Utjecaj atmosferskog tlaka na sekundarano kozmičko zračenje

Škrgulja, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:603698

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Tomislav Škrgulja

UTJECAJ ATMOSFERSKOG TLAKA NA SEKUNDARNO KOZMIČKO ZRAČENJE

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Tomislav Škrgulja

Diplomski rad

Utjecaj atmosferskog tlaka na sekundarno kozmičko zračenje

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Giuliana Verbanac

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____
2. _____
3. _____
4. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Giuliani Verbanac na pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se voditelju Zvjezdarnice Zagreb dr. sc. Draganu Roši na savjetima, te na prilici za upoznavanje sa SEVAN CRO detektorom.

Zahvaljujem se Državnom hidrometeorološkom zavodu (DHMZ) na podacima o tlaku zraka.

Zahvaljujem se roditeljima na podršci.

Sažetak

Proveden je izračun barometrijskih koeficijenata za SEVAN CRO detektor sekundarnog kozmičkog zračenja, koji je postavljen 2008. godine u Zagrebu, kao dio SEVAN mreže detektora. U tu su se svrhu tražile korelacije između mjerenih vrijednosti intenziteta sekundarnog kozmičkog zračenja i tlaka atmosfere na području gdje je smješten detektor, za svaki od tri kanala detektora, te za nabijene čestice niske energije, neutralne čestice i za mione visoke energije. Izračun je proveden koristeći podatke o broju detektiranih čestica u periodu kada je Sunčeva aktivnost bila u minimumu, kako bi utjecaj atmosferskog tlaka bio što bolje izoliran od Sunčeva utjecaja. Rezultati su pokazali kako broj detektiranih čestica, za sva tri kanala detektora i za sve vrste čestica, približno eksponencijalno opada sa porastom tlaka, te su izračunati pripadni barometrijski koeficijenti.

Sadržaj

1. Uvod ... 1
2. Kozmičko zračenje ... 3
2.1. Galaktičko kozmičko zračenje ... 3
2.2. Sunčevo kozmičko zračenje ... 4
2.3. Anomalno kozmičko zračenje ... 5
2.4. Utjecaj Zemljine atmosfere na kozmičko zračenje ... 5
3. Sunce i heliosfera ... 7
3.1. Struktura Sunca ... 7
3.2. Sunčev vjetar ... 8
3.3. Sunčeva aktivnost ... 8
3.4. Heliosfera ... 9
4. Geomagnetsko polje ... 11
4.1. Magnetosfera ... 11
4.2. Vremenske promjene geomagnetskog polja ... 12
4.3. Utjecaj geomagnetskog polja na kozmičko zračenje ... 13
5. SEVAN CRO detektor kozmičkog zračenja ... 15
5.1. Općenito o SEVAN mreži detektora ... 15
5.2. Fizikalni princip rada SEVAN CRO detektora ... 15
5.2.1. Fotomultiplikator ... 15
5.2.2. Scintilator ... 16
5.3. Građa SEVAN CRO detektora ... 16
6. Podaci i metoda ... 19
6.1. Baždarenje detektorskog tlakomjera ... 20
6.2. Filtriranje podataka ... 21
6.3. Određivanje barometrijskih koeficijenata ... 27
6.4. Primjer korekcije podataka ... 33
7. Zaključak ... 37

1. Uvod

Galaktičko kozmičko zračenje je čestično zračenje velikih energija, koje svakodnevno dolazi do Zemlje, a smatra se da nastaje brojnim astrofizičkim procesima. Pojedine čestice mogu doseći energije i do 10^8 TeV, što je nekoliko redova veličine veće energije od čestica u CERN-ovim akceleratorima [1]. Prilikom interakcije zračenja sa Zemljinom atmosferom, nastaju *atmosferski čestični pljuskovi* (čestice se raspadaju), odnosno *sekundarno kozmičko zračenje*. Tijekom Sunčeve aktivnosti, koja, među ostalim, rezultira izbačajima oblaka magnetizirane plazme, dolazi do modulacije, odnosno smanjenja toka galaktičkog kozmičkog zračenja, a s njime i sekundarnog kozmičkog zračenja. Iz tog se razloga praćenjem promjena intenziteta sekundarnog kozmičkog zračenja pomoću detektora na Zemljinoj površini, može predvidjeti dolazak Sunčevih magnetiziranih oblaka i nekoliko sati prije nego oni dođu do Zemlje ili do satelita ACE i SOHO koje se nalaze u Lagrangeovoj točki L1. Takvo predviđanje je bitno iz razloga što Sunčeve visokoenergetske čestice prodiru u elektroničke komponente letjelica i satelita, i pritom mogu uništiti integrirane krugove i spojeve ili uzrokovati promjene u elektronskim signalima koji posljedično mogu rezultirati lažnim naredbama. Također, nailazak Sunčevih magnetiziranih oblaka može potaknuti velike aktivnosti u Zemljinom magnetskom polju, koje uzrokuju pojačanu koroziju u plinovodima, a mogu također i poremetiti elektroenergetske sustave. Postoje i zdravstveni rizici za astronaute i pilote koji često lete u avionima na većim visinama. Čestice velikih energija dolaze sa Sunca oko pola sata do jednog sata ranije nego glavni dio čestica, srednjih energija, koje su najopasnije za elektroniku i astronaute. Tok čestica visokih energija je vrlo malen i ne može se mjeriti s dovoljnom točnošću na letjelicama i satelitima. Međutim, on se može kontinuirano mjeriti zemaljskim detektorima i još pouzdanije s mrežom detektora kozmičkog zračenja.

Krajem 2008. dovršena je instalacija SEVAN CRO detektora kozmičkog zračenja u Zvjezdarnici Zagreb. Time je Zvjezdarnica Zagreb postala prvi opservatorij kozmičkog zračenja u Hrvatskoj [2]. Detektor je potpuno samostalna jedinica za kontinuirano bilježenje čestica zračenja, sa mogućnošću slanja podataka preko interneta. Dio je međunarodne mreže detektora kozmičkog zračenja SEVAN (Space Environmental Viewing and Analysis Network). Mrežu čine detektori postavljeni u nekoliko zemalja, u niskim do srednjim geografskim širinama. Glavni cilj mreže je poboljšanje istraživanja u okviru utjecaja Sunca na kozmičko zračenje i istraživanja stanja svemirskog okoliša [3].

Izmjereni tok sekundarnog kozmičkog zračenja na površini Zemlje, odnosno razvoj atmosferskih čestičnih pljuskova, ne ovisi samo o toku upadnog kozmičkog zračenja već i o stanju same atmosfere (i o nekim drugim parametrima, poput stanja geomagnetskog polja). Stoga je, kako bi se moglo znati dolazi li do promjene izmjerenog toka zračenja zbog stvarne promijene toka galaktičkog kozmičkog zračenja ili zbog promjena parametara atmosfere, potrebno odrediti vezu između izmjerenog toka zračenja i parametara atmosfere.

Ovaj se rad bavi određivanjem veze između izmjerenog intenziteta sekundarnog kozmičkog zračenja na SEVAN CRO detektoru u Zvjezdarnici Zagreb i atmosferskog tlaka, odnosno određivanjem pripadnih barometrijskih koeficijenata. U tu su se svrhu tražile korelacije između izmjerenog intenziteta zračenja i atmosferskog tlaka koristeći podatke iz listopada i studenog 2010. godine kada je Sunčeva aktivnost bila u minimumu (kako bi utjecaj atmosfere bio što bolje izoliran od Sunčeva utjecaja).

U 2. poglavlju (Kozmičko zračenje) ukratko su opisani galaktičko, Sunčevo i anomalno kozmičko zračenje i atmosferski čestični pljuskovi.

U 3. poglavlju (Sunce i heliosfera) ukratko su opisani struktura Sunca i Sunčev vjetar i heliosfera, te je dan kratak pregled vrsta Sunčevih aktivnosti.

U 4. poglavlju (Geomagnetsko polje) dan je kratak opis geomagnetskog polja i njegove interakcije sa Sunčevim vjetrom.

U 5. poglavlju (SEVAN CRO detektor kozmičkih zraka) dan je kratak uvod u SEVAN mrežu i opisani su građa i fizikalni principi rada, te interpretacija mjerenja SEVAN CRO detektora.

U 6. poglavlju (Podaci i metoda) opisana je metoda računanja barometrijskih koeficijenata i korišteni podaci, dani su dobiveni rezultati, te je opisan primjer korekcije podataka upotrebom barometrijskih koeficijenata.

2. Kozmičko zračenje

Kozmičko zračenje je čestično (korpuskularno) zračenje visoke energije koje iz svemira dolazi do Zemlje. Ono se dijeli na *primarno*, nastalo astrofizičkim procesima (prije interakcije sa Zemljinom atmosferom) i *sekundarno,* koje nastaje interakcijom primarnog zračenja sa Zemljinom atmosferom.

Primarno zračenje se većinom (~99%) sastoji od jezgara vodika (protona) i jezgara helija (α-čestica), dok se manjim dijelom sastoji od jezgara težih elemenata (~1%) i od ekstremno malih količina ostalih čestica, koje većinom čine pozitroni i antiprotoni.

Primarno kozmičko zračenje dijeli se u tri kategorije:

- *Galaktičko kozmičko zračenje* – tok visokoenergetskih (do 10^{21} eV) čestica koji nastaje daleko izvan Sunčeva sustava
- *Sunčevo kozmičko zračenje* – tok energetskih čestica (~1 MeV - 10 GeV) koje dolaze sa Sunca
- *Anomalno kozmičko zračenje* – tok energetskih čestica (<10 MeV) koje ne potječu ni od Sunca niti spadaju pod galaktičko kozmičko zračenje

2.1. Galaktičko kozmičko zračenje

Galaktičko kozmičko zračenje nastaje daleko izvan Sunčeva sustava. Čine ga većinom protoni (oko 90%), jezgre helija (7-10%), jezgre težih elemenata (oko 1%) i mali udio elektrona. Smatra se da je razlog ovome ionizacija atoma u procesu nastajanja zračenja i prilikom prolaska kroz brojna jaka magnetska polja na putu od izvora do Sunčeva sustava. Naime, jezgra atoma je suprotne električne nabijenosti od elektrona, pa se prolaskom kroz magnetsko polje dovoljno velikom brzinom elektron u potpunosti razdvoji od jezgre. Isto tako, elektron ima puno manju masu nego jezgra, pa mu se prolaskom kroz magnetsko polje putanja zakrivljuje mnogo više nego jezgri, odnosno jezgri je mnogo lakše proći kroz magnetsko polje.

Smatra se kako galaktičko kozmičko zračenje nastaje raznim astrofizičkim procesima, poput supernovi i izbacivanja tvari iz aktivnih galaktičkih jezgara, ali točan izvor zasada nije poznat.

Kako galaktičko magnetno polje kaotično iskrivljuje putanju i raspršuje nabijene čestice galaktičkog kozmičkog zračenja, ono je, za energije čestica veće od 10 GeV, gotovo uniformno raspoređeno (izotropno) s obzirom na smjer iz kojeg dolazi do Sunčeva sustava. Stoga se ne može otkriti izvor galaktičkog kozmičkog zračenja poznajući samo smjer njegovog dolaska.

Isto tako, tok galaktičkog kozmičkog zračenja, koji dolazi do Sunčeva sustava, gotovo je konstantan u vremenu, tj. bio je u periodu otkada su se počela vršiti njegova mjerenja, prije oko 50 godina, pa sve do danas. Pri prolasku galaktičkog kozmičkog zračenja kroz heliosferu (prostor u kojem je Sunčeva atmosfera dominantna) modulira se njegov intenzitet zbog otežanja gibanja uzrokovanog utjecajem čestica heliosfere i interplanetarnog (heliosferskog) magnetskog polja, te dolazi do Zemlje sa smanjenim intenzitetom. Zapaženo je kako je tok galaktičkog kozmičkog zračenja na Zemlji manji kada je Sunčeva aktivnost veća i obratno, tj. da je tok galaktičkog kozmičkog zračenja antikoreliran sa Sunčevom aktivnošću.

Nagli pad toka galaktičkog kozmičkog zračenja na Zemlji, uzrokovan Sunčevom aktivnošću, zove se *Forbushev pad*. On se događa kada oblak magnetizirane plazme izbačene sa Sunca zahvati Zemlju, te isti sprječava dotok dijela čestica.

2.2. Sunčevo kozmičko zračenje

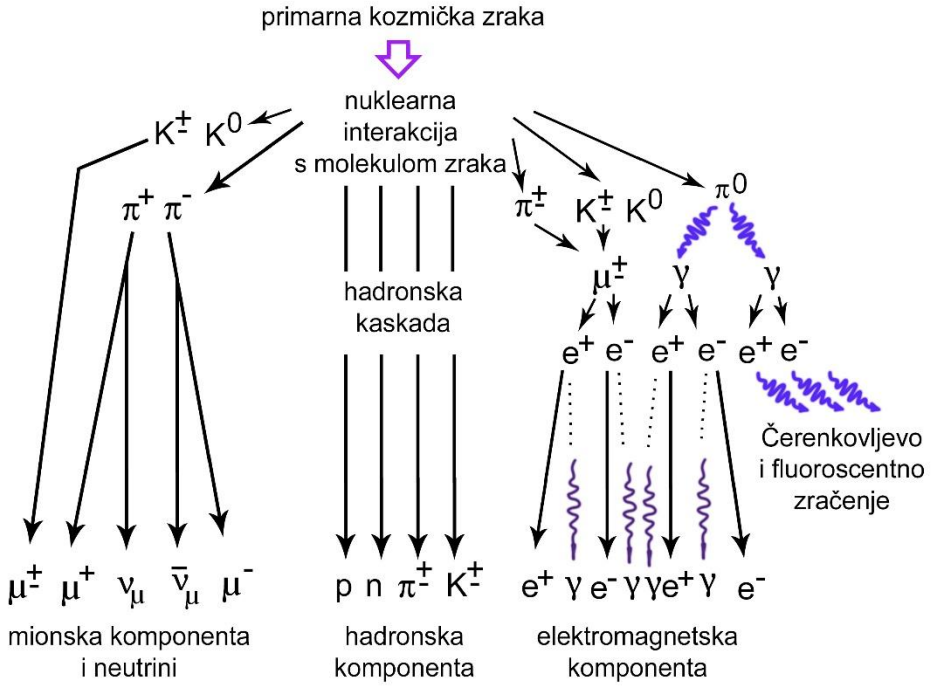
Sunčevo kozmičko zračenje je dio kozmičkog zračenja koje dolazi sa Sunca, a čine ga uglavnom protoni sa manjim udjelom jezgara helija (~10 %) i jezgre težih elemenata (<1 %). Tipične energije čestica su od ~1 MeV/nukleon do ~10 GeV/nukleon. Njegov je intenzitet pojačan tijekom energetskih procesa na Suncu, poput Sunčevih bljeskova i koroninih izbačaja mase. Obično se Sunčevo kozmičko zračenje zbog relativno malih energija ne uspijeva detektirati u ekvatorskim područjima zbog njegova otklanjanja magnetskim poljem (zbog položaja Sunca u odnosu na Zemlju, u blizini ekvatora je kut upada čestica gotovo okomit u odnosu na lokalno geomagnetsko polje), pa se postaje za njegovu detekciju nalaze na većim geografskim širinama.

