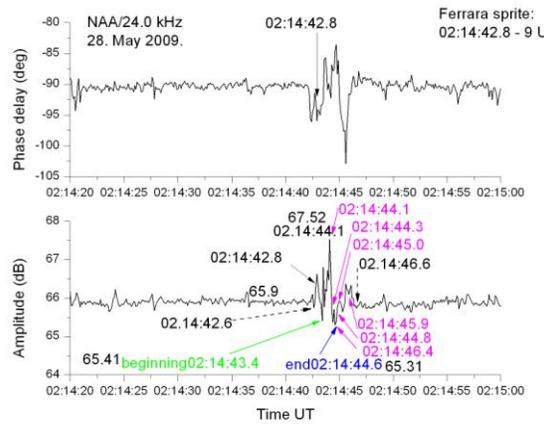
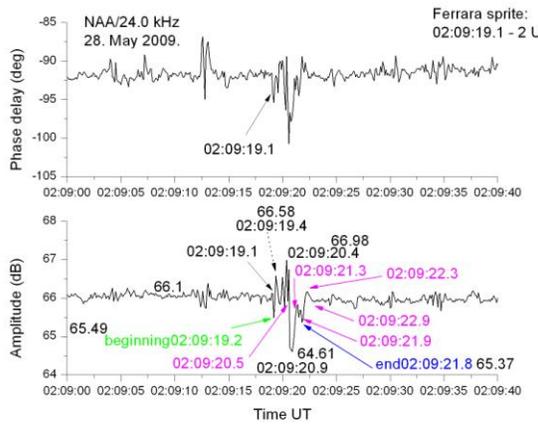
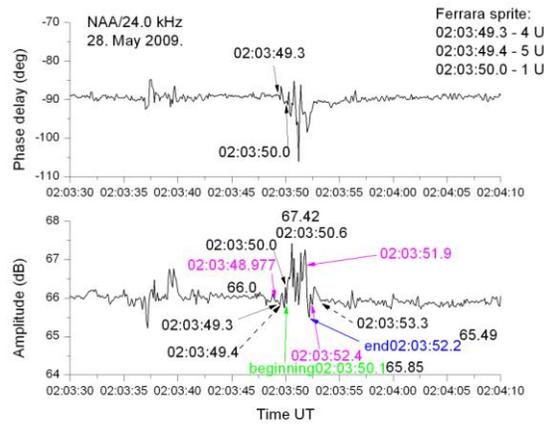
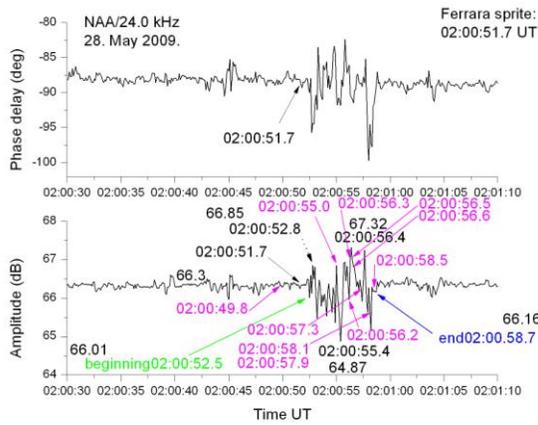
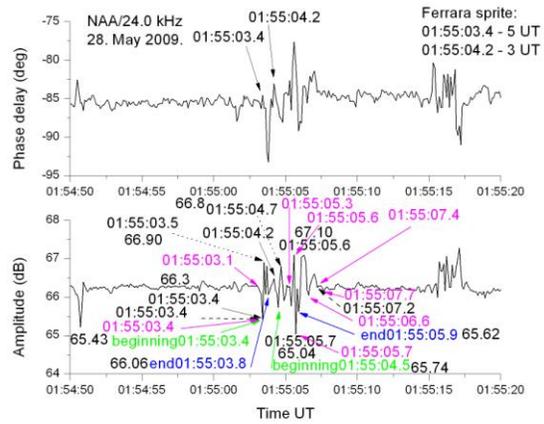
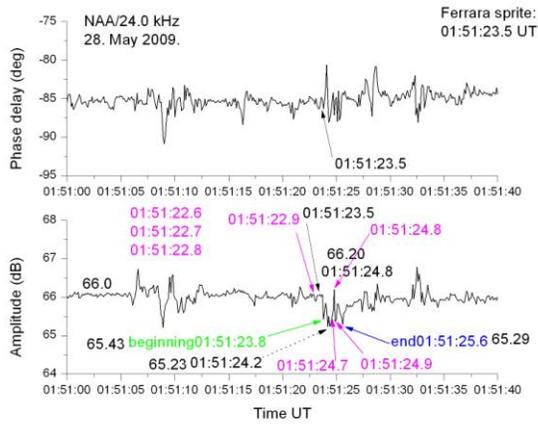




