

UNIVERZITET U BEOGRADU

FIZIČKI FAKULTET

Milica M. Rajačić

ANALIZA UTICAJA AKTIVNOSTI SUNCA I
METEOROLOŠKIH PARAMETARA NA
KONCENTRACIJU ^7Be U PRIZEMNOM
SLOJU ATMOSFERE

Doktorska disertacija

Beograd, 2019

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF PHYSICS

Milica M. Rajačić

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF
SOLAR ACTIVITY AND
METEOROLOGICAL PARAMETERS ON
THE ^7Be CONCENTRATION AT THE
GROUND ATMOSPHERE

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2019

Ova doktorska disertacija je urađena u Institutu za nuklearne nauke „Vinča“, Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, pod mentorstvom dr Dragane Todorović, naučnog savetnika.

Članovi komisije:

dr Dragana Todorović, naučni savetnik

Institut za nuklearne nauke „Vinča“, Univerzitet u Beogradu

dr Jovan Puzović, redovni profesor

Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

dr Vladimir Đurđević, vanredni profesor

Institut za meteorologiju, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Datum odbrane

Analiza uticaja aktivnosti Sunca i meteoroloških parametara na koncentraciju ^7Be u prizemnom sloju atmosfere

Rezime

Zbog svoje radioaktivne i toksične prirode, lokacije i načina nastajanja, izotop ^7Be ima višedecenijsku pažnju u oblasti radioekologije i meteorologije, pre svega kao trasera u praćenju kretanja polutanata i vazdušnih masa. Shodno tome, bilo bi poželjno ustanoviti model vremenske distribucije ovog izotopa, koji bi omogućio predikciju njegove koncentracije.

Kao doprinos poboljšanju odabira parametara za simulacione modele, cilj ovog istraživanja je da se ispita uticaj aktivnosti Sunca i pojedinih meteoroloških parametara na koncentraciju ^7Be u prizemnom sloju atmosfere.

Za potrebe ovog istraživanja, korišćeni su rezultati gamaspektrometrijskog određivanja koncentracije aktivnosti ^7Be u dva medijuma (vazduh – uzorci aerosola i ukupni depozit) tokom perioda 1995–2017, sprovedenih u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Instituta za nuklearne nauke “Vinča”.

Metodama Furijeove transformacije i linearne regresije, primenjenim u ovoj disertaciji, po prvi put je uočena mogućnost uticaja smera Sunčevog magnetnog polja na koncentraciju ^7Be u uzorcima vazduha. Pokazalo se da bi uključivanje perioda promene od 22 godine moglo dovesti do poboljšanja kvaliteta njene simulacije.

Ključne reči: 7-berilijum, radioaktivnost, aproksimacija i predikcija, Furijeova analiza, aktivnost Sunca, jačina Sunčevog magnetnog polja, meteorološki parametri, kosmičko zračenje

Naučna oblast: Fizika

Uža naučna oblast: Fizika jezgra i čestica

UDK broj:

Analysis of the influence of the Solar activity and meteorological parameters on the ^7Be concentration at the ground atmosphere

Abstract

Due to the ^7Be isotope is radioactive and toxic nature, as well as its location and way of its production, it has decades of attention in the field of radiochemistry and meteorology, primarily as a tracker in monitoring the movement of pollutants and air masses. Accordingly, it would be desirable to establish a time distribution model for this isotope, which would allow a prediction of its concentration.

As a contribution to improving the selection of parameters for simulation models, the aim of this study is to examine the influence of solar activity and individual meteorological parameters on the concentration of ^7Be in the ground level atmosphere.

For the purposes of this research, the results of gamaspektrometric determination of the activity concentration of ^7Be in two media (air - aerosols and total deposit) were used. They carried out at the Laboratory for Radiation Protection and Environmental Protection, Institute for Nuclear Sciences "Vinča" and cover the period during 1995-2017.

The methods of the Fourier transform and linear regression, applied in this dissertation, for the first time have seen the possibility of influencing the direction of the Solar magnetic field to the concentration of ^7Be in air samples, and it has been shown that the inclusion of a period of change of 22 years can lead to a decline in the quality of its simulation.

Key words: 7-beryllium, radioactivity, approximation and prediction, Fourier analysis, Sun activity, solar magnetic field strength, meteorological parameters, cosmic radiation

Scientific area: Physics

Narrow scientific field: Physics of nucleus and particles

UDK number:

Veliku zahvalnost na ustupljenim rezultatima merenja do 2012. godine, prenetom iskustvu, nesebičnoj pomoći i podršci želim da izrazim mentorki dr Dragani Todorović.

Hvala članovima komisije, prof. dr Vladimiru Đurđeviću na odvojenom vremenu i pomoći u vezi sa delovima iz oblasti meteorologije i prof. dr Jovanu Puzoviću na saradnji i konstruktivnim diskusijama.

Želela bih da izrazim zahvalnost svim kolegama iz laboratorije koje su mi prenosile svoje znanje, pružale pomoć oko redovnog prikupljanja, pripreme i merenja uzoraka, a pre svega na svakodnevnoj podršci.

Hvala mojim prijateljima koji su bili uz mene sve ove godine, imali razumevanja i pružali „vetar u leđa“.

Najveću i večnu zahvalnost dugujem svojoj porodici, posebno majci koja mi je oslonac i podrška celoga života.

Beskrajno hvala baki i deki koji su do poslednjeg dana svog života brinuli o meni.

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Radioaktivnost	5
2.1	Radioaktivni raspad i jonizujuća zračenja	6
2.1.1	Zakon radioaktivnog raspada.....	6
2.1.2	Prateća jonizujuća zračenja beta raspada.....	7
2.1.3	Doza zračenja.....	10
2.2	Radioaktivnost životne sredine	12
2.2.1	Radioaktivnost atmosfere	14
2.2.1.1	Slojevi i parametri atmosfere.....	14
2.2.1.1.1	Troposfera i meteorološki parametri	16
2.2.1.1.2	Stratosfera.....	21
2.2.1.1.3	Mezosfera	22
2.2.1.1.4	Termosfera	22
2.2.1.2	Prirodna radioaktivnost atmosfere.....	22
2.2.1.2.1	Primordijalni radionuklidi	22
2.2.1.2.2	Kosmičko zračenje	23
2.2.1.2.3	Kosmogeni radionuklidi.....	32
2.2.1.3	Veštačka radioaktivnost atmosfere.....	34
2.2.1.4	Kretanje radionuklida kroz atmosferu	35
3	Sunce i njegovo magnetno polje	37
4	Uticaj Sunca na intenzitet kosmičkog zračenja	46
5	Uticaj kosmičkog zračenja i magnetne aktivnosti Sunca na atmosferske procese	51
6	Primena kosmogenih radionuklida	54

7	Berilijum-7.....	56
7.1	Ekološki značaj (Toksikološki i radijacioni uticaj)	56
7.2	Poreklo	58
7.3	Vremenska i prostorna distribucija.....	62
8	Metoda merenja – Gamasprometrija.....	67
8.1	Detekcija gama zračenja	67
8.1.1	Interakcija zračenja sa materijom	67
8.1.2	Karakteristike detektora.....	71
8.1.3	Poluprovodnički detektori	74
8.1.3.1	Princip rada poluprovodničkih detektora	75
8.1.3.2	Bezprimesni germanijumski detektori (HPGe – High Purity Germanium).....	79
8.2	Analiza spektra	80
9	Eksperimentalni deo	82
9.1	Prikupljanje i priprema uzoraka.....	82
9.2	Merenje uzoraka	84
9.2.1	Kalibracija detektora.....	86
9.2.2	Određivanje aktivnosti.....	90
10	Primenjena analiza.....	93
10.1	Deskriptivni statistički parametri.....	93
10.2	Linearna regresija	97
10.3	Furijeova analiza.....	100
11	Rezultati i diskusija.....	102
11.1	Vremenska distribucija koncentracije ^7Be	102
11.2	Inhalaciona doza	105

11.3 Sezonski karakter koncentracije ^7Be	105
11.3.1 Grupisanje po mesecima i kvartalima.....	105
11.3.2 Grupisanje po godinama	109
11.4 Furijeova analiza.....	111
11.4.1 Perodogram koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha	111
11.4.2 Perodogram koncentracije ^7Be u uzorcima depozita	112
11.5 Koreliranost koncentracije ^7Be sa mogućim uzročnicima njene promene	113
11.5.1 Korelacija sa meteorološkim parametrima	113
11.5.2 Koreliranost sa intenzitetom kosmičkog zračenja	117
11.5.3 Koreliranost sa brojem Sunčevih pega	118
11.5.4 Koreliranost sa orijentacijom Sunčevog magnetnog polja	120
11.6 Aproksimacija i Predikcija.....	121
11.6.1 Metod inverzne Furijeove transformacije.....	121
11.6.1.1 Aproksimacija koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha	122
11.6.1.2 Predikcija koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha	125
11.6.1.3 Aproksimacija koncentracije ^7Be u uzorcima depozita.....	128
11.6.1.4 Predikcija koncentracije ^7Be u uzorcima depozita	133
11.6.2 Metod Linearne regresije.....	136
11.6.2.1 Aproksimacija i predikcija koncentracije ^7Be u uzorcima aerosola	137
11.6.2.2 Aproksimacija i predikcija koncentracije ^7Be u uzorcima depozita.....	141
12 Zaključak	146
Literatura	151

1 UVOD

Berilijum-7 (^7Be) je radioaktivni berilijumov izotop koji nastaje kao posledica interakcije kosmičkog zračenja sa atomima atmosfere. Zbog svoje radioaktivne i toksične prirode, nivo njegove koncentracije je i danas, posle više decenija interesovanja, tema mnogih istraživanja iz oblasti radioekologije i zagađenja životne sredine. Najveću primenu, ^7Be ima kao traser u praćenju kretanja polutanata i vazdušnih masa, što ga čini zanimljivim i u oblasti meteorologije.

Zbog svega navedenog, od višestruke koristi je ustanoviti model vremenske distribucije ovog izotopa, kako zbog potencijalne predikcije njegove koncentracije, tako i zbog uočavanja njenih eventualnih anomalija. Vrlo je verovatno da bi se uspostavljeni model mogao primeniti i na ostale kosmogene radionuklide, naročito one sa dužim vremenom poluraspada, čija je koncentracija u fosilnim ostacima našla primenu u određivanju njihove starosti, ali i rekonstrukciji meteoroloških uslova u prošlosti.

Cilj ovog istraživanja je da se izvrši analiza uticaja aktivnost Sunca i pojedinih meteoroloških parametara na koncentraciju ^7Be u prizemnom sloju atmosfere i njeno modelovanje, doprinoseći time poboljšanju odabira parametara za simulacione modele.

U svrhu ostvarenja cilja, prvi od pokušaja formiranja modela vremenske distribucije koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere je zasnovan isključivo na podacima o koncentraciji aktivnosti ovog izotopa u dva medijuma (vazduh – uzorci aerosola i ukupni depozit) izmerenih u proteklih 23 godine (1995–2017.). Od toga, rezultati do 2017. su iskorišćeni za formiranje modela, dok su podaci iz 2017. godine upotrebljeni za testiranje mogućnosti njihove predikcije. Ovaj model u osnovi koristi Furijeovu analizu, koja omogućava da se iz vremenskog pređe na frekventni domen i time identifikuju periode sadržene u vremenskoj distribuciji podataka. Na osnovu dobijenih rezultata analize, inverznom Furijeovom transformacijom, formira se regresiona jednačina koja aproksimira dosadašnje rezultate merenja i ekstrapolacijom daje mogućnost predikcije rezultata narednih merenja. Prednost ovog modela je što ne zahteva merenje drugih parametara, ali je i mana što isključuje mogućnost njihovog uticaja.

Na osnovu rezultata prethodno navedene analize, koji ukazuju na mogućnost uticaja meteoroloških uslova, promene intenziteta prizemnog kosmičkog zračenja, kao i Sunčeve aktivnosti, u drugom delu istraživanja ispitana je njihova povezanost sa promenom koncentracije ^7Be na teritoriji Republike Srbije (Beograd). Određeni su koeficijenti međusobne linearne koreliranosti i metodom linearne regresije formirane aproksimativne jednačine za čije su parametre odabrani oni sa statistički najznačajnijim koeficijentima koreliranosti. Zatim, na osnovu rezultata merenja odabranih parametara iz 2017. godine, određene su predviđene vrednosti koncentracije aktivnosti ^7Be i upređene sa njenim izmerenim vrednostima za isti period.

Vrednosti pretpostavljenih uzročnika promene, preuzete su sa odgovarajućih internet stranica institucija koje se bave njihovim višedecenijskim praćenjima, dok su vrednosti koncentracije aktivnosti ^7Be u oba razmatrana medijuma određene metodom gamaspektrometrije, u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Instituta za nuklearne nauke “Vinča”, gde se ova merenja vrše od aprila 1994. godine.

Zaključak koji je i doveo do postizanja samog cilja sprovedenog istraživanja je da se u vremenskoj distribuciji koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha uočava uticaj jačine Sunčevog magnetnog polja i da bi uključivanje perioda promene od 22 godine moglo dovesti do poboljšanja kvaliteta njene simulacije.

Ovim istraživanjem, po prvi put je uočena mogućnost uticaja smera Sunčevog magnetnog polja na nivo koncentracije ^7Be , čime se praktično, na još jedan način, pokazuje uticaj Sunčevog magnetnog polja na intenzitet kosmičkog zračenja na Zemlji (drift efekat). Pokazalo se da uvođenje ovog parametra u regresione jednačine koncentracije ^7Be u vazduhu doprinosi smanjenju apsolutnog odstupanja rezultata, kako aproksimacije, tako i predikcije u odnosu na izmerene vrednosti. Takođe, prvi put je ispitan uticaj Sunčeve aktivnosti na koncentraciju ^7Be u depozitu, kao i neke od mogućnosti njenog predviđanja.

Rezultati ovog istraživanja mogu biti od koristi pri izboru parametara za dizajniranje narednih simulacionih modela koncentracije ^7Be , ali i drugih kosmogenih radionuklida, kojima bi se mogli uočiti anomalni događaji kako u prošlosti, tako i u

budućnosti. Predikcija koncentracije ^7Be bi bila korisna i za predviđanje atmosferskih kretanja, a time i procenu zagađenja životne okoline.

Sadržaj disertacije je koncipiran u 12 poglavlja, od kojih posle kratakog pregleda sadržaja sledi uvođenje pojmova i opisivnje pojava iz oblasti radioaktivnosti, meteorologije i radioekologije, gde su objašnjeni i pojmovi kosmičkog zračenja i kosmogenih radionuklida.

Nakon 2. poglavlja, opisana je struktura Sunca, kao i pojave u njegovim unutrašnjim i spoljašnjim slojevima, iza čega sledi pregled literature iz oblasti astrofizike i meteorologije koja se bavila uticajem Sunčeve aktivnosti na intenzitet kosmičkog zračenja na Zemlji i njihovog delovanja na atmosferske procese.

U 6. poglavlju je kroz objavljenu literaturu navedena i objašnjena primena kosmogenih radionuklida, koja je i temelj motivacije za ovo istraživanje. Razlog za sva do sada navedena poglavlja sažet je u 7. poglavlju koje se bavi glavnim predmetom istraživanja – kosmogenim radionuklidom ^7Be , njegovim ekološkim značajem, poreklom i vremenskom i prostornom distribucijom, koje mu pružaju mogućnost primene u oblasti meteorologije, nuklearne i astrofizike.

Sledeća dva poglavlja daju detaljan opis metode merenja i primenjenih eksperimentalnih postupaka kalibracije instrumenata, prikupljanja i pripreme uzoraka, kao i sam način analize merenih podataka.

Primenjeni statistički parametri za opisivanje rezultata merenja i matematički modeli obrade izmerenih vrednosti u cilju ostvarenja ideje rada, odnosno ispitivanja pogodnih načina aproksimacije i predikcije koncentracije izotopa ^7Be u prizemnom sloju atmosfere, objašnjeni su u 10. poglavlju.

Pretposlednje poglavlje, u kom su predstavljeni i diskutovani rezultati istraživanja, najpre se bavi statističkim opisom rezultata merenja, kroz prikaz vremenske distribucije koncentracije ^7Be i njenog sezonskog karaktera, kao i pružanjem uvida u radiološki značaj prisutne koncentracije ovog izotopa u prizemnom sloju atmosfere. Zatim sledi prikaz rezultata matematičke analize izmerenih vrednosti koncentracije, metodom Furijeove

transformacije, na čijim temeljima su zasnivane ideje i pretpostavke za ispitivanja opisana u poslednjem odeljku ovog poglavlja. Pre toga, ispitana je i opravdanost pretpostavki i ideja koje su proizašle iz rezultata Furijeove analize, određivanjem koeficijenata koreliranosti pretpostavljenih uzročnika promena u vremenskoj distribuciji koncentracije ^7Be .

Na kraju poglavlja sa prikazom i diskusijom rezultata celokupnog istraživanja, izložen je detaljan statistički opis razmatranih mogućnosti aproksimacije i predikcije koncentracije radioaktivnog izotopa ^7Be u uzorcima vazduha (aerosola) i ukupnog (suvog i mokrog) depozita prikupljenih u prizemnom sloju atmosfere.

Zaključci proistekli iz ove disertacije izneseni su u 12. poglavlju.

