

Utjecaj Sunčevih bljeskova na širenje radio valova kroz ionosferu

Štajdohar, Silvia

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:312184>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Silvia Štajdohar

UTJECAJ SUNČEVIH BLJESKOVA NA
ŠIRENJE RADIO VALOVA KROZ
IONOSFERU

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Silvia Štajdohar

Diplomski rad

Utjecaj Sunčevih bljeskova na širenje radio valova kroz ionosferu

Voditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc., Giuliana Verbanac

Zagreb, 2021.

Sažetak

Cilj ovog rada bio je proučiti utjecaj Sunčevih bljeskova na širenje radio valova kroz Zemljinu ionosferu. Ionosfera je plazma, što znači da posjeduje električni naboj koji utječe na propagaciju radio signala. Raspodjela naboja nije uniformna, već se u ionosferi formiraju slojevi različitih gustoća nabijenih čestica i ionskog sastava.

Određeni slojevi po noći nestaju ili dolazi do smanjenja gustoće, signal radio valova je manje prigušen te je izmjereni intenzitet jači. Stoga, signal radio vala propagiranog kroz ionosferu ima karakterističan oblik s većom vrijednošću noću, a manjom tijekom dana.

Sunčeva magnetska aktivnost mijenja se otprilike svakih jedanaest godina i uvelike utječe na ionizaciju i širenje radio valova kroz ionosferu. U maksimumu Sunčevog ciklusa opažamo veću učestalost Sunčevih bljeskova kojima se oslobađa visokofrekventno zračenje. Energije bljeskova su toliko visoke da u kratkom vremenu dolazi do promjene gustoće nabijenih čestica u ionosferi. Jedno takvo razdoblje (rujan 2014.-ožujak 2015.) odabrano je za analizu u ovom radu. Korišteni su intenziteti radio valova mjereni SID (Sudden Ionospheric Disturbance) monitorima na tri prijemnika. Bljesak se manifestira kao nagla i relativno kratkotrajna promjena u intenzitetu radio signala. Moguć je i porast i pad intenziteta signala, a utjecaj bljeska vidljiviji je tijekom dana kada je intenzitet signala općenito slabiji.

U promatranom vremenskom intervalu, pojedini bljeskovi najviših energija (7000 – 20000 keV) primjećeni su na sva tri prijemnika. Bljeskovi manjih energija (100 – 300 keV) detektirani su na pojedinačnim prijemnicima. Za promatrane događaje analizirana je i geomagnetska aktivnost.

Ključne riječi: ionosfera, ionizacija, širenje radio valova, Sunčevi bljeskovi, geomagnetska aktivnost

Influence of solar flares on radio waves propagation through the ionosphere

Abstract

The purpose of this thesis was to examine the influence of solar flares on radio waves propagation through the ionosphere. The ionosphere is made of plasma which indicates the existence of electric charge. That charge can influence radio waves propagation. Charge distribution is non-uniform, it is layered and different layers have different charged particle densities and contain different types of ions.

Some layers disappear at night or the density decreases, which leads to decreased radio waves attenuation and the intensity of the radio signal increases. During the day, intensity decreases.

The magnetic activity of the Sun follows a quasi-periodic, approximately 11 years long cycle, during which the magnetic polarity reverses. The solar activity influences the state of the Earth's ionosphere. During the solar cycle maximum, solar flares occur more frequently. Each flare releases an amount of energy, in the form of high frequency radiation, high enough to instantly cause changes in the Earth's ionosphere. In this thesis we have analysed the time interval from September 2014 to March 2015, the maximum of the 24th solar cycle, by analyzing the data obtained by three SID (Sudden Ionospheric Disturbance) monitors. The solar flares can be detected on a radio signal in a form of a sudden and relatively short signal change. Both decrease and increase in the signal intensity can occur. The influence of the flare is more easily seen during the day when the intensity is showing lower values.

Some flares, within the highest energy range (7000 – 20000 keV) were detected on each of the three monitors. Lower energy flares (100 – 300 keV) were detected on a single monitor. Geomagnetic activity for each of the studied solar events was also analysed.

Keywords: ionosphere, ionization, radio waves propagation, Solar flares, geomagnetic activity

Sadržaj

Popis kratica	1
1. Teorijski uvod	2
1.1. Sunčeva aktivnost	2
1.1.1.1.Sunčevi bljeskovi	4
1.2. Ionosfera	5
1.2.1.1.Procesi ionizacije	6
1.2.1.2.Gubitak ionizacije	8
1.2.1.3.Vertikalni profili parametara u ionosferi	9
1.3. Geomagnetska aktivnost	12
2. Širenje radiovalova kroz ionosferu	14
3. Motivacija i cilj	19
4. Podaci	20
4.1. Prijemnici i predajnici	21
5. Rezultati	23
5.1. Događaj 8.9.2014.	23
5.2. Događaj 16.10.2014.	25
5.3. Događaj 18.10.2014.	29
5.4. Događaj 24.10.2014.	32
5.5. Događaj 12.3.2015.	35
6. Diskusija i zaključak	39
7. Literatura	40
Dodatak A	42
A1. Odabir podataka	42
A2. Geomagnetski indeksi	43

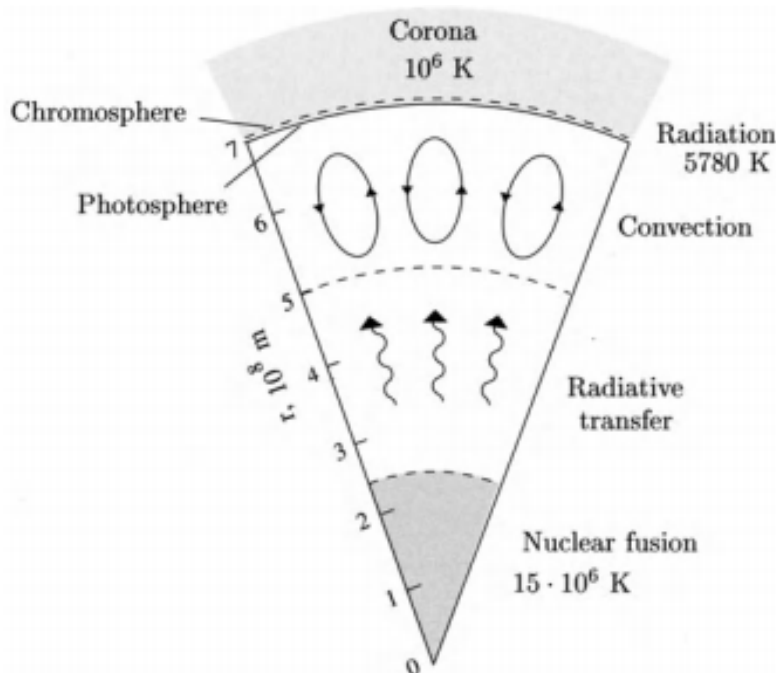
Popis kratica

GFO	Geofizički odsjek, Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu
g.š.	geografska širina
g.d.	geografska dužina
UV	engl. <i>Ultra Violet</i> , ultraljubičasto
EUV	engl. <i>Extremely Ultra Violet</i> , ekstremno ultraljubičasto
EM	elektromagnetski
R_Z	radijus Zemlje
VHF	engl. <i>very high frequency</i> , vrlo visoke frekvencije
VLf	engl. <i>very low frequency</i> , vrlo niske frekvencije
SID	engl. <i>Sudden Ionospheric Disturbance</i> , iznenadni ionosferski poremećaj

1. Teorijski uvod

1.1. Sunčeva aktivnost

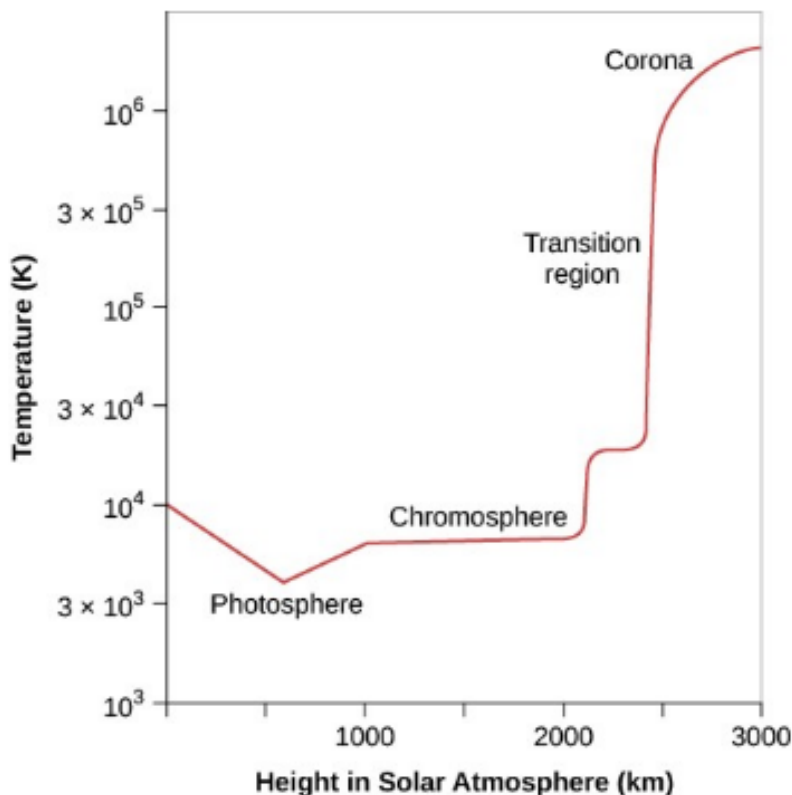
Razumijevanje Sunčeve aktivnosti ključno je za razumijevanje geomagnetske aktivnosti i ionosfere zbog međudjelovanja Sunčevog magnetskog polja sa Zemljinim te uloge Sunčevog zračenja kao primarnog pokretača ionizacijskih procesa u Zemljinoj ionosferi. Sunce se sastoji pretežito od vodika (cca 70 %) i helija (cca 25 %), dok ostatak čine teži elementi, a zbog izrazito visokih temperatura, reda veličine od 10^6 na površini i 10^7 u unutrašnjosti, dolazi do stvaranja plazme. Plazma je kvazineutralan plin, gledajući u cjelini je neutralna, ali po dijelovima posjeduje električni naboj. Pa stoga, Sunce čine protoni, elektroni i alfa čestice (He^{2+}). Procesima nuklearne fuzije u jezgri oslobađaju velike količine energije. Oslobodena energija se prvo zračenjem prenosi od jezgre prema vanjskim dijelovima kroz dio Sunca koji nazivamo zona radijacije, a zatim se mijenja način prijenosa te se energija dalje konvekcijom prenosi dalje prema površini kroz zonu konvekcije, a onda dolazi do površine Sunca, fotosfere. Fotosfera je vidljivi, najsvjetliji dio Sunca debljine oko 100 km (što je vrlo tanko u usporedbi s radijusom Sunca od 700 000 km) u kojem je gustoća dovoljno mala da fotoni koji prenose energiju od unutrašnjosti mogu "pobjeći". Iznad fotosfere prostire se slabo vidljivi sloj debljine do 3000 km koji nazivamo kromosfera te slijedi korona. Shematski prikaz unutrašnjosti Sunca prikazan je na slici 1.1.



Slika 1.1. Unutrašnjost Sunca. Jezgra, zona prijenosa zračenja, zona konvekcije, fotosfera te tzv. atmosfera Sunca: kromosfera i korona. Preuzeto iz [1].

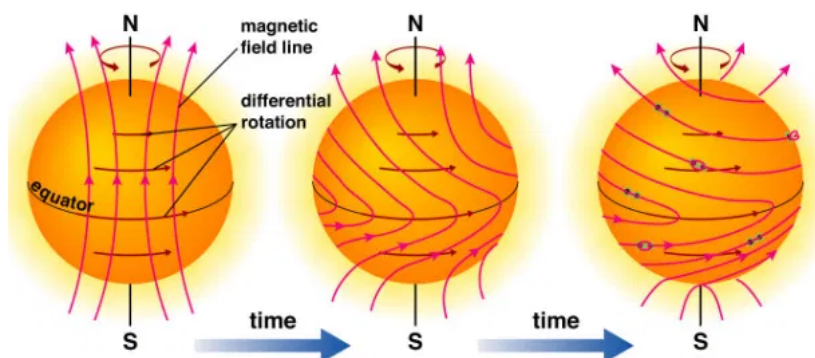
Temperatura na površini Sunca ponaša se neočekivano, rastući od fotosfere prema koroni (slika 1.2) pa je zbog visokih temperatura i površina Sunca veoma aktivno područje s fenomenima poput solarnih bljeskova, Sunčevog vjetra i koroninih izbacaja mase, koji su svi karakterizirani oslobađanjem velikih količina energije, u obliku

zračenja i u obliku čestica visoke energije.



Slika 1.2. Temperaturni profil površine Sunca. Preuzeto s [29].

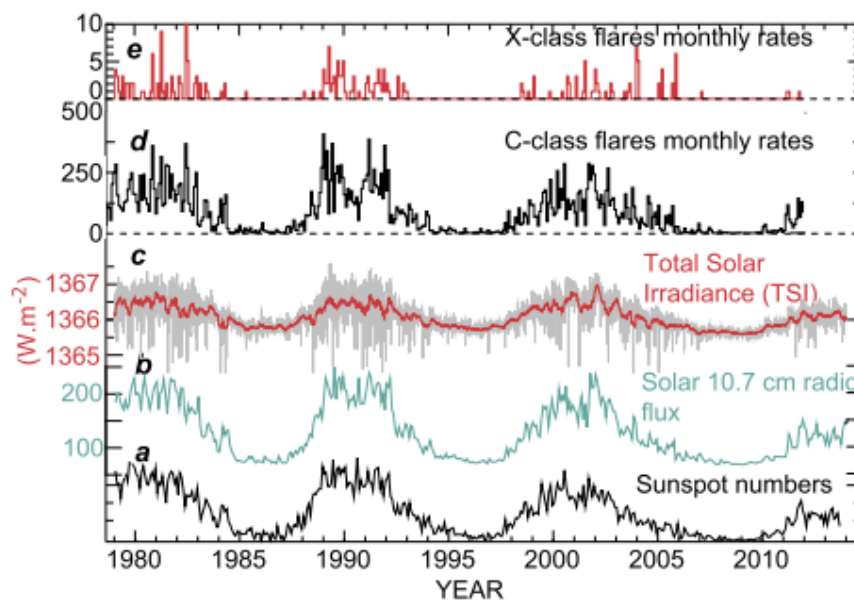
Sunčeva aktivnost prati skoro periodični ciklus, trajanja od otprilike jedanaest godina. Promjene u Sunčevom ciklusu uzrokovane su Sunčevim magnetskim poljem koje otprilike svakih jedanaest godina mijenja polaritet. Uzrok promjene polariteta je diferencijalna rotacija Sunca, rotacija koja se općenito primjećuje kod objekata koji nemaju čvrstu površinu. Rotacija traje 25 dana na ekvatoru te 35 dana na polovima [13]. Uslijed takve rotacije dolazi do izvijanja silnica magnetskog polja (slika 1.3) te se magnetsko polje polako smanjuje na polovima, a nakon što postigne vrijednost nula, dolazi do zamjene polova. Sjeverni magnetski pol postaje južni i obrnuto.



Slika 1.3. Izvijanje silnica magnetskog polja Sunca uzrokovano diferencijalnom rotacijom. Preuzeto s [30].

Zamjena polova označava vrhunac ciklusa te solarni maksimum, a do minimuma dolazi na početku i kraju ciklusa. U Sunčevom ciklusu mijenjaju se sljedeći parametri (iz [12]), prikazano na slici 1.4:

- učestalost Sunčevih bljeskova,
- solarna konstanta (oko 0.1%),
- tok kratkovalnog Sunčevog zračenja, UV, EUV i X zračenja,
- broj Sunčevih pjega,
- učestalost bljeskova, koroninih izbačaja mase i posljedično geomagnetskih oluja.