2.3. Anomalno kozmičko zračenje

Anomalno kozmičko zračenje je dio kozmičkog zračenja, energija manjih od 100 MeV/nukleon, koji ne dolazi od Sunca, a niti ne pripada u galaktičko kozmičko zračenje (puno je manjih energija). Smatra se kako potječe od neutralnih međuzvjezdanih atoma koji se, ulaskom u heliosferu i približavanjem Suncu na udaljenost 1–3 AJ, ioniziraju Sunčevim UV zračenjem i sudarima sa protonima Sunčeva vjetra. Nadalje, nakon ionizacije čestice su nošene Sunčevim vjetrom i interplanetarnim magnetskim poljem nazad do heliopauze (granice heliosfere), gdje neke od njih udarni val ubrzava do velikih energija nazad u unutrašnjost Sunčeva sustava.[4]

2.4. Utjecaj Zemljine atmosfere na kozmičko zračenje

Ulaskom čestica primarnog kozmičkog zračenja u Zemljinu atmosferu nastaju *čestični atmosferski pljuskovi* (*atmosferske kaskade*): brojni sudari između čestica kozmičkog zračenja i jezgara čestica atmosfere, zbog jako velikih energija kozmičkog zračenja, uzrokuju nuklearne reakcije kod kojih dolazi do nastanka brojnih novih čestica. Većina novonastalih čestica se dalje raspada u druge čestice. Tok tako novonastalih čestica se naziva *sekundarno kozmičko zračenje*. Shema atmosferskog čestičnog pljuska prikazana je na slici 1.



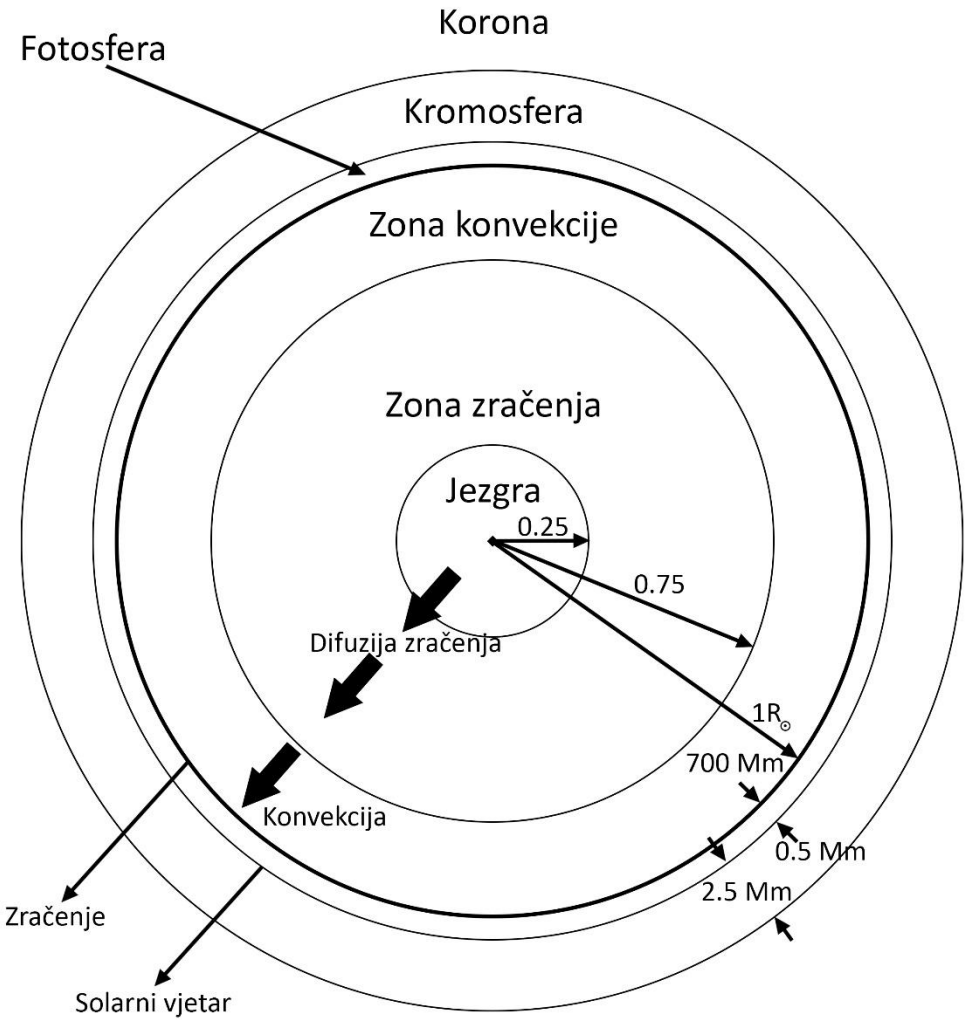
Slika 1. Shematski prikaz atmosferskog čestičnog pljuska.

Pri spomenutim nuklearnom reakcijama nastaju, uglavnom, pioni i kaoni koji ubrzo raspadom prelaze u mione i neutrine.

3. Sunce i heliosfera

3.1. Struktura Sunca

Unutrašnjost Sunca se može podijeliti na nekoliko koncentričnih regija, od kojih svaka na neki način prenosi energiju od jezgre do površine. Pojednostavljena skica strukture Sunca, u presjeku, prikazana je na slici 2.



Slika 2. Skica strukture Sunca

Jezgra je centralno područje Sunca koje se proteže do $\sim 0{,}25 R_{\odot}$. To je područje u kojemu se, zbog velikog tlaka uzrokovanog gravitacijom, odvija nuklearna fuzija, odnosno jezgre atoma se spajaju u teže atomske jezgre, pri čemu se oslobađaju goleme količine energije. Tako se središte jezgre sastoji od helija koji je nastao fuzijom vodika.

Oko jezgre se nalazi *radijacijska zona* koja se proteže do $\sim 0{,}75 R_{\odot}$ udaljenosti od središta. To je područje u kojemu dolazi do velikog raspršenja fotona generiranih u jezgri, odnosno energija se od jezgre prenosi difuzijom radijacije. Naime, kada bi se foton slobodno gibao iz jezgre, trebalo bi mu oko 2 sekunde da dođe do površine Sunca, no zbog velikog broja sudara sa materijom radijacijske zone put fotona od jezgre do površine traje u prosjeku oko 170 000 godina.

Između vrha radijacijske zone i površine Sunca, nalazi se *konvektivna zona*, u kojoj dolazi do naglog pada temperature, od $2 \cdot 10^5$ K pri dnu zone do 5700 K na površini Sunca. Zbog takvog temperaturnog gradijenta, konvektivna zona je područje velike konvektivne nestabilnosti, te se u njoj energija, od vrha radijacijske zone do površine Sunca, prenosi konvekcijom.

Iznad površine Sunca nalazi se atmosfera, koja se sastoji od 3 sloja. *Fotosfera* je najdonji sloj, debljine ≈ 500 km i gustoće 10^{23} $\text{čestica}/\text{m}^3$, koji emitira većinu Sunčeva zračenja. Iznad nje se nalazi, rjeđa i transparentnija, *kromosfera*, gustoće oko 10^{17} $\text{čestica}/\text{m}^3$, dok se nad njom nalazi, još rjeđa, *korona*, gustoće 10^{15} $\text{čestica}/\text{m}^3$.

Za razliku od Sunčeve unutrašnjosti, u atmosferi temperatura raste s visinom, od oko 4200 K u fotosferi do oko $2 \cdot 10^5$ K u koroni. [5]

3.2. Sunčev vjetar

Sunčev vjetar (*solarni vjetar*) je tok nabijenih čestica koje kontinuirano napuštaju Sunce. Sastoji se uglavnom od elektrona i protona. Sunčev vjetar je zapravo pojava ekspanzije Sunčeve korone, koja se događa zbog toga što je koronina temperatura prevelika da bi Sunčeva gravitacija zaustavila njenu ekspanziju. Tipične brzine čestica Sunčeva vjetra na Zemljinoj udaljenosti od Sunca su reda veličine 100 km/s, a energije su reda veličine keV, za protone i eV za elektrone. [6]

3.3. Sunčeva aktivnost

Na fotosferi se nalaze tamna područja koja se nazivaju *Sunčeve pjege*. Tamna su jer im je temperatura manja od temperature okolnih područja i iznosi oko 3000 K. Sunčeve pjege obično traju od nekoliko dana do nekoliko mjeseci i različitih su veličina. Postojanje tih

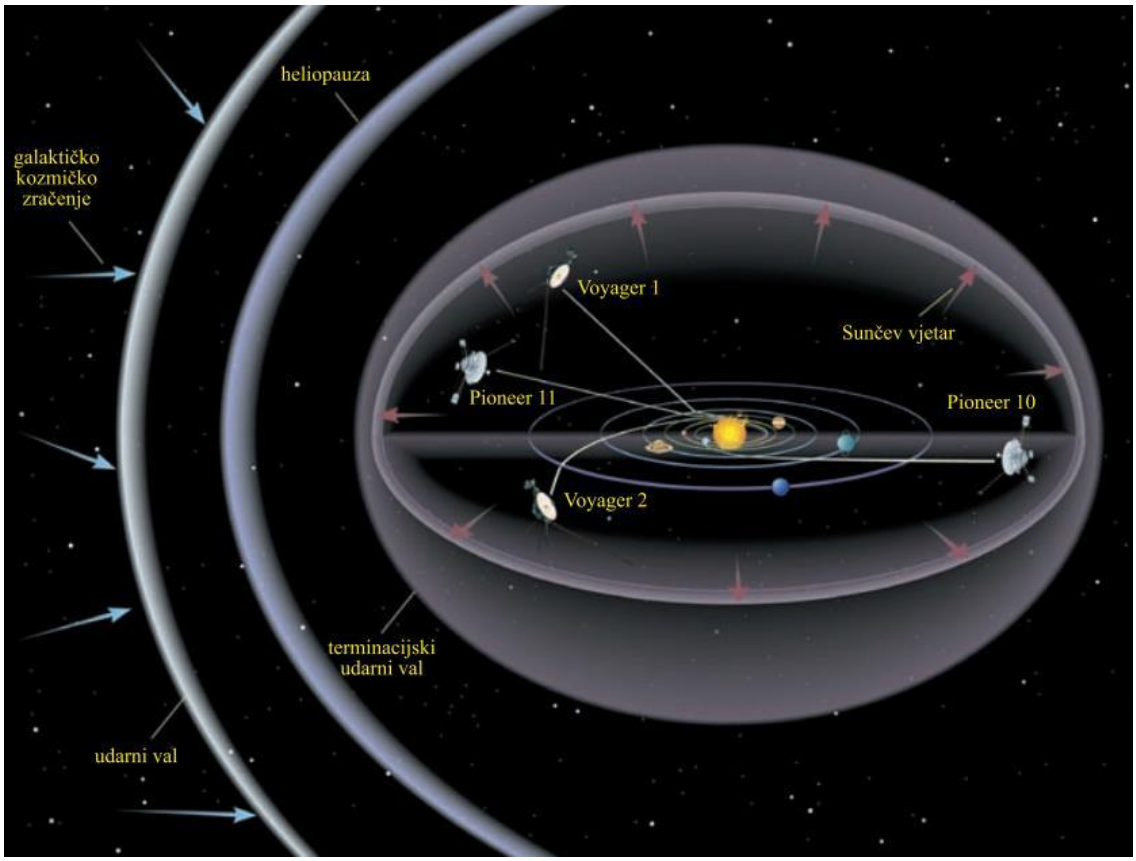
relativno hladnih područja se objašnjava postojanjem jakih magnetskih polja koja sprječavaju dolazak vrućih plinova iz nižih slojeva u fotosferu. Zapaženo je kako broj Sunčevih pjega raste i opada sa periodom od oko 11 godina. Isto tako, opaženo je kako postoje i povezane oscilacije Sunčeva magnetskog polja: svakog Sunčeva ciklusa dolazi do njegovog reverzala (zamjene polova), tako da se tijekom 22 godine (dva ciklusa oscilacije broja pjega), magnetsko polje vraća u početnu orijentaciju.

Iznad površine Sunca, u blizini aktivnih regija karakteriziranim prisutnošću Sunčevih pjega, događaju se velike eksplozije, *Sunčevi bljeskovi*, koje nastaju na neutralnim magnetskim silnicama (između suprotno usmjerenih silnica). Sastoje se od plazme protona i elektrona temperature nekoliko milijuna K i emitiraju ogromne količine elektromagnetskih gama i X-zraka. Često se zajedno sa Sunčevim bljeskovima javljaju *koronini izbačaji mase*, izbačaji ogromne količine plazme elektrona i protona koji putuju po silnicama Sunčeva magnetskog polja. U interakciji su sa Sunčevim vjetrom i Zemljinom magnetosferom.