2 RADIOAKTIVNOST

Opšte je poznato da se atomska jezgra sastoje od protona i neutrona (nukleoni). Da bi se savladalo elektrostatičko odbijanje između protona, sa porastom njihovog broja, u jezgri raste i broj neutrona, pojačavajući time dejstvo jake nuklearne sile¹ koja međusobnim privlačenjem nukleona održava jezgro kompaktnim. Nakon izvesnog broja protona ($Z > 83$), dalje povećanje broja neutrona više ne može održati stabilnost² jezgra i takva jezgra se smatraju nestabilnim³ ili radioaktivnim.

Kako u prirodi sve teži stanju najniže energije, da bi to postigla, radioaktivna jezgra⁴ se spontano raspadaju u jedno ili više drugih jezgara⁵. Tom prilikom, ona oslobađaju energiju emitovanjem čestica i/ili fotona⁶. Ova pojava se naziva radioaktivnost. Otkrio ju je francuski fizičar Anri Bekerel 1896. godine i za ovo otkriće, zajedno sa Pjerom i Marijom Kiri, 1903. godine dobio Nobelovu nagradu.

Naime, masa jezgra je manja od ukupne mase nukleona⁷ u njemu. Ovaj gubitak je utrošen na energiju veze, koja je po Ajnštajnovoj teoriji jednaka $E_v = \Delta mc^2$, gde Δm predstavlja pomenutu razliku u masi⁸, a c brzinu svetlosti⁹. Ova energija se oslobađa pri stvaranju jezgra, a takođe odgovara i energiji koju je potrebno uložiti da bi se jezgro pocepalo. Zato, što je energija veze veća, jezgra su stabilnija. [1]

¹ Domet joj je reda veličine 10^{-15} m

² Najstabilnija su jezgra sa istim brojem protona i neutrona.

³ Nisu u stanju minimalne energije

⁴ Takozvana "jezgra – roditelji"

⁵ „Jezgra – potomci“ (mogu biti i radioaktivna i stabilna)

⁶ Foton – kvant elektromagnetnog zračenja

⁷ Masa protona van jezgra iznosi $1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg, a neutrona $1,6749 \cdot 10^{-27}$ kg

⁸ Takozvani „defekt mase“

⁹ $c \approx 3 \cdot 10^8$ m·s⁻¹

2.1 Radioaktivni raspadi i jonizujuća zračenja

2.1.1 Zakon radioaktivnog raspada

Radioaktivni raspad je slučajan, statistički proces i ne može se tačno predvideti koje jezgro će se u kom trenutku raspasti. Međutim, svako jezgro poseduje izvesnu verovatnoću raspada (λ), na osnovu koje je moguće odrediti vreme (preko Jednačine 1) za koje će se raspasti polovina trenutnog broja jezgara ($T_{1/2}$ – vreme poluraspada):

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1)$$

Broj raspada u jedinici vremena definiše aktivnost izotopa (A) i jednaka je proizvodu verovatnoće za raspad i preostalom broju jezgara (Jednačina 2), koji je moguće odrediti pomoću zakona radioaktivnog raspada (Jednačina 3).

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow \quad (2)$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad (3)$$

gde je: N – broj jezgara u trenutku t ; N_0 – broj jezgara u početnom trenutku t_0 ; λ – verovatnoća (konstantna) raspada. Jedinica za aktivnost je Bekerel (Bq).

Specifična aktivnost izotopa¹⁰ (A_S) se može izračunati na osnovu njegove molarne mase M_m i vremena poluraspada $T_{1/2}$ (Jednačina 4).

$$A_S = \frac{\lambda N}{m} = \frac{\lambda N}{M_m N / N_A} = \frac{\lambda N_A}{M_m} = \frac{\ln 2 \cdot N_A}{T_{1/2} \cdot M_m} \quad (4)$$

gde su: m – masa radionuklida, N_A – Avogadrov broj. [1,2]

¹⁰ Aktivnost 1 g njegove mase

Rezultati merenja aktivnosti određenog radionuklida u nekom uzorku se obično izražavaju preko koncentracije aktivnosti (A_M), koja se dobija deljenjem ukupne aktivnosti radionuklida u uzorku (A) sa količinom merenog uzorka (M), Jednačina 5.

$$A_M = \frac{A}{M} \quad (5)$$

S obzirom da je aktivnost radionuklida u uzorku proporcionalna njegovoj zastupljenosti (broju čestica, Jednačina 2), na osnovu koncentracije aktivnosti (A_M) može se odrediti i sama koncentracija ispitanog radionuklida (K). Naime, kako je aktivnost 1 g izotopa (A_S) poznata vrednost, njegova koncentracija u uzorku iznosi: $K = A_M/A_S$. Zbog toga, kao ekvivalent izrazu "koncentracija aktivnosti radionuklida" može se koristiti izraz "koncentracija radionuklida".

2.1.2 Prateća jonizujuća zračenja beta raspada

Pojam "zračenje" podrazumeva emitovanje energije, čiji nosioci mogu biti alfa (^4He) i beta (e^- , e^+) čestice, fotoni, neutroni, mioni i druge čestice. Svako zračenje koje je sposobno da izazove jonizaciju sredine kroz koju prolazi ($E > 12,4 \text{ eV}$) smatra se jonizujućim (alfa, beta, X, gama, neutronska, pozitronska i druga zračenja). Ova zračenja prolaskom kroz materiju predaju energiju atomima i molekulima izazivajući izbacivanje elektrona iz njihovog elektronskog omotača. Pri tome oni gube elektroneutralnost i postaju jonizovani, a samim tim i veoma reaktivni. U živim organizmima ovo može da dovede do aktivacije različitih ćelijskih mehanizama koji za posledicu imaju degradaciju ćelija i tkiva, nekada čak i smrt izloženog organizma. [3]

Pored elektromagnetnog dela kosmičkog zračenja, Rendgen aparata, CT uređaja, jedan od izvora jonizujućih zračenja su i radioaktivni raspad. Naime, pri svakom radioaktivnom raspadu dolazi do emisije čestica i/ili elektromagnetnog zračenja. Tako su, na primer, alfa i beta zračenja posledice alfa, odnosno beta raspada, dok se prelaženje atoma u niže energetske stanje emisijom fotona iz omotača ili jezgra naziva X, odnosno gama zračenje, respektivno. Kao što će u 7. poglavlju biti rečeno, posmatrani radionuklid u

ovom istraživanju (${}^7\text{Be}$) je beta emiter, pa će za potrebe ovog rada u daljem tekstu biti objašnjeni samo beta raspad i njegova prateća zračenja (beta, X i gama).

Osnovna karakteristika beta raspada je transformacija nukleona u samom jezgru, a tri osnovna tipa beta raspada su: beta-minus (elektronski), beta-plus (pozitronski) i elektronski zahvat.

a) Pri beta-minus raspadu, neutron se transformiše u proton, elektron (β^- -čestica) i antineutrino (Jednačina 6):



Tom prilikom elektron i antineutrino napuštaju jezgro, dok proton ostaje unutar njega povećavajući mu redni broj za jedan. Maseni broj je nepromenjen, zbog čega su jezgro-roditelj i jezgro-potomak izobarna jezgra (Jednačina 7):



b) U jezgrima podložnim beta-plus raspadu, proton se raspada na neutron (ostaje vezan u jezgru), pozitron (β^+ -čestica) i neutrino (Jednačina 8):



Pri ovom raspadu redni broj jezgra smanjuje se za jedan, formirajući svoje izobarno jezgro (Jednačina 9):



c) Do raspada putem elektronskog zahvata dolazi kod jezgara koja imaju višak protona, ali ne i dovoljno energije da se oni izbace. Naime, ako je energetska razlika između jezgra-roditelja i jezgra-potomka manja od 1,022 MeV, jezgro-roditelj nema dovoljno energije za emisiju pozitrona i tada je jedino moguće da proton iz jezgra "uhvati"

jedan elektron iz omotača ¹¹ i formira neutron, emitujući pri tome jedan neutrino (Jednačina 10):



Promenom broja protona, jezgro se menja u novi hemijski element, pomeren za jedno mesto ulevo u Periodnom sistemu (Jednačina 11):



Takođe, pored spomenutih načina beta raspada, događaju se i njihove dvostruke varijante, ograničeni beta raspad, kao i elektronski zahvat sa emisijom pozitrona. Kod ograničenog beta raspada, jezgro emituje elektron i antineutrino, ali elektron bude uhvaćen u praznu K-ljusku, a novo jezgro ostaje u pobuđenom i nestabilnom stanju. Ova pojava se javlja kod jonizovanih atoma koji imaju nepopunjenu K-ljusku.

Emitovanje e^- ili e^+ iz atomskog jezgra pri beta raspadu, naziva se beta zračenje. Maksimalna energija u spektru beta zračenja je oko 5 MeV, a brzine čestica su (30–99) % brzine svetlosti. Zbog manjih dimenzija i većih brzina kretanja čestica, jonizujuće dejstvo beta zračenja je dosta slabije u odnosu na alfa. Međutim, beta čestice uz veću brzinu imaju i manje naelektrisanje od alfa čestica, što im omogućava veći domet u vazduhu (nekoliko metara) i veću prodornost u različite sredine¹². Zbog svega ovoga, sa strane spoljašnjeg ozračivanja, beta zraci imaju intenzivniji radiološki efekat¹³.

X i gama zračenje (fotoni) su vrste visoko energetskog elektromagnetnog zračenja. Fotoni se kreću brzinom svetlosti, nemaju ni masu, ni naelektrisanje, pa u vazduhu mogu preći stotine kilometara pre nego što izgube energiju. Jonizujuća moć X i gama zračenja je mnogo slabija od moći beta zračenja, ali zbog svoje elektroneutralnosti, koja im omogućava da ne skreću u električnom i magnetnom polju, bezdimenzionalnosti i visokih energija, ova

¹¹ Obično iz K ili L ljuske

¹² Za zaustavljanje beta čestice potrebna je metalna prepreka debljine nekoliko mm

¹³ Mogu da prodru u ljudsko telo do nekoliko cm

zračenja imaju visoku prodornost¹⁴. Energije X zračenja su reda veličine (10^1 – 10^2) keV, a gama iznad nekoliko 10^1 keV. Iako im se delovi energetskeg područja preklapaju, osnovna razlika između ova dva zračenja je u mestu njihovog porekla.

X zračenje emituje atomski omotač, pri prelasku elektrona sa viših na niže energetske nivoe. Tokom elektronskog zahvata, u sloju omotača iz kog je elektron "zahvaćen" ostaje šupljina koja se popunjava nekim od elektrona iz viših nivoea, što za posledicu ima da je ovaj tip raspada uvek praćen emisijom fotona X zračenja.

Gama zračenje emituju pobuđena (ekscitovana) jezgra pri prelasku u niža energetska stanja. Posle alfa i beta raspada, jezgro-potomak često ostane u nekom od svojih pobuđenih stanja. Da bi se deekscitovalo, ono dodatno emituje i gama zračenje. Prolazeći kroz materiju, pozitroni emitovani pri beta-plus raspadu se susreću sa slobodnim elektronima i nestaju u procesu anihilacije. Tom prilikom, anihilirani pozitron i elektron se transformišu u dva gama fotona ($e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$) sa energijama po 511 keV. Pri fisionom raspadu, višak energije se takođe oslobađa emisijom gama zračenja, a u pobuđenom stanju jezgro često ostane i posle elektronskog zahvata, pa se može reći da je gama zračenje prateća pojava većine raspada. [1, 2, 3]

2.1.3 Doza zračenja

Da bi se opisalo dejstvo jonizujućeg zračenja na organizme, uvodi se nekoliko fizičkih veličina koje služe kao kvantitativna mera nivoea izlaganja jonizujućim zračenjima.

Apsorbovana doza (D) je jednaka apsorbovanoj energiji po jedinici mase. S obzirom na to da nemaju sve vrste jonizujućeg zračenja isti uticaj na tkiva i organe, uvodi se pojam ekvivalentne doze ($H_{T,R}$), čija je vrednost jednaka proizvodu srednje apsorbovane doze u tkivu ili organu, usled zračenja vrste R ($D_{T,R}$) i odgovarajućeg radijacionog težinskog faktora w_R . Ukoliko su tkivo ili organ izloženi zračenjima različitih vrsta, ukupan dozni ekvivalent (H_T) je jednak sumi ekvivalentnih doza za odgovarajuća zračenja. [2, 4]

¹⁴ Neki gama zraci mogu proći i kroz olovnu ploču debljine 20 cm

Kako nisu sva tkiva i organi podjednako osetljivi na jonizujuća zračenja, u proceni efektivne doze je potrebno uzeti u obzir i tkivne težinske faktore (w_T) kojima se izražava razlika u doprinosu ekvivalenata doze pojedinih tkiva efektivnoj dozi. Efektivna doza (E) predstavlja sumu otežinjenih ekvivalenata doza u svim tkivima i organima ljudskog organizma, koje potiču od unutrašnjeg i spoljašnjeg izlaganja (Jednačina 12) [2, 4].

$$E = \sum_T H_T w_T = \sum_T w_T \sum_R D_{T,R} \cdot w_R (=) Sv \quad (12)$$

Izlaganje jonizujućem zračenju može biti spoljašnje i/ili unutrašnje, a granice radioaktivne kontaminacije su određene granicama godišnjeg unosa radionuklida u organizam (GGU_n), jačine efektivne doze koja potiče od spoljašnjeg ozračivanja (GD), kao i izvedenim koncentracijama radionuklida (IK_n).

Granicama godišnjeg unosa radionuklida u organizam (Jednačina 13) ograničava se interna kontaminacija.

$$GGU_n = \frac{GD}{e(g)_n} \quad (13)$$

gde su: GD [$Sv \cdot god^{-1}$] – granica efektivne doze i $e(g)_n$ [$Sv \cdot Bq^{-1}$] – očekivana efektivna doza po jediničnom unošenju radionuklida (različita je za ingestiju i inhalaciju).

Izvedena koncentracija radionuklida u vazduhu, vodi, hrani (IK_n) se računa na sledeći način (Jednačina 14):

$$IK_n = \frac{GGU_n}{V} = \frac{GD}{V \cdot e(g)_n} \quad (14)$$

Za unetu količinu (V) se uzima prosečna količina unosa ispitivanog uzorka (Prosečna količina vazduha koju udahne čovek (V_{vaz}) iznosi $0,8 m^3 \cdot h^{-1}$, što je za 8766 sati godišnje $7000 m^3 \cdot god^{-1}$, a GD za stanovništvo¹⁵ iznosi $1 mSv \cdot god^{-1}$). [5]

¹⁵ Za profesionalno izložena lica ova vrednost je $20 mSv/god$

2.2 Radioaktivnost životne sredine

Radioaktivnost je prisutna u svim porama životne sredine: vazduhu, vodi, zemljištu, biljkama, životinjama i nama samima.

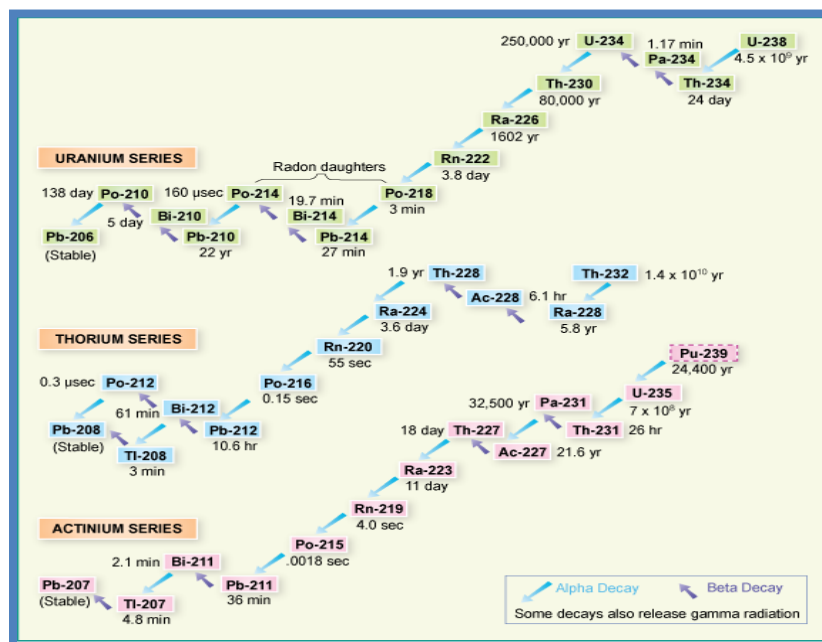
Prirodnu komponentu radioaktivnosti čine:

a) *Radioaktivni izotopi primordijalnog porekla* – nestabilni izotopi koji su ušli u sastav Zemlje prilikom njenog formiranja. Zbog geološke starosti Zemlje od oko $4,5 \cdot 10^9$ godina, veći deo ovih elemenata se već raspao. Međutim, izotopi sa vremenom poluraspada većim od $0,5 \cdot 10^9$ godina (1/10 starosti Zemlje) još uvek se nalaze u Zemljinoj kori i imaju značajan doprinos u ukupnoj radioaktivnosti životne sredine. Najznačajniji među njima su: ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th i ^{235}U , čija su vremena poluraspada prikazana u Tabeli 1.

Tabela 1. Radionuklidi primordijalnog porekla i njihova vremena poluraspada [6]

<i>Radionuklid</i>	<i>Vreme poluraspada, $T_{1/2}$ (godina)</i>
^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$
^{232}Th	$14 \cdot 10^9$
^{235}U	$0,704 \cdot 10^9$

Dok se ^{40}K raspada na stabilne elemente (^{40}Ca i ^{40}Ar), potomci ^{238}U , ^{232}Th i ^{235}U su takođe nestabilni izotopi, što za posledicu ima formiranje čitavih nizova drugih radioaktivnih elemenata do formiranja poslednjeg (stabilnog) elementa. Ove tri prirodne serije (Uranijumova, Torijumova i Aktinijumova, redom) imaju nekoliko zajedničkih osobina: rodonačelnik niza ima veliki period poluraspada (10^8 – 10^9 godina), poseduje izotop u gasovitom stanju (koji utiče na migraciju sledećih potomaka u atmosferu) i svaki se završava stabilnim izotopom olova (^{206}Pb , ^{208}Pb , ^{207}Pb , respektivno). Šeme raspada sve tri prirodne serije radioaktivnih nizova, prikazane su na Slici 1.