Slika 1.4. Promjene broja Sunčevih bljeskova X i C kategorija, ukupnog zračenja, radio toka i broja Sunčevih pjega od 1979 do cca 2010., preuzeto iz [2].

1.1.1.1. Sunčevi bljeskovi

Uobičajeni način praćenja Sunčevog ciklusa je praćenje broja Sunčevih pjega, no može se pratiti bilo koji od navedenih parametara. Ono što nas posebno zanima u ovom radu je učestalost i intenzitet bljeskova. Bljeskovi su eksplozije na površini Sunca do kojih dolazi zbog pomicanja i ispreplitanja magnetskih silnica, trajanja od svega nekoliko minuta do tridesetak minuta. Učestala su pojava te se svaki dan opaža više desetaka slabijih bljeskova. Učestalost im raste oko solarnog maksimuma (slika 1.5), a raste i količina energija oslobođena u obliku zračenja. Tijekom bljeska oslobađaju se velike količine energije koja u obliku zračenja (vidljivo zračenje, UV, EUV i X) dolazi i do Zemlje. Radi se o EM valovima koji putuju brzinu svjetlosti pa je utjecaj na Zemljinu ionosferu na dnevnoj strani Zemlje gotovo trenutnan. Bljeskovima se ubrzava plazma sa Sunca, a potencijalno može ući u Zemljinu magnetosferu. Uz pojačano zračenje

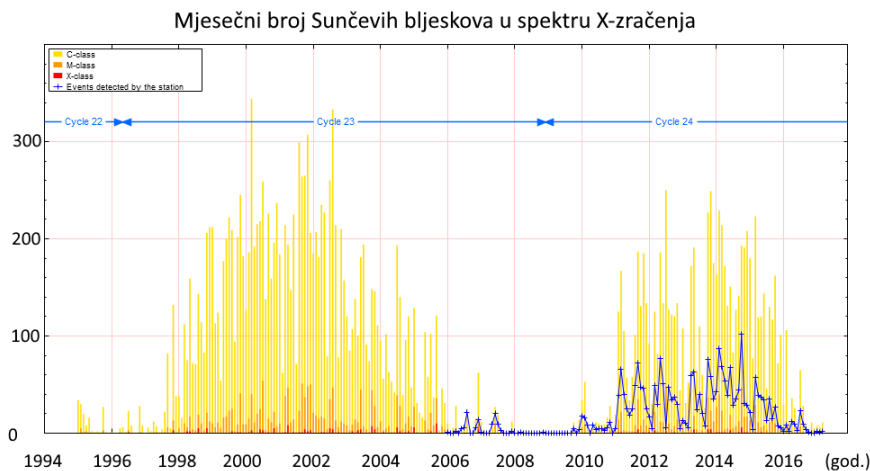
dostupno je više energije za ionizacijske procese. Utjecaj bljeska ne očekujemo na trenutno neozračenju (noćnoj) strani Zemlje.

Sunčevi bljeskovi dijele se po ukupnom toku zračenja u intervalu valnih duljina 0.1–0.8 nm (izmjenom XRS (X-ray Sensor) instrumentom smještenim u GOES-15 satelitu čija je orbita geostacionarna) na, [24]:

kategorija	tok zračenja [W/m ²] u intervalu valnih duljina 0.1-0.8 nm
A	$< 10^{-7}$
B	$\geq 10^{-7} < 10^{-6}$
C	$\geq 10^{-6} < 10^{-5}$
M	$\geq 10^{-5} < 10^{-4}$
X	$\geq 10^{-4}$.

Tablica 1.1. Podjela Sunčevih bljeskova po ukupnom toku zračenja valne duljine između 0.1 i 0.8 nm.

Sunčev (solarni) vjetar prenosi energiju sa Sunca u obliku čestica visoke energije. Radi se o konstantnom toku plazme, pretežito sastavljenje od elektrona (e^-) i protona (p^+), a česice se s različitih regija Sunca emitiraju u različitim gustoćama i različitom brzinom [23]. Čestice visoke energije mogu ući u Zemljinu atmosferu na polarnom području te pridonijeti ionizaciji. Osim čestica, Sunčev vjetar sa sobom nosi i magnetsko polje Sunca.



Slika 1.5. Učestalost bljeskova X zračenja. Originalna verzija slike preuzeta je s [11] i modificirana je za potrebe ovog rada. Obratiti pažnju na vremensko razdoblje rujana-listopada 2014.

1.2. Ionosfera

Ionosfera je ionizirana komponenta gornje atmosfere Zemlje koja se proteže od otprilike 50 do 1000 km, a točne granice variraju ovisno o Sunčevoj aktivnosti. Sastoji se od plazme, dakle, kao cjelina je neutralna, odnosno ukupna gustoća pozitivnih iona jednaka je ukupnoj gustoći elektrona, a negativni ioni su dovoljno rijetki da ih zanemarimo. Nabijene čestice omogućuju tok električne struje što vodi do perturbacija

geomagnetskog polja te elektrodinamičkog zagrijavanja gornje atmosfere, utječu na dinamiku strujanja u termosferi te modificiraju elektromagnetske (EM) valove. Kako bismo razumijeli utjecaj ionosfere na širenje EM valova, bitno je prvo odrediti vertikalni profil gustoće iona, temperature, raspodjelu pojedinih vrsta iona kao i varijabilnost navedenih svojstava kroz dan, godinu i Sunčev ciklus.

Glavni pokretač ionizacije je Sunčevo zračenje. Iz tog razloga, broj nabijenih čestica veći je tijekom dana, odnosno na dnevnoj strani Zemlje. Procesi gubitka naboja događaju se prilikom sudara nabijenih čestica što upućuje da im učestalost raste s rastom gustoće nabijenih čestica te su dominantni noću, u odsutstvu ionizacije uzrokovane Sunčevim zračenjem, a s dovoljnom gustoćom zbog iona nastalih tijekom dana.

1.2.1.1. Procesi ionizacije

Primarni proces nastajanja nabijenih čestica u ionosferi je fotoionizacija termosferskih plinova Sunčevim EUV zračenjem i X-zrakama. Sekundarni procesi ionizacije uključuju ionizaciju fotoelektronima te izmjene naboja. Specifično je za polarno područje da ionizaciji doprinosi precipitacija čestica visoke energije iz Sunčevog vjetra.

Fotodisocijacija

U fotodisocijaciji ne nastaju nabijene čestice, već se molekule razlažu na atome koji kasnije mogu biti ionizirani. Općenita forma fotodisocijacije je



gdje je X bilo koji atom, odnosno X_2 bilo koja molekula, a budući da su najzastupljenije molekule O_2 i N_2 [1], najčešći procesi fotodisocijacije su



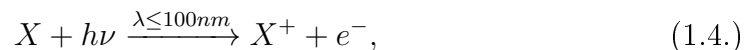
Nastali atomi kisika i dušika mogu dalje ulaziti u sljedeće procese primarne ili sekundarne ionizacije.

Primarna fotoionizacija.

Primarnom fotoionizacijom smatramo ionizaciju uzrokovanu kratkovalnim ($\lambda \lesssim 100$ nm) zračenjem, a može biti nedisocijativna ili disocijativna.

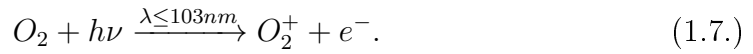
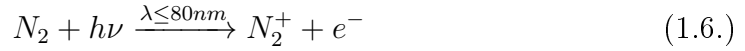
- **Nedisocijativna fotoionizacija**

Općeniti oblik nedisocijativne fotoionizacije glasi



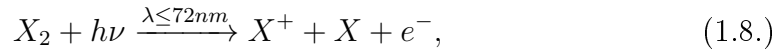
gdje je X bilo koji atom ili molekula. Kako su O , N_2 i O_2 najzastupljeniji plinovi u gornjoj atmosferi, najbitniji procesi ionizacije su





- **Disocijativna fotoionizacija**

U disocijativnu fotoionizaciju ulazi molekula iz koje tijekom procesa nastaju pozitivan ion, neutralan atom i slobodni elektron, a općenita forma glasi



u kojoj je X jednakog značenja kao i u prethodnim primjerima. Kao i kod foto-disocijacije, nastali neutralni atom može dalje ulaziti u ostalne procese ionizacije. Primjetimo da, budući da je disocijativna fotoionizacija svojevrsna kombinacija fotodisocijacije i nedisocijativne fotoionizacije, potreba je veća energija, odnosno zračenje kraćih valnih duljina kako bi se proces uopće mogao odvijati.

Uočimo da su za različite procese primarne ionizacije potrebna zračenja različitih valnih duljina, odnosno različitih energija.

Sekundarna ionizacija

Sekundarnom ionizacijom smatramo ionizaciju koja nije direktno uzrokovana zračenjem sa Sunca, a uključuje procese izmjene naboja te ionizaciju fotoelektronima ili drugim česticama visoke energije.

- **Procesi izmjene naboja**

Procesi izmjene naboja imaju općenitu formu



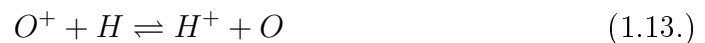
a nakon izmjene gustoća ionizacije ostaje nepromijenjena jer je broj nabijanih čestica jednak. Konkretni primjeri izmjene naboja u ionosferi su



zatim, kao bitni izvori iona O_2^+ u ionosferi

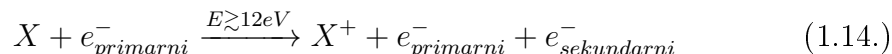


te, kao glavni izvor H^+ iona u gornjoj ionosferi, tzv. plazmasferi ($h \gtrsim 1000$ km).



- **Precipitacija čestica visokih energija**

Osim fotona, u procesu ionizacije mogu sudjelovati i ostale čestice visokih energija što je posebno izraženo na višim geografskim širinama. Dospjeli elektron visoke energije uzrokovat će sljedeću reakciju

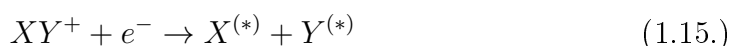


1.2.1.2. Gubitak ionizacije

Činjenica da se procesi ionizacije događaju konstantno na dnevnoj strani Zemlje, a gustoća ionizacije ne raste konstantno, vodi na zaključak da se naboji gube u procesima koje nazivamo rekombinacije. Za razliku od ionizacije za koju je potrebna energija u vidu zračenja ili čestica visoke energije, za rekombinacije je dovoljno da su prisutni ioni, dakle rekombinacije se odvijaju i danju i noću, a noću su, u odsutnosti ionizacije, dominantan proces. Proces gubitka naboja su sljedeći:

- **Disocijativna rekombinacija molekularnih iona**

Disocijativna rekombinacija molekularnih iona dana je općenitom formom



Gdje X i Y označavaju atome, a XY molekulu. Konkretni primjeri rekombinacija su



- **Radijativna rekombinacija atomskih iona**

Općenita forma radijativne rekombinacije glasi



odnosno



- **Izmjena naboja**

Izmjena naboja istovremeno je proces stvaranja i nestajanja iona, a sam proces ne mijenja gustoću ionizacije u određenom sloju.



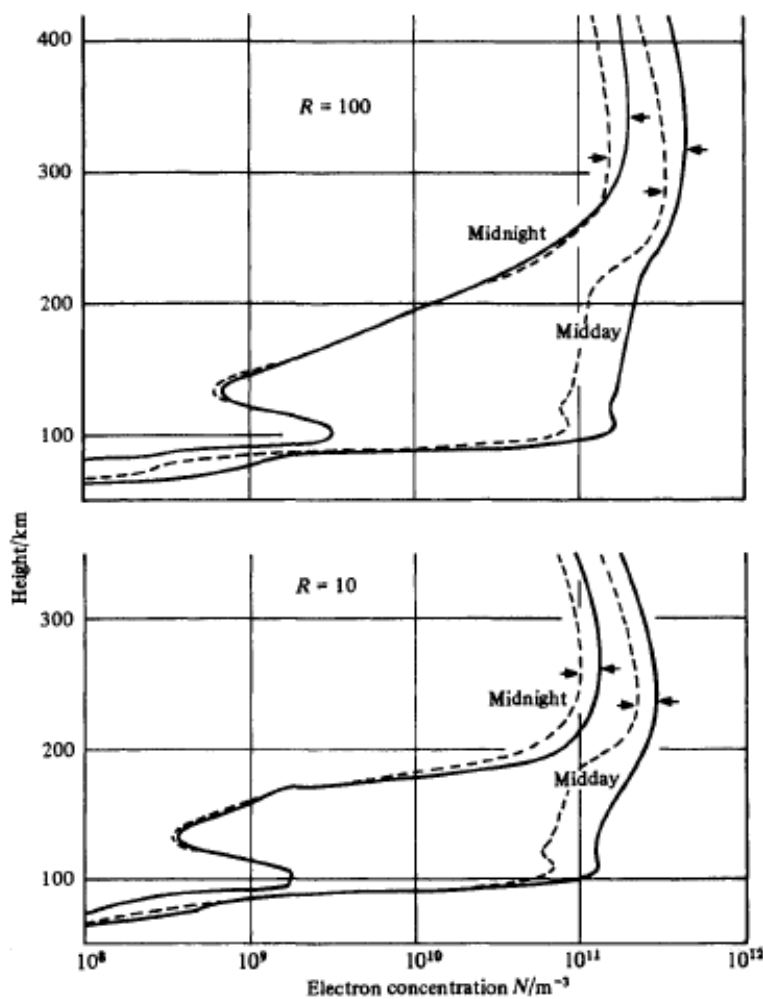
1.2.1.3. Vertikalni profili parametara u ionosferi

Najbitnije svojstvo ionosfere je gustoća nabijenih čestica. Budući da je ionosfera kvazineutralna, gustoća pozitivnih iona je gotovo jednaka gustoći elektrona, [1],

$$n_i = \sum_j n_j \simeq n_e = n, \quad (1.22.)$$

gdje je n_i gustoća pozitivnih iona, n_j parcijalna gustoća pojedinih iona, n_e gustoća elektrona, a n ukupna gustoća pozitivnih iona ili elektrona, ali ne i ukupna gustoća nosioca naboja. Udio negativnih iona je zanemariv.

Gustoća se mijenja tijekom dana, tijekom godine te tijekom Sunčevog ciklusa, kao što je prikazano na slici 1.6.



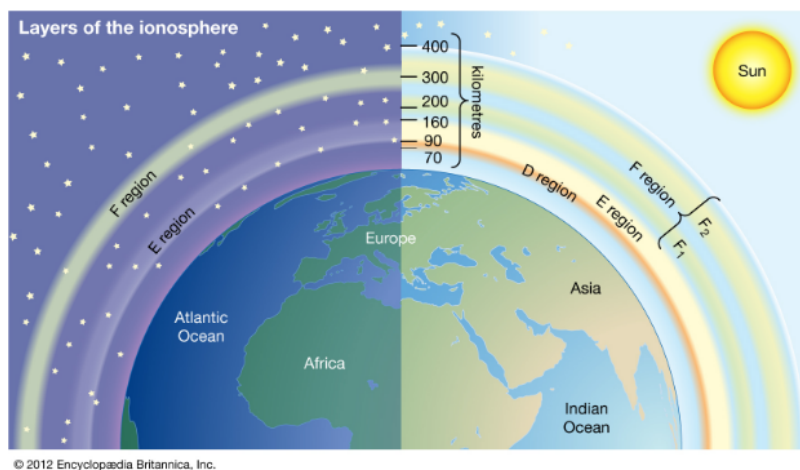
Slika 1.6. Gustoća nabijenih čestica u ionosferi za godinu blizu minimuma broja Sunčevih pjega ($R = 10$) i godinu blizu maksimuma broja Sunčevih pjega ($R = 100$), za ponoć i podne. Punom linijom označene su vrijednosti gustoće čestica u srpnju, a crtkanom linijom vrijednosti u siječnju. Preuzeto iz [3].