Svaka vrsta aktivnosti u Sunčevoj atmosferi uzrokuje varijacije u energiji Sunčeva zračenja, te u energiji čestica izbačenih iz Sunca u međuplanetarni prostor. Varijacije su direktno povezane sa periodičnom aktivnošću Sunca, odnosno sa brojem Sunčevih pjega, iako mali broj pjega ne znači nužno nisku aktivnost. [6]

3.4. Heliosfera

Heliosfera je prostor unutar kojeg je Sunčev vjetar dominantan u odnosu na međuzvjezdanu tvar. Granica između heliosfere i okolnog prostora zove se *heliopauza* i određena je ravnotežnom između dinamičkih tlakova Sunčeva vjetra i međuzvjezdane tvari. Skica heliosfere prikazana je na slici 3.



Slika 3. Skica heliosfere

Kako Sunčev sustav ne miruje, već je dio galaktike koja rotira, smatra se kako heliosfera nije sfernog oblika, već je sabijena međuzvjezdanom tvari iz smjera u kojemu Sunce putuje kroz galaktiku i izdužena sa suprotne strane (slično kao i u slučaju Zemljine magnetosfere i Sunčeva vjetra). [4]

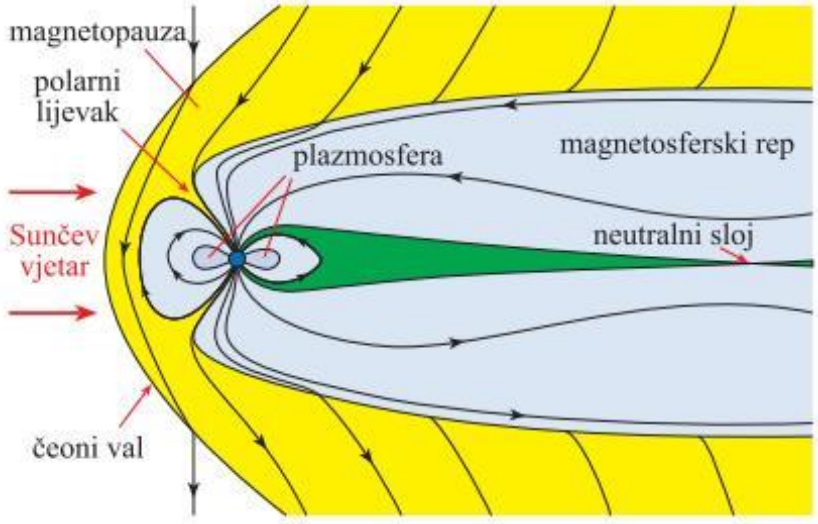
4. Geomagnetsko polje

Geomagnetsko polje je Zemljino magnetsko polje. Ono je, u blizini Zemljine površine, u prvoj aproksimaciji približno jednako magnetskom polju magnetskog dipola (idealnog štapićastog magneta) centriranog u središtu Zemlje, čija je os nagnuta za ~11° u odnosu na os Zemljine rotacije. Intenzitet polja se povećava od ~30 000 nT na ekvatoru do ~60 000 nT na g*eomagnetskim polovima*, koji su mjesta na kojima je polje, na Zemljinoj površini, vertikalno usmjereno, odnosno mjesta gdje bi se u prvoj aproksimaciji polja nalazili polovi idealiziranog dipola. Smatra se da su južni i sjeverni pol nekada bili zamijenjeni u odnosu na današnje stanje, tj. kako je polje bilo suprotno usmjereno. Naime, tijekom nastanka stijene, ona poprima magnetizaciju u smjeru okolnog magnetskog polja. Daljnjim hlađenjem stijene, magnetizacija ostaje tako trajno usmjerena, te je mjerenjem smjera magnetizacije, poznavajući starost stijene, moguće otkriti nekadašnji smjer geomagnetskog polja. Tako su brojne analize magnetizacije stijena diljem svijeta pokazale kako se tijekom Zemljine prošlosti već mnogo puta dogodio *geomagnetski reverzal*, tj. promijenio se polaritet geomagnetskog polja.

Smatra se kako glavni dio geomagnetskog polja postoji zbog konvektivnog gibanja nabijene plazme u Zemljinoj vanjskoj jezgri (*geomagnetski dinamo*). Osim glavnog dijela, manji dio (<1%) potječe od magnetičnih stijena u litosferi i gornjem plaštu. Velika i vremenski vrlo promjenjiva komponenta polja dolazi od magnetosferskih struja, koje nastaju kao posljedica interakcije između Sunčeva zračenja i nabijene Sunčeve plazme sa Zemljinom atmosferom i geomagnetskim poljem. [4]

4.1. Magnetosfera

Granica na kojoj je Zemljino magnetsko polje prevladavajuće, odnosno dovoljno jako da bi spriječilo napredak toka Sunčeva vjetra u Zemljinu okolinu zove se *magnetopauza*, a prostor unutar nje *magnetosfera*. Magnetopauza je određena jednakošću gustoće energije geomagnetskog polja i gustoće kinetičke energije Sunčeva vjetra. Kao što se može vidjeti iz skice na slici 4, na dnevnoj strani Zemlje, nalazi se na udaljenosti od oko 10-15 radijusa Zemlje (od središta Zemlje), dok se na noćnoj strani proteže do udaljenosti veće od 200 radijusa Zemlje (*magnetosferski rep*), zbog utjecaja Sunčeva vjetra.



Slika 4. Skica magnetosfere

Kao posljedice Sunčeva elektromagnetskog ozračenja (solarne iluminacije) i interakcije između magnetosfere i Sunčeve plazme, u magnetosferi postoji nekoliko izvora magnetosferskih električnih struja koje su odgovorne za magnetosferske poremećaje na kratkim vremenskim skalama.[4]

4.2. Vremenske promjene geomagnetskog polja

Geomagnetsko polje je vremenski promjenjivo na raznim vremenskim skalama, od djelića sekunde pa do starosti Zemlje. Dok je za promjenu na velikim vremenskim skalama zaslužna promjena toka plazme u Zemljinoj vanjskoj jezgri, na kratkim vremenskim skalama (reda veličine nekoliko sekunda, minuta ili sati) varijacije u geomagnetskom polju su većinom izazvane raznim sustavima električnih struja u magnetosferi. Naime, osim distorzije oblika geomagnetskog polja, odnosno kompresije na dnevnoj i izduženja na noćnoj strani, Sunčev vjetar u geomagnetskom polju izaziva električne struje koje stvaraju vlastito magnetsko polje. Kompresija na dnevnoj strani povezana je strujama u magnetopauzi, dok je izduženje na noćnoj stranici popraćeno strujama koje teku na površini magnetosferskog repa (*struja magnetskog repa*) i na plohi koja razdvaja južnu i sjevernu hemisferu (*struja neutralnog sloja*). Na radijalnoj udaljenosti od oko 5-8 radijusa Zemlje, oko Zemlje teče *prstenasta struja*, sastavljena većinom od protona energija 20-200 keV. Sve nabrojane struje teku okomito na geomagnetsko polje, no postoje struje koje su usmjerene duž silnica geomagnetskog polja, te ih spajaju sa polarnim ionosferskim strujama i većinom ih čine elektroni. Sve te brojne struje ovise o dinamičkom tlaku Sunčeva vjetra i

međuplanetarnom magnetskom polju. Tako se promjenom parametara Sunčeva vjetra mijenjaju struje, te dolazi do promjena u geomagnetskom polju, odnosno do *geomagnetske aktivnosti*. Kako se geomagnetska aktivnost javlja u više oblika, prate se razni *geomagnetski indeksi*, izračunate veličine povezane sa pripadnom globalnom geomagnetskom aktivnošću. Jakim i dugim djelovanjem Sunčeva vjetra na magnetosferu javlja se pojačana prstenasta struja, te nastaje *geomagnetska oluja*, jaki globalni poremećaj geomagnetskog polja. Geomagnetske oluje karakterizirane su snižavanjem horizontalne komponente geomagnetskog polja u srednjim geografskim širinama i najčešće ih se prati računanjem *Dst indeksa*, longitudinalnog prosjeka odstupanja horizontalne komponente polja od normalne zbog ekvatorijalno simetrične geomagnetske oluje. Tako, za vrijeme geomagnetskih oluja Dst indeks ima manju vrijednost od uobičajene i obično se geomagnetskom olujom smatra aktivnost kod koje je Dst < -50 nT [5]. Osim Dst, često se kod klasifikacije geomagnetske aktivnosti koristi *Ap indeks.* Za određeni dan, Ap indeks se računa kao suma osam 3-satnih *ap indeksa*, koji približno predstavljaju maksimalni poremećaj (u jedinicama od 2,0 nT) najveće komponente (sjever-jug, istok-zapad ili vertikalna komponenta) geomagnetskog polja na 50° geomagnetske širine. Obično se geomagnetske oluje prema vrijednosti Ap indeksa klasificiraju na sljedeći način [7]:

- Manja geomagnetska oluja: 29 < Ap < 50
- Velika geomagnetska oluja: 49 < Ap < 100
- Žestoka (engl. s*evere*) geomagnetska oluja: Ap > 100

4.3. Utjecaj geomagnetskog polja na kozmičko zračenje

Kako magnetsko polje utječe Lorentzovom silom na nabijene čestice u gibanju, geomagnetsko polje iskrivljuje putanje na nabijenih čestica kozmičkog zračenja. Koliko će jako putanja čestice biti zakrivljena, osim parametara magnetskog polja, ovisi o samoj čestici, odnosno o njenoj brzini, masi i naboju, tj. o *magnetskom rigiditetu* čestice, P, koji je definiran kao

$$P = \frac{p}{q} \tag{1}$$

gdje je p količina gibanja, a q naboj čestice. Čestice koje imaju jednak rigiditet će, uz iste uvjete ulaska u magnetsko polje, imati jednaku putanju. Ukoliko je rigiditet čestice premalen u odnosu na lokalno geomagnetsko polje, ona će se vratiti nazad u Svemir. Tako se za svaku lokaciju na površini Zemlje može definirati *granični geomagnetski rigiditet*, minimalni rigiditet koji je potreban da bi čestica teoretski mogla doći do tla. Ta veličina nije konstantna za određeno mjesto već varira u vremenu sukladno varijacijama geomagnetskog polja. Posljedično, detektori koji se nalaze na površini Zemlje mogu posredno zabilježiti samo čestice koje imaju dovoljno veliki rigiditet. [9]

5. SEVAN CRO detektor kozmičkog zračenja

5.1. Općenito o SEVAN mreži detektora

Mreža detektora sekundarnog kozmičkog zračenja *SEVAN* osnovana je u okviru Međunarodne heliofizičke godine (IHY), programa koji je osmišljen kao međunarodni program globalnih istraživanja u svrhu boljeg razumijevanja pokretača stanja u svemirskom okolišu i klimi. Mrežu trenutno čine 6 detektora postavljenih u niskim i srednjim geografskim širinama, od kojih su tri postavljena u Armeniji (Nor-Amberdu, Yerevanu i Aragatsu), jedan u Hrvatskoj (Zagrebu), jedan u Bugarskoj (na planinskom vrhu Musala) i jedan u Indiji (New Delhiju).[3]

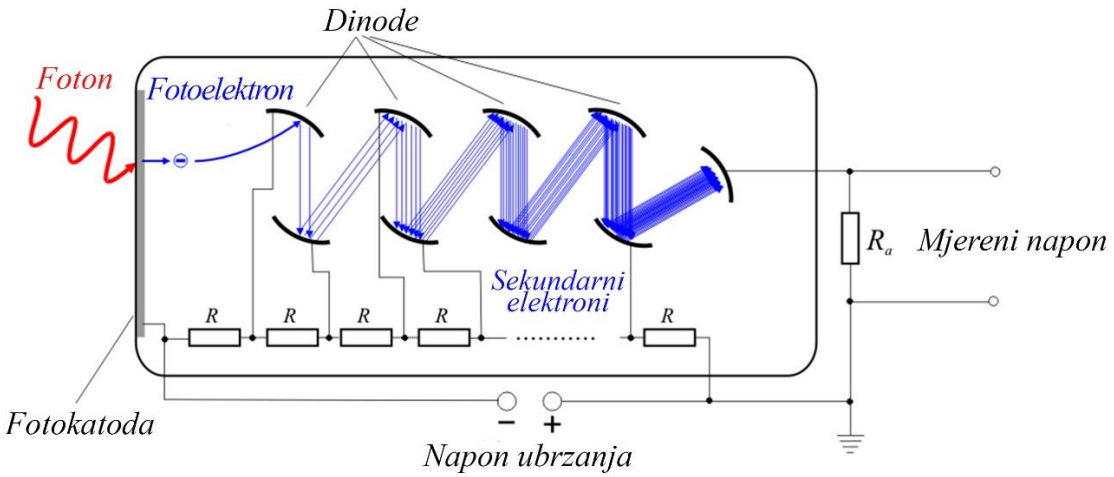
Cilj mreže je prikupljanje podataka o sekundarnom kozmičkom zračenju radi boljeg razumijevanja povezanosti između Sunčeve aktivnosti i toka čestica kozmičkog zračenja. Kako solarna aktivnost uzrokuje modulacije kozmičkog zračenja, detekcijom modulacije moguće je predvidjeti nadolazeće geomagnetske oluje satima prije nego što detektori na satelitima detektiraju nadolazeći oblak plazme sa Sunca. Naime, prilikom koroninih izbačaja mase, oblak plazme putuje sa Sunca srednjim brzinama od oko 2500 km/s, te mu treba neko vrijeme kako bi stigao do satelita i bio detektiran. Istom oblaku treba manje od sat vremena kako bi od, npr. ACE ili SOHO satelita, došao do magnetosfere i izazvao geomagnetsku oluju, što je prekratko vrijeme za poduzimanje potrebnih mjera.[2]

5.2. Fizikalni princip rada SEVAN CRO detektora

5.2.1. Fotomultiplikator

Fotomultiplikator je uređaj koji energiju fotona pretvara u električni signal i pojačava ga do znatno većih energija od one koju je imao foton.