Slika 1. Šeme raspada prirodnih serija radioaktivnih nizova [7]

b) *Kosmičko zračenje* – podrazumeva visokoenergetske čestice iz svemira koje ulaze u Zemljinu atmosferu, kao i kaskade novih čestica nastale u njihovim interakcijama sa jezgrima vazduha. Detaljnijem opisu kosmičkog zračenja posvećeno je Poglavlje 2.2.1.2.2;

c) *Radioaktivni izotopi kosmogenog porekla* – radioaktivna jezgra nastala u interakciji kosmičkog zračenja sa atomima atmosfere. Zbog prirode njihovog nastajanja, detaljniji opis distribucije i primene kosmogenih radionuklida dati su u Poglavljima 2.2.1.2.3 i 6, nakon poglavlja posvećenog kosmičkom zračenju.

Veštačku (ili proizvedenu) komponentu radioaktivnosti u najvećoj meri čine medicinska ozračivanja i sva radioaktivna jezgra nastala ljudskim delovanjem (nuklearni reaktori, nuklearno oružje itd.). Razvoj nuklearne tehnologije¹⁶ doprineo je povećanju radioaktivnih materija koje nemaju prirodno poreklo u životnoj sredini.

¹⁶Probe sa nuklearnim oružjem, povećanje broja nuklearnih centara, razvoj postrojenja za proizvodnju i obradu nuklearnog goriva itd.

Posledice prisustva svih navedenih članova radioaktivnosti su *spoljašnje i unutrašnje ozračivanje*. Spoljašnje ozračivanje iz životne sredine nastaje pre svega usled kosmičkog zračenja i emisijom radioaktivnih izotopa prisutnih u zemljištu i vazduhu, dok je unutrašnje ozračivanje posledica kontaminacije radioaktivnim jezgrima, koja u organizam mogu dospeti putem ingestije i inhalacije¹⁷. [2, 8, 9]

2.2.1 Radioaktivnost atmosfere

Usled direktnog spoljašnjeg ozračivanja kosmičkim zračenjem i raspadom prisutnih radionuklida u vazduhu, njihovom inhalacijom i taloženjem na tlo, čime se kontaminiraju zemljište i biljke, a kasnije, preko lanca ishrane, i životinje i ljudi, može se reći da najznačajniji udeo u ozračivanju organizma iz životne okoline ima atmosfera (oko 70 % ukupne godišnje efektivne doze, ne uzimajući u obzir ingestiju) [3]. Zbog brzine i veličine oblasti širenja kontaminacije, atmosfera je i najznačajniji vid transporta radioaktivnih materija.

2.2.1.1 Slojevi i parametri atmosfere

Zahvaljujući razvoju nauke, sastav i struktura atmosfere su danas veoma dobro poznati. Atmosfera se u najvećoj meri sastoji od azota (oko 76 %), kiseonika (oko 23 %), argona (oko 1 %) i ostalih gasova (manje od 1 %) [10].

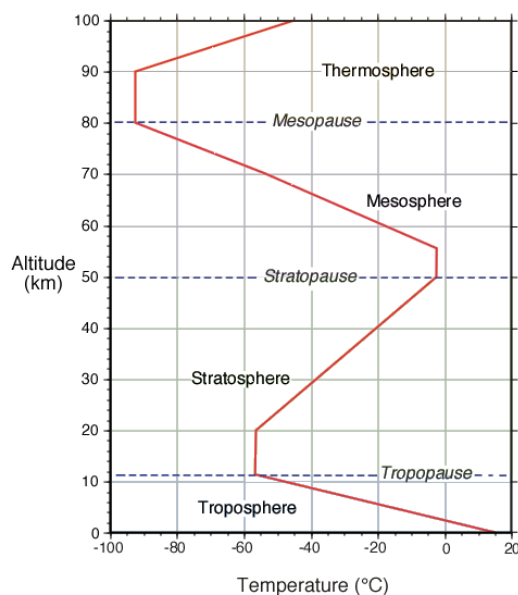
Osim gasova, u atmosferi su prisutne i čestice u tečnom i čvrstom stanju. Prve obrazuju oblake i magle, dok se u druge ubrajaju čestice dima i prašine. Zajedno ove čestice, koje mogu da lebde ili sporo padaju, nazivamo *aerosoli*. Neke aerosoli potiču od prirodnih izvora poput vulkanskih erupcija, peščanih oluja, šumskih požara i morskog rasprskavanja, dok su neke posledica ljudske aktivnosti, kao što je loženje fosilnih goriva. Svi aerosoli, imaju značajnu ulogu u procesu kondenzovanja vodene pare u atmosferi kao *jezgra kondenzacije* i mogu se podeliti u tri velike grupe: a) *Ejtkinsova (Aitken) jezgra* sa poluprečnikom $r < 0,1 \mu\text{m}$ – u meteorologiji se obeležavaju sa CN (*Condensation Nuclei*);

¹⁷ *Ishranom i udisanjem*

b) *Velika jezgra* (r u intervalu $0,1-1,0 \mu\text{m}$) – vrlo su aktivna u atmosferi i obeležavaju se sa CCN (*Cloud Condensation Nuclei*); c) *Gigantska jezgra* ($1,0 < r < 3,5 \mu\text{m}$) – ima ih malo, ali su značajna pri obrazovanju krupnih kapljica. [10]

Veličina čestica i njihov hemijski sastav su dva najvažnija parametra pri interakciji aerosola sa okolinom. Depozicija iz atmosfere na tlo, vegetaciju i druge površine je funkcija veličine čestica¹⁸. Takođe je i stepen do kojeg atmosferske čestice prodiru u ljudsko telo (preko respiratornih organa) pretežno određen njihovom veličinom. Procenjuje se da oko 70 % čestica koje se unesu u atmosferu ponovo bude staloženo (direktnom depozicijom¹⁹ ili inkorporirani u kišnim kapima). Brzina taloženja aerosola u najvećoj meri zavisi od njihovih fizičkih osobina (mase, oblika, specifične težine).

Atmosfera je podeljena po visini na nekoliko slojeva: troposfera, stratosfera, mezosfera, termosfera i egzosfera (Slika 2). Sa tačke gledišta transporta radioaktivnih materija, najbitnija su dva najniža sloja.



Slika 2. Slojevi atmosfere i njihov temperaturni režim [11]

¹⁸ Samo dovoljno male čestice mogu da ostanu u vazduhu.

¹⁹ Pod uticajem gravitacionih sila

2.2.1.1.1 Troposfera i meteorološki parametri

Troposfera je najniži, najgušći i najtopliji deo atmosfere. Visina do koje se prostire zavisi od geografske širine: (6–8) km na polovima i (16–18) km iznad ekvatora. U njoj se nalazi oko 80 % mase atmosfere (skoro sva atmosferska voda) i odvijaju gotovo svi klimatski procesi²⁰ uslovljeni meteorološkim parametarima poput insolacije (osunčanost), temperature, vazdušnog pritiska, vlažnosti vazduha i dr. [10, 12]

Osunčanost (insolacija)

Insolacija predstavlja direktno Sunčevo zračenje na horizontalnoj površini. Meri se heliografom i izražava u časovima sijanja Sunca. Vrednost insolacije se menja sa ekspozicijom reljefa i geografskom širinom, a na jednoj lokaciji broj sunčanih sati najviše zavisi od trajanja obdanice, godišnjeg doba i oblačnosti.

Temperatura

Temperatura je jedna od osnovnih fizičkih jedinica i predstavlja meru srednje kinetičke energije čestica u materiji. U meteorologiji se pod temperaturom vazduha podrazumeva temperatura koja nije uzrokovana toplotnim zračenjem tla i okoline ili Sunčevim zračenjem. Meri se na otvorenom prostoru, na visini od 2 m iznad tla, u naročitom meteorološkom zaklonu koji štiti termometre od padavina i zračenja.

Na teritoriji Srbije najhladniji mesec je januar u kom se srednja mesečna temperatura kreće u intervalu od -6 °C u planinskim predelima, do oko 0 °C u ravničarskim delovima zemlje²¹. Najtopliji mesec u Srbiji je jul, sa srednjom mesečnom temperaturom u intervalu od 11 °C do 22 °C. [13]

²⁰ Formiranje oblaka, padavina, strujanje vazduha, električna pražnjenja i dr.

²¹ Najviša je u Beogradu (0,4 °C), zbog izraženog urbanog uticaja

Vlažnost vazduha

Iznad kontinenata, veliki deo vodene pare ulazi u atmosferu preko isparavanja sa zemljišta i slobodnih vodenih površina. Čak i biljke, preko procesa transpiracije²², doprinose povećanju vlažnosti. Međutim, sve ovo iznosi samo 15 % od ukupne količine vodene pare koja godišnje dospe u atmosferu, preostalih 85 % isparava iz okeana.

Usled isparavanja, vertikalnim ili konvektivnim strujanjem vazduha, odnosno turbulentnim procesima u troposferi, u Zemljinj atmosferi se uvek nalazi određena količina *vodene pare*, koja se difuznim procesima meša sa vazduhom.

Vlažnost vazduha daje predstavu o količini vodene pare koja se nalazi u vazduhu i jedan je od najvažnijih klimatskih elemenata. Od njene količine direktno zavisi pojava padavina, ali i nivo dugotalasnog Zemljinog zračenja, koje ona apsorbuje.

Količina vodene pare u atmosferi je promenljiva, ali na određenoj temperaturi i pritisku, količina vodene pare koja se može naći u određenoj zapremini vazduha je ograničena. Ako vazduh u sebi sadrži maksimalnu količinu vodene pare onda je on zasićen. Temperatura vazduha na kojoj je vazduh zasićen vodenom parom naziva se temperaturom rosne tačke. Međutim, ako dođe do naglog opadanja temperature, vazduh biva prezasićen vodenom parom, pa se taj višak kondenzuje u kapljice tekuće vode ili sublimira u kristale leda.

Merenje vlažnosti vazduha vrši se pomoću higrometra i izražava u procentima. Apsolutna vlažnost vazduha predstavlja masu vodene pare u gramima koja je sadržana u 1 m³ vazduha, dok relativna vlažnost predstavlja odnos između apsolutne i maksimalne moguće vlažnosti koju bi on mogao imati na datoj temperaturi (veća je zimi nego leti). Relativna vlažnost je izuzetno važna, jer se njenim iznosom pokazuje stepen zasićenosti vazduha vodenom parom. Vazduh se smatra veoma suvim ako je njegova relativna vlažnost ispod 55 %, suvim između (55–74) %, umereno vlažnim (75–90) %, a veoma vlažnog

²² *Isparavanje vode iz biljaka*

preko 90 %. Merenje relativne vlažnosti vazduha, zasniva se na merenju odnosa pritiska vodene pare i pritiska zasićene vodene pare²³ i izražava se u procentima.

Vazdušni pritisak

Kao posledica težine molekula koje sadrži, atmosfera ima svoju težinu i vrši pritisak na površinu Zemlje (približno $1 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$). Najčešće korišćene jedinice za merenje pritiska su milibar (mb) i paskal (Pa). Pritisak na nivou mora na 45° geografske širine, pri temperaturi od 0°C , iznosi 1013,25 mb i naziva se normalnim vazdušnim pritiskom.

Kako najniži, prizemni slojevi atmosfere trpe najveći pritisak, na višim nadmorskim visinama, količina vazduha je manja, pa vazdušni pritisak na svakih 100 m opada za oko 11 mb, što znači da se na visini od oko 5 km smanji za 50 %.

Hladan vazduh je gušći od toplog, zbog čega se spušta naniže, obrazujući predeo visokog vazdušnog pritiska (polje anticiklona), dok se topao podiže i obrazuje predeo niskog vazdušnog pritiska (polje ciklona). Kada postoje razlike u atmosferskim pritiscima, vazduh počinje da se kreće iz područja višeg ka području sa nižim vazdušnim pritiskom, što uzrokuje pojavu vetrova.

Kako je gustina vodene pare manja od gustine vazduha²⁴, smeša vazduha i pare ima manju gustinu, pa u danima kada je vlažno vreme, vazdušni pritisak je između ostalog niži i zbog ove činjenice. Vodena para ima svoj pritisak (napon) koji raste sa povećanjem sadržaja vodene pare u vazduhu. Napon zasićene vodene pare direktno zavisi od temperature i naziva se maksimalni napon vodene pare. Na višoj temperaturi vazduh može primiti više vodene pare i obrnuto, a kada se vlažan i topao vazduh podigne, u njemu se na određenoj visini kondenzuje vodena para i formira oblak.

²³ *Maksimalan pritisak vodene pare pri određenoj temperaturi*

²⁴ *U razmeri 0,622:1*

Oblačnost

Sa molekulima vazduha pomešani su i mikroskopski delovi prašine, dima i soli iz okeana. Na površinama mnogih od njih, može da se kondenzuje vodena para, zbog čega se ovakve čestice nazivaju jezgrima kondenzacije. U toplom vazduhu, molekuli vodene pare se kreću brzo i udaraju u jezgro tolikom jačinom da se od njega odbijaju. Međutim, ako je vazduh rashlađen, molekuli se kreću mnogo sporije i više su skloni da se „nakače“ i kondenzuju na jezgrima. Kada se nekoliko milijardi ovakvih molekula kondenzuje na ovim jezgrima, formiraju se male tečne kapljice oblaka.

Oblačnost predstavlja pokrivenost vidljivog dela nebeskog svoda oblacima. Za njeno merenje ne postoji instrument, već se procenjuje golim okom i izražava na skali od 0–10 (često je u upotrebi i skala od 0–8 ili izražavanje u procentima pokrivenosti), gde vrednosti "0" odgovara potpuno vedrom nebu, bez ijednog oblaka, dok se vrednost "10" pripisuje potpunoj pokrivenosti neba oblacima (100 %).

Količina padavina

Na temperaturi rosne tačke, vodena para se kondenzuje ili sublimira i pretvara u padavine koje se, u čvrstom ili tečnom agregatnom stanju, formiraju neposredno uz površinu tla (horizontalne ili niske padavine) ili u višim slojevima atmosfere (vertikalne ili visoke padavine), nakon čega padaju na površinu. Da bi došlo do njihovog formiranja moraju postojati vodena para (posledica isparavanja), proces kondenzacije (uglavnom kao posledica dinamičkog hlađenja) i prisustvo jezgra kondenzacije.

Na osnovu načina hlađenja vazduha, padavine se dele na: konvektivne²⁵, frontalne²⁶ i orografske²⁷ padavine.

²⁵Podizanje zagrejanog vazduha na visine, gde zbog nižih temperatura dolazi do zgušnjavanja i formiranja oblaka

²⁶Udarom toplog i vlažnog na hladan i suv talasni front.

²⁷Podizanjem toplog i vlažnog vazduha zbog savlađivanja orografskih prepreka–planina

Kao meteorološki element, padavine imaju sledeće karakteristike: oblik, trajanje, količinu i intenzitet. Oblik padavina je određen različitim formama tečne i čvrste faze vode. Kiša, sneg, grad i njihova međufazna stanja spadaju pod vertikalne ili visoke padavine, dok se rosa, slana, inje i poledica smatraju horizontalnim ili niskim padavinama. Trajanje padavina predstavlja vremenski interval od početka do završetka padavina. Količina padavina je zapremina vode na jediničnoj površini (1 m^2) izražena u litrima ili u milimetrima, pri čemu zapremini od 1 litra odgovara visina vode od 1 mm. Konačno, intenzitet padavina predstavlja količinu padavina u jedinici vremena, pri čemu se obično za jedinicu vremena uzima 1 h ili 1 min.

Prema podacima Republičkog hidrometeorološkog zavoda Srbije, na prostorima Republike Srbije prosečna količina padavina je $896 \text{ mm}\cdot\text{god}^{-1}$ i u proseku rastu sa nadmorskom visinom, od ispod $600 \text{ mm}\cdot\text{god}^{-1}$ do preko $1000 \text{ mm}\cdot\text{god}^{-1}$. Najveća količina padavina je karakteristična za maj i jun, nasuprot februaru i oktobru tokom kojih je količina padavina najmanja, što je karakteristika kontinentalnog režima padavina (veća količina padavina tokom toplijih meseci) [14].

Troposfera se može podeliti u tri sloja:

- a) Prizemni sloj – prostire se do 100 m visine i zbog direktnog kontakta sa Zemljinom površinom, karakterišu ga velika temperaturna kolebanja, kao i vlažnost vazduha.
- b) Pogраниčni sloj – uz ista kolebanja, kao u prizemnom sloju, odlikuje ga i pozitivan gradijent brzine vetra. Zahvata pojas od 100 m do 3000 m.
- c) Slobodna atmosfera – obuhvata sloj od 3000 m do 8000 m, sa karakterističnim negativnim gradijentom temperature²⁸ i vlažnosti vazduha. U njemu, zbog velike kondenzacije, dolazi do formiranja svih tipova oblaka.

²⁸ Hlađenje sa visinom (do $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ na polovima i $-85 \text{ }^\circ\text{C}$ na ekvatoru).