Na 1.6 uočavamo da je gustoća znatno veća u podne nego u ponoć što je očekivano s obzirom na to da su tijekom dana dominantni procesi fotoionizacije, a noću procesi

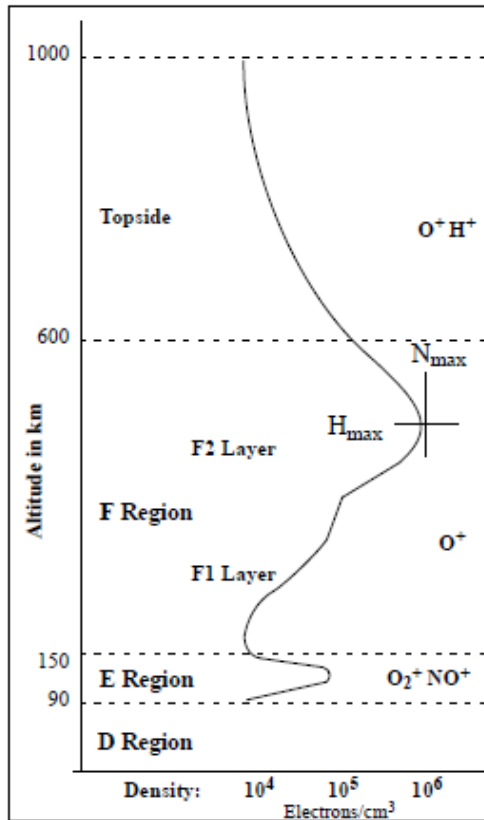
rekombinacije. Također uočavamo da je gustoća veća u srpnju, nego u siječnju (radi se o Sjevernoj hemisferi) što pripisujemo razlici u kutu upada Sunčevih zraka te uočavamo veću gustoću u godini blizu solarnog maksimuma, odnosno maksimuma ukupnog zračenja i učestalosti bljeskova, [3].

Karakteristično za ionosferu je formiranje slojeva s različitom gustoćom nabijenih čestica i sastavom iona, što je prikazano na slici 1.7. Glavni uzrok razlike u gustoći nabijenih čestica je razlika u intenzitetu i energiji zračenja koje dopire do određene visine pa zbog toga gustoća raste do otprilike 300 km jer se na višim visinama apsorbira više zračenja. Nakon toga gustoća nabijenih čestica pada jer osim zračenja, na gustoću nabijenih čestica utječe i broj (nenabijenih) čestica dostupnih za ionizaciju, a njihov broj pada s visinom (slika ??). Razlikujemo tri sloja: D, E i F, od kojih F dijelimo na sva podsloja, F_1 i F_2 , a visine na kojima se rasprostiru variraju primarno na dnevnoj i sezonskoj skali (iz [5] i [6]).

- D sloj
 - 50-90 km.
 - Prisutan isključivo tijekom dana, noću u potpunosti nestaje jer se zbog relativno visoke gustoće čestica rekombinacije događaju često.
- E sloj
 - 100-125 km.
 - Slično kao u D sloju, gustoća čestica je i dalje dovoljno velika da se rekombinacije odvijaju često pa sloj praktički nestaje tijekom noći, iako je za razliku od D sloja prisutna slaba ionizacija.
- F sloj
 - Najznačajniji utjecaj na širenje EM valova.
 - Najvarijabilniji sloj, znatno varira ovisno o dobu dana i sezoni.
 - F_1 podsloj prostire se iznad 300 km ljeti te iznad 200 km zimi.
 - F_2 podsloj prostire se iznad 400 km ljeti te iznad 300 km zimi.



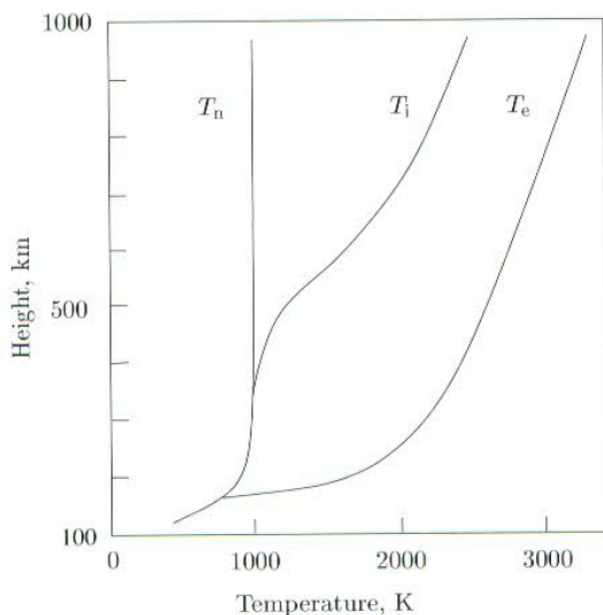
Slika 1.7. Pojednostavljeni prikaz slojeva danju i noću. Preuzeto s [13].



Temperaturni profil

Tipični temperaturni profil za srednje geografske širine i dane sa slabom Sunčevom aktivnošću prikazan je na slici 1.8. Razmatramo temperature iona te elektrona u usporedbi s temperaturom neutralnog plina. Temperatura elektronskog plina jednaka je temperaturi neutralnog plina do otprilike 150 km, nakon čega temperatura neutralnog plina ubrzo dosegne maksimalnu vrijednost. Ona ostaje konstantna, a temperatura elektronskog plina raste s visinom što implicira na izvor topline u plazmasferi.

Temperatura ionskog plina jednaka je temperaturi neutralnog plina do otprilike 350 km kao posljedica jače interakcije neutralnog plina i ionskog plina u usporedbi s interakcijom između neutralnog i elektronskog plina. Nakon 350 km raste, ali ne dostiže vrijednosti temperature elektronskog plina. Razlika u temperaturama između navedene tri komponente uzrokuje konstantni tok topline od elektronskog plina k ionskom te od ionskog plina k neutralnom, a iznad 250 km ionski i elektronski plin su glavni izvor topline neutralnog plina. Sve navedeno vrijedi na dnevnoj strani Zemlje, dok noću temperature rapidno padaju, do izjednačenja, te vrijedi $T_n \approx T_i \approx T_e$ [1].



Slika 1.8. Temperaturni profil u ionosferi. Preuzeto iz [1].

1.3. Geomagnetska aktivnost

Da bi planet imao magnetsko polje moraju biti zadovoljeni sljedeći uvjeti: vodljivi tekući materijal u unutrašnjosti i dovoljno brza rotacija. Kod Zemlje se radi o tekućoj vanjskoj jezgri, sastavljenoj od metala, pretežito željeza. Gibanje tekućeg metala u jezgri najjednostavnije možemo opisati kao turbulentnu konvekciju, termalnu i kemijsku, a rotacija Zemlje dodatno usmjerava gibanje te doalzi do generiranja električnog i magnetskog polja. Nastalo magnetsko polje nazivamo glavno polje, jer je ono glavna komponenta u ukupnom polju kojem također doprinose polja interplanetarnog prostora i Sunca te slabo polje uzrokovano magnetskim materijalima u kori. Ukupno polje je dipolno u prvoj aproksimaciji.

Geomagnetski indeksi

Za opis poremećaja u Zemljinom magnetskom polju koristi se više indeksa. Navodimo opis onih koji su korišteni u ovom radu.

- *Dst geomagnetski indeks*, [nT], [17].
Od engl. *Disturbance Storm-Time Index*. Opisuje efekt koji zapadna ekvatorijalna prstenasta struja ima na horizontalnu komponentu magnetskog polja, H , za vrijeme magnetskih oluja, odnosno globalni pad H koji predstavlja glavnu fazu geomagnetske oluje. Budući da su vrijednosti Dst indeksa negativne često se koristi i $-Dst$ indeks. Vrijednosti niže od -100 nT ukazuju na jake geomagnetske oluje, između -100 i -50 nT na srednje jako geomagnetske oluje, dok je za vrijeme slabe geomagnetske oluje vrijednost Dst indeksa između -50 i -20 nT [16].
- *Ap geomagnetski indeks*, [nT], [19].
Opisuje geomagnetske poremećaje u umjerenim širinama, a određuje se iz Kp indeksa, dok se Kp indeks određuje iz K indeksa. K indeks kvantificira poremećaje

horizontalne komponente geomagnetskog polja na skali od 0 do 9, a vrijednosti veće od 4 ukazuju na geomagnetsku oluju. Dobiva se iz najveće fluktuacije horizontalne komponente polja izmjerene u trosatnom intervalu [31]. Kp indeks predstavlja srednju vrijednost trosatnih K indeksa s 13 mjernih postaja lociranih između 44° i 66° sjeverne ili južne geomagnetske širine, od kojih je 11 na Sjevernoj, a dvije na Južnoj hemisferi.

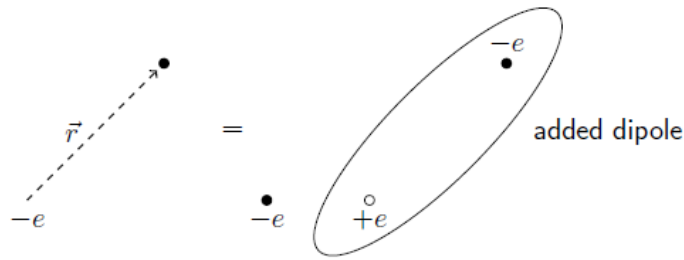
- *AE geomagnetski indeks*, [nT], [18].
Od engl. *Auroral Electrojet Index*. Opisuje geomagnetsku aktivnost uzrokovanu povećanim tokom ionosferskih struja u auralnom (polarnom) području. Određuje se iz horizontalne komponente Zemljinog magnetskog polja mjerene na 12 postaja unutar auralne zone na Sjevernoj hemisferi.

2. Širenje radiovalova kroz ionosferu

Refleksija valova u ionosferi rezultat je refrakcije propagirajućeg vala. Ionosferska plazma ima vlastitu dielektričnu konstantu koja je funkcija različitih parametara, uključujući gustoću elektrona i frekvenciju vala.

Električno polje će na elektron djelovati silom po vektoru \vec{r} , kao što je prikazano na slici 2.1. Pomak elektrona ekvivalentan je situaciji u kojoj elektron miruje te dodamo dipol (desna strana slike). Dipolni moment tada iznosi $e\vec{r}$. Ako s N označimo gustoću elektrona, a s \vec{r} prosječni pomak, tada je polarizacija po volumenu

$$\vec{P} = -Ne\vec{r}. \quad (2.1.)$$



Slika 2.1. Djelovanje električnog polja na elektron. Preuzeto iz [21].

Jednadžba gibanja za elektron mase $m_e = 9.190 \times 10^{-31}$ kg, naboja $e = 1.6021 \times 10^{-19}$ C i brzine $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ u električnom polju \vec{e} glasi

$$m_e \frac{d\vec{r}}{dt} = -e\vec{e}. \quad (2.2.)$$

Na isti elektron djeluje i trenje kao rezultat sudara s neutralnim molekulama. Pribrojimo li trenje električnoj sili, dobivamo

$$m_e \frac{d\vec{r}}{dt} = -e\vec{e} - \nu m_e \vec{v}, \quad (2.3.)$$

gdje ν označava frekvenciju sudara. Ista jednadžba po \vec{r} glasi

$$m_e \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -e\vec{e} - \nu m_e \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.4.)$$

Za sinusoidalno polje jednadžbu možemo napisati po fazama tako da $\frac{d}{dt}$ zamijenimo s $j\omega$.

$$-\omega^2 m_e r = -eE - j\omega \nu m_e r \quad (2.5.)$$

ili kao

$$r = \frac{eE}{\omega^2 m_e - j\omega \nu m_e} = \frac{eE}{m_e \omega^2 (1 - j\frac{\nu}{\omega})}. \quad (2.6.)$$

Dobiveni r kao polarizaciju daje

$$P = -\frac{Ne^2E}{m_e\omega^2(1 - j\frac{\nu}{\omega})}, \quad (2.7.)$$

a gustoća električnog toka je

$$D = \epsilon_0E + P = \epsilon_0E - \frac{Ne^2E}{m_e\omega^2(1 - j\frac{\nu}{\omega})} \equiv \epsilon_0\epsilon_rE \quad (2.8.)$$

iz čega proizlazi da je efektivna relativna dielektrična konstanta plazme

$$\epsilon_r = 1 - \frac{Ne^2E}{m_e\omega^2(1 - j\frac{\nu}{\omega})}. \quad (2.9.)$$

Kutnu frekvenciju plazme definiramo kao

$$\omega_p = \frac{Ne^2}{m_e\epsilon_0} \approx 3183N \quad (2.10.)$$

funkciju gustoće elektrona u plazmi. Stoga je

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2(1 - j\frac{\nu}{\omega})}. \quad (2.11.)$$

Zanemarimo li sudare elektrona, za dielektričnu konstantu dobivamo

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \approx 1 - \frac{81N}{f^2} \quad (2.12.)$$

te uz činjenicu da je konstanta propagacije vala kroz plazmu $\sqrt{\epsilon_r}k_0$ zaključujemo da:

- Za frekvencije $\omega > \omega_p$, efektivna dielektrična konstanta je manja od 1, a konstanta propagacija ima realnu vrijednost pa će doći do refrakcije vala u plazmi zbog promjene ϵ_r po visini.
- Za frekvencije $\omega < \omega_p$, dielektrična konstanta poprima negativnu vrijednost pa je konstanta propagacije imaginarna
- Za frekvencije $\omega \gg \omega_p$, što vrijedi za VHF i više frekvencije, dielektrična konstanta je ≈ 1 . U tom slučaju val prolazi kroz plazmu bez refrakcije, no dolazi do drugih pojava pogotovo ako je plazma magnetizirana Zemljinim magnetskim poljem. Kod prolaska valova navedenih frekvencija, događa se Faradayeva rotacija, odnosno prolaskom vala vektor polarizacije rotira.

Možemo definirati dva načina propagacije vala kroz ionosferu. Za frekvencije niže od kutne frekvencije plazme, val se reflektira od ionosfere. Za frekvencije više od kutne frekvencije plazme, dolazi do refrakcije, a budući da se indeks loma mijenja s visinom, val se "savija" te ako pritom dosegne kritični kut, odbija se natrag i prolazi kroz obrnuti proces refrakcije na putu prema Zemlji.

Ako je kut incidencije malen, val se neće odbiti, već će proći kroz ionosferu i neće se vratiti do površine Zemlje, stoga su za slanje signala na veće udaljenosti bitni gustoća elektrona, frekvencija i kut ulaska vala u ionosferu.