Shema fotomultiplikatora prikazana je na slici 5. Princip rada se zasniva na fotoelektričnom efektu. Elektroni izbačeni iz metala, zbog primitka fotona, se ubrzavaju električnim poljem, te dolazi do sudara sa drugim komadom metala iz kojega se tada izbija još veći broj elektrona, koji se tada ubrzavaju drugim električnom poljem i tako dalje. Ovakav se proces izbijanja i ubrzanja elektrona ponavlja uzastopno nekoliko puta, te su količina i energije konačno izbijenih elektrona mnogo veće od energije dolaznog fotona. Elektroni se tada, zbog svoje brojnosti i velike energije, mogu lako detektirati.



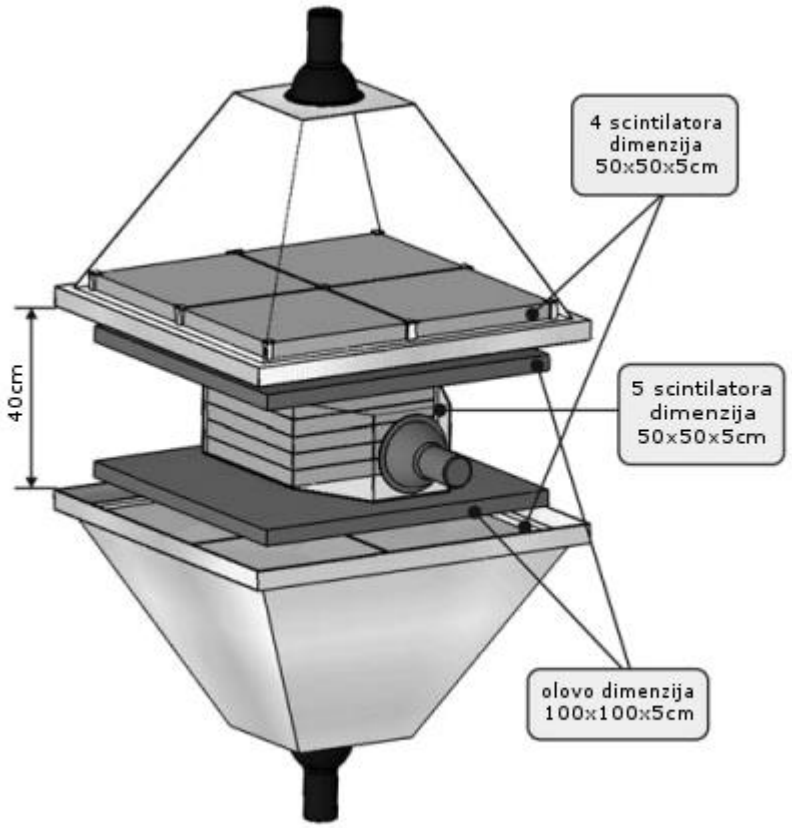
Slika 5. Shema fotomultiplikatora

5.2.2. Scintilator

Scintilator je materijal sa svojstvom *scintilacije*, otpuštanja energije, primljene od ionizirajućeg zračenja u obliku elektromagnetskog zračenja. Scintilatori se obično koriste u kombinaciji sa nekom vrstom fotomultiplikatora kako bi se izazvani bljesak mogao efektivno detektirati. [8]

5.3. Građa SEVAN CRO detektora

Kako bi bila moguća detekcija različitih vrsta čestica, SEVAN detektor sadrži tri kanala za detekciju čestica sekundarnog kozmičkog zračenja. Svaki kanal se sastoji od scintilacijskih ploča dimenzija 50 cm x 50 cm x 5 cm i jednog fotomultiplikatora. Gornji i donji kanali sadrže po 4, a srednji 5 scintilacijskih ploča. Kanali su međusobno odvojeni olovnim pločama dimenzija 100 cm x 100 cm x 5 cm. Skica detektora prikazana je na slici 6.



Slika 6. Detekcijski dio SEVAN CRO detektora.

Za razliku od ploča u gornjem i donjem kanalu, u srednjem kanalu one nisu poslagane horizontalno, jedne do drugih, već leže naslagane jedne na drugima. Naime, da bi došlo do scintilacije, mora doći do interakcije dolazeće čestice i jezgre atoma u scintilatoru, no nuklearni udarni presjek jezgre je malen za neutralne čestice, pa je potreban deblji sloj da bi ona bila registrirana.

Kada dođe do sudara čestice kozmičkog zračenja i scintilacijske ploče, u nekom kanalu, ploča se pobuđuje, te dolazi do elektromagnetskog zračenja, od kojeg većina, zbog dizajna kućišta, bude usmjerena prema fotomultiplikatoru. Tako dolazi do detekcije zračenja, te se, pomoću elektronike koja je spojena na fotomultiplikator, primitak signala u pripadnom kanalu zapisuje u memoriju računala.

Ovisno o tome u kojoj kombinaciji kanala, je došlo do detekcije, može se zaključiti o kojoj se vrsti čestice radi.

Kombinacija	Interpretacija
100	Nabijena čestica niske energije
010	Neutralna čestica
111 ili 101	Mion visoke energije
001	Kosi nailazak čestice

Tablica 1. Ovisnost vrste čestice o signalu. Prva, druga i treća znamenka označavaju ima li signala u gornjem, donjem ili srednjem kanalu, respektivno. Jedinica znači da u pripadnom kanalu ima signala, a nula da nema.

Pojava signala samo u gornjem kanalu predstavlja detekciju nabijene čestice (većinom elektrona i miona) niske energija (< 100 MeV). Signal u gornjem i donjem, ili u sva tri kanala predstavlja detekciju visokoenergetskog (> 250 MeV) miona. Kako je scintilator gornjeg kanala pretanak za detekciju neutralne čestice, detekcijom neutralne čestice se smatra pojava signala u srednjem kanalu. [3]

Uz kanale za detekciju kozmičkih zraka, detektor je opremljen i vlastitim tlakomjerom, kako bi se tijekom detekcije mogao mjeriti atmosferski tlak, koji utječe na kozmičko zračenje.

6. Podaci i metoda

Iz eksperimenata je poznato kako je relativna promjena intenziteta pojedine komponente sekundarnog kozmičkog zračenja proporcionalna promjeni tlaka, tj. da vrijedi

$$\frac{dI}{I} = \mu dP \tag{2}$$

gdje je μ barometrijski koeficijent, I intenzitet zračenja (broj detektiranih čestica u jedinici vremena) i P atmosferski tlak [10].

Uz pretpostavku da je barometrijski koeficijent konstantan s obzirom na tlak, integracijom jednadžbe (2) dobiva se jednakost

$$ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \mu(P - P_0) \tag{3}$$

gdje je P_0 neki referentni tlak, a I_0 srednji intenzitet koji je pri njemu izmjeren.

Zapisujući jednadžbu u obliku

$$ln(I) = \mu P + (ln(I_0) - \mu P_0) \tag{4}$$

Odnosno

$$ln(I) = aP + b \tag{5}$$

gdje je $a \equiv \mu$ i $b \equiv ln(I_0) - \mu P_0$, dobiven je oblik jednadžbe pogodan za linearnu regresiju. Nadalje, nakon što se linearnom regresijom odredi a, iz njegove se definicijske jednadžbe može odrediti barometrijski koeficijent, tj. vrijedi

$$\mu = a \tag{6}$$

kao i

$$M_\mu = M_a \tag{7}$$

gdje su M_μ i M_a pripadne pogreške od μ i a, respektivno.

Za potrebu određivanja barometrijskih koeficijenata, korišteni su podaci o izmjerenom intenzitetu kozmičkog zračenja za listopad i studeni 2010. godine (1.10.-30.11.). To je razdoblje odabrano iz razloga što je tada solarna aktivnost bila u minimumu, odnosno solarna modulacija primarnog kozmičkog zračenja i Sunčev utjecaj na geomagnetsko polje su bili minimalni. Ovo je važno iz razloga što je bilo potrebno u što većoj mjeri izolirati utjecaj samog atmosferskog tlaka na zračenje.

Koristeći jednadžbu (2), barometrijski koeficijenti su računati linearnom regresijom iz podataka o izmjerenim intenzitetima i pripadnim tlakovima.

6.1. Baždarenje detektorskog tlakomjera

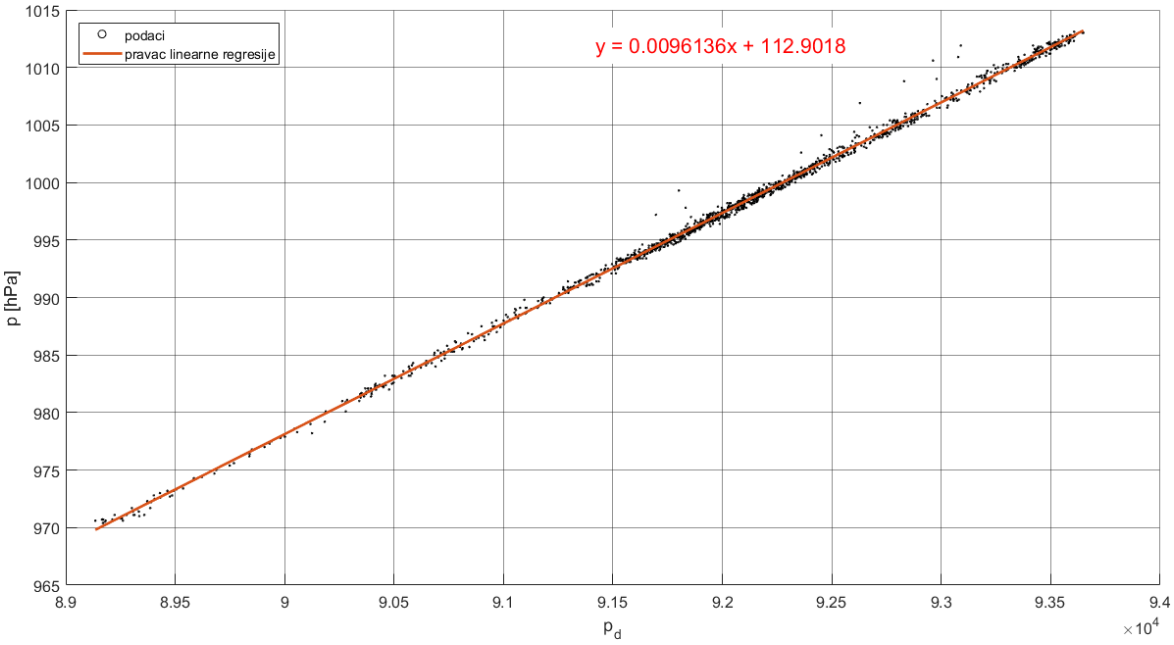
SEVAN CRO detektor je opremljen sa tlakomjerom koji mjeri atmosferski tlak svake minute, tj. s istom učestalosti mjerenja kao i kozmičkog zračenja.

Kako on mjeri tlak u vlastitim (bezdimenzionalnim) jedinicama, bilo je potrebno naći vezu između vrijednosti tlaka koje daje detektorski barometar (p_d) i stvarnih vrijednosti tlaka (p). U tu su se svrhu koristili satni podaci Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ), o tlaku na izmjerenom na postaji Maksimir. Promatrajući ovisnost između dvaju mjerenja tlakova, za svaki puni sat tijekom listopada i studenog 2010. godine, ustanovljeno je da je veza između tlakova linearna tj. da vrijedi

$$p = a_d \cdot p_d + b_d \tag{8}$$

gdje su sa a_d i b_d označeni pripadni koeficijenti. Važno je napomenuti kako je takva veza očekivana, s obzirom na konstrukciju detektorskog barometra, te potvrđuje kako je on ispravan. Ovo je važna činjenica iz tog razloga što su mjerenja kozmičkog zračenja minutna, pa je važno imati barem minutne vrijednosti tlaka kako bi analiza ovisnosti detektiranog intenziteta zračenja o tlaku bila što točnija.

Koeficijenti a_d i b_d su određeni linearnom regresijom (metodom najmanjih kvadrata). Podaci su, zajedno sa pravcem regresije, prikazani na slici 7, a koeficijenti dobiveni regresijom i pripadni koeficijent korelacije, R^2 , dani u tablici 2.



Slika 7. Ovisnost atmosferskog tlaka kojeg je izmjerio DHMZ o vrijednosti iz detektorskog barometra i pripadni pravac regresije.

Sa slike 7 se jasno vidi kako su vrijednosti dobivene detektorskim barometrom linearno zavisne o atmosferskom tlaku. Ovu činjenicu podupire i veliki koeficijent korelacije vrijednosti 0,99783.

a_d (Pa)	b_d (Pa)	$\overline{a_d}$ (Pa)	M_{ad} (Pa)	$\overline{b_d}$ (Pa)	M_{bd} (Pa)	R^2
0,961±0,002	11300 ±100	0,96136	0,11743	11290,18	108,13	0,99783

Tablica 2. Koeficijenti a_d i b_d, njihove srednje vrijednosti ($\overline{a_d}$ i $\overline{b_d}$) i pripadne pogreške (M_{ad} i M_{bd}) dobiveni linearnom regresijom između tlaka atmosfere kojeg je odredio DHMZ i izmjerenog detektorskim barometrom i pripadni koeficijent korelacije.