Od sledećeg sloja, stratosfere, troposfera je odvojena tropopauzom. Visina njenog formiranja varira sa geografskom širinom, godišnjim dobom i posebnim dnevnim uslovima. Najniža je u polarnim oblastima, gde ponekad u zimskim noćima može i da nestane.

Ovaj sloj je karakterističan zbog prestanka hlađenja vazduha sa visinom, kao i gotovo potpunim odsustvom vlage. Prema Svetskoj meteorološkoj organizaciji, tropopauza je sloj gde negativan gradijent temperature opadne ispod $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$.

Takođe, jaka turbulencija je još jedna karakteristika tropopauze, pa u njoj dolazi do kretanja vazdušnih masa u svim pravcima. [10, 12]

2.2.1.1.2 Stratosfera

Prostiranje stratosfere varira sa geografskom širinom i godišnjim dobom, od 8 km do oko 55 km (najviša je leti, na ekvatoru). Za razliku od troposfere, temperatura u ovom sloju ima pozitivan gradijent i dostiže $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porast temperature je posledica apsorpcije ultraljubičastog Sunčevog zračenja ($\lambda < 290\text{ nm}$) od strane molekula kiseonika (O_2), usled čega se oni dele i formiraju troatomski oblik, molekule ozona (O_3), stvarajući time ozonski omotač (ozonosfera).

Zbog suvoće vazduha, u stratosferi skoro da i nema oblaka, dok se kretanje vazdušnih masa, odvija uglavnom u horizontalnom pravcu. Usled niskog gradijenta temperature i slabog mešanja vazduha između slojeva, stratosfera predstavlja sloj velike stabilnosti.

Takođe, zbog nedostatka vertikalne konvekcije, materijali koji ulaze u stratosferu mogu se dugo zadržati u njoj. Velike vulkanske erupcije i meteoriti mogu dopremiti aerosolne čestice u stratosferu gde mogu ostati mesecima i godinama, ponekad menjajući globalnu klimu Zemlje. [10, 11, 15]

2.2.1.1.3 Mezosfera

Sloj atmosfere, od stratopauze do visine od oko (80–100) km, sa ponovnim negativnim gradijentom temperature, naziva se mezosfera. U ovom pojasu, temperatura dostiže svoju minimalnu vrednost i do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, a vazduh je izuzetno proređen²⁹.

2.2.1.1.4 Termosfera

Najveći sloj atmosfere, koji se prostire na visini (90–500) km, je termosfera. Kao i u stratosferi, u ovom sloju temperatura ima pozitivan gradijent, pri čemu dostiže vrednost i do $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iznad ovog sloja, do nekih 3000 km, nalazi se sloj egzosfere. U njemu temperatura nastavlja da raste. [10, 12]

2.2.1.2 **Prirodna radioaktivnost atmosfere**

Prirodna radioaktivnost atmosfere³⁰ u najvećoj meri potiče od emisije gasova radioaktivnih *izotopa radona*³¹ nastalih raspadima primordijalnih radionuklida, dok preostali deo čine *kosmičko zračenje* i *kosmogeni radionuklidi*.

2.2.1.2.1 Primordijalni radionuklidi

Kao što je u Poglavlju 2.2 rečeno, u kori Zemlje postoji izvestan broj nestabilnih elemenata još od njenog formiranja (⁴⁰K, članovi tri prirodna radioaktivna niza itd.). Oni u atmosferu mogu dospeti na više načina: erupcijama vulkana, razaranjem stena, podizanjem prašine, emanacijom i sl.

Zbog svog dugog vremena poluraspada, male specifične aktivnosti i zanemarljivog prisustva u atmosferi, prvi članovi radioaktivnih nizova ne predstavljaju njene ozbiljnije radiološke kontaminante.

²⁹ Oko 99,9% atmosferske mase se nalazi u njenim nižim slojevima.

³⁰ Čini oko 50% ukupne prirodne komponente radioaktivnosti životne sredine.

³¹ Potomci primordijalnih radioaktivnih elemenata

Međutim, u šemi raspada sva tri radioaktivna niza (^{238}U , ^{232}Th i ^{235}U) postoje radioaktivni izotopi radijuma čiji su potomci takođe radioaktivni izotopi radona (^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{219}Rn , respektivno) koji se u prirodi nalaze u gasovitom stanju što im omogućava emanaciju iz Zemljine kore u atmosferu. Koncentracija radonovih izotopa u atmosferi je u najvećoj meri uslovljena sadržajem radonačelnika nizova u tlu, stanjem tla iz kojeg se emisija obavlja (vlaga, temperatura, snežni pokrivač, rastinje) kao i meteorološkim uslovima koji vladaju na lokaciji. Na primer, pri nižem pritisku, sunčanom vremenu i povišenoj temperaturi, emanacija se povećava, a pravac i brzina vetra određuju dalje kretanje izotopa.

Svaki od pomenutih radonovih izotopa se raspada na odgovarajuće izotope Po, Pb i Bi, emitujući pri tome alfa zračenje. Potomci ovih raspada su takođe alfa emiteri i interaguju sa negativnim jonima prisutnim u atmosferi, pripajajući se za prirodne aerosole.

Aerosoli većih dimenzija se zadržavaju u nosu i usnoj duplji, ne dopirući do osetljivog respiratornog epitela bronhijalnog stabla. Međutim, aerosoli sa dijametrima u intervalu (0,1–10) nm se najbolje talože u ljudskim plućima. Zato, ukoliko se deponuju u plućima, ovakvi aerosoli sa "vezanim" alfa emiterima (zbog velike moći jonizacije) postaju izuzetno opasni. Iz tog razloga, radonovi izotopi iz prirodnih radioaktivnih nizova, predstavljaju najznačajniji radioaktivni kontaminant atmosfere. [16]

Najveći doprinos prirodnoj radioaktivnosti vazduha, sa svojim kratkoživećim potomcima, daju izotopi ^{222}Rn i ^{220}Rn (zbog značajnog prisustva ^{238}U i ^{232}Th u Zemljinoj kori), dok je zbog niske zastupljenosti ^{235}U u tlu (0,7 %), doprinos ^{219}Rn zanemarljiv. Prvi dugoživeći potomak ^{222}Rn , ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ godine), se veoma brzo vezuje za neaktivne aerosole i na taj način migrira kroz atmosferu ili se putem padavina i taloženja prašine deponuje na površinu Zemlje. [8, 9, 16]

2.2.1.2.2 Kosmičko zračenje

Kosmičko zračenje podrazumeva čestično i elektromagnetno zračenje čije poreklo potiče iz kosmosa. Za posmatrača na Zemlji, primarnim kosmičkim zračenjem se smatra onaj deo kosmičkog zračenja koji pogodi atmosferu (oko $10^5 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Deo koji nastaje

interakcijom primarnog dela sa česticama atmosfere, naziva se sekundarnim kosmičkim zračenjem. [17]

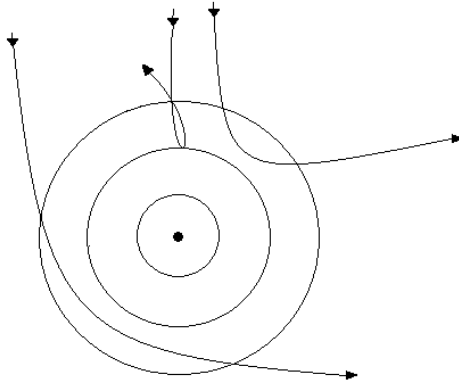
Najveći deo primarnog kosmičkog zračenja se sastoji od visokoenergetskih čestica: najzastupljenija su jonizovana jezgra vodonika (protoni, oko 85 %) i helijuma (alfa čestice, oko 12 %), dok ostalo čine joni ugljenika, azota i kiseonika (oko 1,7 %), joni litijuma, berilijuma i bora (oko 0,7 %) i oko 0,6 % joni težih elemenata ($Z > 10$). Vrlo mali deo čine elektromagnetno zračenje i elektroni. [18]

U odnosu na poreklo, čestice primarnog kosmičkog zračenja mogu se podeliti u dve veće grupe:

- a) Solarne – Ova grupa potiče od Sunca i pretežno je čine protoni energije ispod 1 GeV. Zbog velike količine vodonika koju Sunce izbacuje tokom erupcija (Poglavlje 3), intenzitet ovog zračenja varira u odnosu na Sunčevu aktivnost (Poglavlje 4).
- b) Galaktičke – Ove čestice vode poreklo iz naše (čestice sa donjeg kraja energetskog spektra) i drugih galaksija (do 10^{12} GeV). Intenzitet ovog dela primarnog zračenja opada sa energijom po zakonu $N(E) \sim E^{-1,6}$, gde $N(E)$ predstavlja broj čestica sa energijama većim od E . Kako su ove čestice naelektrisane, pretpostavlja se da svoju ogromnu energiju dobijaju ubrzavanjem pri prolasku kroz magnetna polja galaktičkih objekata. [18]

Kao posledica rotacije naše galaksije (Mlečni put), stvara se magnetno polje od nekoliko μG koje kontinualno skreće upadno kosmičko zračenje. Kako je ovaj prečnik savijanja reda veličine galaksije, za lokalnog posmatrača kosmički zraci su izotropni.

Prodor čestica primarnog zračenja u atmosferu, suprotstavlja se Zemljino magnetno polje. Dejstvom Lorencove sile, ovo polje skreće naelektrisane čestice, smanjuje njihov fluks i na taj način predstavlja zaštitni sloj od kosmičkog zračenja (Slika 3). Usled toga, teško je da bilo koja naelektrisana čestica koja dolazi izvan magnetosfere Zemlje prođe u nju. [17]



Slika 3. Moguće putanje kretanja naelektrisanih čestica upadnog kosmičkog zračenja istog naelektrisanja i momenta u ravni geomagnetnog ekvatora [17]

Međutim, ovoj tendenciji polja da odbaci česticu, u određenoj meri suprotstavlja se njen impuls (moment). Zbog toga, sposobnost čestice da prođe u geomagnetno polje zavisi od njene magnetne rigidnosti (Jednačina 15). Za razliku od čestica sa istim impulsom ili energijom, ali različitim naelektrisanjem, čestice sa istom rigidnošću će u magnetnom polju pratiti identične trajektorije.

$$R = \frac{pc}{q} = r_L B \quad (15)$$

gde su: q – naelektrisanje čestice ($q = e \cdot Z$, $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C, Z – redni broj atoma); c – brzina svetlosti; B – jačina magnetnog polja; r_L – Larmorov radijus (žiroradijus). [19]

Larmorov radijus je radijus kretanja naelektrisane čestice u magnetnom polju, koja je u njega ušla pod pravim uglom u odnosu na linije polja i određuje se prostim izjednačavanjem Lorencove i centripetalne sile (Jednačina 16) [20]:

$$q(\vec{v} \times \vec{B}) = qvB_{\perp} = \frac{m\vartheta^2}{r_L} \Rightarrow r_L = \frac{m\vartheta}{qB_{\perp}} = \frac{p}{qB_{\perp}} \quad (16)$$

Kako se čestice primarnog kosmičkog zračenja kreću brzinama bliskim brzini svetlosti, njihova masa i moment se izražavaju sledećim formulama (Jednačine 17 i 18):

$$m = \gamma m_0 \quad (17)$$

$$p = \gamma m_0 v \quad (18)$$

gde su: m_0 – masa mirovanja čestice; v – brzina kretanja čestice i γ – Lorencov (relativistički) faktor koji zavisi od brzine čestice na sledeći način (Jednačina 19):

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (19)$$

Zbog relativističkih brzina kojima se kreću, za protone primarnog kosmičkog zračenja se može koristiti aproksimacija da im je rigidnost (izražava se u V) jednaka energiji, prelaskom sa jedinice eV na jedinicu V. [20]

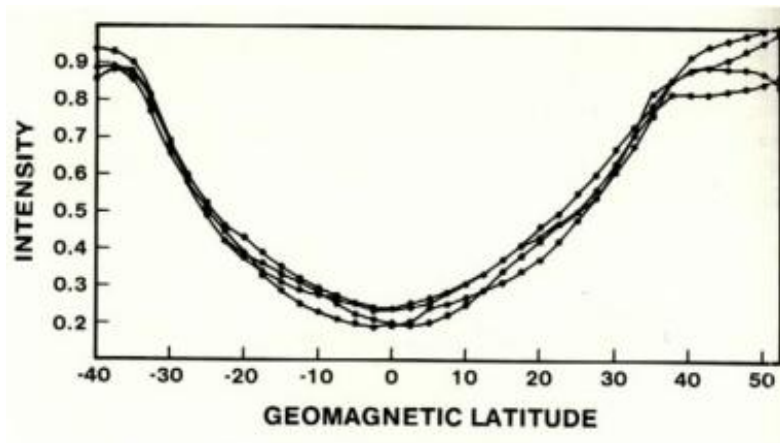
Za svaku tačku u magnetosferi postoji određena minimalna rigidnost³² koju čestica treba da poseduje da bi doprla do nje. Čestice čija je rigidnost manja od kritične će prethodno biti odbačene, pa je kosmičko zračenje intenzivnije u tačkama sa nižom rigidnošću. Minimalna rigidnost koju čestica treba da poseduje da bi dostigla odgovarajuću poziciju iznad Zemlje, tj. tačku određenog geocentričnog radijusa (r) i geomagnetne širine (λ), može se proceniti korišćenjem Stormerove formule (Jednačina 20):

$$R_c(r, \lambda, \theta, \varphi) = \frac{M \cos^4 \lambda}{r^2 [1 + \sqrt{(1 - \sin \theta_z \sin \varphi \cos^3 \lambda)}]^2} \quad (20)$$

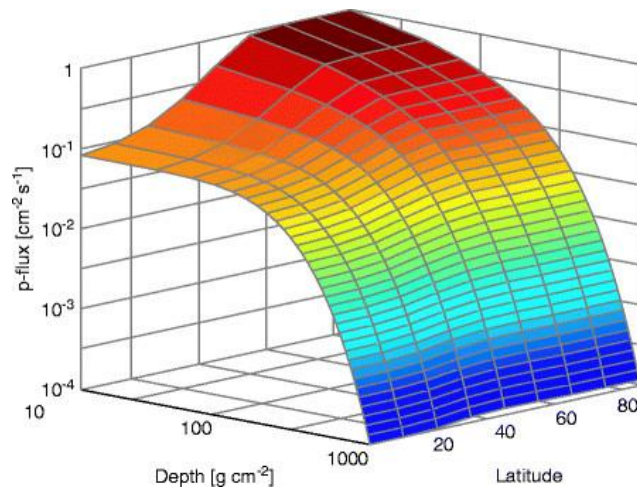
gde je R_c – prag rigidnosti u tački sa koordinatama ($r, \lambda, \theta, \varphi$); M – magnetni moment Zemlje; θ_z – zenitni ugao; φ – azimutni ugao izmeren od južnog magnetnog pola u smeru kazaljke na satu (asimetrija istok–zapad): za prodiranje pozitivnih jona sa zapada $\varphi = 270^\circ$, odnosno $\varphi = 90^\circ$ za prodiranje sa istoka, dok za negativne jone važi isti redosled vrednosti ugla φ , pri suprotnom smeru prodiranja. [19]

³² Kritična ili granična rigidnost, prag rigidnosti

Iz ove jednačine sledi nekoliko zaključaka o raspodeli čestica i njihovih energija u magnetosferi. Na primer, za čestice koje se kreću pod pravim uglom u odnosu na Zemlju ($\theta_z = 0^\circ$), prag rigidnosti je proporcionalan faktoru $\cos^4\lambda$. To znači da je prodor lakši na većim magnetnim širinama, gde je faktor $\cos^4\lambda$ minimiziran. Zbog toga su polovi najviše pogođene oblasti na Zemlji, dok je ekvator najzaštićeniji (Slika 4). Jednačina prikazuje i asimetriju u pragu krutosti u odnosu na pravac dolaska, jer je pozitivnom jonu najlakše da proдре sa zapada ($\varphi = 270^\circ$). Takođe, prag rigidnosti je obrnutno proporcionalan kvadratu geocentričnog radijusa. Prema tome, na određenoj geografskoj širini, penetracija na niže visine zahteva veću rigidnost, pa će čestice sa većim rigidnostima biti detektovane na nižim nadmorskim visinama (Slika 5).



Slika 4. Intenzitet kosmičkog zračenja u funkciji geografske širine [21]



Slika 5. Fluks protona u funkciji visine i geografske širine [22]

Čestice primarnog kosmičkog zračenja, čija je rigidnost veća od R_c , se na svom putu kroz atmosferu sudaraju sa njenom materijom i anihiliraju. Anihilacioni procesi dostižu toliki stepen da na nadmorskim visinama manjim od 25 km broj čestica primarnog zračenja opadne do vrlo malog dela svog početnog intenziteta.

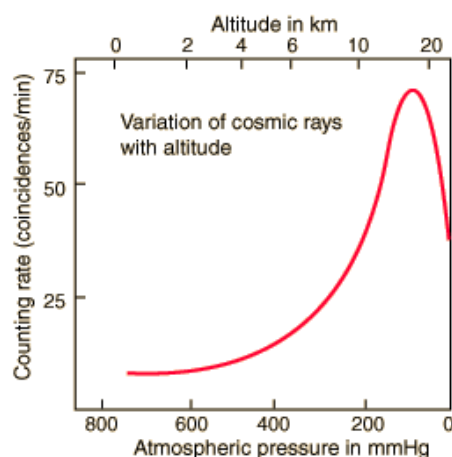
U interakcijama sa atmosferskom materijom, formira se veliki broj novih čestica (kaskade) čija je ukupna kinetička energija manja od prvobitnog (primarnog) zračenja, ali je njihov ukupni maseni ostatak veći od mase primarnih čestica. Na primer, jedan proton energije 10^4 GeV, može da proizvede 50–100 novih visokojonizovanih čestica. Ove novonastale čestice, nazivaju se sekundarnim kosmičkim zračenjem.