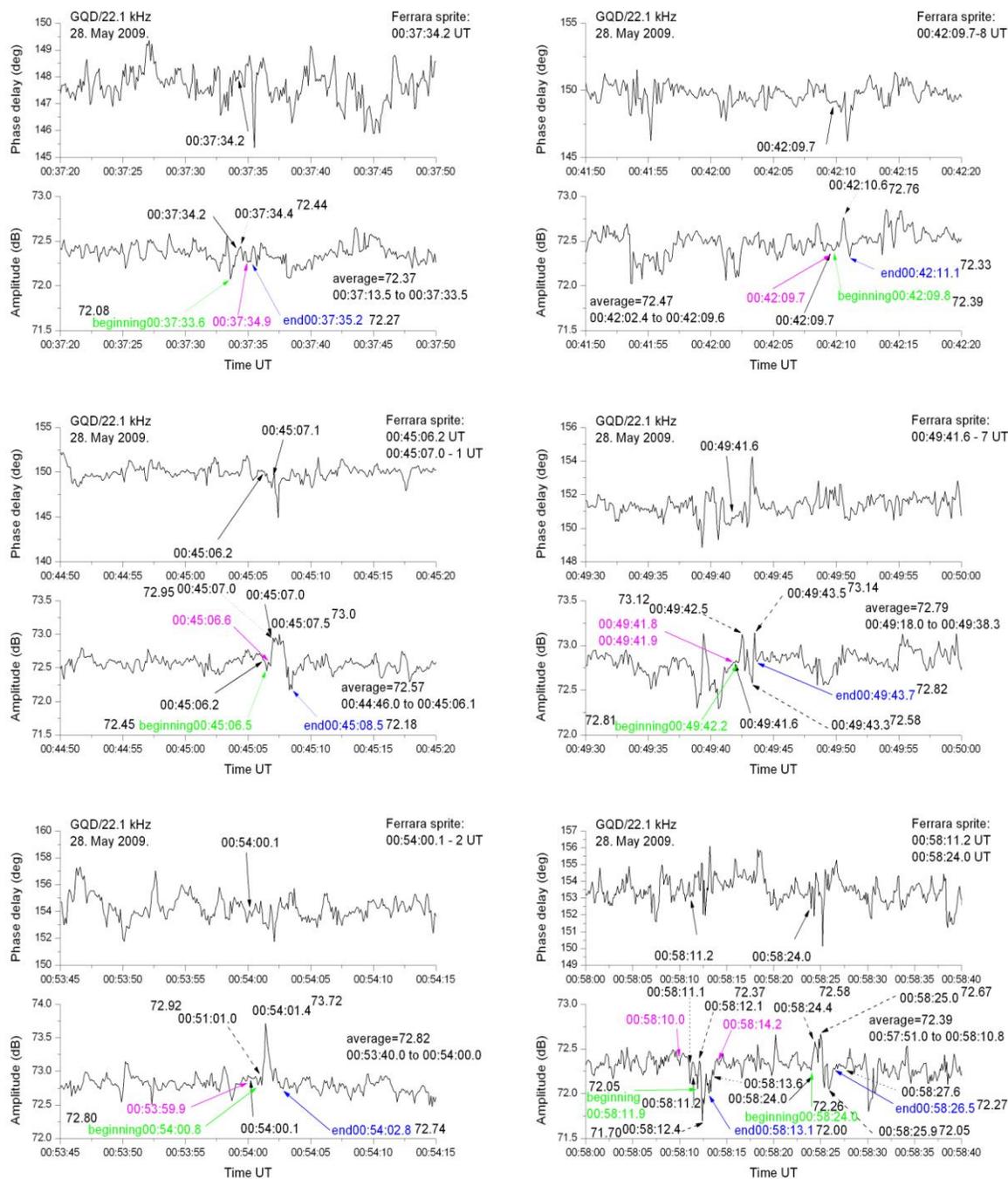
PRILOG 3C. Poremećaji na noćnom NAA/24.0 kHz signalu snimljeni 28. maja 2009. godine u Beogradu; na donjem panelu, y osa je amplituda signala (dB), a na gornjem panelu, faza ($^{\circ}$) signala trase; na oba panela, x osa je UT vreme. Strelice prikazuju UT vremena: roze boja - atmosfersko pražnjenje, crna boja - sprajt i VLF poremećaj (zelena boja - početak, plava boja kraj poremećaja).