Podijelimo li ionosferu u tanke slojeve u kojima je indeks loma konstantan, vrijedi

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = \dots = n_k \sin \theta_k. \quad (2.13.)$$

Uvjet za povratak signala do Zemlje je totalna unutarnja refleksija, do koje dolazi kada je kut refrakcije $\theta = 90^\circ$. Pretpostavimo da se to dogodi u k-tom sloju pa je

$$n_0 \sin \theta_0 = n_k \sin 90^\circ = n_k, \quad (2.14.)$$

a uz $n_0 = 1$

$$\sin^2 \theta_i = n_k^2 = \epsilon_{r,k} \quad (2.15.)$$

pa slijedi da je za dani kut incidencije θ_i i frekvenciju f_{ob} minimalna gustoća elektrorona za koju dolazi do totalne refleksije

$$\epsilon_{r,k} = \sin^2 \theta_i = 1 - \frac{81 N_{min}}{f_{ob}^2}. \quad (2.16.)$$

Maksimalnu frekvenciju za koju se val vraća do Zemlje nazivamo kritična frekvencija, f_c , a možemo ju izraziti kao funkciju maksimalne gustoće elektrona N_{max} . Kao granični slučaj uzimamo kut incidencije $\theta_i = 0^\circ$, $\sin \theta_i = 0$, a jedini način da se za taj kut ulaska potigne totalna unutarnja refleksija jest da vrijedi $\epsilon_{r,k} = 0$.

$$\epsilon_{r,k} = 1 - \frac{81 N_{min}}{f_{ob}^2} = 0 \Rightarrow \frac{81 N_{max}}{f_c^2} = 1 \Rightarrow f_c = 9\sqrt{N_{max}}. \quad (2.17.)$$

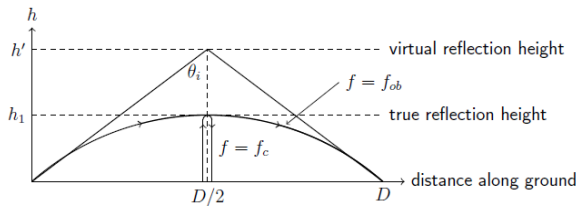
Također vrijedi

$$\sin^2 \theta_i = 1 - \cos^2 \theta_i = 1 - \frac{81 N_{max}}{f_{ob}^2}, \quad (2.18.)$$

$$f_{ob} = 9\sqrt{N_{max} \sec^2 \theta_i} = f_c \sec \theta_i, \quad (2.19.)$$

f_{ob} je maksimalna iskoristiva frekvencija i obično niža od 40 MHz, spuštajući se i do 20-30 MHz za vrijeme slabe Sunčeve aktivnosti. Jednadžba 2.19. naziva se *zakon sekante*. Slika 2.2 prikazuje put rekraktirane zrake povezane s frekvencijom f_{ob} . Zakrivljena putanja doseže visinu h_1 prije povratka na Zemlju. Sjecište sekanta na ulaznu i vraćenu zraku, u točki do Zemlje, naziva se virtualna visina refleksije h' . Virtualna visina ovisi o stanju ionosfere, dobu dana i sloju do kojeg zraka doseže (D, E, F). Sa slike 2.2 zaključujemo da je virtualna visina dana kao

$$\sec \theta_i = \sqrt{\frac{D^2}{2h'} + 1}. \quad (2.20.)$$

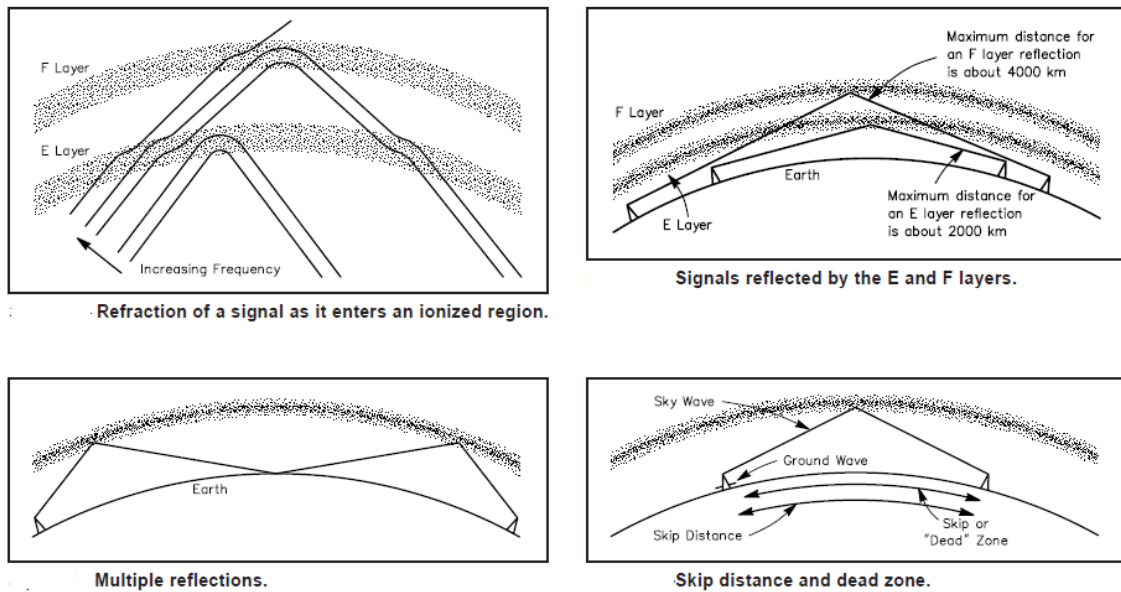


Slika 2.2. Međusobni odnosi upadnog kuta, virtualne visine i ukupne prijedene udaljenosti. Preuzeto s [21].

Maksimalna udaljenost koju val može prijeći $D = d_{max}$ postiže se namještajući transmitter tako da signal kreće paralelno s površinom Zemlje. Uzimajući u obzir lom u ionosferi, maksimalna udaljenost je

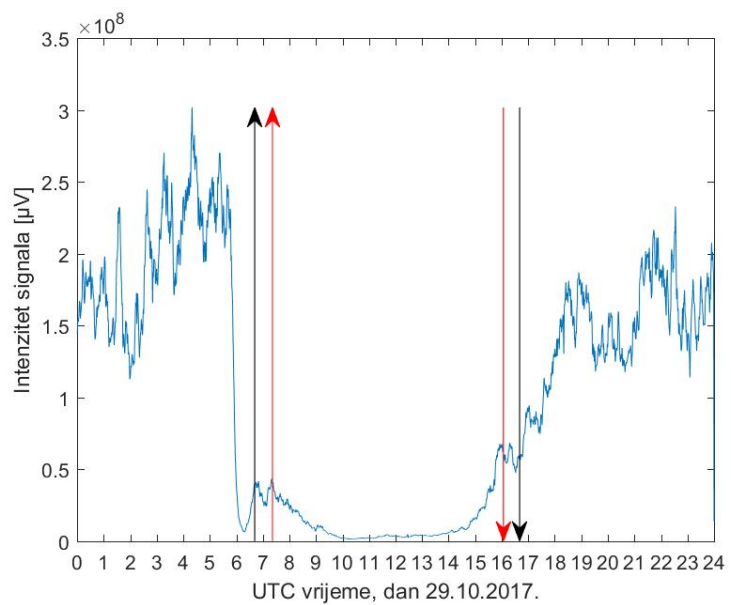
$$d_{max} = 2\sqrt{2KR_Z h'}, \quad (2.21.)$$

gdje KR_Z označava efektivni radijus Zemlje. Virtualna visina, a posljednično i maksimalna udaljenost, različita je za svaki sloj ionosfere. Zraka može prijeći veću udaljenost ukoliko probije u više slojeve ionosfere (slika 2.3). Za probijanje u više slojeve potrebno je emitirati zračenje viših frekvencija, jer je atenuacija obrnuto proporcionalna kvadratu frekvencije.



Slika 2.3. Lom zrake ovisno o frekvenciji. Maksimalne udaljenosti koje može prijeći zraka koje se probije u E i F sloj. Višestruke refleksije. Preuzeto iz [6].

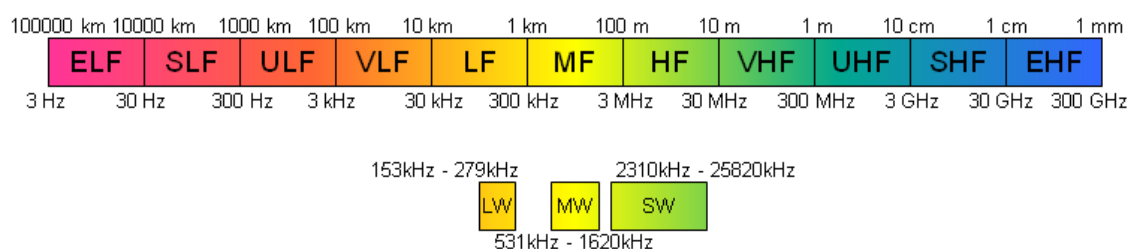
Tipični primjer signala koji se reflektira od ionosferskih slojeva prikazan je na 2.4. Signal je izmjeren na prijemniku označenom kao 2. *prijemnik* u tablici 4.1, dana 29.10.2013. po UTC vremenu. Vertikalnim strelicama prema gore i dolje označeni su izlazak i zalazak Sunca, respektivno, crnom bojom za lokaciju prijemnika, a crvenom za lokaciju predajnika. Atenuacija je uvijek prisutna, ali je jača danju kada su prisutna sva tri sloja, a slabi tijekom noći kada uslijed procesa rekombinacije nabijenih čestica i nedostatka primarne fotoionizacije D sloj nestaje u potpunosti, a E sloj djelomično. Signal je jači od ponoći do izlaska Sunca, nego od zalaska Sunca do ponoći jer je broj nabijenih čestica tijekom noći sve manji. Uočavamo pad signala neposredno prije izlaska Sunca, jer Sunčevo zračenje dolazi do ionosfere iako je Sunce još ispod horizonta. Istu pojavu ne uočavamo nakon zalaska Sunca. Tijekom dana signal je konstantan. Nagle promjene signala pripisujemo bljeskovima ili geomagnetskim olujama. U nekim slučajevima, oko podneva se može uočiti blagi rast te zatim jednako blagi pad signala, tzv. "trbuh", uzokovan maksimalnom dnevnom gustoćom nabijenih čestica, odnosno jačanjem D sloja i posljednično porastom kritične frekvencije koja se može reflektirati od ionosfere. Te se pojave uglavnom uočavaju na postajama bliže ekvatoru, jer je D sloj u tom području gušći.



Slika 2.4. Primjer tipičnog signala za dan sa slabom Sunčevom aktivnošću. Signal je jači noću, danju je atenuacija veća pa signal slabi. Uočava se asimetričnost signala pri izlasku i zalasku Sunca.

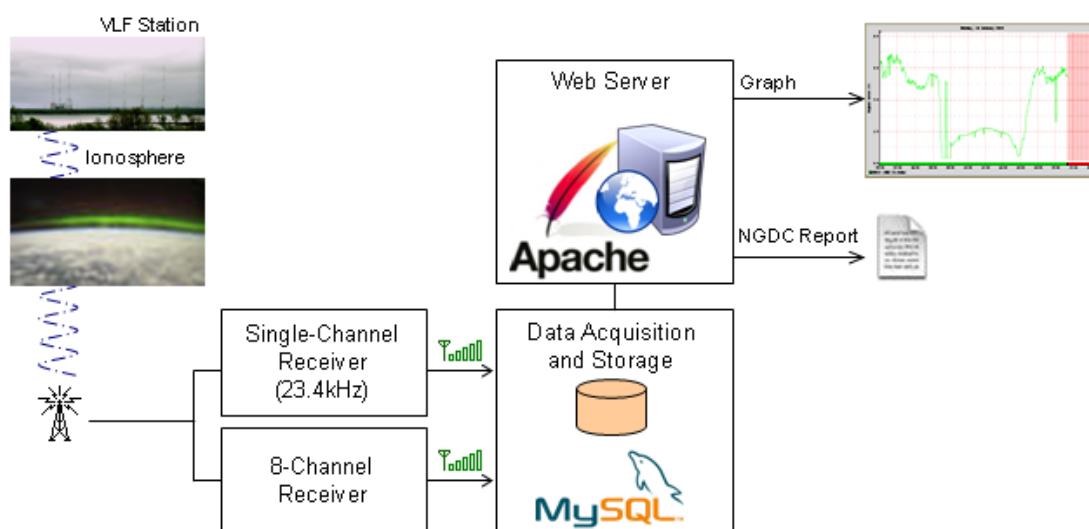
3. Motivacija i cilj

Cilj rada je proučiti utjecaj Sunčevih bljeskova na stanje ionosfere. Kao što je navedno u prethodnom poglavlju, najbolji način za uvid u trenutno stanje ionosfere je proučavanje širenja radio signala na veće udaljenosti. U tu svrhu korišteni su podaci izmjereni SID monitorom, čija je dostupnost omogućena u sklopu dugogodišnjeg projekta *SID-monitoring* koji vodi *Stanford Solar Center* <http://solar-center.stanford.edu/SID/sidmonitor/>. Podaci o signalu dostupni su na <http://solar-center.stanford.edu/SID/sidmonitor/>. *Sid monitori* su prijemnici VLF (od engl. *very low frequency*) signala. VLF signal označava raspon signala frekvencije od 3 do 30 kHz, s valnim duljinama između 100 i 10 km, te je taj interval manji dio spektra radio valova, prikazanog na slici 3.5.



Slika 3.5. Spektar radio signala s naznačenim valnim duljinama (iznad obojene linije) i frekvencijama (ispod obojene linije). Kratice su: F-*frequency*, L-*low*, H-*high*, V-*very*, U-*ultra*, S-*super*, E-*extremely*. Preuzeto s [26].

Prijemnici bilježe intenzitet radio signala u μV . Na Zemlji je raspoređeno tridesetak predajnika VLF valova i postavljeni su u svrhu komuniciranja američke vojske s podmornicama. Na početku projekta distribuirano je preko 900 prijemnika, no stvaran broj teško je procijeniti, budući da ih je vrlo lako ponovo nabaviti ili napraviti. Podaci sa svih prijemnika šalju se na službenu stranicu <http://sid.stanford.edu/database-browser/>. Shematski prikaz prijenosa signala prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6. Shematski prikaz funkcioniranja predajnika i prijemnika VLF signala. Preuzeto s [27].

4. Podaci

U radu obrađujemo sljedeće podatke iz vremenskog razdoblja oko maksimuma 24. Sunčevog ciklusa: kraj 2014. i početak 2015. godine. Svi podaci prikazani su u UTC vremenu:

- podaci o intenzitetu radio signala iz projekta *SID-Monitoring*,
- podaci o Sunčevim bljeskovima iz *NASA-inog* kataloga bljeskova i
- podaci o vrijednostima geomagnetskih indeksa.

Podaci o intenzitetu radio signala su preuzeti s <http://sid.stanford.edu/database/-browser/>. Teorijski, svi prijemnici mogu primiti signale sa svih predajnika, no pokazalo se da kvaliteta signala direktno ovisi o udaljenosti što je otežalo izbor kombinacija prijamnika i predajnika za proučavanje. Primjeri signala na kojima ne možemo detektirati bljeskove dani su u Dodatku A. Podaci s prijemnika poslani su na službenu stranicu. Tek nekolicina prijemnika je poslala podatke za duže vremensko razdoblje.

Podaci o Sunčevim bljeskovima preuzeti su sa stranice https://hesperia.gsfc.nasa.gov/hessidata/dbase/hessi_flare_list.txt na kojoj su navedeni svi bljeskovi od 12.2.2011., 21:29:56 do 3.3.2018. 04:04:08 po UTC vremenu. Parametri koji su uzeti u obzir su početak i kraj bljeska, odnosno ukupno trajanje (dano u sekundama), raspon energije (u keV, s danim rasponima od 6-12, 12-25, 25-50, 50-100, 100-300, 300-800, 800-7000 i 7000-20000 keV) te najveći iznos energije. Svi navedni parametri dobivaju se iz mjerenja *NASA-ine RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Spectrometric Imager)* svemirske letjelice. Misija je trajala od 2002. do 2018., a letjelica se nalazila u kružnoj orbiti oko Zemlje na visini od 600 km.[32]

Prebrojavanjem ukupnog broja bljeskova za razne raspone energija utvrđeno je da su bljeskovi energije < 50 keV svakodnevna pojava, a bljeskovi energije < 100 keV dogode se jednom u nekoliko dana pa te dane smatramo mirnim danima. Dakle, razmatrano samo dane s bljeskovima energije > 100 keV. Također, uočeno je razdoblje pojačane Sunčeve aktivnosti u drugoj polovici 2014. i početkom 2015. godine, s najjačim bljeskovima u rujnu i listopadu 2014. To je razdoblje pobliže analizirano. Nakon izbora više desetaka dana sa zanimljivom Sunčevom aktivnošću pogodnih za proučavanje, analizirani su podaci o radio valovima čije širenje upućuje na stanje ionosfere.