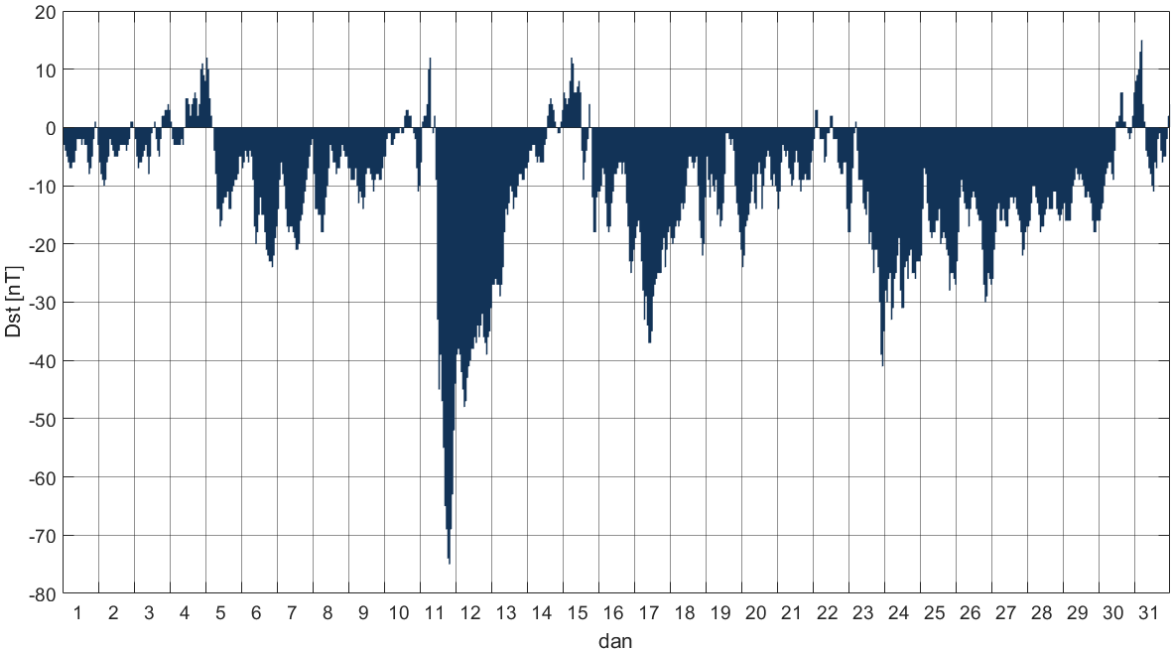
Transformacijom minutnih podataka sa detektorskog barometra, pomoću formule (8), dobivene su baždarene (minutne) vrijednosti tlaka, koje su se koristile u izračunu barometrijskih koeficijenata.

6.2. Filtriranje podataka

Kako bi utjecaj geomagnetskog polja na tok zračenja bio što manji, u obzir su uzimani samo *mirni dani*. Mirnim danima su se smatrali oni tijekom kojih nije dolazilo do većih geomagnetskih oluja, tj. tijekom kojih su čitavo vrijeme bili ispunjeni sljedeći kriteriji:

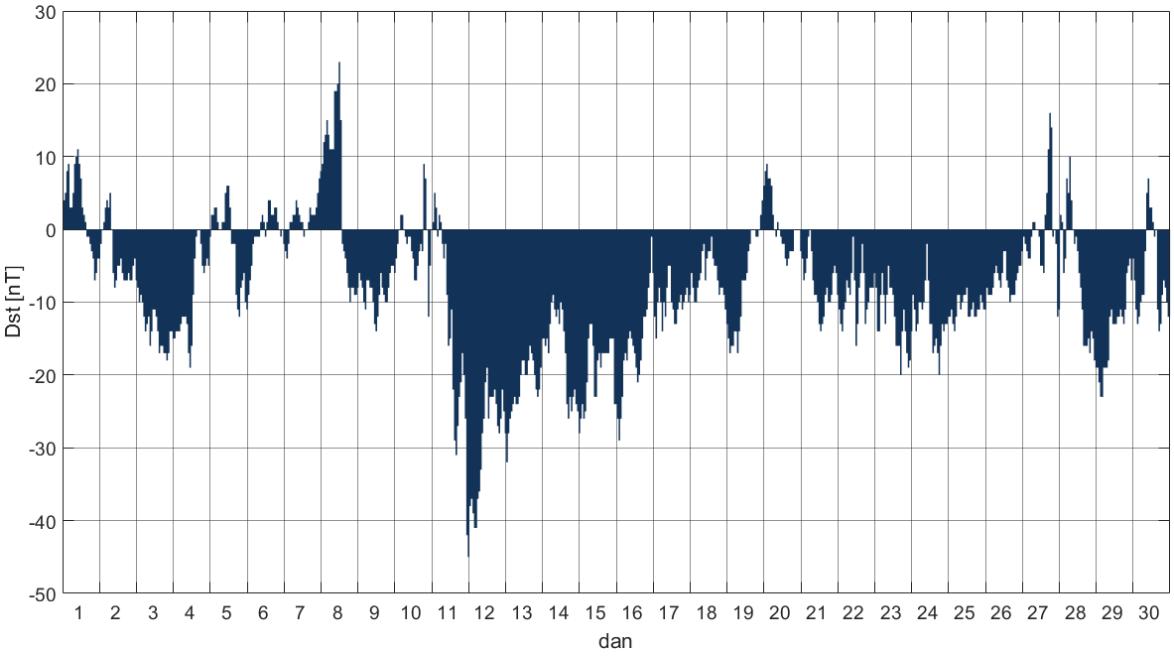
- Ap indeks < ≈ 30
- Dst indeks > ≈ -50 nT

Podaci o geomagnetskim Dst indeksima preuzeti su iz internetskih stranica svjetskog podatkovnog centra za geomagnetizam, Kyoto (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp), a o Ap indeksima iz stranica Američke nacionalne oceanografske i atmosferske službe (https://www.ngdc.noaa.gov). Analizom podataka o geomagnetskim indeksima zaključeno je kako kriterije za mirne dane zadovoljavaju svi dani u promatranom razdoblju osim 11. i 12. listopada tijekom kojih je, prema vrijednostima Dst indeksa, došlo do geomagnetskih oluja. Na slikama 8 i 9 prikazani su grafovi Dst indeksa, a na slikama 10 i 11 grafovi Ap indeksa za 10. i 11. mjesec 2010. godine, respektivno.



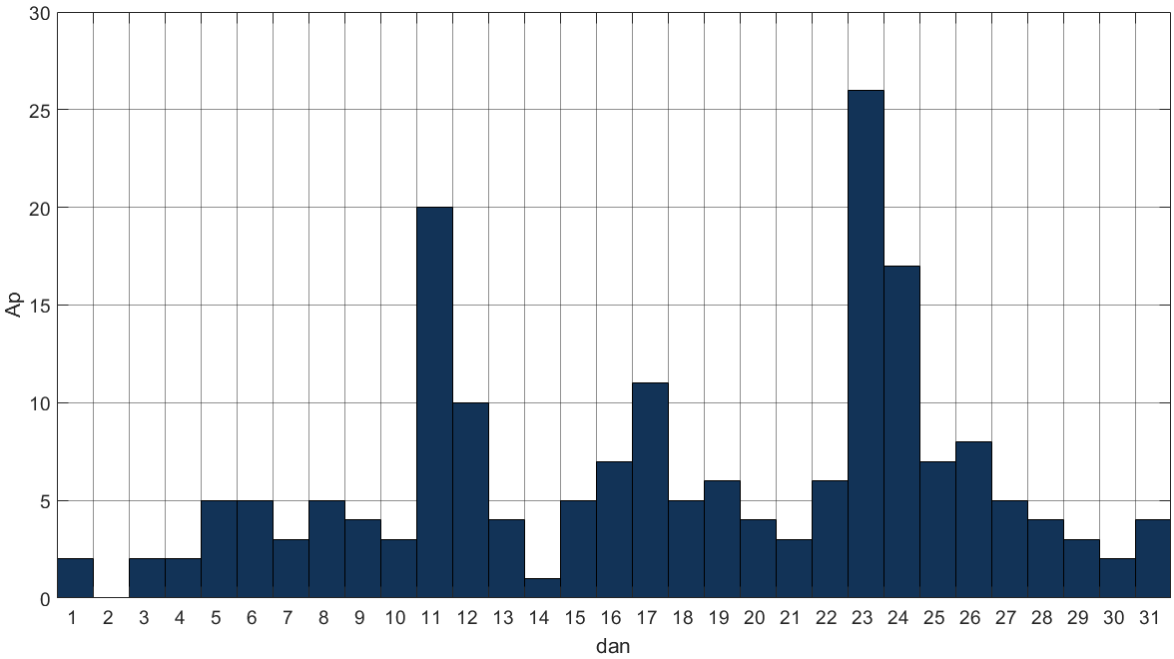
Slika 8. Graf Dst indeksa za listopad 2010. godine.

Sa slike 4 se vidi kako je tijekom 11. i 12. listopada Dst indeks postizao relativno velike (negativne) vrijednosti. Tako su 11. listopada postignute vrijednosti i do -74 nT, dok je 12. listopad započeo sa relativno velikom vrijednošću od -39 nT i postignute su vrijednosti i do -48 nT.

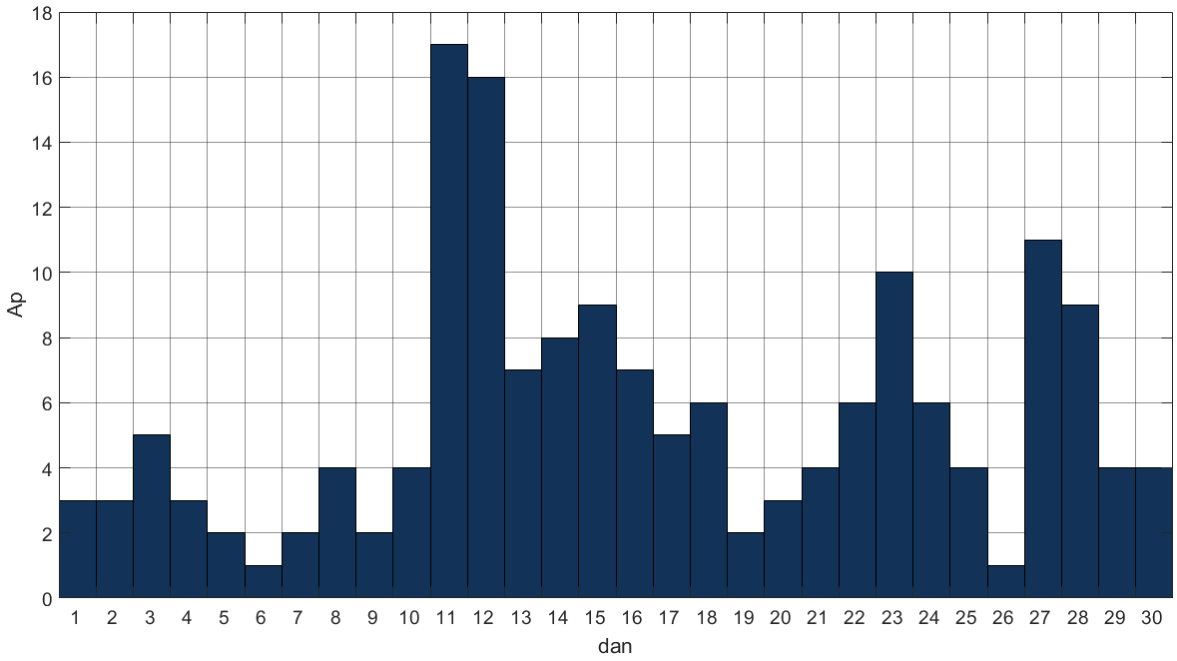


Slika 9. Graf Dst indeksa za studeni 2010. godine.

Iz slike 5 se može vidjeti kako je studeni 2010. bio relativno miran s obzirom na vrijednosti Dst indeksa.



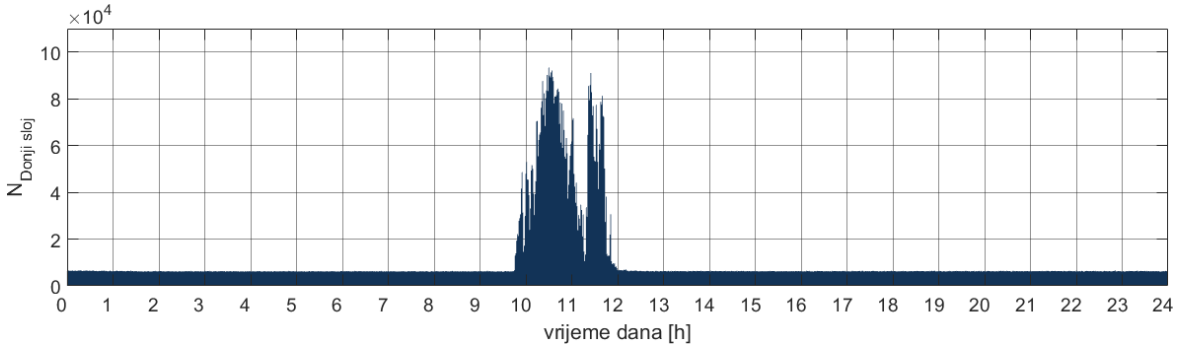
Slika 10. Graf Ap indeksa za listopad 2010. godine.



Slika 11. Graf Ap indeksa za studeni 2010. godine.

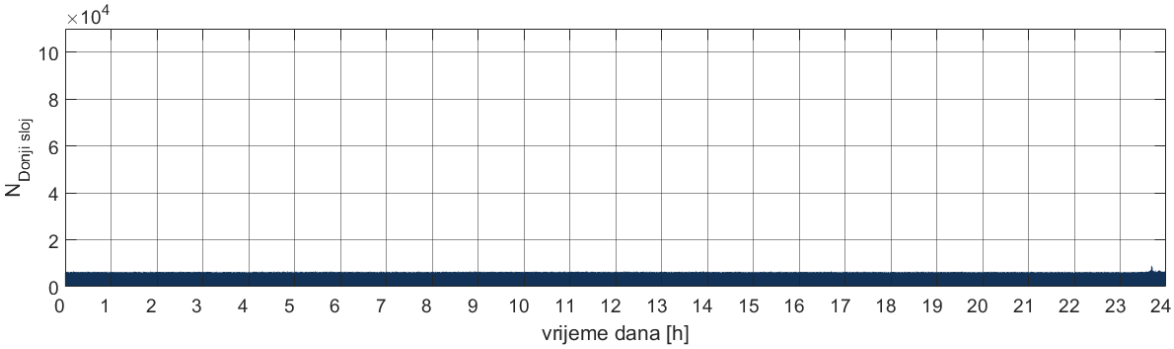
Iz slika 10 i 11 se vidi kako su oba promatrana mjeseca bili mirni s obzirom na Ap indekse.