Geomagnetno polje ne utiče samo na prodor primarnog kosmičkog zračenja, već i na dalje kretanje naelektrisanih komponenti sekundarnog kosmičkog zračenja. Menjajući im pravac kretanja, magnetno polje produžava putanju čestica kroz atmosferu i povećava mogućnost da jedan deo bude izbačen u svemir. Time se verovatnoća da čestice kosmičkog zračenja stignu do površine Zemlje smanjuje.

Od 100 primarnih čestica, manje od 1 može da formira kaskadu koja može da dostigne nivo mora. Većina ih se raspadne ili izgubi energiju, čime se gube iz kaskade. Deo kosmičkog zračenja koji uspe da proдре do površine Zemlje, nazivamo površinskim

kosmičkim zračenjem. Najveći deo ovog zračenja čine čestice od 3. do 7. generacije sekundarnog zračenja, dok je udeo čestica primarnog zračenja manji od 1 %.

Na gustinu fluksa kosmičkog zračenja u nekoj tački, pored geomagnetnog polja, utiču i procesi stvaranja i apsorpcije. Najveću gustinu, kaskade dostižu na visini od oko 15 km (Pfozter-ova tačka, Slika 6), ispod čega dolazi do značajnih gubitaka koji, između ostalog, zavise od vrste čestica. [17]



Slika 6. Pfozter-ov grafik zavisnosti kosmičkog zračenja u zavisnosti od nadmorske visine

[17]

Nivo atenuacije se može odrediti poređenjem fluksa čestica sa dve različite visine (Jednačina 21), pri čemu I_1 predstavlja fluks na visini (pritisaku) A_1 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$).

$$L = \frac{A_1 - A_2}{\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} \quad (21)$$

Ovaj kvantitativni parametar (L) se naziva atenuacioni faktor, srednji slobodni put ili apsorpciona dužina. [17]

Uočava se da je u prethodnoj jednačini visina izražena u jedinicama $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Ova jedinica je uobičajena u fizici kosmičkog zračenja i predstavlja barometarski pritisak na određenoj lokaciji (na nivou mora, visina je $1033 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Između jedinica $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ i km važi sledeća veza (Jednačina 22):

$$A = 1033 - (0,03648 \cdot H) + (4,26 \cdot 10^{-7} \cdot H^2) \quad (22)$$

gde je: A – nadmorska visina u $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; $H = 3280,84 \cdot h$ (h – visina izražena u km). [17]

Usled različite mase i interakcije sa atmosferom, apsorpcione dužine se razlikuju u zavisnosti od vrste čestica. Na nižim visinama, tipične apsorpcione dužine za pojedine čestice su³³: $L_{e^-} = 100 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$, L_p i $L_\pi = 110 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$, $L_n = 148 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$, $L_\mu = 520 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$. [17]

Čestice koje učestvuju u jakim interakcijama (hadroni – nukleoni i π -čestice) prolaskom kroz atmosferu dožive mnogo sudara, zbog čega uglavnom ne stignu do nivoa mora. One na svom putu formiraju kaskade sekundarnih čestica³⁴, koje se u najvećoj meri razlikuju po vrsti interakcije sa drugim česticama, vremenu poluraspada i masi (Tabela 2). [17]

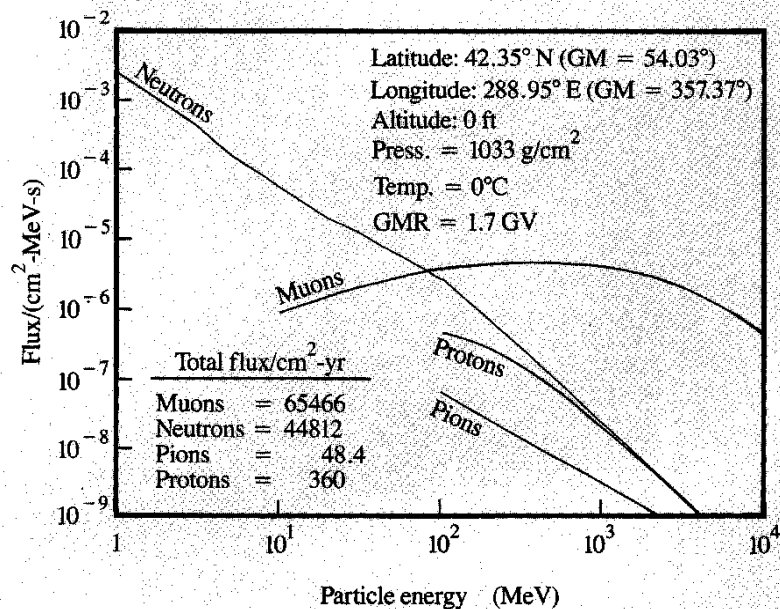
Tabela 2. Fizičke karakteristike čestica kosmičkog zračenja [17]

Čestica	Vrsta interakcije			Masa (MeV)	Vreme poluživota
	Elektromagnetna	Jaka	Slaba		
Pion	✓	✓		≈ 134	26 ns
Mion	✓		✓	≈ 106	2 μs
Neutron		✓		940	\approx stabilna
Proton	✓	✓		938	stabilna
Elektron	✓			0,5	stabilna
Foton	✓				stabilna

Na Slici 7 je prikazan teorijski grafik zavisnosti fluksa čestica sekundarnog zračenja u funkciji od energije na nivou mora.

³³Ove brojeve treba pažljivo koristiti, jer opisuju samo promenu ukupnog broja čestica, ali ne i distribuciju energije sa visinom.

³⁴ π , μ -čestice, nukleone, e^- i fotone



Slika 7. Teorijski grafik zavisnosti fluksa čestica sekundarnog zračenja u funkciji od energije [17]

Mioni (μ) su čestice koje ne učestvuju u jakim interakcijama i energiju gube samo na atmosferskim elektronima, što im omogućava da na nivou mora dominiraju u srednjem i visokoenergetskom delu spektra (ima ih oko 100 puta više od bilo koje druge čestice).

Niskoenergetsku komponentu površinskog kosmičkog zračenja uglavnom čine fotoni, e^- i e^+ .

Isti broj neutrona i protona postoji samo na vrlo visokim energijama, dok na energijama nižim od 1 GeV, protoni, putem elektromagnetne interakcije, počinju dodatno da interaguju sa elektronima i njihov apsolutan fluks postaje manji od fluksa neutrona.

Fluks piona (π) je mali u odnosu na druge čestice, jer se većina ili raspadne zbog kratkog vremena poluraspada ($T_{1/2} \sim ns$) ili sudari sa drugim česticama i anihilira pre nego što stigne do nivoa mora. [17]

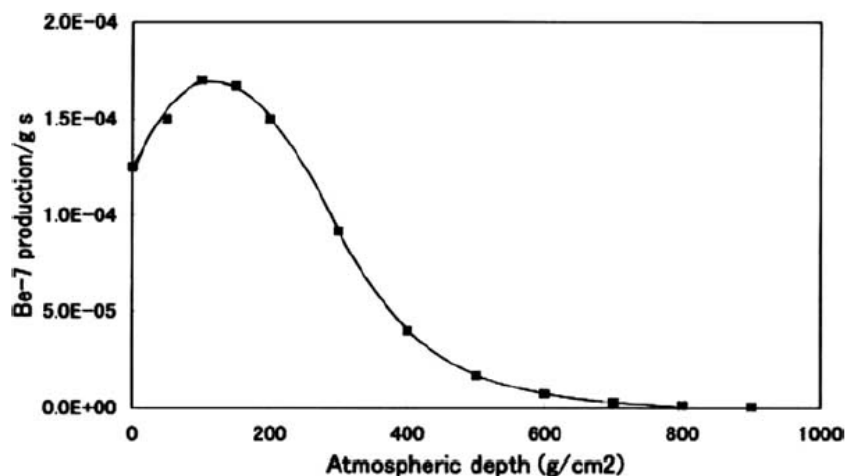
Iako većina merenja fluksa kosmičkog zračenja ne razlikuje hadrone među sobom, postoji generalno slaganje da na nivou mora 97 % hadrona čine neutroni. Na nižim energijama krive fluksa neutrona za različite visine su skoro paralelne i uzimanjem

vrednosti fluksa za istu energiju dobija se poklapanje sa Pfozter-ovim grafikom (Slika 6), koji prikazuje eksponencijalnu zavisnost intenziteta kosmičkog zračenja sa nadmorskom visinom. U delu spektra sa većim energijama, potrebno je meriti ukupan fluks hadrona. [17]

U intenzitetu kosmičkog zračenja na Zemlji, uz geografsku, uočava se i vremenska distribucija. Ova promena izazvana je uticajem magnetnog polja Sunca. Za razliku od Zemljinog, Sunčevo magnetno polje je promenljivog pravca i intenziteta (Poglavlja 3 i 4).

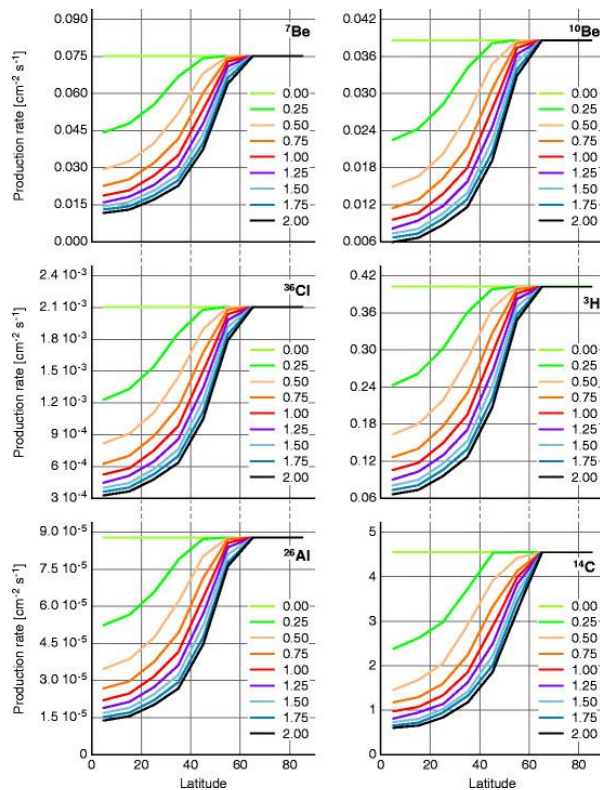
2.2.1.2.3 Kosmogeni radionuklidi

Deo interakcije kosmičkog zračenja sa jezgama zastupljenim u gornjim slojevima atmosfere (azot, kiseonik, vodonik i drugi) utiče na radioaktivnost atmosfere proizvodeći kosmogene radionuklide (^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{26}Al , ^{32}Si , ^{36}Cl , ^{39}Ar , ^{41}Ca , ^{81}Kr , ^{129}I i dr.). U skladu sa prostiranjem kosmičkog zračenja³⁵, proizvodnja kosmogenih radionuklida zavisi od nadmorske visine (Slika 8) i geografske širine (Slike 9 i 10).



Slika 8. Brzina proizvodnje ^7Be u funkciji visine na 25° severne geografske širine [23]

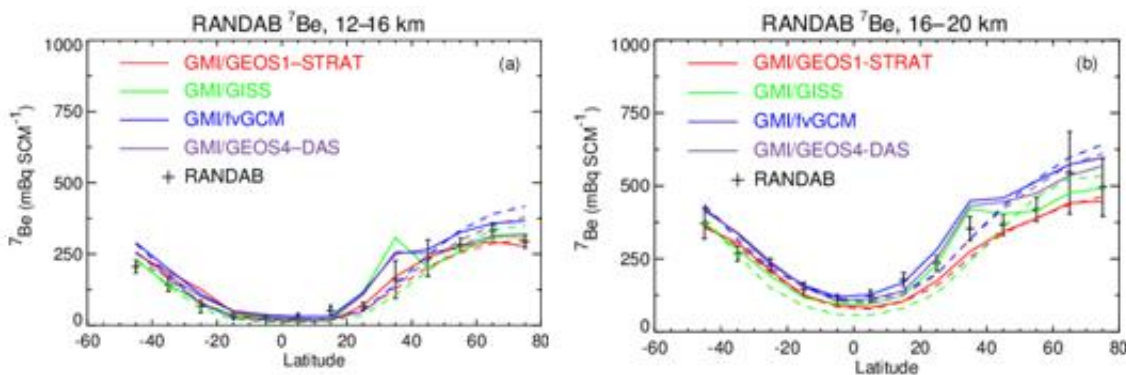
³⁵ Opisano u prethodnom poglavlju.



Slika 9. Zavisnost proizvodnje ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al i ^{36}Cl od geografske širine i jačine geomagnetnog dipola. U proračun su uključeni protoni, alfa čestice i teže komponente kosmičkog zračenja [22]

Sa grafika prikazanog na Slici 8 se uočava da brzina proizvodnje ^7Be u zavisnosti od nadmorske visine, na geografskoj širini $\lambda = 25^\circ$, dostiže maksimum na oko $100 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Pfitzer-ova tačka), što odgovara maksimumu fluksa neutrona sa energijama $> 10 \text{ MeV}$ na istoj geografskoj širini. [23]

Na Slici 10 su prikazani grafici distribucije ^7Be u odnosu na geografsku širinu u dva pojasa, (12–16) km i (16–20) km. Poređenjem ova dva grafika, pored efekta geografske širine koji prati distribuciju kosmičkog zračenja, uočava se i prethodno pomenuti efekat nadmorske visine. Grafik zavisnosti koncentracije ^7Be u višem pojasu je transliran ka većim vrednostima koncentracija u odnosu na vrednosti iz nižeg pojasa.



Slika 10. Posmatrane i simulirane distribucije ^7Be u odnosu na geografsku širinu na visinama: (12–16) km (a) i (16–20) km (b) [24]

Ovako nastali radionuklidi se putem atmosferskih transportnih procesa raspoređuju u atmosferi, čime daju svoj doprinos njenoj ukupnoj prirodnoj radioaktivnosti. Kratkoživeći deo ove grupe radionuklida se raspadne pre nego što stigne do prizemnih slojeva, dok se dugoživeći zadržavaju u biosferi i učestvuju u njenim procesima (kruženje vode u prirodi, lanac ishrane, kretanje vazdušnih masa i dr.).

Nakon formiranja, kosmogeni radionuklidi se brzo vezuju za submikronske aerosolne čestice [23] i na taj način, putem inhalacije, veoma lako dospevaju u pluća. Takođe, slobodnim taloženjem i atmosferskim padavinama, deponuju se na Zemljinu površinu, odakle se u organizmu mogu naći i putem ingestije. Međutim, i kada se nalaze van organizma, kosmogeni radionuklidi spontanim raspadima vrše spoljašnje ozračivanje, doprinoseći ukupnom radijacionom dejstvu atmosfere.

2.2.1.3 Veštačka radioaktivnost atmosfere

Čovek je razvojem nuklearne tehnologije stvorio uslove za formiranje novih radioaktivnih izotopa (^{131}I , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu i dr.), koji slučajnim ili namernim postupcima mogu dospeti u ekosistem. Mogućnost kontaminacije je stvorena izgradnjom nuklearnih postrojenja koja se koriste za eksperimentalna istraživanja ili proizvodnju nuklearne energije. Primer za to su akcidenti na nuklearnim postrojenjima u Černobilju (1986.) i Fukušimi (2011.) tokom kojih je došlo do ispuštanja velikih količina radionuklida, od kojih

se neki, poput ^{137}Cs ($T_{1/2} \approx 30$ godina) i ^{90}Sr ($T_{1/2} \approx 29$ godina) još uvek nalaze u životnoj okolini.

Međutim, najveća količina radioaktivnih čestica antropogenog porekla je ispuštena u atmosferu tokom nuklearnih proba 60-ih godina XX veka. Pri nuklearnim eksplozijama, u atmosferu se izbacila velika količina radioaktivnog materijala koja se, u zavisnosti od vrste i snage eksplozije, kao i visine na kojoj je eksplozija izvršena i meteoroloških uslova na mestu eksplozije, može zadržati u troposferi ili dopreti do stratosfere. [8, 9]

2.2.1.4 Kretanje radionuklida kroz atmosferu

U procesima kruženja oko Zemlje mogu učestvovati samo radionuklidi čije je vreme poluraspada bar nekoliko dana. Čestice koje se nalaze u prizemnom sloju atmosfere podležu uticaju lokalnih meteoroloških uslova, pa je za njihovo mešanje najodgovorniji turbulentni karakter kretanja vazdušnih masa. Turbulencija nastaje usled trenja i stvaranja vrtloga pri kretanju vazdušnih masa oko neravnina na Zemljinoj površini i usled neravnomerne raspodele temperature, pa se stepen stabilnosti atmosfere opisuje vertikalnim gradijentom horizontalne brzine vetra i vertikalnim gradijentom temperature.

Zbog slabe vertikalne turbulencije, izotopi koji se deponuju u stratosferi, zavisno od njihovih dimenzija i visine na kojoj se nalaze, zadržavaju se u njoj od nekoliko meseci do godinu dana, nakon čega se transportuju ka troposferi. Na visinama većim od 20 km moguće je i međuhemisferski transport.