Podaci o geomagnetskoj aktivnosti, odnosno satne vrijednosti geomagnetskih indeksa *Ap*, *AE* i *Dst* preuzete su sa stanice <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

Podaci su prikazani u poglavlju 5. na način da je na x-osi vrijeme u UTC koordinati, a na y-osi signal (slike 5.1-5.18). Apsolutna vrijednost signala je manje bitna, bitniji je odnos između dana i noći te tipični oblik ili odstupanje od njega. Točkama su prikazani vrhunci bljeskova iz kataloga bljeskova, dodatno naglašeni vertikalnim linijama za bljeskove po danu kada očekujemo jači efekt bljeska na ionizaciju. Točno vrijeme trajanja bljeskova, po katalogu, navedeno je u tablicama (5.1, 5.2, 5.5, 5.8, 5.11), dok su u ostalim tablicama u poglavlju 5. navedene anomalije na signalu koje po obliku odgovaraju bljeskovima (5.3, 5.4, 5.7, 5.9, 5.9, 5.10, 5.12, 5.13).

4.1. Prijemnici i predajnici

Nakon detaljne analize podataka za više prijemnika za mirne dane (dane sa slabijom Sunčevom aktivnošću) odabrane su tri kombinacije prijemnika i predajnika sa zadovoljavajućom kvalitetom signala. Uočeno je da kvaliteta signala direktno ovisi o udaljenosti prijemnika i predajnika. Geografske koordinate prijemnika i predajnika, države u kojima se nalaze te njihove međusobne udaljenosti navedene su u tablici 4.1. U daljnjem tekstu prijemnici i predajnici su označeni kao *prvi*, *drugi* i *treći* (1., 2., i 3.). Radi lakše vizualizacije, karte s lokacijama svih prijemnika i predajnika prikazane su na slikama 4.1 i 4.2.

	g.š.	g.d.	država	udaljenost
1. predajnik	55°N	3°W	Ujedinjeno Kraljevstvo	
1. prijemnik	37°N	10°E	Tunis	
				2229 km
2. predajnik	53°N	8°E	Njemačka	
2. prijemnik	47°N	1°E	Francuska	
				833 km
3. predajnik	45°N	67°W	Kanada	
3. prijemnik	39°N	77°W	SAD	
				1060 km

Tablica 4.1. Koordinate prijemnika i predajnika te njihova međusobna udaljenost.



Slika 4.1. Lokacije prvog prijemnika, prvog predajnika, drugog prijemnika i drugog predajnika.



Slika 4.2. Lokacije trećeg prijemnika i trećeg predajnika.

Svi predajnici emitiraju VLF radio signal s frekvencijama navedenim u tablici 4.2.

	frekvencija [kHz]
1. predajnik	22.1
2. predajnik	23.3
3. predajnik	24.0

Tablica 4.2. Frekvencije signala s pojedinog predajnika.

Nakon odabira kombinacija predajnika i prijemnika s kvalitetnim signalom za mirne dane, odarana su tri dana s jačom Sunčevom aktivnošću, pogodnih za proćavanje bljeskova (8.9.2014., 16.10.2014., 18.10.2014.), jedan dan sa slabijom aktivnošću za usporedbu (24.10.2014.), kao i jedan dan sa slabijom aktivnošću na kojem je uočeno neobično ponašanje signala (12.3.2015.). Uvijek se analiziraju iste kombinacije prijemnika i predajnika, tako se pod "signal na prvom prijemniku" podrazumijeva da ga odašilje prvi predajnik.

5. Rezultati

Prikazani su rezultati za pet promatranih dana, što uključuje sljedeće:

- prikaz intenziteta signala po UTC vremenu,
- tablicu s popisom svih bljeskova za promatrani dan iz *NASA-inog* kataloga bljeskova,
- tablicu s promjenama na tipičnom signalu koje po obliku odgovaraju bljeskovima po UTC vremenu,
- tablicu s promjenama na tipičnom signalu koje po obliku odgovaraju bljeskovima po lokalnom vremenu,
- prikaz satnih vrijednosti odabranih geomagnetskih indeksa za promatrani dan.

Strelicama su označeni izlazak i zalazak Sunca. Punim točkama označeno je vrijeme vrhunca Sunčevih bljeskova iz kataloga, a bljeskovi tijekom dana, kada očekujemo jači utjecaj, dodatno su označeni vertikalnim linijama. UTC vrijeme pretvoreno je u lokalno vrijeme na prijemniku određivanjem vremenske zone u kojoj se nalazi prijemnik te oduzimanjem ili zbrajanjem. Lokalno vrijeme na prva dva prijemnika je sat vremena ispred, a lokalno vrijeme na trećem prijemniku je pet sati iza UTC vremena.

5.1. Događaj 8.9.2014.

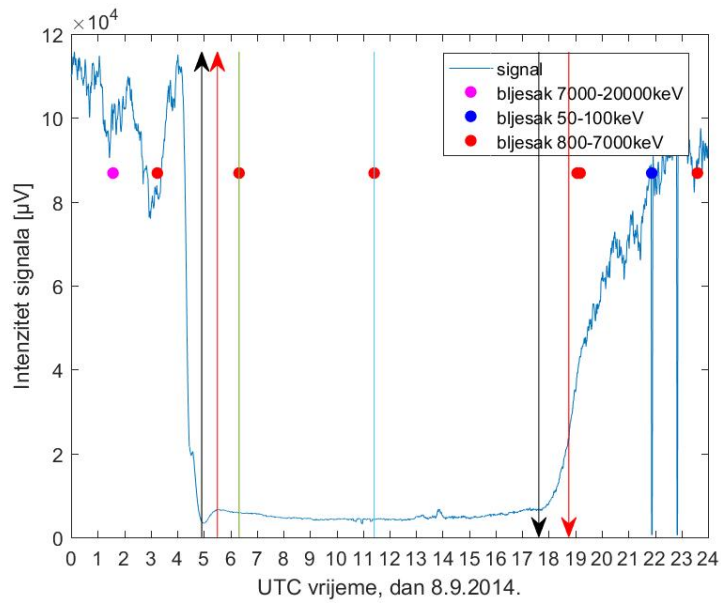
Ovaj događaj karakteriziran je jakom Sunčevom aktivnošću prema izmjerenim energijama bljeskova.

početak	vrhunac	kraj	raspon intenziteta [keV]
1:34	1:35	1:46	7000-2000
3:06	3:15	3:20	800-7000
6:19	6:20	6:27	800-7000
11:13	11:25	11:42	800-7000
19:00	19:04	19:09	800-7000
19:09	19:11	19:19	800-7000
21:50	21:53	22:06	50-100
23:32	0:11	0:16	800-7000

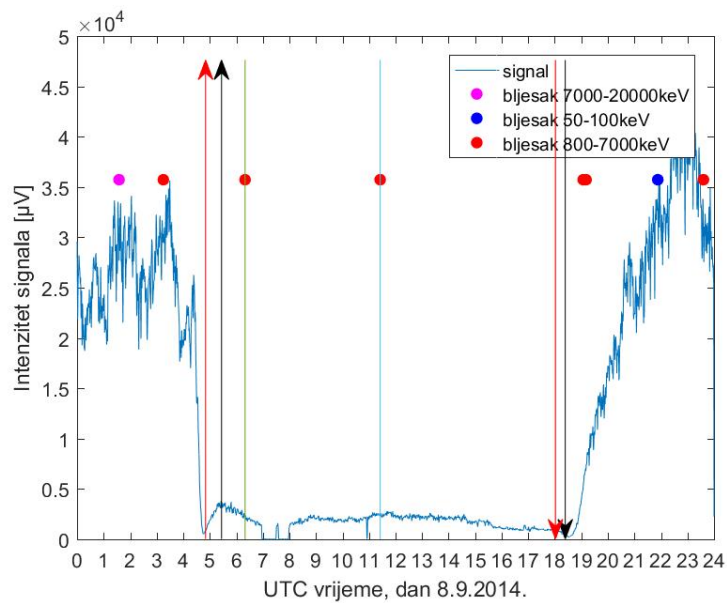
Tablica 5.1. Bljeskovi iz *NASA-inog* kataloga bljeskova za dan 8.9.2014.

Unatoč velikom broju zabilježenih bljeskova (tablica 5.1), niti jedan nije primjećen na grafovima. Na prvom i drugom prijemniku oblik signala odgovara tipičnom obliku s najjačim signalom od ponoći do neposredno prije izlaska Sunca, s kratkim padom u zoru. Najniže vrijednosti očitavamo tijekom dana te signal ponovo raste nakon zalaska Sunca, no manje je vrijednosti, nego prije jutra. Bljeskove ne uočavamo na grafu niti po danu niti po noći. Na trećem prijemniku signal je prešumovit da bismo uočili manje

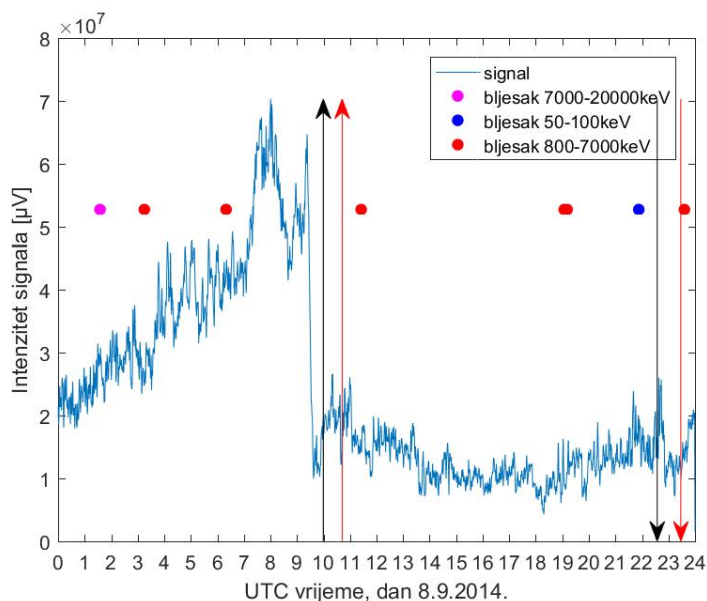
promjene na signalu.



Slika 5.1. Prijemnik u Tunisu (1. prijemnik). 8.9.2014.

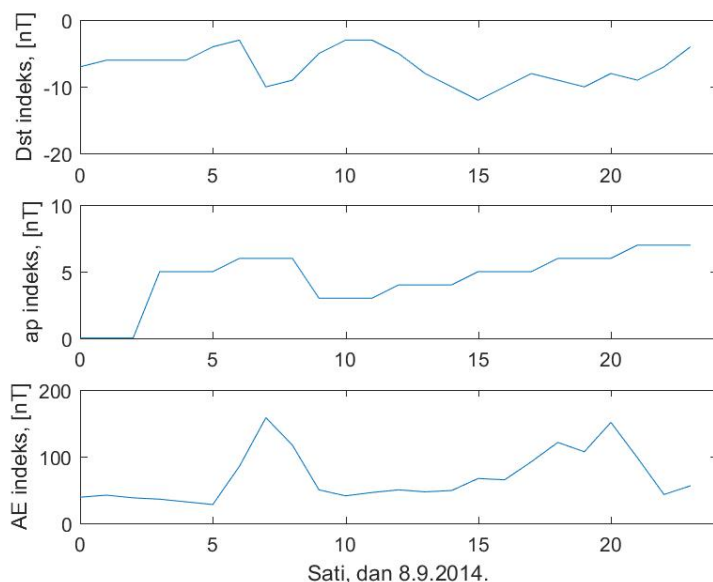


Slika 5.2. Prijemnik u Francuskoj (2. prijemnik). 8.9.2014.



Slika 5.3. Prijemnik u SAD-u (3. prijemnik). 8.9.2014.

Geomagnetska aktivnost je slaba. Vrijednost $-Dst$ indeksa ne raste iznad 20 nT, minimalnu vrijednost od 3 nT poprima između 8 i 11 sati, a maksimum od 12 nT postiže u 15 sati. Geomagnetski ap indeks minimum od 0 nT pokazuje od 0 do 3 sata, a maksimum od 7 nT od 21 do 23 sata. AE indeks minimum od 28 nT postiže u 4 sata, a maksimum od 158 nT u 7 sati.



Slika 5.4. Indeksi geomagnetske aktivnosti na dan 8.9.2014.

5.2. Događaj 16.10.2014.

Navedeni događaj je također karakteriziran je jakom Sunčevom aktivnošću prema izmjenjenim energijama bljeskova (tablica 5.2). Na prvom prijemniku općeniti oblik signala prati tipični oblik, s najvećom vrijednošću od ponoći do izlaska Sunca, kratkim

padom u zoru i najnižom vrijednošću tijekom dana. Većina bljeskova događa se u razdoblju između izlaska i zalaska Sunca na lokaciji prijemnika. Na grafu također uočavamo bljesak u obliku porasta signala u trajanju od 36 minuta, od 13:03 do 13:39. Navedeni porast signala povezujemo s dva uzastopna bljeska od koji je prvi raspona energije 800 – 7000 keV u trajanju 11 minuta, od 12:38 do 12:49, a drugi raspona energije 100 – 300 keV u trajanju 9 minuta, od 12:58 do 13:07, iščitano iz *NASA-inog* kataloga bljeskova. Intenzitet signala je prilikom bljeska narastao s 400 na 1900 μV , odnosno bilježimo porast amplitude od 375%. Pod amplitudom smatramo razliku maksimalne, odnosno u slučaju pada minimalne, vrijednosti tijekom bljeska i vrijednosti intenziteta signala neposredno prije bljeska.

Na drugom prijemniku općeniti oblik signala prati tipični oblik, s najvećom vrijednošću od ponoći do izlaska Sunca, kratkim padom u zoru i najnižom vrijednošću tijekom dana. Većina bljeskova događa se u razdoblju između izlaska i zalaska Sunca na lokaciji prijemnika. Na grafu također uočavamo dva pada i porast signala koji ne odgovaraju tipičnom obliku. Prvi pad signala je trajanja 61 minutu, od 6:58 do 7:59, te ga ne možemo povezati s bljeskom koji se događa tek kasnije, od 8:09 do 8:17. Drugi pad intenziteta, s 3000 na 500 μV (500%) događa se u 12:36 i trajanja je 1 minute. Porast intenziteta signala s $0.4 \cdot 10^4$ na $2.4 \cdot 10^4$ μV (500%) na grafu traje 39 minuta, od 13:03 do 13:42, slično kao na prvom prijemniku.

Na trećem prijemniku uočavamo potpunu odsutnost signala od 0:00 do 4:07, što ukazuje na grešku na prijemniku ili predajniku. Uočavamo porast signala neposredno prije i nakon izlaska Sunca trajanja 43 minute, od 10:53 do 11:36. Prije i tijekom porasta događaju se bljeskovi, prvi od 9:30 do 9:51, zatim od 11:06 do 11:13 te od 11:19 do 11:31, no porast ne povezujemo s bljeskovima, jer je prvi bljesak dosta ranije. Porast signala očekujemo neposredno nakon bljeska, a druga dva bljeska događaju se nakon što signal već počne rasti te ne mijenjaju trend porasta. Idući porast vidljiv na grafu je trajanja 38 minuta, isti onaj koji je uočen i na prva dva prijemnika, a intenzitet raste s $0.9 \cdot 10^8$ na $2.75 \cdot 10^8$ μV . Uočavamo i kratak pad signala, trajanja 2 minute, od 19:17 do 19:19, a povezujemo ga s bljeskom raspona energije 800 – 7000 keV trajanja 17 minuta, od 19:04 do 19:21. Intenzitet pada s $0.8 \cdot 10^8$ na 0 μV , odnosno 100%.