Osim filtracije podataka na osnovi geomagnetske aktivnosti, pri računu barometrijskih koeficijenata zanemareni su i podaci iz vremenskih intervala tijekom kojih su detektirane velike anomalije u broju detektiranih čestica. Naime, broj detektiranih čestica je u svim kanalima gotovo konstantan u vremenu, no tijekom nekih vremenskih intervala broj detektiranih čestica u donjem kanalu bio je i više od 10 puta veći od uobičajenog. Grafovi detektiranog broja čestica u donjem kanalu za dane kada su bile prisutne anomalije prikazani su na slikama 12-18.

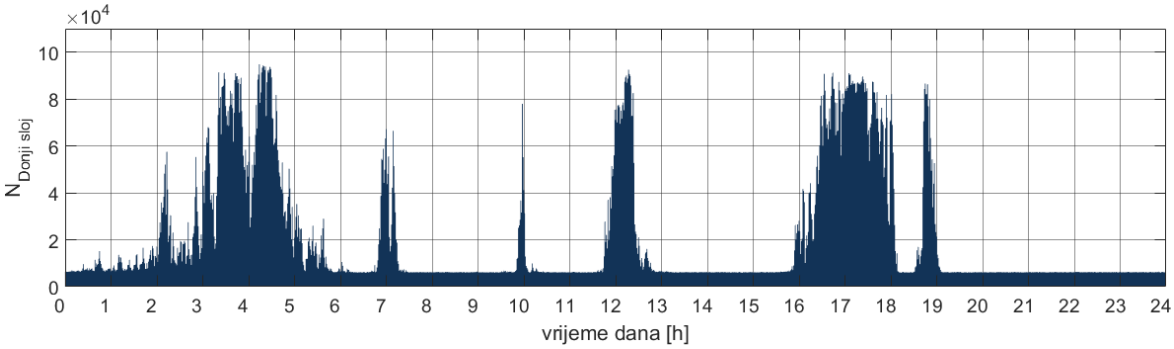


Slika 12. Graf detektiranog broja čestica u donjem sloju tijekom 24. listopada.

Na slici 12 se vidi kako je anomalija 24. listopada trajala otprilike između 9:30h i 12:30h. U tom intervalu, broj detektiranih čestica postizao je vrijednosti i preko 80000 po minuti.

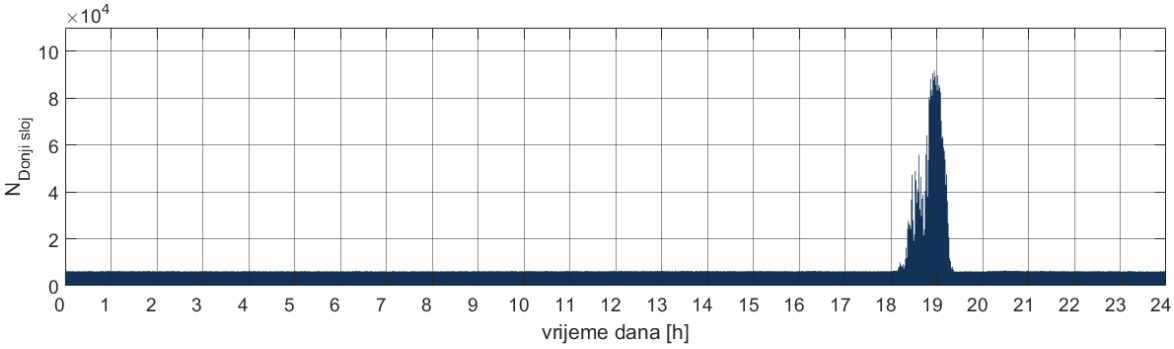


Slika 13. Graf detektiranog broja čestica u donjem sloju tijekom 25. listopada.



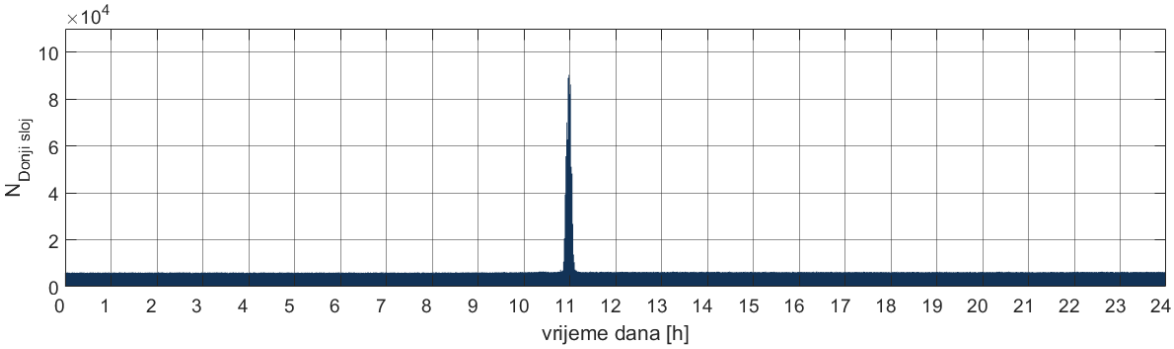
Slika 14. Graf detektiranog broja čestica u donjem sloju tijekom 26. listopada.

Iz slika 13 i 14 može se vidjeti kako se je slična, i gotovo jednaka po maksimalnoj vrijednosti, anomalija pojavila 25. listopada oko 23:30h i, sa prekidima, trajala sve do oko 19:30h sljedećeg dana.

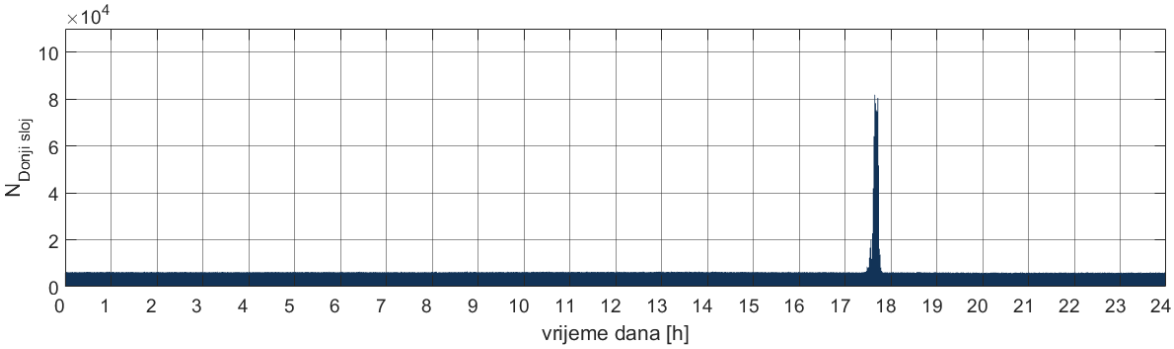


Slika 15. Graf detektiranog broja čestica u donjem sloju tijekom 27. listopada.

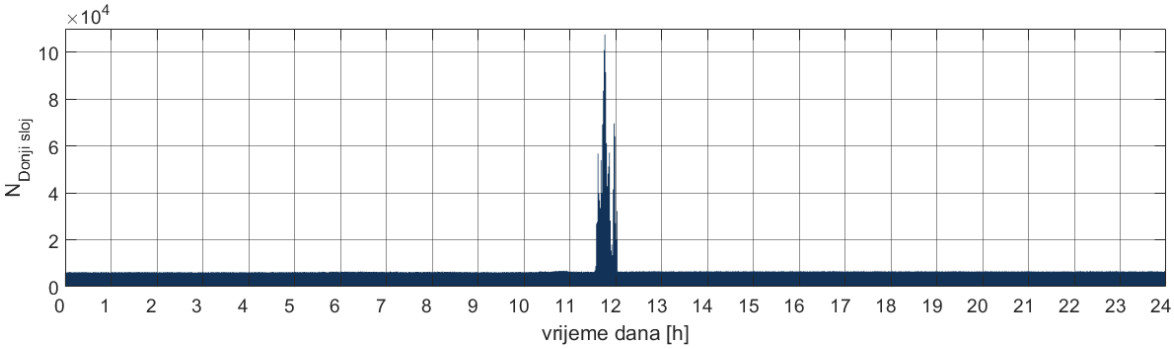
Tijekom 2., 5. i 7. studenog pojavljivale su se anomalije kraćeg trajanja (cca 1h) što se može vidjeti na slikama 16, 17 i 18, respektivno.



Slika 16. Graf detektiranog broja čestica u donjem sloju tijekom 2. studenog.



Slika 17. Graf detektiranog broja čestica u donjem sloju tijekom 5. studenog.



Slika 18. Graf detektiranog broja čestica u donjem sloju tijekom 7. studenog.

Uzrok ovih anomalijama je nepoznat, a kako su se pojavljivale samo u donjem kanalu, moglo bi se zaključiti kako se radi o kosom nailasku velikog broja čestica. No, kako je gotovo nemoguće da tako velik broj čestica bude detektiran, svaki put, samo u donjem kanalu (kod ostalih kanala nema nikakvih znakova anomalija) vjerojatno se radi o šumu, odnosno nekom problemu kod samog detektora.

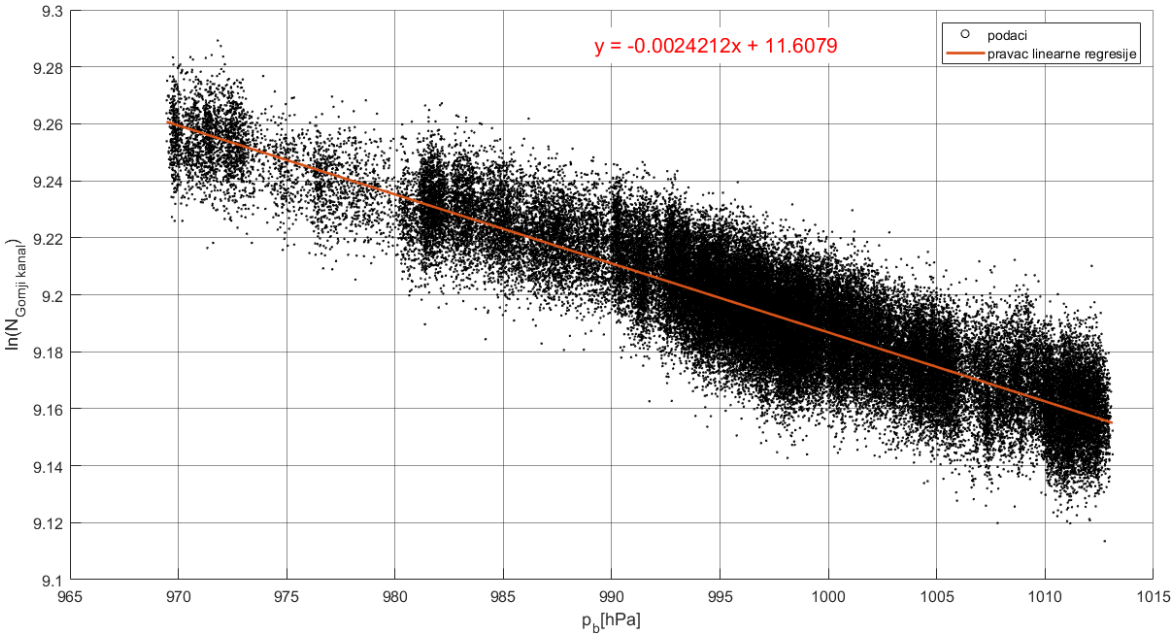
U tablici 3 navedeni su vremenski intervali koji su zbog anomalija zanemareni pri određivanju barometrijskih koeficijenata.

Početak intervala	Kraj intervala
24.10. 09:30h	24.10. 12:30h
25.10. 23:00h	26.10. 20:00h
27.10. 18:00h	27.10. 19:30h
02.11. 10:00h	02.11. 12:00h
05.11. 17:00h	05.11. 18:30h
07.11. 10:00h	07.11. 12:30h

Tablica 3. Popis vremenskih intervala koji su zbog velikih anomalija u broju detektiranih čestica u donjem kanalu zanemareni pri određivanju barometrijskih koeficijenata.

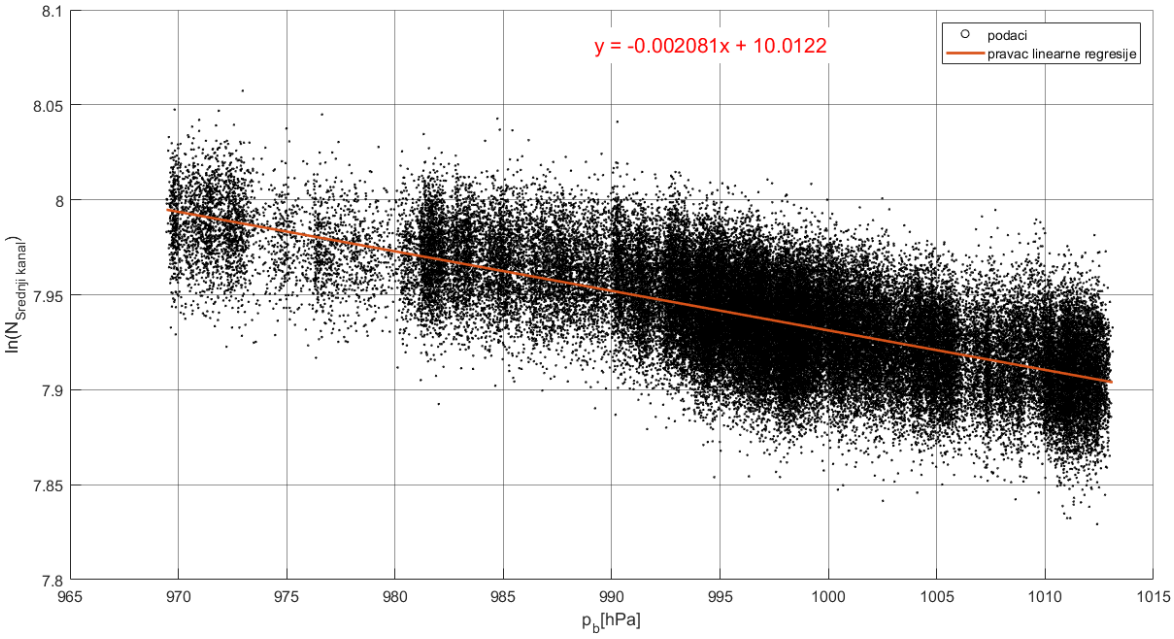
6.3. Određivanje barometrijskih koeficijenata

Barometrijski koeficijenti su određivani za pojedine kanale, te za određene kombinacije kanala, odnosno za pojedine vrste čestica (tablica 1). Za pojedini kanal/kombinaciju tražena je veza između broja detektiranih čestica u minuti u tom kanalu/kombinaciji, i vrijednosti baždarenog tlaka detektorskog barometra. Na slikama 15-20 prikazane su ovisnosti broja detektiranih čestica o tlaku i pripadni pravci linearne regresije za pojedini kanale/kombinacije.