Kada je troposfera najbliža stratosferi (najveća visina tropopauze), radi uspostavljanja ravnoteže usled nejednakih pritisaka i temperature, dolazi do pojava mlaznih struja, pri kojima se vazduh premešta iz viših u niže slojeve. U troposferi radionuklidi borave oko trideset dana, odakle putem suvih ili mokrih padavina dospevaju do prizemnog sloja atmosfere i to uglavnom u onoj hemisferi u kojoj je došlo do strato-troposferskog mešanja vazduha.

Kretanje izotopa u troposferi je uslovljeno brzinom globalnog kretanja vazdušnih masa i meteorološkim uslovima na mestu njihovog prisustva. Koncentracija radioaktivnih

čestica koje dospeju na površinu Zemlje, zavisi od njihovih fizičko-hemijskih osobina i dinamičkih uslova atmosfere na mestu spuštanja (brzina vetra, režim strujanja i stanje stabilnosti atmosfere). Ukoliko izotopi budu zahvaćeni oblakom, tokom boravka u njemu dolazi do radioaktivnog raspada, što utiče na smanjenje njihove koncentracije.

Kada je u pitanju kontaminacija atmosfere veštačkim putem, u dosadašnjim slučajevima akcidenata na nuklearnim postrojenjima, domet ispuštenih izotopa je uglavnom bio lokalnog i regionalnog karaktera, dok su kontaminacije uzrokovane nuklearnim probama bile pretežno globalnog karaktera. Razlog tome je što u prvom slučaju, visina dometa nije prelazila granice troposfere, dok je pri eksplozijama snage veće od 100 kt, nastalih tokom nuklearnih testiranja, dolazilo i do kontaminacije stratosfere. [8, 9]

3 SUNCE I NJEGOVO MAGNETNO POLJE

Najdublji Sunčev sloj (jezgro) se sastoji od gasa potpuno jonizovanih atoma vodonika vrlo velike gustine (oko $150 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), na temperaturi od oko $15,7\cdot 10^6 \text{ K}$, što omogućava odvijanje nuklearnih reakcija (Poglavlje 7.2). Zbog potpuno jonizovane sredine, apsorpcija nastalih fotona u jezgru je vrlo retka. Međutim, na putu ka gornjim slojevima često dolazi do njihovog rasejanja na slobodnim elektronima, pri čemu im se (kao i pri apsorpciji), usled gubitka energije, smanjuje frekvencija.

Po izlasku iz jezgra, fotoni pogađaju druge čestice i nasumično menjaju pravac svog prostiranja. U ovom sloju, energija se prenosi zračenjem, zbog čega je i nazvan “radijaciona zona”. Usled smanjene gustine čestica i temperature, u njemu su onemogućeni fuzioni procesi i u blizini gornje granice, temperatura opadne dovoljno da gas prestaje da bude potpuno jonizovan. Idući ka površini, prvo se pojavljuju neutralni atomi helijuma, a zatim i vodonika³⁶.

Daljim udaljavanjem od jezgra, pored neutralnih atoma, počinju da se javljaju i negativni joni vodonika koji apsorbuju elektromagnetno zračenje od vidljivog do IC dela spektra³⁷. Usled toga, slojevi u kojima je koncentracija ovakvih jona velika postaju neprozračni i onemogućavaju dalji proboj zračenja. Ovo dovodi do pojave velikog negativnog temperaturnog gradijenta koji omogućava pojavu konvektivne nestabilnosti i turbulentnih kretanja u površinskim slojevima radijacione zone. U oblasti koja se nalazi između gornje granice radijacione zone i površine Sunca, energija više ne može da se prenosi zračenjem i prenos se odvija konvekcijom³⁸.

³⁶ Energija prve jonizacije helijuma je $24,59 \text{ eV}$, a vodonika $13,6 \text{ eV}$

³⁷ Ovi joni imaju stabilno stanje sa energijom jonizacije od $0,75 \text{ eV}$, i njima odgovara granična frekvencija jonizacije koja se nalazi duboko u infracrvenoj (IC) oblasti spektra ($n_1 = e/h$, gde je h Plankova konstanta). Ako foton, sa frekvencijom većom od granične, pogodi ovakav jon, on biva neutralisan procesom fotojonizacije (fotoefekat).

³⁸ Pojava razmene toplote (mase) prostim mešanjem materije unutar samog fluida (tečnost ili gas), pod uslovom da postoji razlika u temperaturi (gustini) unutar samog fluida.

U konvektivnim slojevima Sunca dolazi do kretanja velikih masa supstance. Gas koji se nalazi blizu konvektivne zone se zagreva, zapremina mu se povećava, a gustina smanjuje. Sila potiska deluje na njega, potiskuje ga naviše sve dok ne dospe u površinske slojeve Sunca, gde zračenjem gubi energiju, hladi se i postaje gušći, zbog čega počinje da tone i vraća se u dublje slojeve konvektivne zone. [25–28]

Kao što je rečeno, γ -fotoni nastali u Sunčevom jezgru polako gube energiju dok putuju ka njegovoj površini. Na tom putu oni nailaze na atome koji ih apsorbuju, a zatim ponovo emituju na talasnim dužinama koje odgovaraju temperaturi okolnog gasa. Prema tome, kako se zračenje postepeno probija ka površini, kroz sve hladnije slojeve gasa, njegova frekvencija se sve više smanjuje³⁹. U sloju koji obavija konvekcionu zonu, temperatura opada na $5,8 \cdot 10^3$ K i konačno, fotoni napuštaju Sunce u obliku vidljive svetlosti. U skladu sa tim, ova oblast je dobila naziv “fotosfera”, a zbog konvektivnog kretanja gasa ispod nje, na njoj se vide svetlije (toplije) i hladnije (tamnije) oblasti. Tamne oblasti, čije su dimenzije oko 10000 km (približno veličini Zemlje) nazvane su pege.

Proučavanje pega ukazuje na to da se one sastoje iz dva dela. U sredini se nalazi taman, centralni deo (senka ili umbra), a oko njega je nešto svetlija oblast (polusenka ili penumbra) okružena mnogo sjajnijom fotosferom. Postepena promena boje je posledica promene temperature fotosfere. Temperatura u oblasti senke iznosi oko $4,5 \cdot 10^3$ K, a u polusenci $5,5 \cdot 10^3$ K. Dakle, pege se sastoje od vrelog gasa, ali one izgledaju crne samo zato što se nalaze u okruženju mnogo toplije fotosfere ($T \sim 6 \cdot 10^3$ K).

Pege nisu stabilne. Većina menja svoj oblik i veličinu, a sve pege dolaze i odlaze. Pojedinačne pege mogu da traju od 1 do 100 dana (prosečno trajanje pege je između 10 i 20 dana), dok grupe pega u proseku traju oko 50 dana.

Intenzivna strujanja ispod fotosfere dovode do toga da usijani gas povremeno ispliva iz podfotosferskih slojeva na površinu. Ovaj gas za sobom povlači i linije

³⁹Vinov zakon pomeranja tvrdi da porastom temperature apsolutno crnog tela, maksimum krive intenziteta zračenja postaje viši i pomera se ka kraćim talasnim dužinama. $\lambda_{max} = b/T$ (Vinova konstanta $b \approx 2,9 \text{ mm} \cdot \text{K}$)

magnetnog polja⁴⁰, čime ih dodatno savija i omogućava da se ispod površine Sunca formira oblast pojačanog magnetnog polja u obliku torusa. Pritisak polja dovodi do širenja torusa, istiskivanja gasa i smanjenja gustine u torusu. Pod dejstvom sile potiska, torus počinje da isplivava na površinu. Na ovaj način linije magnetnog polja formiraju prsten čiji je jedan deo ispod, a drugi iznad fotosfere. U preseku prstena magnetnih linija sa fotosferom nastaju dve pege suprotnih polariteta (vodilja i pratilja). Kako su magnetna polja dve pege u istom paru suprotno orijentisana, linije polja kroz jednu od pega izvire iz unutrašnjosti Sunca, prave luk kroz atmosferu i vraćaju nazad u dubine Sunca kroz drugu pegu. Magnetni pol pega “vodilja” odgovara magnetnom polu hemisfere na kojoj se nalaze. S toga, pri pozitivnoj orijentaciji (smeru, polaritetu) magnetnog polja⁴¹, na severnoj hemisferi linije magnetnog polja iz njih izlaze, dok na južnoj ulaze.

Analize spektralnih linija ukazuju na to da je magnetno polje pega 2–3 reda veličine jače nego polje u okolnim oblastima Sunca⁴². Pojačano magnetno polje se suprotstavlja konvektivnom kretanju, a slabljenje ili potpuno zaustavljanje konvekcije ispod pega otežava dotok toplote iz unutrašnjosti. Usled ovoga, fotosferski gas se hladi, što je praćeno nastankom pega, kao hladnijih i tamnijih oblasti fotosfere. [25–28]

Na Suncu se u jednom trenutku može naći na stotine pega, ali ono može biti i bez ijedne pege. Na osnovu nekoliko vekova posmatranja, zaključeno je da postoje takozvani ciklusi pega [29]. U proseku svakih 11 godina, broj pega dostiže svoj maksimum, a zatim se smanjuje skoro na nulu pre nego što ciklus ponovo počne. Međutim, period jednog ciklusa nije uvek isti i on je do sada varirao između 7 i 15 godina. Sa napredovanjem ciklusa menja se i heliografska širina na kojoj se pege javljaju. Naime, nove pege se, u odnosu na prethodne, pojavljuju bliže ekvatoru kako se ciklus približava svom

⁴⁰ $B = 6 \cdot 10^{-5} T$

⁴¹ Polaritet magnetnog polja se definiše kao pozitivan ($A > 0$) kada se istoimeni magnetni i geografski polovi nalaze na istoj hemisferi, tj. kada linije polja izlaze iz Sunca (N -magnetni pol) na severnoj hemisferi.

⁴² U neporemećenim oblastima, magnetno polje Sunca ima jačinu oko $1,5 \cdot 10^{-4} T$, što je nekoliko puta jače od magnetnog polja Zemlje ($\sim 0,5 \cdot 10^{-4} T$), dok magnetno polje najmanjih pega iznosi oko $10^{-2} T$, a najvećih i do $4 \cdot 10^{-1} T$.

maksimumu. Na početku svakog ciklusa, u vreme minimuma Sunčeve aktivnosti, moguće je videti samo nekoliko pega. One se tada najčešće nalaze u dve uske zone, severno i južno od ekvatora, na heliografskim širinama od 25° do 30° . Približno četiri godine kasnije, u vreme Solarnog maksimuma, broj pega je značajno porastao. Pege se tada nalaze u pojasu od 15° do 20° severno i južno od ekvatora. Konačno, na kraju ciklusa, ukupan broj pega je opet mali, a većina pega se nalazi u pojasu od 10° oko ekvatora. Promena broja pega i njihove migracije ka manjim heliografskim širinama⁴³ posledica su jačanja magnetnog polja, odnosno obmotavanja linija polja oko ekvatora, usled diferencijalne rotacije⁴⁴, omogućene gasovitom strukturom Sunca. [25–28]

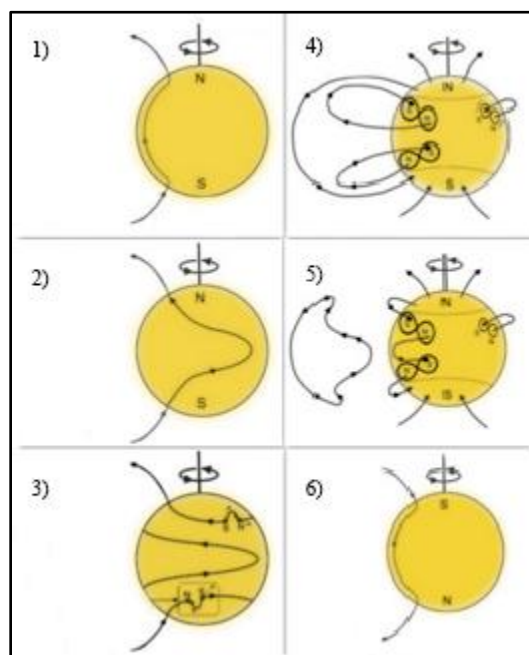
Tokom ili nakon maksimuma Solarne aktivnosti⁴⁵, pege vodilje sa suprotnih hemisfera su toliko blizu da počinju da se uparuju. Daljom rotacijom, njihovi polatiteti se okreću⁴⁶, odnosno magnetne linije polja menjaju smer, ponirući u pege vodilje koje se nalaze na severnoj hemiseri ($A < 0$). Ovo znači da je ciklus Solarne aktivnosti samo polovina ciklusa njegovog magnetnog polja (Haleov ciklus, 22 godine). [30, 31] Grafički prikaz polovine ciklusa, prikazan je na Slici 11.

⁴³ *Orijentacija polja se menja iz pravca sever–jug, ka pravcu istok–zapad.*

⁴⁴ *Ugaona brzina rotacije Sunca na ekvatoru je veća nego na polovima, što deformiše linije magnetnog polja i obmotava ih oko ekvatora.*

⁴⁵ *Tokom neparnih ciklusa, polaritet magnetnog polja se menja iz pozitivnog u negativan i obrnuto*

⁴⁶ *Ove promene ne moraju da se odvijaju na obe polulopte istovremeno. Tako se, na primer, pozitivni pol magnetnog polja, u periodu od 1952. do 1957. godine, nalazio na severnoj Sunčevoj polulopti, a negativni na južnoj. Međutim, 1957. godine, do promene polariteta je došlo samo na južnoj polulopti, dok se na severnoj polulopti ovo odigralo tek godinu dana kasnije.*



Slika 11. Promena orijentacije Solarnog magnetnog polja [32]

Iznad fotosfere se nalazi hladna i prozirna Sunčeva atmosfera, koju čine dva sloja: hromosfera i korona. Koncentracija čestica u njoj počinje naglo da opada, što rezultuje manju emisiju svetlosti u odnosu na fotosferu⁴⁷, koja je pri normalnim uslovima suviše sjajna i dominantna, zbog čega je hromosferu moguće videti samo tokom totalnog pomračenja Sunca⁴⁸.

Naime, rečeno je da je gustina gasa ispod fotosfere vrlo velika, pa su interakcije između fotona, elektrona i jona vrlo česte⁴⁹, što otežava zračenju da izađe u okolni prostor⁵⁰. Verovatnoća da foton, bez daljih interakcija, prođe kroz atmosferu zavisi isključivo od njegove energije. Ako energija koju foton poseduje odgovara nekom elektronskom prelazu u nekom od atoma ili jona prisutnih u gasu, onda postoji verovatnoća

⁴⁷Gas koji sadrži vrlo mali broj atoma ili jona po jedinici zapremine ne može da emituje veliki broj fotona

⁴⁸ Mesečeva senka zakloni fotosferu, pa se hromosfera vrlo jasno vidi.

⁴⁹Fotoni bivaju apsorbirani i ponovo emitovani mnogo puta dok putuju iz jezgra ka spoljašnjosti.

⁵⁰Jednom fotonu može biti potrebno i po nekoliko miliona godina da stigne do površine.

za njegovu apsorpciju. Što je broj elemenata koji mogu da apsorbuju dati foton veći, manja je verovatnoća da on napusti atmosferu Sunca. Suprotno, ako energija fotona ne odgovara nijednom prelazu, onda foton ne može da interaguje sa gasom i on neometano napušta atmosferu Sunca, odlazeći u međuplanetarni prostor. Zato, hromosferom dominira specifična crvena boja koja potiče od vodonikove H_{α} emisije linije⁵¹, ali je zračenje hromosfere vrlo intenzivno i u ljubičastoj liniji kalcijuma.

Temperatura gasa dostiže svoju minimalnu temperaturu od oko $4 \cdot 10^3$ K na oko 1500 km iznad fotosfere, nakon čega se događa nešto neočekivano – temperatura počinje konstantno da raste i dostize vrednost od 10^6 K (tranzitna zona). Razlog ovog pozitivnog gradijenta temperature još nije sa sigurnošću poznat, ali astronomi veruju da su za zagrevanje korone odgovorni poremećaji magnetnog polja u fotosferi. Daljim povećanjem visine, temperatura ostaje približno konstantna (poslednji sloj Sunčeve atmosfere – korona).

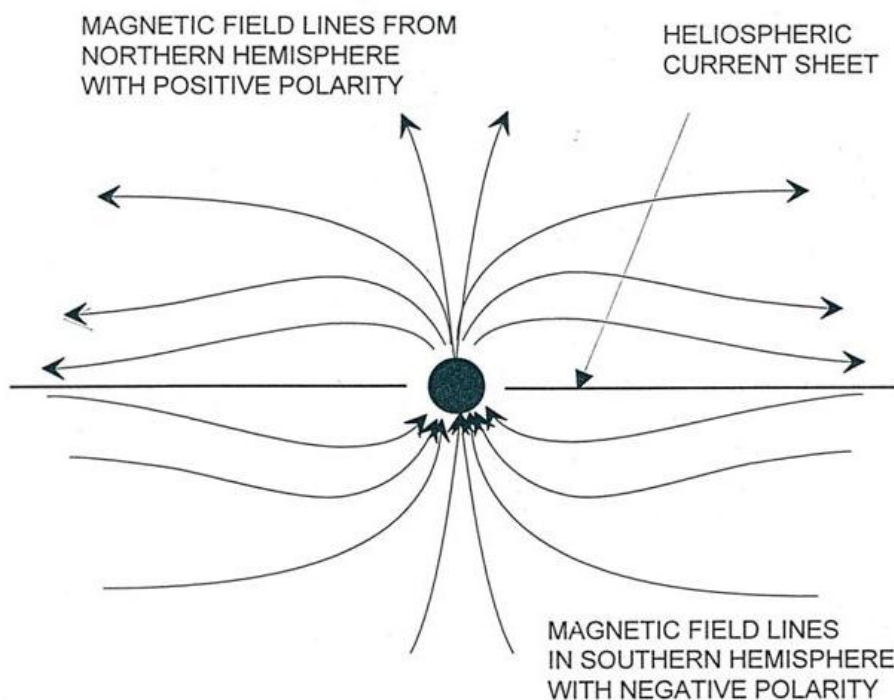
Koronu je moguće videti tokom kratkih trenutaka totalnog pomračenja Sunca, ako Mesec prekrije potpuno i fotosferu i hromosferu. Sa zaklanjanjem svetlosti fotosfere izgled spektralnih linija se drastično menja, što ukazuje ili na promenu u zastupljenosti elemenata ili na promenu temperature gasa, ili na oba. Najbitnije je to što se umesto apsorpcionog spektra koji je bio prisutan kod svetlosti fotosfere, javlja emisijski spektar i pojavljuje potpuno nov niz spektralnih linija. Nove linije se javljaju zbog toga što su atomi u koroni višestruko jonizovaniji nego što je to slučaj sa atomima hromosfere i fotosfere, a uzrok ovoliko velikog stepena jonizacije je njena vrlo visoka temperatura.