Navedene promjene u signalu dane su u tablicama 5.3 i 5.4.

početak	vrhunac	kraj	intenzitet [keV]
1:05	1:07	1:12	800-7000
8:09	8:11	8:17	7000-20000
9:30	9:31	9:51	800-7000
11:06	11:10	11:13	800-7000
11:19	11:23	11:31	800-7000
12:38	12:40	12:49	800-7000
12:58	13:02	13:07	100-300
18:49	18:51	19:04	800-7000
19:04	19:06	19:21	800-7000

Tablica 5.2. Bljeskovi iz *NASA-inog* kataloga bljeskova za dan 16.10.2014.

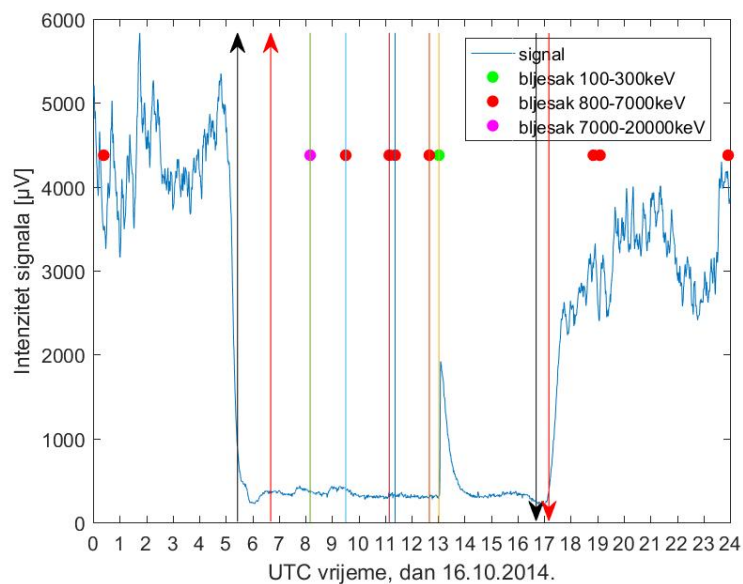
	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	13:03	13:15	13:39	36
2. prijemnik	12:36	12:36	12:36	1
	13:03	13:05	13:42	39
3. prijemnik	13:01	13:04	13:39	38
	19:17	19:18	19:19	2

Tablica 5.3. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 16.10.2014., UTC vrijeme.

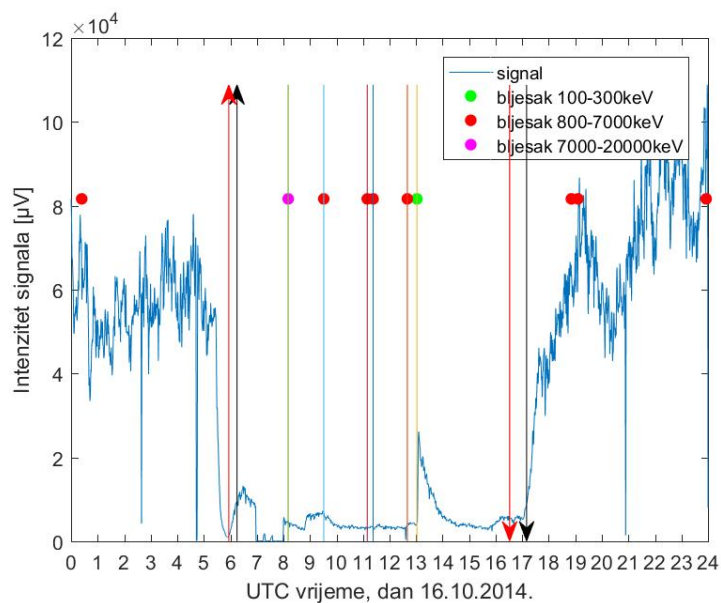
	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	14:03	14:15	14:39	36
2. prijemnik	13:36	13:36	13:36	1
	14:03	14:05	14:42	39
3. prijemnik	8:01	8:04	8:39	38
	14:17	14:18	14:19	2

Tablica 5.4. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 16.10.2014., lokalno vrijeme.

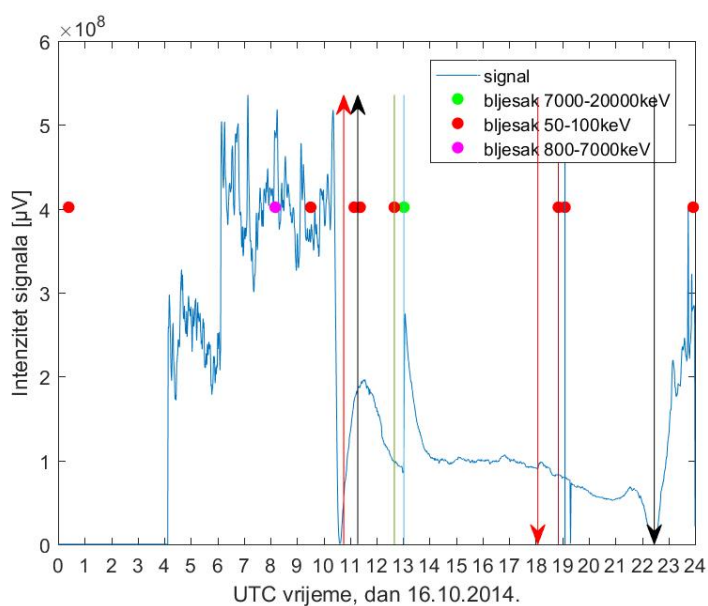
Porast signala, koji povezujemo s bljeskovima, događa se naglo, dok je pad na normalne dnevne vrijednosti nešto sporiji.



Slika 5.5. Prijemnik u Tunisu (1. prijemnik).16.10.2014.

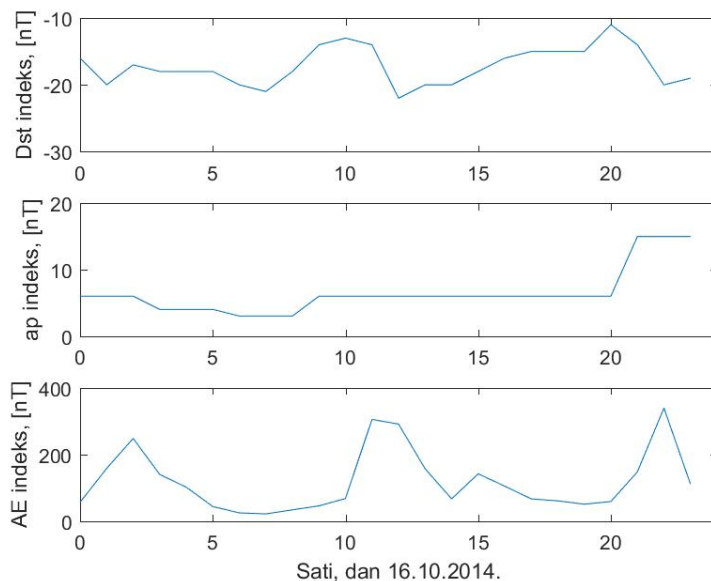


Slika 5.6. Prijemnik u Francuskoj (2. prijemnik). 16.10.2014.



Slika 5.7. Prijemnik u Sjevernoj Americi (3. prijemnik).16.10.2014.

Geomagnetska aktivnost je slaba. Vrijednost $-Dst$ indeksa ne raste iznad 30 nT, minimalnu vrijednost od 11 nT postiže u 20 sati, a maksimum od 22 nT postiže u 12 sati. Geomagnetski ap indeks minimum od 3 nT pokazuje od 6 do 9 sati, a maksimum od 15 nT od 21 do 23 sata. AE indeks minimum od 22 nT postiže u 7 sati, a maksimum od 339 nT u 22 sata.



Slika 5.8. Indeksi geomagnetske aktivnosti na dan 16.10.2014.

5.3. Događaj 18.10.2014.

Ovaj događaj je, slično kao i prethodna dva, karakteriziran jakim Sunčevom aktivnošću prema izmjerenim energijama bljeskova (tablica 5.5). Na prvom prijemniku tijekom dana uočavamo blaži porast intenziteta signala, s 400 na 600 μV (50%), u trajanju od 62 minute, od 7:48 do 8:50, a povezujemo ga s bljeskom trajanja 16 minuta, od 7:09 do 7:25. Osim porasta signala, uočava se i pad, trajanja 33 minuta, od 19:33 do 20:10, s 2700 na 2000 μV (35%). U navedenom razdoblju u katalogu iščitavamo jaki bljesak raspona energije 7000 – 20000 keV trajanja 16 minuta, od 19:34 do 19:50.

Na drugom prijemniku tijekom dana uočavamo tri nagla pada signala. Prvi je trajanja 59 minuta, od 6:59 do 7:58, otprilike u vrijeme zbivanja bljeska raspona energije 800 – 7000 keV, trajanja 16 minuta, od 7:09 do 7:25. Idući, kraći, pad signala na grafu uočavamo od 8:32 do 8:33 i ne povezujemo ga s bljeskom, jer se bljesak događa nakon uočenog pada. Treći pad signala uočavamo od 13:25 do 13:27, nakon bljeska raspona energije 800 – 7000 keV trajanja 12 minuta, od 13:10, do 13:22. Intenzitet pada s 5000 na 0 μV (100%). Za 3. prijemnik nemamo kvalitetne podatke za ovaj događaj.

Navedene promjene u signalu dane su u tablicama 5.7 i 5.9.

početak	vrhunac	kraj	raspon intenziteta [keV]
2:45	2:50	3:02	800-7000
4:21	4:22	4:31	800-7000
7:09	7:13	7:25	800-7000
8:46	8:47	8:59	800-7000
13:10	13:15	13:22	800-7000
15:28	15:30	15:44	7000-20000
17:00	17:04	17:09	800-7000
18:06	18:09	18:13	800-7000
19:34	19:41	19:50	7000-20000
20:18	20:21	20:29	800-7000
21:45	21:48	21:56	800-7000
22:45	23:21	23:28	50-100
23:28	23:36	23:39	800-7000

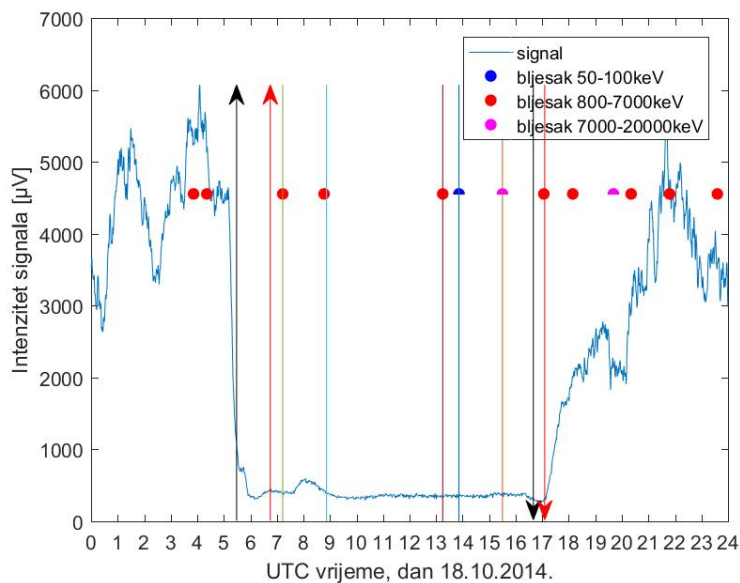
Tablica 5.5. Bljeskovi iz *NASA-inog* kataloga bljeskova za dan 18.10.2014.

	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	7:48	8:01	8:50	62
	19:33	konst. pad	20:10	37
2. prijemnik	13:10	konst. pad	13:22	12

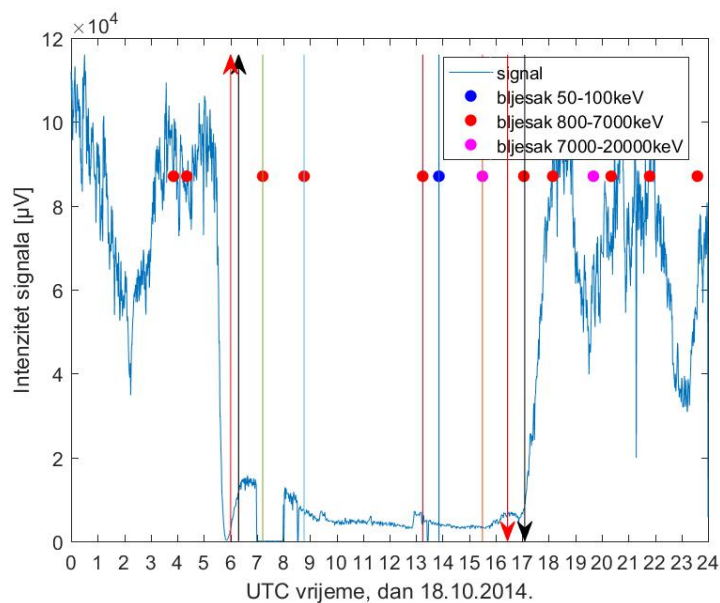
Tablica 5.6. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 18.10.2014., UTC vrijeme.

	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	8:48	9:01	9:50	62
	20:33	konst. pad	21:10	37
2. prijemnik	14:10	konst. pad	14:22	12

Tablica 5.7. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 18.10.2014., lokalno vrijeme.

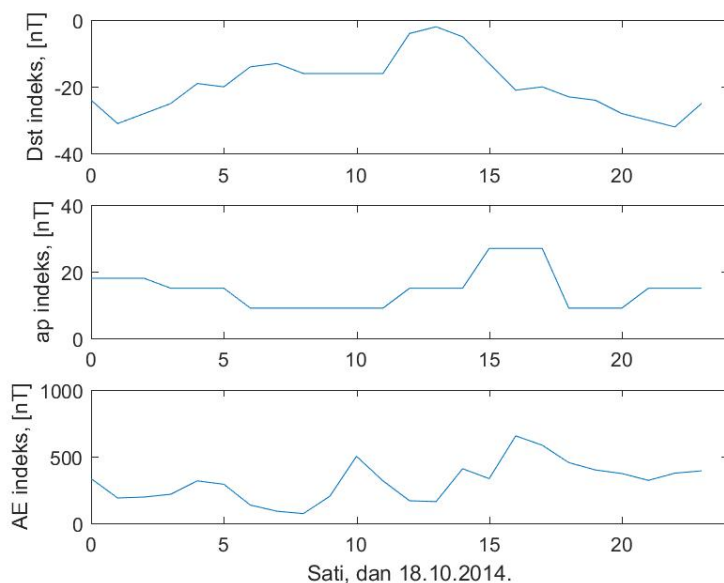


Slika 5.9. Prijemnik u Tunisu (1. prijemnik). 18.10.2014.



Slika 5.10. Prijemnik u Francuskoj (2. prijemnik). 18.10.2014.

Geomagnetska aktivnost je slaba. Vrijednost $-Dst$ indeksa raste iznad 30 nT, s maksimumom od 32 nT u 22 sata što indicira na slabu geomagnetsku oluju, a minimalnu vrijednost od 2 nT postiže u 13 sati. Geomagnetski ap indeks minimum od 9 nT pokazuje od 6 do 11 te od 18 do 21 sati, a maksimum od 27 nT od 15 do 17 sat. U isto vrijeme maksimum postiže i AE s vrijednošću 654 nT u 16 sati, dok minimum vrijednosti 72 nT uočavamo u 8 sati.



Slika 5.11. Indeksi geomagnetske aktivnosti na dan 18.10.2014.

5.4. Događaj 24.10.2014.

Ovaj događaj karakteriziran je slabijom Sunčevom aktivnošću prema izmjerenim energijama bljeskova, u odnosu na prethodne događaje (tablica 5.8). Na prvom prijemniku uočavamo porast signala trajanja 25 minuta od 7:32 do 7:57. Od bljeskova u tom razdoblju u katalogu pronalazimo bljesak raspona energije 100 – 300 keV trajanja 16 minuta, od 7:36 do 7:52 i bljesak raspona energije 50 – 100 keV trajanja 9 minuta, od 8:57 do 9:06. Intenzitet signala raste s 800 na 1800 μV (125%).