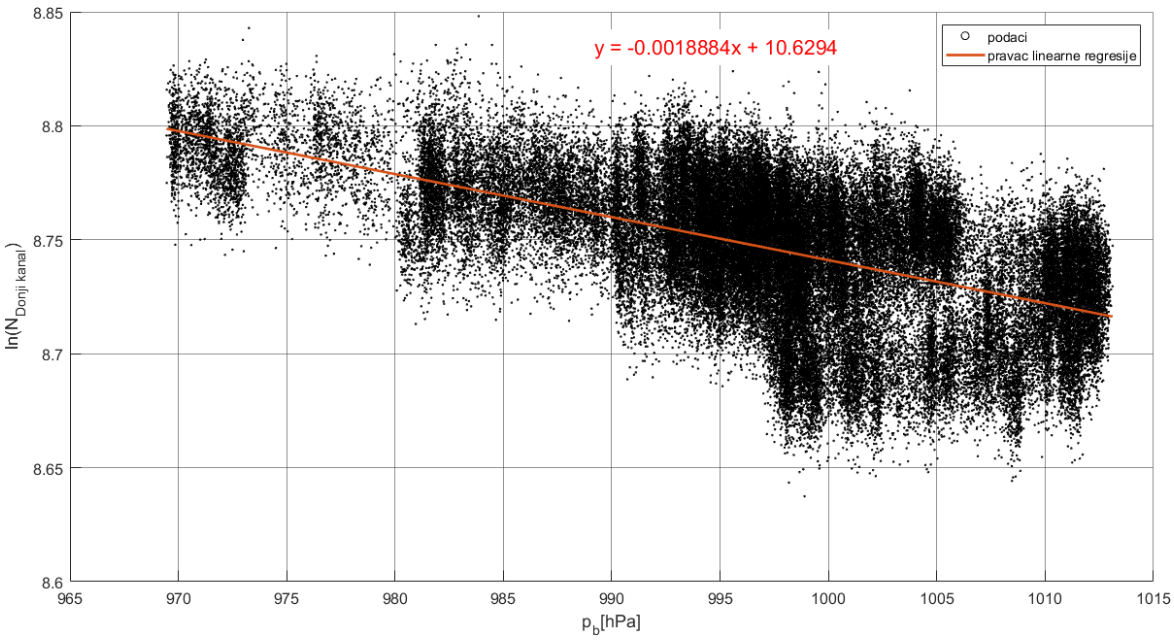
Slika 19. Ovisnost logaritma broja detektiranih čestica u minuti u gornjem kanalu o atmosferskom tlaku i pripadni pravac regresije.

Na slici 19 prikazana je ovisnost logaritma intenziteta zračenja o atmosferskom tlaku za gornji kanal detektora i pripadni pravac regresije. Primjećuje se kako intenzitet pada sa porastom tlaka. Dobivena je vrijednost barometrijskog koeficijenta od (-0,2421±0,0004) %/mbar, a veliki koeficijent korelacije od 0,78025 ukazuje na jaku korelaciju između tlaka intenziteta zračenja.



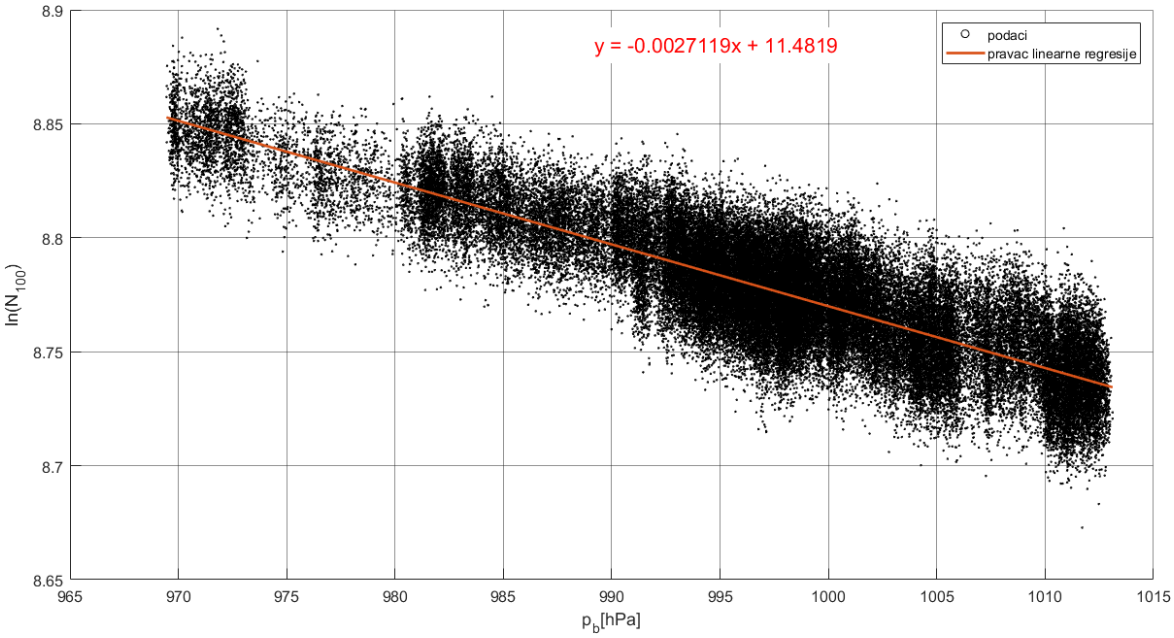
Slika 20. Ovisnost logaritma broja detektiranih čestica u minuti u srednjem kanalu o atmosferskom tlaku i pripadni pravac regresije.

Za srednji kanal dobiven je barometrijski koeficijent (-0,2081±0,0008) %/mbar, nešto manji od onog za gornji kanal. Koeficijent korelacije je puno manji od onog za gornji kanal i iznosi 0,45875. Podaci i pripadni pravac regresije prikazani su na slici 20.



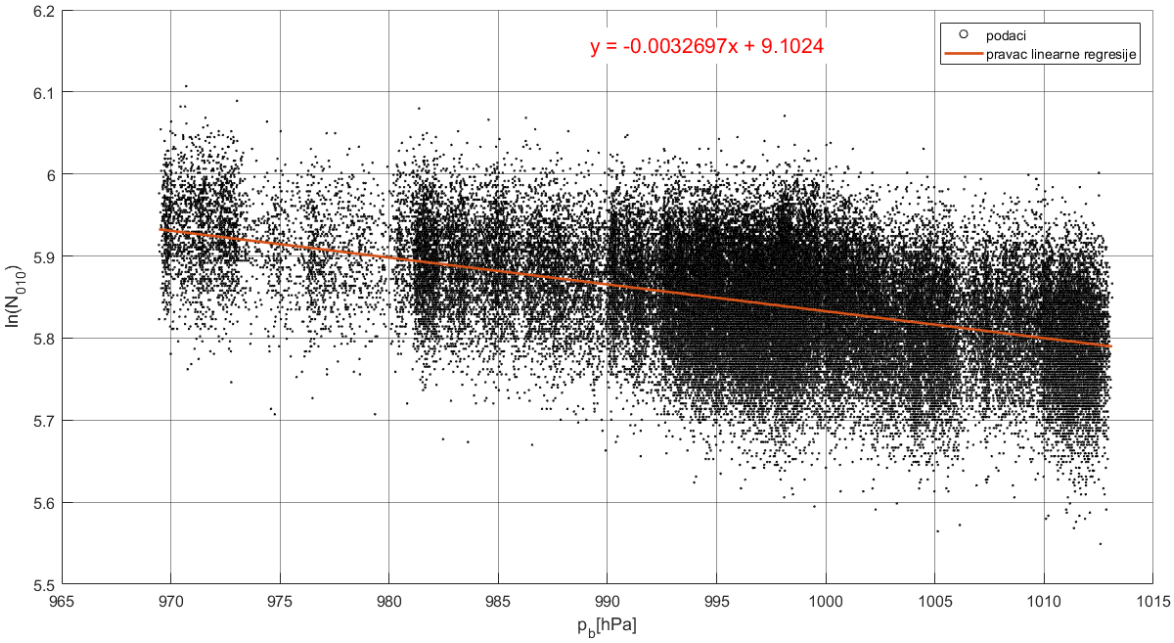
Slika 21. Ovisnost logaritma broja detektiranih čestica u minuti u donjem kanalu o atmosferskom tlaku i pripadni pravac regresije.

Za donji kanal dobiven je još manji, ali istog reda veličine, barometrijski koeficijent vrijednosti (-0,189±0,001) %/mbar. Koeficijent korelacije je relativno nizak i iznosi 0,31084. Podaci i pravac regresije prikazani su na slici 21.



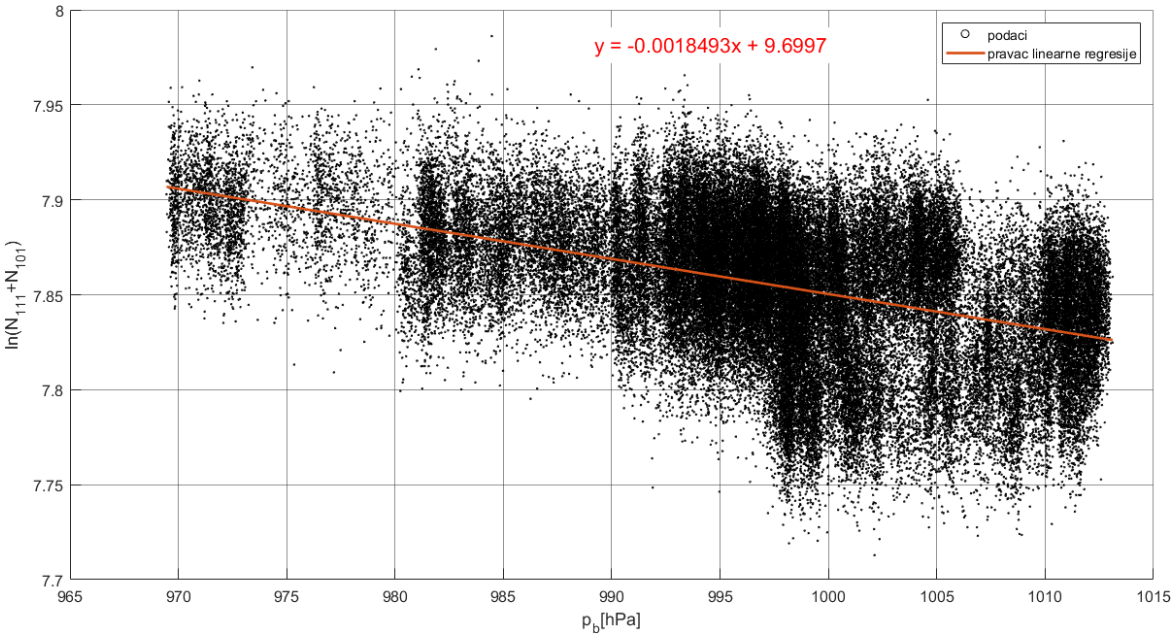
Slika 22. Ovisnost logaritma broja detektiranih čestica u minuti u za kombinaciju 100 (pojava signala samo u gornjem kanalu, odnosno detekcija nabijene čestice niske energije) o atmosferskom tlaku i pripadni pravac regresije.

Za nabijene čestice niske energije (kombinacija 100) dobiven je barometrijski koeficijent vrijednosti (-0,2712±0,0006) %/mbar. Koeficijent korelacije je relativno visok, 0,71063. Podaci i pravac regresije prikazani su na slici 22.



Slika 23. Ovisnost logaritma broja detektiranih čestica u minuti u za kombinaciju 010 (pojava signala samo u srednjem kanalu, odnosno detekcija neutralne čestice) o atmosferskom tlaku i pripadni pravac regresije.

Za neutralne čestice (kombinacija 010) dobiven je nešto veći barometrijski koeficijent, (-0,327±0,002) %/mbar. Koeficijent korelacije je malen (što je jasno i iz raspršenosti na slici 23) i iznosi 0,20805.



Slika 24. Ovisnost logaritma broja detektiranih čestica u minuti u za kombinacije 111 i 101 zajedno (signal u sva tri ili samo u gornjem i donjem kanalu, odnosno detekcija miona visoke energije) o atmosferskom tlaku i pripadni pravac regresije.

Za mione visoke energije (kombinacije 111 i 101) dobiven je barometrijski koeficijent (-0,185±0,001) %/mbar (manji od onih za nabijene čestice niske energije i neutralne čestice). Na slici 24 se može vidjeti kako se radi o vrlo raspršenom uzorku, na što ukazuje i relativno mali koeficijent korelacije vrijednosti 0,19692. No, unatoč velikoj raspršenosti, jasno je vidljivo kako se broj detektiranih čestica smanjuje porastom tlaka.

U tablici 4. dan je sažeti popis izračunatih barometrijskih koeficijenata za pojedine kanale/kombinacije. Primjećujemo kako barometrijski koeficijenti za pojedine kanale po iznosu od najvećeg prema najmanjem pripadaju gornjem, srednjem i donjem kanalu, respektivno. S obzirom na vrstu čestice, najveći koeficijent pripada neutralnim česticama (kombinacija 010), zatim, nešto manji, nabijenim česticama niske energije (kombinacija 100), dok najmanji pripada mionima visoke energije (kombinacije 111 i 101).