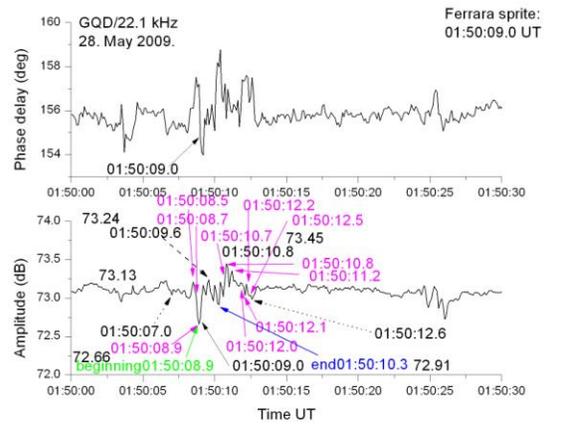
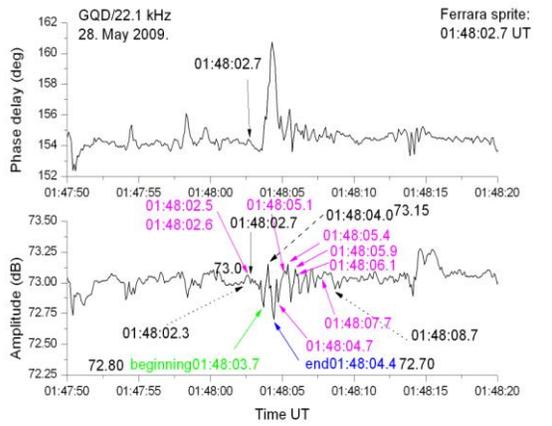
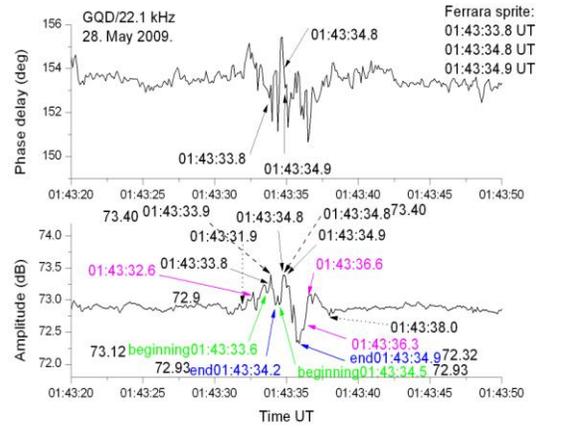
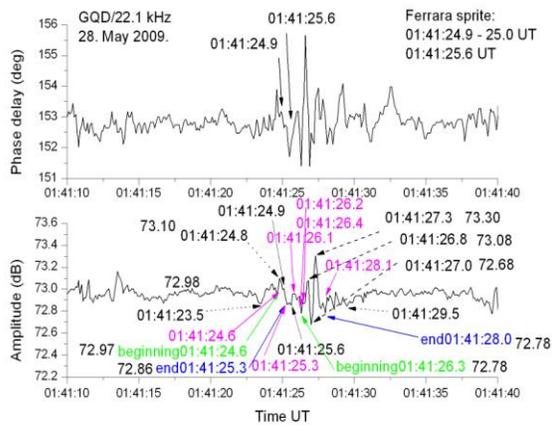
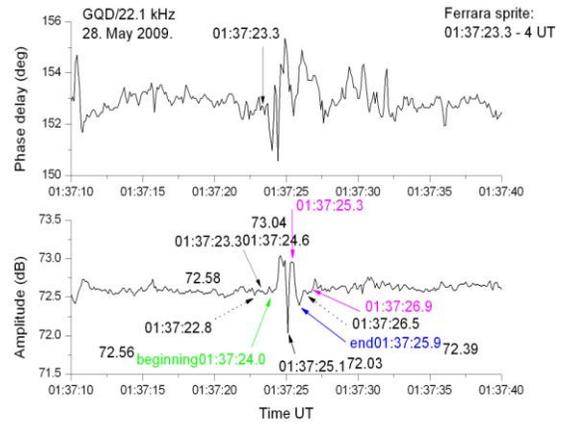
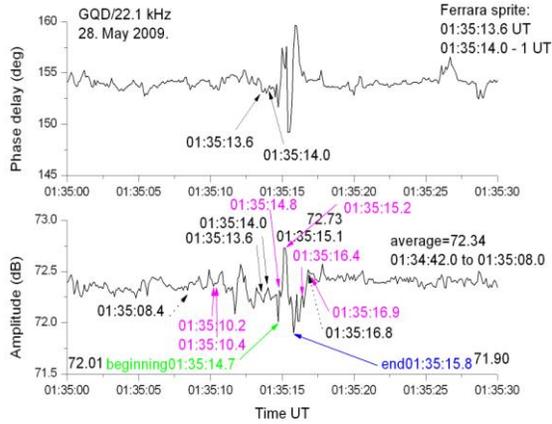