Na osnovu navedenog, može se uočiti da elektromagnetno zračenje i visokoenergetske čestice stalno napuštaju Sunčevu površinu. Na rastojanju od oko $10 \cdot 10^6$ km od fotosfere, koronarni gas je dovoljno vreo, a čestice gasa dovoljno brze da savladaju gravitaciono privlačenje Sunca i odu u međuplanetarni prostor. Zračenje se od fotosfere udaljava brzinom svetlosti i do Zemlje stiže za oko 8 minuta, dok se čestice kreću brzinom od oko $500 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ i stižu do Zemlje za nekoliko dana. Ovaj stalni protok čestica naziva se Solarni vetar i izazvan je visokom temperaturom korone. Područje širenja

⁵¹Talasna dužina ove linije je 656,3 nm, što je tačno u sredini crvenog dela spektra.

Sunčevog vetra naziva se heliosfera, a procenjuje se da je njena granica⁵² na rastojanju ~ 100 a.u. od Sunca, što je daleko iza orbite Plutona. [25–28]

Oblast unutar heliosfere gde se menja polaritet magnetnog polja naziva se "heliosferna strujna površ"⁵³ (*HCS – Heliospheric Current Sheet*), razdvajajući područje Solarnog vetra gde su linije magnetnog polja usmerene ka ili od Sunca (Slika 12). Naziv "strujna" je dobila zato što unutar nje teče mala električna struja od oko $10^{-10} \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$, a usled rotacije oko Sunca⁵⁴ poprima oblik takozvane "balerinine sukne" (Slika 13). Proporcionalno sa promenom intenziteta aktivnosti Sunca, menja se i njen nagibni ugao u odnosu na Solarni ekvator (Slika 14). [33, 34]

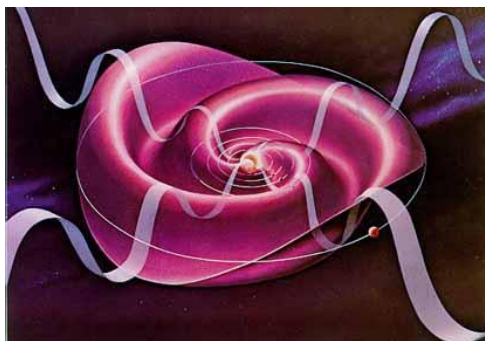


Slika 12. Formiranje heliosferne strujne površi na mestu između oblasti gde su linije magnetnog polja usmerene ka Suncu sa jedne, odnosno od njega, sa druge strane [35]

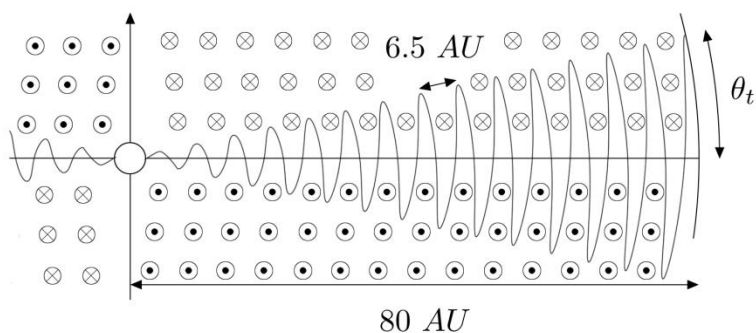
⁵²Oblast gde brzina solarnog vetra padne ispod brzine zvuka (u međuzvzdanim prostoru iznosi $\sim 100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$).

⁵³ U literaturi se može naći i izraz "heliosferna neutralna površ"

⁵⁴ $T = 25$ dana



Slika 13. Oblik heliosferne strujne oblasti, takozvana “balerinina suknja” [36]



Slika 14. Nagibni ugao heliosferne strujne površi [37]

Za Zemlju, Solarni vetrovi su veliki i razređeni gasoviti oblaci koji se kreću. Sastoje se od elektrona i pozitivnih čestica (95 % protoni i oko 4,5 % jezgra helijuma) energija između (10–100) keV. Na rastojanju Zemljine orbite, zavisno od aktivnosti Sunca, svake sekunde kroz kvadratni metar poprečne površine prostruji između $5 \cdot 10^{11}$ i $5 \cdot 10^{12}$ protona, a njihova koncentracija iznosi u proseku oko $5 \cdot 10^6 \text{ m}^{-3}$ (kosmičko zračenje Solarnog porekla).

Kako Solarni vetrovi sa sobom nose i magnetno polje, pri sudaru sa razređenom Zemljinom atmosferom dolazi do nastanka udarnog talasa sa one strane Zemlje koja je okrenuta ka Suncu. Zemljino magnetno polje se suprotstavlja magnetnom polju Sunca, zbog čega se širi u prostoru tako da se u smeru prema Suncu prostire samo do rastojanja oko 10 puta većeg od njenog poluprečnika, a u suprotnom smeru (na noćnoj strani) ima oblik repa komete. [25–28]

Takođe, važan mehanizam oslobađanja magnetne energije u svemir su i Sunčeve baklje. To su ogromne eksplozije u Sunčevoj atmosferi, koje obuhvataju ubrzane čestice (do 10^9 eV) i kretanje užarene plazme. One su najenergičniji fenomen Sunca, greju plazmu i ubrzavaju elektrone, protone i teške jone skoro do brzine svetlosti. Njihovo pojavljivanje prati ciklus Sunčevih pega, od nekoliko na dan, kada je Sunce aktivno, do jedne nedeljno, kada miruje. Takođe, većina baklji se pojavljuje u područjima oko Sunčevih pega i traju od nekoliko minuta do više od jednog sata. Proizvedena radijacija pokriva ceo elektromagnetni spektar (od gama do dugih radio-talasa), pa X i UV zraci mogu ometati veliki opseg radio komunikacija (npr. radara). [25–28, 38, 39]

4 UTICAJ SUNCA NA INTENZITET KOSMIČKOG ZRAČENJA

U prethodnim poglavljima je rečeno da deo fluksa⁵⁵ kosmičkog zračenja na Zemlji potiče od čestica nastalih kao posledica aktivnosti Sunca, ali i da ono svoju energiju ne emituje podjednako u vremenu, već sa izvesnom periodičnošću od oko 11 godina.

Zato, iako se izučava decenijama unazad, zbog svog stohastičkog ponašanja, uticaj Sunca na kosmičko zračenje je još uvek nedovoljno istražena i vrlo aktuelna tema [39–69]. Primećeno je i da promena Sunčevog ponašanja utiče na broj pega, učestalost baklji, ugao heliosferne strujne oblasti u odnosu na Solarni ekvator i mnoge druge pojave unutar Sunčevog sistema, pa se ovi parametri često koriste kao traseri za praćenje Sunčeve aktivnosti.

Posmatranja uticaja međusobnog položaja Zemlje i Sunca na intenzitet kosmičkog zračenja, pakazala su da ni dnevne, ni godišnje varijacije uglavnom nisu veće od 10 %. U periodima pojačane aktivnosti, raste i učestalost emitovanja Solarnih baklji. Shodno tome, povećava se i broj baklji koje pogode Zemlju, što dovodi do porasta ukupnog broja nukleona. Kao posledica ovoga, mogu se detektovati nešto veća dnevna odstupanja⁵⁶. Sve ovo implicira da Sunce, kao izvor kosmičkog zračenja, nema veliki uticaj na Zemlji.

Međutim, 50-ih godina, Skot Forbuš (*Scott E. Forbush*) je uočio da kosmičko zračenje na Zemlji varira inverzno broju Sunčevih pega. Ovu antikoreliranost potvrdio je i veliki broj autora [45–54]. Takođe, značajan nivo antikoreliranosti je ustanovljen i korišćenjem Solarnih baklji kao trasera Sunčeve aktivnosti [38, 55]. Naime, u periodima povećane Sunčeve aktivnosti se javlja i dodatno magnetno polje, koje povećava zaštitu Sunčevog sistema od galaktičkog kosmičkog zračenja, dovodeći do smanjenja njegovog intenziteta na Zemlji za oko 30 %. Zaključujemo da, iako Solarni deo nema veliki udeo u

⁵⁵ Broj čestica po jedinici površine, u jedinici vremena

⁵⁶ Ovo se događa nekoliko puta godišnje. Energetski spektar ovih čestica je raširen, jer baklje mogu trajati izvestan vremenski interval. Razlikuje se i vreme koje je potrebno česticama različitih energija da stignu do Zemlje.

ukupnom fluksu kosmičkog zračenja, Sunce ipak igra primetnu ulogu u zaštiti Zemlje od galaktičkog zračenja.

Ipak, bez obzira na to što je pomenuta antikoreliranost najuočljivija manifestacija uticaja Sunca na kosmičko zračenje, višedecenijskim posmatranjima, mnogi autori su ukazali na anomalno ponašanje intenziteta kosmičkog zračenja tokom različitih Solarnih ciklusa [47].

Izučavanje reakcije kosmičkog zračenja na promenu Sunčeve aktivnosti je dovelo do uočavanja različitog oblika maksimuma susednih ciklusa. Ispostavilo se da se oblik vremenske distribucije kosmičkog zračenja ponavlja tokom naizmeničnih ciklusa. Pri prelasku iz parnog u neparni Solarni ciklus ($A > 0$), maksimumi zračenja imaju ravan oblik, dok je pri $A < 0$ maksimum vrlo oštar [44, 47]. Za sada, ovakvo ponašanje kosmičkog zračenja se pripisuje promenljivom polaritetu Sunčevog magnetnog polja (Poglavlje 3)⁵⁷.

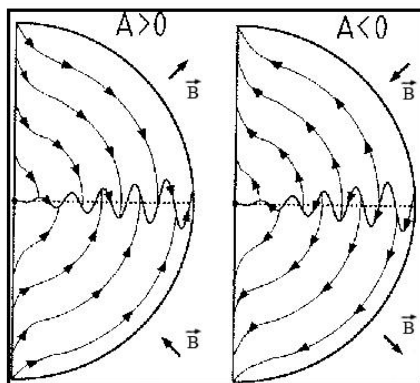
Po Jednačini 23, prenos kosmičkih zraka u heliosferi podlozan je četirima transportna efekta: konvekciji, pomeranju (drift), adijabatskoj promeni energije i difuziji [31, 58]. Njihova relativna važnost varira tokom Solarnog ciklusa [59].

$$\frac{\partial f}{\partial t} = - \left(\underbrace{V}_{a} + \underbrace{\langle v_D \rangle}_{a'} \right) \cdot \nabla f + \underbrace{\nabla(k_{(s)} \cdot \nabla f)}_c + \underbrace{\frac{1}{3}(\nabla \cdot V)}_b \frac{\partial f}{\partial \ln P} + \underbrace{Q}_e \quad (23)$$

Pojedinačni članovi prenosne jednačine predstavljaju: a – Konvekcija usled radialne komponente brzine Solarnog vetra. Tokom Solarnog minimuma ova komponenta ima veliku zavisnost od geografske širine; b – Adijabatska razmena energije koja zavisi od znaka divergencije brzine Solarnog vetra; c – Difuzija usled turbolentnih nepravilnosti u heliosfernom magnetnom polju; d – Gradijent, zakrivljenost i driftovi strujne površi heliosfernog magnetnog polja; e – Poslednji član predstavlja dodatne izvore, poput anomalnih čestica kosmičkog zračenja, ubrzanih u završnom udaru Solarnog vetra i slično.

⁵⁷ Do promene orijentacije polja dolazi tokom perioda maksimalne aktivnosti, pri čemu linije polja zauzimaju isti položaj posle približno 22 godine.

Komponente konvekcije i difuzije su nezavisne od polariteta Solarnog magnetnog polja i one će varirati samo sa promenom Solarne aktivnosti⁵⁸ [44, 60], dok će driftovska komponenta menjati znak nakon svake promene orijentacije polja tokom maksimuma aktivnosti. Do ovoga dolazi zato što pri polaritetu $A > 0$ (Slika 15a), pozitivno naelektrisane čestice ulaze kroz strujni sloj u unutrašnjost heliosfere i izlaze duž helio-ekvatora, dok je u polaritetu $A < 0$ tok obrnut (Slika 15 b).



Slika 15. Kretanje pozitivno naelektrisane čestice u heliosferi: Tokom $A > 0$, smer magnetnog polja je paralelan radijalnom vektoru na severnom i antiparalelan na južnom polu. Tada pozitivno naelektrisane čestice driftuju od polova ka ekvatoru, duž strujne površi [70]

Uočeno je i da intenzitet kosmičkog zračenja na Zemlji⁵⁹ postaje osetljiviji na hrapavost strujnog sloja tokom opadajuće faze neparnih ciklusa (oštar oblik maksimuma), pa je ovaj efekat drifta izraženiji u periodima oko Solarnog minimuma negativne polarizacije⁶⁰. To dovodi do sporije reakcije fluksa zračenja, što objašnava činjenicu da su neparni ciklusi kosmičkog zračenja duži od parnih. [44]

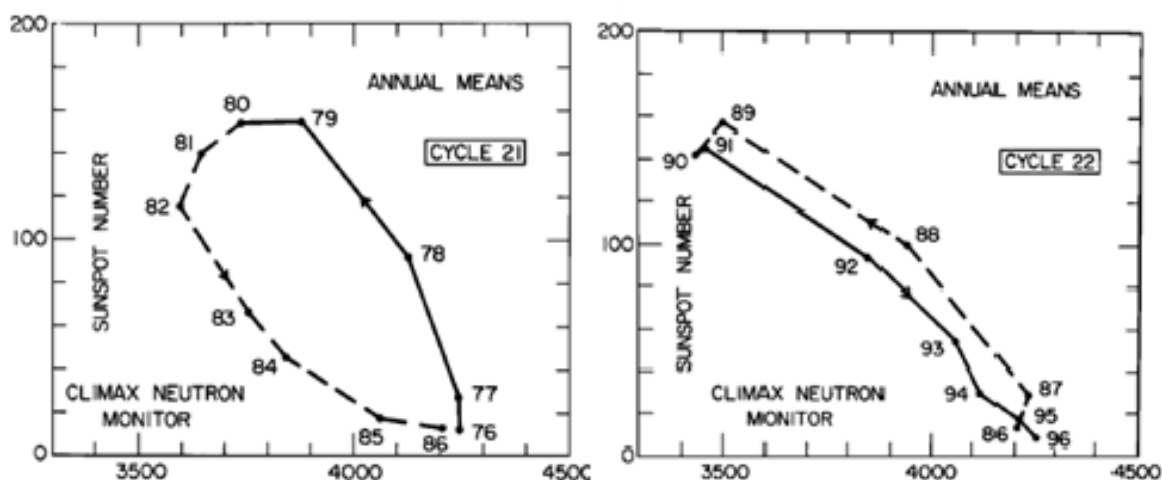
⁵⁸ Difuzioni koeficijent je obrnuto proporcionalan aktivnosti Sunca i jedan je od glavnih uzročnika 11-godišnjeg ciklusa intenziteta kosmičkog zračenja na Zemlji.

⁵⁹ Rastojanje Zemlje od Sunca $\approx 150 \cdot 10^6$ km.

⁶⁰ U složenoj magnetnoj strukturi karakterističnoj za solarni maksimum, modulacija je verovatno određena velikim poremećajima u solarnom vetru

Analiziranjem perioda od 19. do 22. ciklusa, ispostavilo se da su vremenska kašnjenja kosmičkog zračenja za Sunčevim pegama bila veća tokom neparanih (19. i 21.) ciklusa (više od 1 god.⁶¹). Za paran, 20. ciklus, dobijena je čak negativna vrednost, koja je ukazivala na to da je na promenu Sunčeve aktivnosti brže odreagovalo kosmičko zračenje, nego pojava pega [46, 47, 56, 60, 66, 68]. U skladu sa ovim, u periodima parnih ciklusa i brzina opadanja intenziteta kosmičkog zračenja je bila veća u odnosu na povećanje broja Sunčevih pega [60].

Postojanje histerezisnog efekta u ciklusima Solarne aktivnosti i kosmičkog zračenja, potvrđeno je od strane mnogih autora [60, 69]. Poređenjem oblika histerezisne petlje za parne i neparne cikluse, uočljiva je značajna razlika (Slika 16). Naime, razlika integrala ovih parametara između rastuće i opadajuće faze je mnogo veća tokom neparanih ciklusa, odnosno pri porastu Sunčeve aktivnosti u periodu pozitivne polarizacije [60].