Kanal/kombinacija	μ(%/mbar)	$\bar{\mu}$ (%/Mbar)	M_μ (%/mbar)	R^2
Gornji kanal	-0,2421±0,0004	0,24212	0,00044586	0,78025
Srednji kanal	-0,2081±0,0008	0,2081	0,00078432	0,45875
Donji kanal	-0,189±0,001	0,18884	0,00097566	0,31084
Kombinacija 100	-0,2712±0,0006	0,27119	0,00060049	0,71063
Kombinacija 010	-0,327±0,002	0,32697	0,0022136	0,20805
Kombinacija 101 ili 111	-0,185±0,001	0,18493	0,0012959	0,19692

Tablica 4. Popis izračunatih barometrijskih koeficijenata za svaki kanal, te pripadne srednje vrijednosti, pogreške i koeficijenti korelacije.

Važno je napomenuti kako su dobivene vrijednosti barometrijskih koeficijenata istog reda veličine (~10^{-1} %/mbar) kao kod ostalih detektora SEVAN mreže [5], što daje težinu točnosti dobivenih rezultata. Koeficijenti korelacije su kod većine kanala i vrsta čestica relativno maleni, no podaci nisu normalizirani s obzirom na temperaturu atmosfere. Normalizacija s obzirom na temperaturu atmosfere bi dovela do jačeg izražaja utjecaja atmosferskog tlaka na intenzitet. Za to bi bilo potrebno izračunati temperaturne koeficijente analogne barometrijskim koeficijentima.

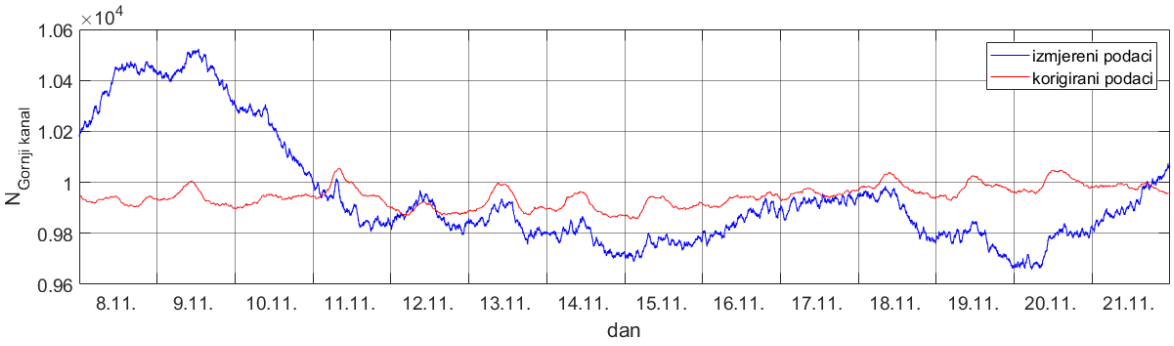
6.4. Primjer korekcije podataka

Korekciju podataka o zračenju u nekom vremenskom periodu, odnosno određivanje intenziteta I_0 koje bi zračenje imalo pri danim okolnostima, ali na referentnom atmosferskom tlaku P_0, moguće je provesti manipulacijom jednadžbe (3) i uvrštavanjem vrijednosti tlaka *P*, izmjerenog intenziteta *I* i referentnog tlaka P_0 u istu, za svako mjerenje u tom vremenskom periodu. Manipulacijom jednadžbe (3) dobiva se sljedeći izraz za I_0:

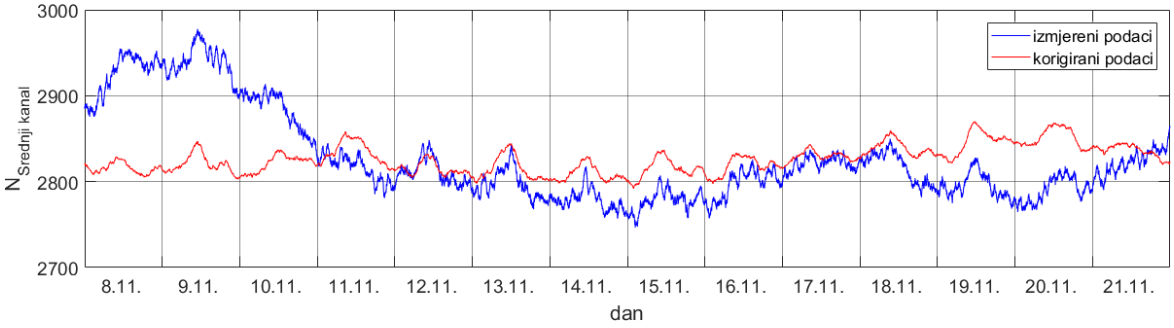
$$I_0 = Ie^{-\mu(P-P_0)} \tag{9}$$

U nastavku su, kao primjeri korištenja barometrijskih koeficijenata u svrhu korekcije podataka o intenzitetu zračenja, prikazani grafovi nekorigiranih i pripadnih korigiranih podataka iz SEVAN CRO detektora za dvotjedni period, od 14. do 27. studenog 2010. godine. Korigirani su podaci za svih 6 kanala/kombinacija za koje su određeni barometrijski koeficijenti (tablica 4).

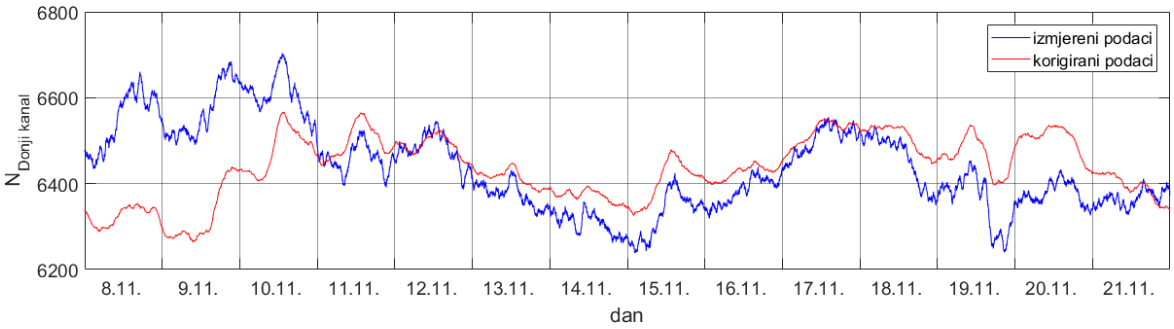
Grafovi korigiranih (crveno) i nekorigiranih (plavo) podataka su prikazani na slikama 25-30. Kako su podaci visoke razlučivosti (1 minuta), te kako su minutne varijacije izmjerenih vrijednosti zračenja relativno velike, zbog bolje preglednosti prikazani podaci filtrirani kliznim srednjakom prozora širine 1h.



Slika 25. Grafovi izmjerenog (plavo) i korigiranog (crveno) intenziteta zračenja za dvotjedni period od 8.11.2010. do 21.11.2010. za gornji kanal detektora.



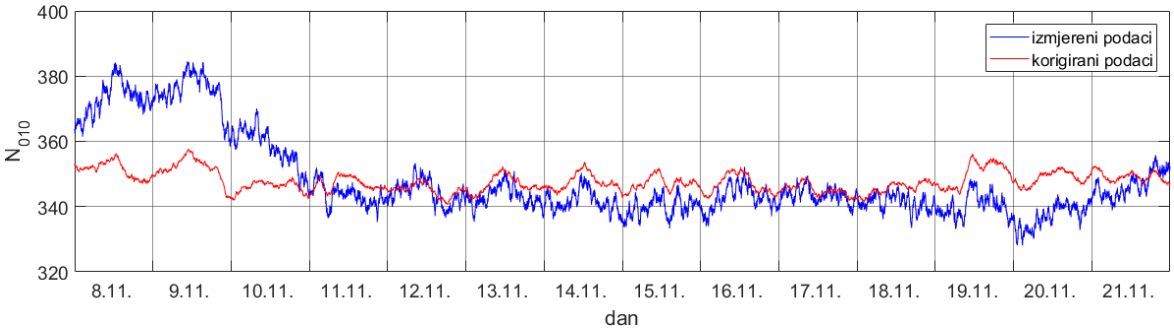
Slika 26. Grafovi izmjerenog (plavo) i korigiranog (crveno) intenziteta zračenja za dvotjedni period od 8.11.2010. do 21.11.2010. za srednji kanal detektora.



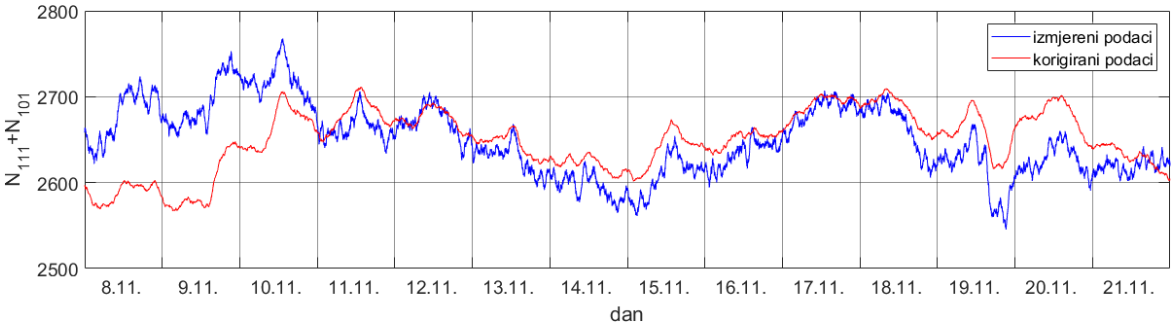
Slika 27. Grafovi izmjerenog (plavo) i korigiranog (crveno) intenziteta zračenja za dvotjedni period od 8.11.2010. do 21.11.2010. za donji kanal detektora.



Slika 28. Grafovi izmjerenog (plavo) i korigiranog (crveno) intenziteta zračenja za dvotjedni period od 8.11.2010. do 21.11.2010. za kombinaciju 100 (nabijene čestice niske energije).



Slika 29. Grafovi izmjerenog (plavo) i korigiranog (crveno) intenziteta zračenja za dvotjedni period od 8.11.2010. do 21.11.2010. za kombinaciju 010 (neutralne čestice).



Slika 30. Grafovi izmjerenog (plavo) i korigiranog (crveno) intenziteta zračenja za dvotjedni period od 8.11.2010. do 21.11.2010. za kombinacije 111 i 101 (mioni visoke energije).

Na slikama se može primijetiti kako korigirani podaci variraju slabije od izmjerenih, odnosno kako je intenzitet zračenja gotovo konstantan ako se zanemare varijacije uzrokovane promjenama atmosferskog tlaka. Također se vidi kako je tijekom 8., 9. i 10. studenog pojačani intenzitet zračenja bio posljedica pada atmosferskog tlaka. Kod

korigiranih podataka se jasno vide dnevne varijacije, odnosno da gotovo svakog dana oko podneva dolazi do maksimuma intenziteta zračenja.

7.Zaključak

Kontinuirano praćenje intenziteta sekundarnog kozmičkog zračenja na Zemlji je vrlo važno iz znanstvenih i sigurnosnih aspekata. Iz izmjerenih podataka mogu se donijeti zaključci o kompleksnim procesima u Sunčevom sustavu. Kako bi se iz podataka uklonio utjecaj Zemljine atmosfere, potrebno je odrediti vezu između izmjerenih podataka i parametara atmosfere. Izračunati su barometrijski koeficijenti, koji opisuju vezu između toka sekundarnog kozmičkog zračenja i atmosferskog tlaka, koristeći podatke SEVAN CRO detektora kozmičkog zračenja koji je 2008. godine postavljen u Zvjezdarnici Zagreb. Korišteni su podaci za listopad i studeni 2010. godine, kada je Sunčeva aktivnost bila u minimumu. Ustanovljeno je kako intenzitet zračenja pada sa porastom atmosferskog tlaka, za sve vrste čestica i za sve kanale detektora. Izračunati barometrijski koeficijenti su istog reda veličine kao i kod ostalih detektora SEVAN mreže. Poznavanje barometrijskih koeficijenata omogućilo je korekciju podataka s obzirom na atmosferski tlak, te su korigirani podaci za dvotjedni period studenog 2010. godine. Kod korigiranih podataka se bolje raspoznaju uzorci poput dnevnih varijacija toka sekundarnog kozmičkog zračenja, a isto tako se bolje raspoznaju i varijacije izazvane Sunčevom aktivnošću i ostalim uzročnicima anomalija u intenzitetu sekundarnog kozmičkog zračenja. Da bi se podaci mogli u potpunosti normalizirati s obzirom na stanje atmosfere i geomagnetskog polja, bilo bi potrebno odrediti i druge tipove veza, poput ovisnosti toka zračenja o temperaturi atmosfere, stanja geomagnetskog polja i drugih.

Literatura

[1] CERN, https://home.cern/about/physics/cosmic-rays-particles-outer-space

[2] Zvjezdarnica Zagreb, https://zvjezdarnica.hr/obrazovni/znanost/sevan-cro-zagreb/

[3] Roša D., Angelov Ch., Arakelyan K. i ostali, Sevan cro particle detector for solar physics and space weather research, Central European astrophysical bulletin 34, 115-122, 2010.

[4] Roša, D., Metode astronomskih istraživanja, ALFA d.d., Zagreb, 2010.

[5] Kivelson M., Russel C., Introduction to Space Physics, Cambridge University Press, Ujedinjeno Kraljevstvo, 1995.

[6] Zolesi B., Cander Lj., Ionospheric Prediction and Forecasting, Springer, Berlin, 2014.

[7] Kamide Y., Handbook of the Solar-Terrestrial Environment, Springer, Berlin, 2007.

[8] Northrop R., Introduction to Instrumentation and Measurements, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005.

[9] Grieder P., Cosmic Rays at Earth: Researcher's Reference Manual and Data Book, Elsevier, Amsterdam, 2001.

[10] Carmichael H. i ostali, Attenuation of neutron monitor radiation in atmosphere, Canadian journal of physics 46, 1006, 1968.