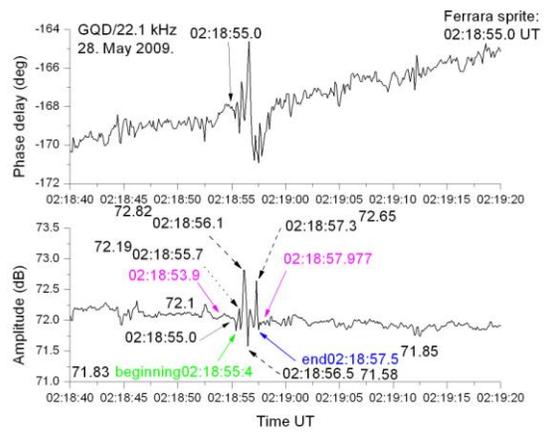




PRILOG 3D. Poremećaji na noćnom GQD/22.1 kHz signalu snimljeni 28. maja 2009. godine u Beogradu; na donjem panelu, y osa je amplituda signala (dB), a na gornjem panelu, faza (°) signala trase; na oba panela, x osa je UT vreme. Strelice prikazuju UT vremena: roze boja - atmosfersko pražnjenje, crna boja - sprajt i VLF poremećaj (zelena boja - početak, plava boja kraj poremećaja).







Biografija

Aleksandra Kolarski rođena je 18. 01. 1978. godine, u Beogradu. Osnovnu školu i prirodno-matematički smer Gimnazije, završila je kao vukovac u Sremskoj Mitrovici. Osnovne studije na smeru za geofiziku, Rudarsko-geološkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, završila je 2004. godine, sa prosečnom ocenom 9.57 i ocenom 10 na diplomskom ispitu, sa diplomskim radom "Određivanje parametara 3D seizmičkih reflektivnih ispitivanja na prostoru Severnog Banata". Magistarske studije završila je 2009. godine sa prosečnom ocenom 10, na smeru za geofiziku - grupa za geomagnetizam i gravimetriju, Rudarsko-geološkog fakulteta, odbranivši magistarsku tezu "Dijagnostika niske jonosfere radio talasima vrlo niskih frekvencija (VLF)". Izradu doktorske disertacije "Elektromagnetska sprega sistema litosfera-atmosfera-jonosfera", započela je 2010. godine, na smeru za geofiziku - grupa za geomagnetizam i gravimetriju, Rudarsko-geološkog fakulteta, pod mentorstvom prof. dr Bobana Marinkovića, kasnije i prof. dr Vesne Damjanović. Zaposlena je u kompaniji NTC NIS Naftagas D.O.O. Novi Sad. Uključena je u Projekat III44002 "Astroinformatika: Primena IT u astronomiji i srodnim oblastima", pod pokroviteljstvom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, koji se odvija u Institutu za fiziku i Astronomskoj opservatoriji u Beogradu. Istraživanje u okviru ove problematike deo je međunarodne akcije COST TD1403 (ranije 724 i ES0803).

Autor je radova:

- Kolarski, A., Grubor, D. (2014). Sensing the Earth's low ionosphere during solar flares using VLF signals and goes solar X-ray data, *Adv. Space Res.*, **53**(11), pp. 1595-1602.
- Kolarski, A., Grubor, D. (2015). Comparative Analysis of VLF Signal Variation along Trajectory Induced by X-ray Solar Flares, *J. Astrophys. Astr.*, **36**(4), pp. 565-579.
- Kolarski, A., Grubor, D., Šulić, D. (2011). Diagnostics of the Solar X-Flare Impact on Lower Ionosphere Through the Vlf-Naa Signal Recordings, *Balt. Astron.*, **20**(4), pp. 591-595.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Александра Б. Коларски

број индекса Г297

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

ЕЛЕКТРОМАГНЕТСКА СПРЕГА СИСТЕМА ЛИТОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ЈОНОСФЕРА

- 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, 22. 04. 2016.

А. Коларски

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Александра Б. Коларски

Број индекса Г297

Студијски програм Геологија

Наслов рада ЕЛЕКТРОМАГНЕТСКА СПРЕГА СИСТЕМА ЛИТОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ЈОНОСФЕРА

Ментор др Бобан Маринковић, ванр. проф. и др Весна Дамњановић, ванр. проф.

Потписани/а Александра Б. Коларски

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, 22. 04. 2016.

А. Коларски

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

ЕЛЕКТРОМАГНЕТСКА СПРЕГА СИСТЕМА ЛИТОСФЕРА-АТМОСФЕРА-ЈОНОСФЕРА

која је моје ауторско дело.

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, 22. 04. 2016.

А. Касарки