Na drugom prijemniku signal je noću šumovit, no tada ni ne očekujemo bljeskove. Nedugo nakon izlaska Sunca uočavamo pad signala trajanja 60 minuta, od 6:58 do 7:58. Od bljeskova u tom razdoblju u katalogu pronalazimo bljesak raspona energije 100 – 300 keV trajanja 16 minuta, od 7:36 do 7:52 i bljesak raspona energije 50 – 100 keV trajanja 9 minuta, od 8:57 do 9:06, no pad signala ne povezujemo s bljeskovima, jer je predug. Signal na ovom primjeru odstupa od tipičnog po tome što je vrijednost signala najviša od zalaska Sunca do ponoći, a očekuje se najviša vrijednost od ponoći do izlaska Sunca.

Na trećem prijemniku uočavamo neobičan oblik signala tijekom dana, tzv. trbuh do kojeg uobičajeno dolazi zbog jačanja D sloja. Ova je pojava češća oko ekvatora i ne očekujemo je na g.š. promatranog prijemnika. Uočavamo i porast signala oko 21 sat, s porastom intenziteta s $2 \cdot 10^7$ na $9 \cdot 10^7$ μV (350%). Povezujemo ga s dva bljeska iz kataloga s počecima u 21:06 i 21:24 jer iako porast počinje neposredno prije, do maksimuma dolazi nakon bljeska.

Navedene promjene u signalu dane su u tablicama 5.9 i 5.10.

početak	vrhunac	kraj	intenzitet [keV]
1:04	1:09	1:13	50-100
2:50	2:59	3:07	50-100
7:36	7:47	7:52	100-300
8:57	9:00	9:06	50-100
21:06	21:17	21:24	50-100
21:24	21:32	21:58	50-100
22:37	22:38	22:56	100-300

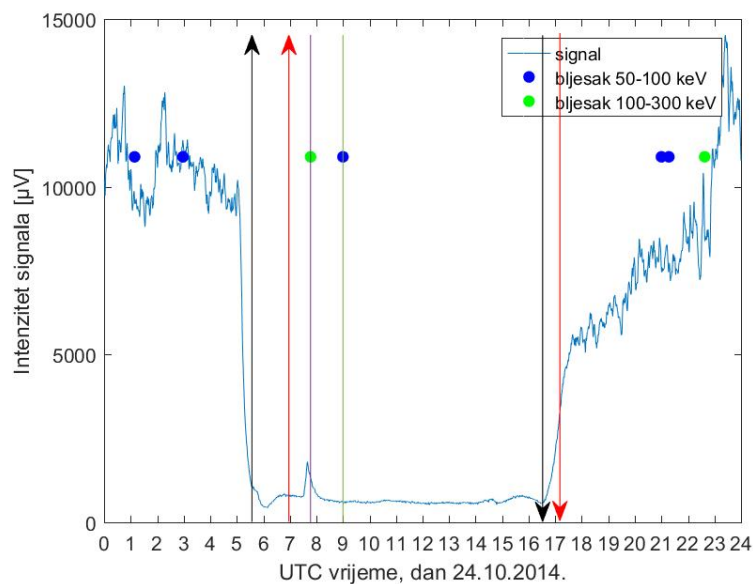
Tablica 5.8. Bljeskovi iz *NASA-inog* kataloga bljeskova za dan 24.10.2014.

	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	7:32	7:39	7:57	25
3. prijemnik	20:58	21:09	21:46	48

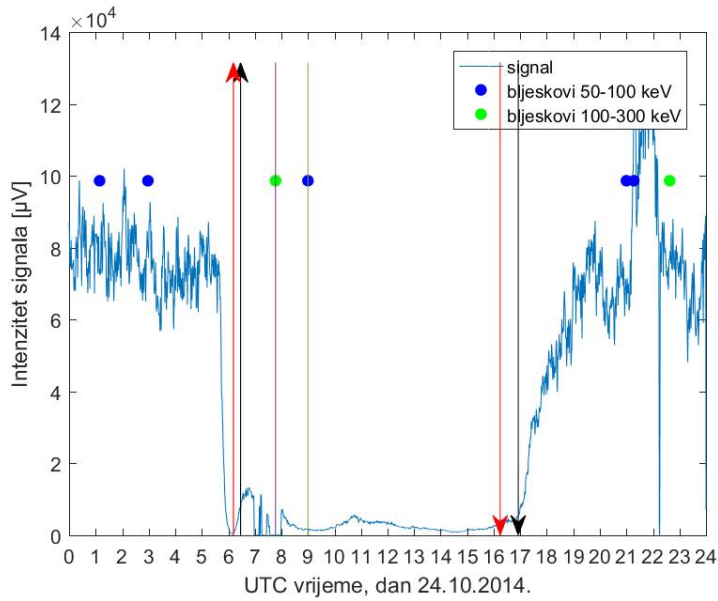
Tablica 5.9. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 24.10.2014., UTC vrijeme.

	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	8:32	8:39	8:57	25
3. prijemnik	15:58	16:09	16:46	48

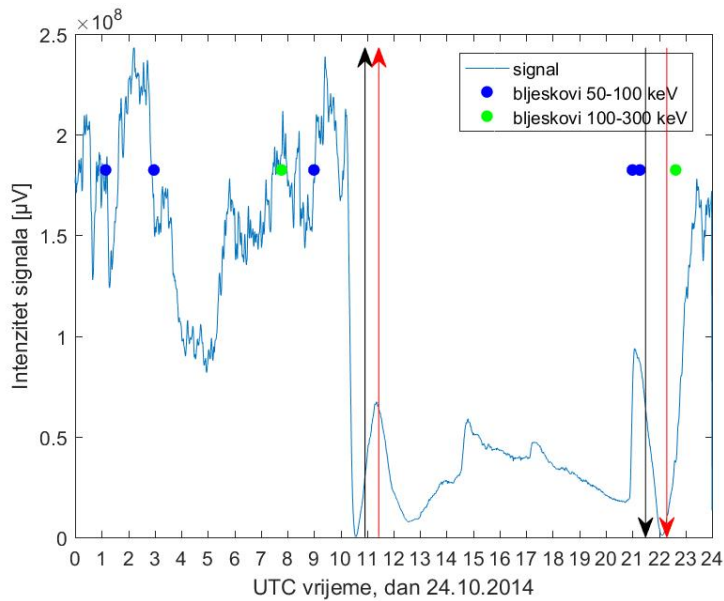
Tablica 5.10. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 24.10.2014., lokalno vrijeme.



Slika 5.12. Prijemnik u Tunisu (1. prijemnik). 24.10.2014.

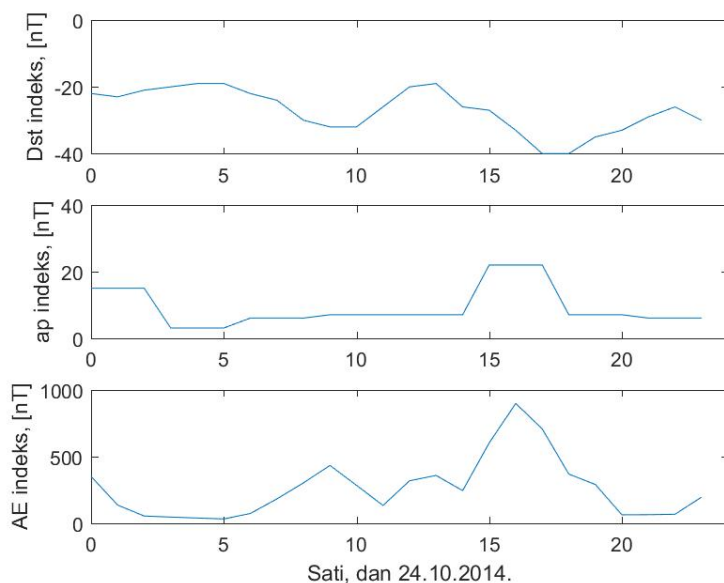


Slika 5.13. Prijemnik u Francuskoj (2. prijemnik). 24.10.2014.



Slika 5.14. Prijemnik u SAD-u (3. prijemnik). 24.10.2014.

Sva tri indeksa mjere geomagnetske aktivnosti postižu maksimum u isto vrijeme. $-Dst$ indeks iznosi 40 nT od 16 do 17 sati što ukazuje na slabu geomagnetsku oluju, ap indeks maksimalno iznosi 22 nT od 15 do 17 sati, dok AE indeks raste do 897 nT u 16 sati. Minimumi $-Dst$, ap i AE indeksa također su simultani te iznose 19, 3 i 32 nT, a uočavamo ih od 4 do 5 sati, od 3 do 5 sati i u 5 sati, respektivno.



Slika 5.15. Indeksi geomagnetske aktivnosti na dan 24.10.2014.

5.5. Događaj 12.3.2015.

Ovaj događaj također je karakteriziran jakom Sunčevom aktivnošću prema izmjerenim energijama bljeskova (tablica 5.11). Na sva tri prijemnika uočavamo promjenu povezanu s bljeskom iz kataloga, trajanja 7 minuta, od 12:07 do 12:11. Na prvom prijemniku primjećujemo da je signal izrazito šumovit, no unatoč šumu uočavamo dva nagla porasta signala. Manji porast intenziteta s $0.4 \cdot 10^8$ na $3.8 \cdot 10^8$ μV (850%) događa se od 11:51 do 12:37 i povezujemo ga s navedenim bljeskom, a veći, s $0.4 \cdot 10^8$ na $4.7 \cdot 10^8$ μV (1075%), od 14:11 do 14:36 te ga ne možemo povezati niti s jednim bljeskom. Osim porasta signala, uočavamo i manji pad od 8:22 do 8:29 koji povezujemo s bljeskom iz kataloga trajanja 16 minuta, od 8:06 do 8:22. Intenzitet pada s $1.5 \cdot 10^8$ na $0.5 \cdot 10^8$ μV (67%).

Na drugom prijemniku uočavamo pad signala trajanja 15 minuta, od 5:46 do 6:01, koji ne povezujemo s bljeskom te dva izrazita porasta signala. Manji porast, s $1.5 \cdot 10^4$ na $2.5 \cdot 10^4$ (67%) događa se od 11:47 do 12:35 i povezan je s bljeskom u 12:07, a veći od 14:07 do 14:31, iznosa s $0.5 \cdot 10^4$ na $2.6 \cdot 10^4$ μV (420%), ne povezujemo s bljeskom, kao i u slučaju prvog prijemnika. Porast oko 9 sati, s $0.3 \cdot 10^4$ na $1 \cdot 10^4$ μV (233%) povezujemo s dva slabija bljeska u 8:06 i 9:22.

Na trećem prijemniku uočavamo jedan nagli porast signala od 13:39 do 14:20, isti koji uočavamo na prva dva prijemnika, nepovezan s bljeskovima. Pad signala iz 22 sata povezujemo s jednim slabijim bljeskom iz kataloga s početkom u 21:39. Porast je iznosa s $1 \cdot 10^8$ na $4.2 \cdot 10^8$ μV (320%), a pad s $3 \cdot 10^7$ na 0 μV (100%).

Navedene promjene u signalu dane su u tablicama 5.12 i 5.13.

početak	vrhunac	kraj	intenzitet [keV]
4:41	4:45	5:13	800-7000
8:06	8:13	8:22	50-100
12:07	12:11	12:14	100-300
21:39	21:49	22:08	100-300
23:22	23:28	23:40	100-300

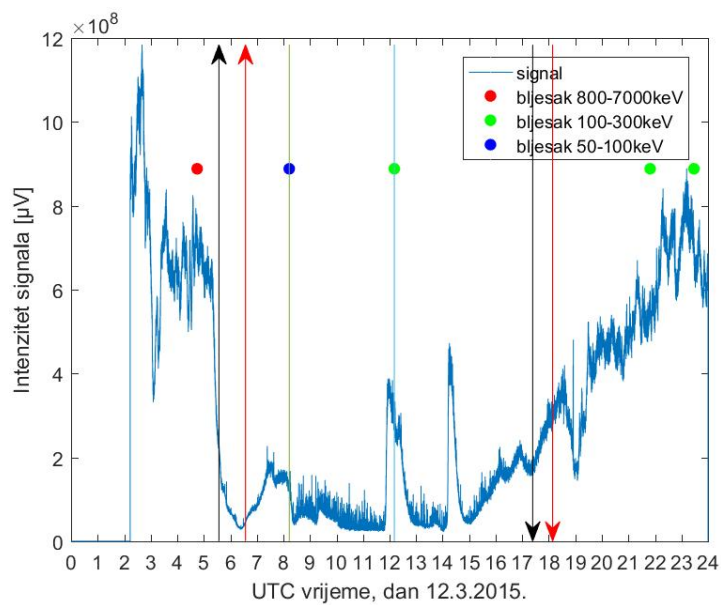
Tablica 5.11. Bljeskovi iz *NASA-inog* kataloga bljeskova za dan 12.3.2015.

	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	8:22	8:24	8:29	7
	11:51	11:59	12:33	42
	14:11	14:18	14:36	25
2. prijemnik	9:10	9:16	9:58	48
	11:47	11:56	12:35	48
	14:07	14:11	14:31	24
3. prijemnik	13:39	13:40	14:20	41
	22:04	22:33	22:40	36

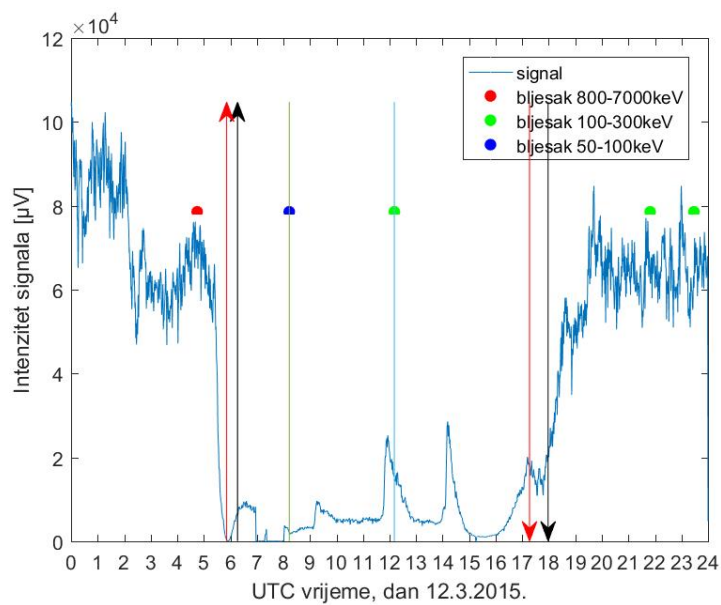
Tablica 5.12. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 12.3.2015., UTC vrijeme.

	početak	vrhunac	kraj	trajanje, [min]
1. prijemnik	9:22	9:24	9:29	7
	12:51	12:59	13:33	42
	15:11	15:18	15:36	25
2. prijemnik	10:10	10:16	10:58	48
	12:47	12:56	13:35	48
	15:07	15:11	15:31	24
3. prijemnik	8:39	8:40	9:20	41
	17:04	17:33	17:40	36

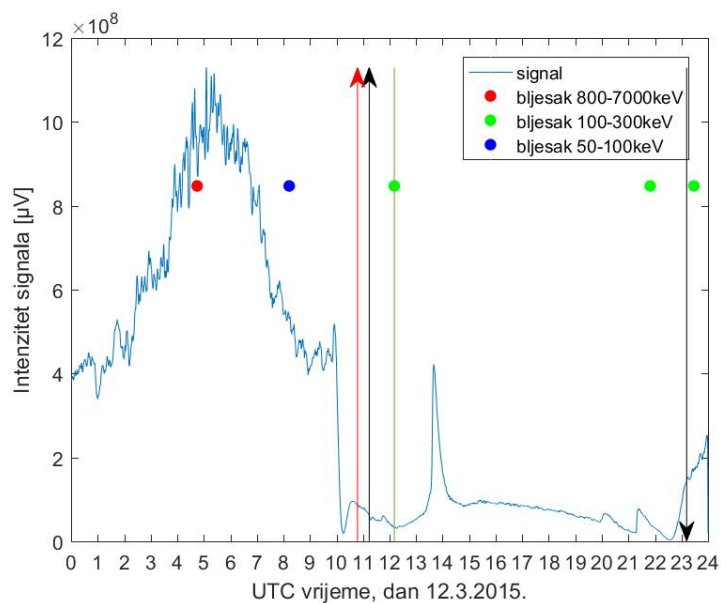
Tablica 5.13. Vremena, trajanje i intenzitet promjena na signalu uočenih na grafovima za dan 12.3.2015., lokalno vrijeme.



Slika 5.16. Prijemnik u Tunisu (1. prijemnik). 12.3.2015.

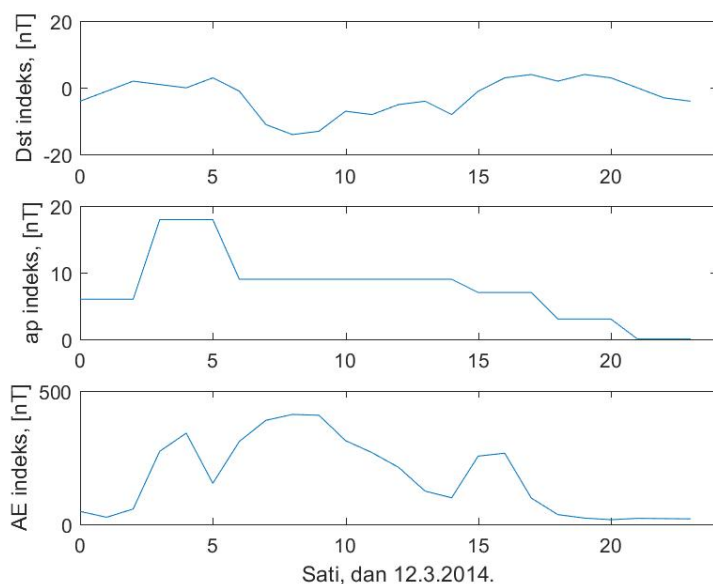


Slika 5.17. Prijemnik u Francuskoj (2. prijemnik). 12.3.2015.



Slika 5.18. Prijemnik u Sjevernoj Americi (3. prijemnik). 12.3.2015.

Geomagnetska aktivnost je slaba. Vrijednost $-Dst$ indeksa ne raste iznad 20 nT, minimalnu vrijednost od 4 nT postiže u 4 i u 21 sat, a maksimum od 14 nT postiže u 8 sati. Geomagnetski ap indeks minimum od 0 nT pokazuje od 21 do 23 sata, a maksimum od 18 nT od 3 do 5 sati. AE indeks minimum od 17 nT postiže u 20 sati, a maksimum od 411 nT u 8 sata (isto kao $-Dst$).



Slika 5.19. Indeksi geomagnetske aktivnosti na dan 12.3.2015.

6. Diskusija i zaključak

U ovom radu analizirani su radio signali mjereni SID monitorima u razdoblju pojačane Sunčeve aktivnosti oko maksimuma 24. Sunčevog ciklusa (rujan 2014.- ožujak 2015.). Odabrani su dani za koje su spektrometrom na *RHESSI* letjelici zabilježeni bljeskovi energija iznad 50 keV. Nakon preliminarne analize s više kombinacija prijemnika i predajnika, odabrane su tri kombinacije prijemnika i predajnika s odgovarajućom kvalitetom signala i kontinuiranim mjerenjem za izabrane događaje.

Intenzitet signala uvijek je veći noću nego danju te ne ovisi o frekvenciji signala s predajnika. Tipični oblik signala ovisi o izlasku i zalasku Sunca, te ne pokazuje ovisnost o intenzitetu ili učestalosti bljeskova. Tipični oblik intenziteta radio signala pokazuje pad s noćne na dnevnu vrijednost prilikom izlaska Sunca na lokaciji prijemnika i porast s dnevne na noćnu vrijednost prilikom zalaska Sunca na istoj lokaciji.

Bljeskovi su uočeni danju što se vidi i iz lokalnih vremena navedenih u tablicama danim u poglavlju 5. Činjenica da su promjene vidljive samo danju ukazuje na njihovu povezanost s promjenom ionizacije. Utjecaj bljeska je kratkog trajanja. Analizirni događaji pokazuju trajanje zračenja bljeskova u opsegu od svega jedne minute do četrdesetak minuta. Utjecaj bljeska na signalu značajniji je u razdoblju između izlaska i zalaska Sunca na lokaciji prijemnika kao kratki nagli porast, a pad je blaži. To je i očekivano, jer tijekom dana prevladavaju procesi ionizacije pa se rekombinacije događaju rjeđe i potrebno je više vremena da se gustoća nabijenih čestica vrati na istu vrijednost koju je imala i prije bljeska. U razdoblju oko izlaska i zalaska Sunca na lokaciji prijemnika teže je uočiti utjecaj bljeska. Bljesak se superponira na očekivani pad, odnosno rast intenziteta signala.

Uočeni bljeskovi pretežito su visokih energija, većina u rasponu 800-7000 keV, uz nekoliko bljeskova manjih energija (100-300 keV). Nije zabilježen niti jedan bljesak koji spada u najniži izabrani raspon energija (50-100 keV). Neki od bljeskova uočeni su na sva tri prijemnika, dok su neki uočeni na pojedinačnom prijemniku.

Tijekom bljeska amplitude rastu ili padaju od 40% pa do preko 1000%. Amplituda porasta, odnosno pada signala manja je za bljeskove uočene na samo jednom prijemniku, a veća za bljeskove uočene na sva tri prijemnika. Promjena amplitude ne ovisi o frekvenciji signala s predajnika.

Geomagnetska aktivnost bila je slaba do umjerena za svaki od promatranih događaja. Samo kod jednog od promatranih događaja vrijeme povećane geomagnetske aktivnosti istovremeno je s pojavom bljeska.

Na kraju ističemo da su SID monitori vrlo korisni za proučavanje promjena ionosfere putem ispitivanja radio signala koji bilježe. Uz to su jeftini i lako se održavaju, a podaci su dostupni zahvaljujući projektu *SID monitoring* koji vodi *Stanford Solar Center*. Dodatno, rezultati dobiveni u ovom radu doprinose razumijevanju utjecaja ionosfere na astronomska opažanja u radiovalnom području, primjerice promatranja LOFAR teleskopom.

7. Literatura

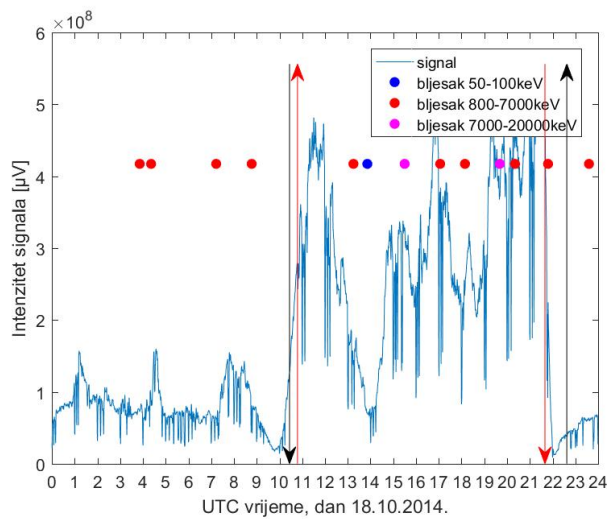
- 1 Proelss, G. W. (2004.) *Physics of the Earth's Space Environment*. Berlin. Springer-Verlag.
- 2 Balogh, A., Hudson, H., Petrokay, K., vomn Steiger, R. (2015.) *The Solar Activity Cycle: Physical Causes and Consequences*. New York. Springer-Verlag.
- 3 Budden, K.G. (1985.) *The propagation of radio waves: The theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere*. Cambridge. Cambridge University Press.
- 4 Goldston, R.J i Rutherford, P.H. (1995.) *Introduction to Plasma Physics*. Bristol. IOP Publishing Ltd.
- 5 Dellinger, J. H. (1939.) The role of ionosphere in radio wave propagation. *Electrical Engineering*, 1939.(58), 803.-822.
- 6 Pole, I. (1999.) Radio Waves and the Ionosphere. <https://www.arrl.org/files/file/Technology/pdf/119962.pdf>
- 7 Nahin, P.J. (1996.) *The Science of Radio*. Woodbury. AIP Press.
- 8 Sunspots/Solar cycle. NOAA. <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/sunspots\solar-cycle>
- 9 Solar flares (Radio blackout). NOAA. <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-flares-radio-blackouts>
- 10 <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-structure-and-composition-of-the-sun/>
- 11 Solar activity. *Sid Monitoring Station*. <https://sidstation.loudet.org/solar\activity-en.xhtml>
- 12 Solar facts. *The Sun today*. <https://www.thesuntoday.org/solar-facts/suns-magnetic-poles-flipped-solar-max-is-here/>
- 13 Ionosphere and Magnetosphere. *Britannica* <https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere#ref272026>
- 14 Magnetic Components. *Canada* https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/comp-en.php
- 15 Earth's magnetosphere. NOAA. <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/earths-\magnetosphere>
- 16 Verbanac, G., Živković, S., Vršnak, B., Bandić, M., Hosjak, T., Comparison of geoeffectiveness of coronal mass ejections and corotating interaction regions, *Astronomy and Astrophysics* 558, A85 (2013)
- 17 The Disturbance Storm Time Index, NOAA. <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/dst.html>

- 18 AE, AU, AL, AO INDICES, *International Service of Geomagnetic Indices*. http://isgi.unistra.fr/indices_ae.php
- 19 Kp INDEX. *International Service of Geomagnetic Indices*. http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php
- 20 Electromagnetic spectrum. *Britannica*. <https://www.britannica.com/science/electromagnetic-spectrum>
- 21 Ionospheric Propagation. *Utoronto*. <https://www.waves.utoronto.ca/prof/svhum/ece422/notes/20c-ionosphere.pdf>
- 22 Radio Waves and Ionosphere. *Technology*. <https://www.arrl.org/files/file/Technology/pdf/119962.pdf>
- 23 Solar wind. *NOAA*. <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-wind>
- 24 What are Solar flares. *Space Weather Live*. <https://www.spaceweatherlive.com/en/help/what-are-solar-flares.html?fbclid=IwAR2tNUvL1LU15VgYi4J\L667SsULoCSid00GHdNC5dvkGE09PF8KuEZLPBQw.html>
- 25 RHESSI *eoPortal Directory*. <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/r/rhessi>
- 26 VLF. *SID Monitoring Station*. <https://sidstation.loudet.org/vlf-en.xhtml>
- 27 Station Overview. *SID Monitoring Station*. <https://sidstation.loudet.org/station-en.xhtml>
- 28 Anderson, D., Fuller-Rowell, T. (1999.) *Space Environment Topics, SE-14*. Boulder, CO. Space environment center.
- 29 The structure and composition of the Sun. *Lumen*. <https://courses.lumenlearning.com/astronomy/chapter/the-structure-and-composition-of-the-sun/>
- 30 Solar max is here. *The Sun today*. <https://www.thesuntoday.org/solar-facts/suns-magnetic-poles-flipped-solar-max-is-here/>
- 31 Planetary K-index *NOAA*. <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>
- 32 Mission facts. *NASA*. <https://hesperia.gsfc.nasa.gov/rhessi3/mission/mission-facts/index.html>

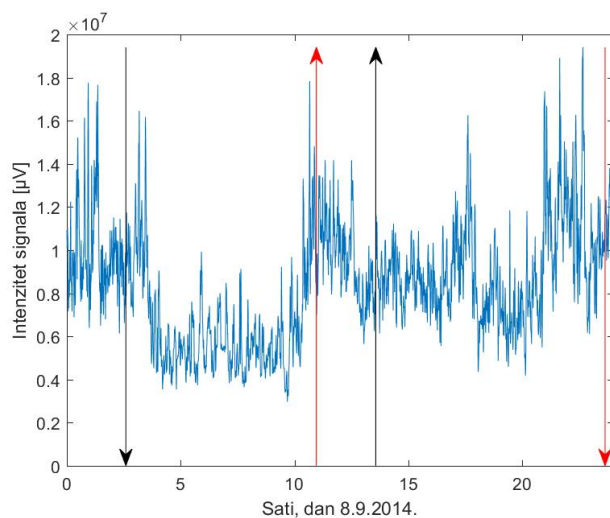
Dodatak A

A1. Odabir podataka

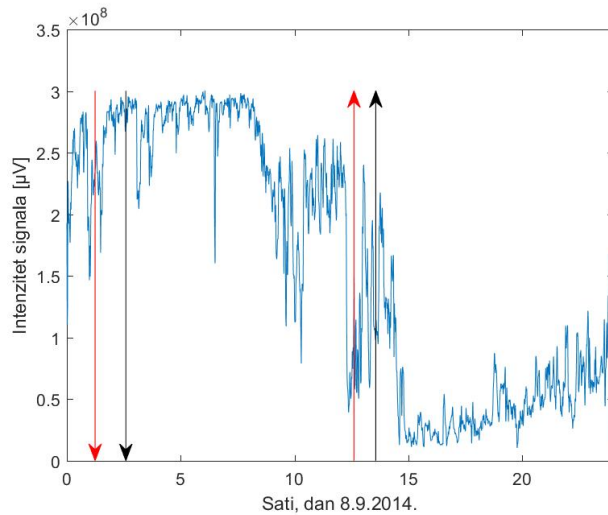
Osim tipičnog oblika signala na prijemniku, ključan faktor u odabiru podataka je signal koji je dovoljno gladak, odnosno bez šumova koji mogu prikriti bljesak, odnosno istog su reda veličine kao i bljesak. Na slikama A1, A2 i A3 prikazane su kombinacije prijemnika i predajnika s lošom kvalitetom signala. Filtriranje šuma nema smisla, jer bi se na taj način izgubili i eventualno vidljivi utjecaji bljeskova. Uzrok loše kvalitete signala je prevelika udaljenost između predajnika i prijemnika.



Slika A1. Prijemnik u Vijetnamu, predajnik u Kanadi (3. predajnik). 18.10.2014. Signal sadrži previše šuma da bi se mogli razaznati utjecaji Sunčevih bljeskova na ionizaciju.



Slika A2. Prijemnik u SAD-u (3. prijemnik), ali s prikazom signala s različitog predajnika. 8.9.2014. Signal sadrži previše šuma da bi se mogli razaznati utjecaji Sunčevih bljeskova na ionizaciju.



Slika A3. Drugi prijemnik u SAD-u. 8.9.2014, predajnik u Kanadi (3. predajnik). Signal sadrži previše šuma da bi se mogli razaznati utjecaji Sunčevih bljeskova na ionizaciju.

A2. Geomagnetski indeksi

U tablici A1 prikazane su minimalne i maksimalne vrijednosti geomagnetskih indeksa Dst , ap i AE za svaki od promatranih dana. Uočavamo da je geomagnetska aktivnost slaba tijekom svih promatranih dana.

	8.9.2014.		16.10.2014		18.10.2014.		24.10.2014.		12.3.2015.	
indeks	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Dst	-12	-3	-22	-11	-32	-2	-40	-19	-14	4
ap	0	7	3	15	9	27	3	22	0	18
AE	28	158	22	339	72	654	32	897	17	411

Tablica A1. Minimalne i maksimalne vrijednosti geomagnetskih indeksa za pet promatranih dana. Sve vrijednosti izražene su u nT.