Slika 16. Histerezisna petlja srednjih godišnjih brojeva Sunčevih pega u odnosu na fluks kosmičkog zračenja za neparne (a) i parne (b) ciklus. Puna linija odgovara periodu pozitivne orijentacije magnetnog polja, a isprekidana periodu negativne polarizacije [60]

⁶¹ U prethodnim posmatranjima, u zavisnosti od solarnog ciklusa i indeksa aktivnosti, vremensko kašnjenje je variralo od nekoliko meseci do godinu dana .

Različite odgovore u periodima pozitivne i negativne polarizacije, kosmičko zračenje je pokazalo i na promenu ugla heliosferne strujne površi. Veza između ova dva parametra ispitana je tokom rastuće i opadajuće faze 20–23. ciklusa [43, 53]. Ispostavilo se da je njihova međusobna koreliranost bila veća pri negativnoj polarisanosti.

Na osnovu serija merenja u energetske oblasti iznad nekoliko 10 GeV, na mestima sa različitim rigidnostima, koja su pokazala vrlo slično ponašanje, možemo zaključiti da zaista postoji modulacija galaktičkog kosmičkog zračenja, koja dovodi do sistematske razlike u evoluciji intenziteta kosmičkog zračenja tokom parnih i neparnih ciklusa Sunčevih pega. Usled periodičnosti ciklusa iste parnosti, ova moduliranost se može pripisati promeni Solarnog magnetnog polja.

Sve navedeno implicira da je Sunce dominantna varijabilna sila koja kontroliše strukturu heliosfere i modulaciju kosmičkih zraka kroz nivo Solarne aktivnosti, ugao nagiba heliosferne strujne površi, brzinu Sunčevog vetra i jačinu i turbulenciju interplanetarnog magnetnog polja, kao i da proučavanje promena kosmičkog zračenja pruža mogućnost dobijanja informacija i koncipiranja obrasca ponašanja interplanetarnih magnetnih polja i određivanja njihove vremenske i prostorne raspodele.

5 UTICAJ KOSMIČKOG ZRAČENJA I MAGNETNE AKTIVNOSTI SUNCA NA ATMOSFERSKE PROCESE

Smatra se da postoje tri mehanizma kojima se Solarna varijabilnost može dovesti u vezu sa klimom:

- a) Promena ukupnog fluksa Sunčevog zračenja – zagreva niže slojeve atmosfere;
- b) Ultra-ljubičasto zračenje – utiče na koncentraciju ozona koji zagreva stratosferu;
- c) Kosmičko zračenje

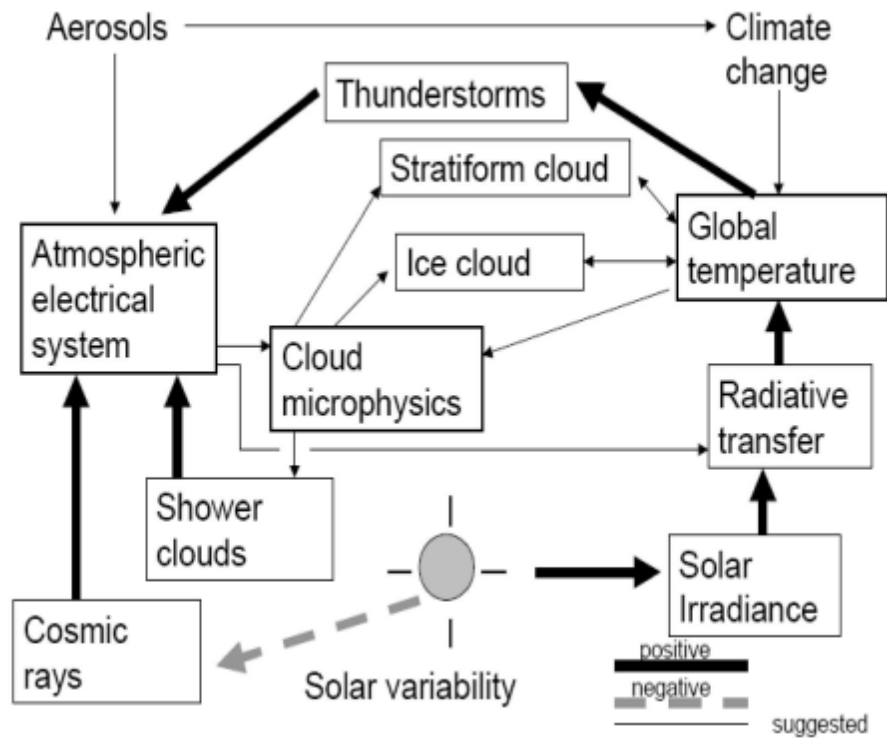
Iako se gotovo svaka promena atmosferskih parametara dovodi u vezu sa intenzitetom Sunčevog zračenja koje je modulirano Zemljinim orbitalnim kretanjem, neke varijacije se ipak ne mogu u potpunosti objasniti na ovaj način.

Značajno manji energetski fluks kosmičkog od Solarnog zračenja (10^9 puta)⁶², dovodi do utiska da kosmičko zračenje ne može uticati na atmosferske procese. Međutim, kosmičko zračenje se smatra jedinim uzročnikom proizvodnje jona u nižoj atmosferi, pa procesi zavisni od električnih osobina atmosfere (atmosferske struje, sevanje, oblačnost i grmljavine) mogu biti pod uticajem njegovog intenziteta (Slika 17) [71].

Poređenjem koncentracije jona u atmosferi na različitim visinama i geografskim širinama (različite geomagnetne rigidnosti), zaključeno je da proizvodnja jona linearno raste sa intenzitetom kosmičkog zračenja⁶³. Takođe, proizvodnja jona opada sa povećanjem Sunčeve aktivnosti. [71]

⁶² $F_S = 1,36 \cdot 10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ (Solarni fluks), $F_{CR} = 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ (Fluks čestica $> 0,1 \text{ GeV}$)

⁶³ Raste sa povećanjem geografske širine



Slika 17. Uticaj Sunca na atmosferske procese [71]

Efekat kosmičkog zračenja na klimu se ogleda na tri načina:

- a) Kroz promenu koncentracije jezgra kondenzacije⁶⁴
- b) Elektrifikacijom atmosfere
- c) Formiranjem leda u ciklonima

Posmatranjem promena oblačnosti i padavina, uočeno je da prate Forbušov (11-godišnji) ciklus intenziteta kosmičkog zračenja, kao i smanjena oblačnost iznad ekvatora. Takođe, i rekonstrukcija klimatskih promena iz prošlosti se slaže sa koncentracijama „fosilnih ostataka“ kosmogenih radionuklida⁶⁵. Globalna temperatura je imala suprotan

⁶⁴ Objašnjeno u Poglavlju 2.2.1.1.1, pod „Oblačnost“

⁶⁵ U periodu od 1690–1700, koji se smatra najhladnijom dekadom u poslednjih 1000 godina, detektovana je najveća koncentracija ¹⁰Be.

trend u odnosu na koncentraciju ^{10}Be . Naime, joni proizvedeni kosmičkim zračenjem u stratosferi i troposferi utiču na proizvodnju ultra-finih aerosola, čiji slojevi, skrećući Sunčeve zrake, značajno utiču na smanjenje zagrevanja atmosfere. Takođe, laki joni mogu igrati ulogu jezgra kondenzacije, pa je formiranje oblaka direktno proporcionalno intenzitetu kosmičkog zračenja. Povećana oblačnost dodatno utiče na redukciju Sunčevog zračenja u nižoj atmosferi, ali i na refleksiju termalnog zračenja sa površine Zemlje. [71]

Kosmičko zračenje ima glavnu ulogu u formiranju električnih osobina atmosfere. Porast intenziteta kosmičkog zračenja dovodi do povećanja proizvodnje naelektrisanja u prostoru. Kako u oblacima postoji veliki gradijent kondukcije, na vrhu i dnu oblaka se formiraju naelektrisane površi, koje su u formi naelektrisanih aerosolnih čestica. U prisustvu električnog polja, naelektrisane aerosoli se akumuliraju i adsorbuju na kapi. Ovo utiče na potencijal atmosfere i vertikalni protok struje kroz slojeve oblaka.

Mnogi autori su ukazali i na direktnu zavisnost količine ozona od intenziteta kosmičkog zračenja. Uočeni su Forbušov efekat i povećanje ozona sa porastom geografske širine.

Ispitivanjem modulisanost atmosferskih parametara, uočen je i uticaj drifta, tj. promene orijentacije Solarnog magnetnog polja. Praćenjem temperature na visini od 25 km u oblastima između 30° i 50° severne geografske širine, tokom perioda od 1950–2000, i poređenjem sa jačinom Solarnog magnetnog indeksa ⁶⁶ za isti period, dobijena je koreliranost od 0,89 [72]. Efekat drifta je primećen i u drugim posmatranjima vremenske promene temperature, ali i vazdušnog pritiska i padavina.

⁶⁶ Uzima u obzir intenzitet i smer vektora polja.

6 PRIMENA KOSMOGENIH RADIONUKLIDA

Zbog svog načina stvaranja i kretanja kroz atmosferu, kosmogeni radionuklidi su našli primenu, pre svega, u meteorologiji [73, 74], za praćenje kretanja vazdušnih masa i polutanata (^{10}Be , ^7Be), u rekonstrukciji intenziteta kosmičkog zračenja (^{10}Be), ali i za određivanje starosti različitih materijala iz prirode (^{10}Be , ^{14}C). Takođe, kao što je u Poglavlju 4 pokazano, aktivnost Sunca utiče na intenzitet kosmičkog zračenja na Zemlji, pa je za očekivati da se u vremenskim promenama kosmogenih radionuklida može uočiti i uticaj Sunčeve aktivnosti. Shodno tome, vremenske varijacije prisustva kosmogenih radionuklida mogu da posluže i kao indikator globalnih promena fluksa kosmičkog zračenja, odnosno Solarne aktivnosti.

Odnos koncentracija ^{10}Be i ^7Be , kao dva radionuklida sa identičnim izvorom distribucije i različitim vremenom poluraspada, govori o stratosferskom transportu, prvenstveno o izmeni vazdušnih masa od tropskih ka većim geografskim širinama i o strato-troposferskom prenosu. Udaljavanjem od oblasti sa najvećom proizvodnjom, ^7Be se raspada, pa se njihov odnos povećava. Iz tog razloga, ovaj odnos predstavlja jedan od trasera stratosferskog transporta i indikator strato-troposferskih izmena [75, 76].

Koncentracije kosmogenih radionuklida u ledenim naslagama, mogu da posluže kao indikatori fluksa kosmičkog zračenja, a time i Sunčeve aktivnosti, više od 10000 godina unazad. Takođe, iz koncentracija ^{10}Be i ^{14}C , proizašla je rekonstrukcija prosečnih godišnjih vrednosti Sunčevog polja od 1610. godine. U vremenskim promenama koncentracija kosmogenih radionuklida su prisutni i Daltonov i Maundrov minimumi⁶⁷, koji sugerišu veoma jako Solarno magnetno polje. [77–80]

Posmatranjem ponašanja dva radionuklida različitog porekla mogu se pratiti vazdušna kretanja, pa se veliki broj autora bavio odnosom koncentracija ^7Be sa ^{210}Pb , ^{137}Cs i ^{90}Sr . [81–90]

⁶⁷ Periodi izuzetno niske solarne aktivnosti u periodu između 17. i 18. veka. Takođe, ovaj period je poznat i po temperaturama nižim od prosečnih.

Zbog uočene zavisnosti koncentracije ozona od intenziteta kosmičkog zračenja, analizirana je i njegova veza sa koncentracijom ^7Be [76, 84, 91, 92].

Procesima spiranja, radionuklidi iz atmosfere dospevaju i do zemljišta, pa se vrše i ispitivanja distribucije ^7Be kroz zemljište i njegovog prisustva u pojedinim biljnim kulturama [93–98].

Izvesna doza koreliranosti (od 0,394 do 0,887) uočena je i između ^7Be i jona u atmosferi (H^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^-) [99], a posmatrana je i veza ^7Be sa persistentnim organskim polutantima (POP) [100] i česticama aerodinamičkog dijametra ispod $1\ \mu\text{m}$ i $10\ \mu\text{m}$ (PM_1 i PM_{10}) [101].

7 BERILIJUM-7

7.1 Ekološki značaj (Toksikološki i radijacioni uticaj)

Berilijum je lak, nemagnetni metal sive boje, dobar provodnik toplote i električne energije, transparentan na X zračenje. Ima široku primenu u nuklearnom oružju i reaktorima, vazduhoplovnim i svemirskim vozilima, instrumentima, Rendgen aparatima, ogledalima i dr. Legure berilijuma se koriste u automobilima, računarima, sportskoj opremi (štapovi za golf, okviri bicikala).

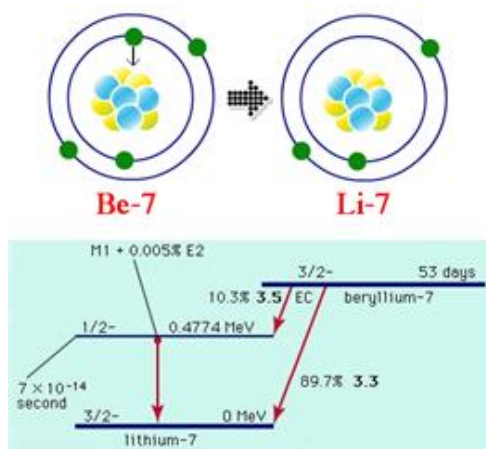
Ovaj element, kao i mnoga njegova jedinjenja imaju sladak ukus, ali nažalost većina ih je otrovno. Čist berilijum se u prirodi javlja kao hemijska komponenta određenih vrsta stena, uglja, nafte, zemljišta i vulkanske prašine. U vazduhu, jedinjenja berilijuma su prisutna uglavnom kao fine čestice prašine (npr. iz industrijskih postrojenja, sagorevanjem uglja i ulja) koje se putem suvih i mokrih padavina talože na vodu i zemljište. U vodene tokove, berilijum ulazi spiranjem stena i zemljišta, ali i ispuštanjem industrijskih otpadnih voda. Berilijum, kao i drugi radionuklidi, može ući u organizam putem ingestije ili inhalacijom. U dodiru sa kožom, vrlo mala količina berilijuma može da prodre u telo. Ingestijom, manje od 1 % unetog berilijuma prelazi iz gastrointestinalnog trakta u krvotok (veći deo berilijuma napusti telo za nekoliko dana). Međutim, čestice berilijuma se udisanjem deponuju u pluća i ulaze u krvotok. Taj proces se odvija sporo, pa se berilijum može zadržati u organizmu mesecima i godinama pre nego što se eliminiše iz njega. Mala količina berilijuma iz pluća, želuca i creva stigne do bubrega, koje napušta putem urina. Jedan deo berilijuma dospeva do jetre i kostiju, gde se može zadržati duže vreme.

Opšta populacija je u normalnim uslovima izložena niskim nivoima koncentracije berilijuma iz vazduha, hrane i vode. Međutim, ljudi koji rade u industriji gde se vadi i obrađuje berilijum, mogu biti izloženi visokim koncentracijama, kao i ljudi koji žive u blizini takvih postrojenja. Nivo oštećenja pluća zavisi od nivoa koncentracije i dužine izlaganja. Takođe, Međunarodna agencija za istraživanje raka je utvrdila da berilijum i neka njegova jedinjenja mogu biti kancerogeni. EPA (*Environmental Protection Agency*) je

procenila da bi pojedinac koji kontinuirano tokom života udiše vazduh sa $0,4 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ berilijuma imao povećane šanse za razvoj raka. [102]

Berilijum ima 12 poznatih izotopa. Pošto izotopi imaju iste hemijske osobine, svaki od njih u telu ima isti metabolički put. Kako je samo jedan od izotopa stabilan (${}^9\text{Be}$), svi ostali, uz toksikološki, imaju i radijacioni efekat na organizam.

Jedan od najpoznatijih predstavnika berilijumovih radioaktivnih izotopa, uz ${}^{10}\text{Be}$ je ${}^7\text{Be}$ ($T_{1/2} = 53,2$ dana). On se elektronskim zahvatom transformiše u ${}^7\text{Li}$ (Jednačina 24), čije se pobuđeno jezgro, u približno 10 % slučajeva, relaksira emisijom fotona gama zračenja energije 477,6 keV (Jednačina 25) [103]. Zahvaljujući ovome, omogućeno je da se njegova koncentracija odredi u različitim vrstama uzoraka metodom gamaspektrometrije (Poglavlja 8 i 9). Grafički prikaz šeme raspada ${}^7\text{Be}$, prikazan je na Slici 18.



Slika 18. Raspad ${}^7\text{Be}$ [104, 105]



Nakon raspada i svog toksičnog i radijacionog delovanja (spoljašnje i unutrašnje ozračivanje), ${}^7\text{Be}$ nastavlja da utiče na organizam preko svog potomka (${}^7\text{Li}$) koji, ukoliko se unese u organizam, postaje široko distribuiran u centralnom nervnom sistemu.

7.2 Poreklo

Prva jezgra ${}^7\text{Be}$ u Univerzumu stvorena su ubrzo posle Velikog praska. Tada su formirani protoni i neutroni stupali u proces nukeosinteze, čime su u prvim minutima rađanja Univerzuma formirana i prva jezgra: ${}^2\text{H}$, ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{H}$ i ${}^3\text{He}$. Njihovom daljom fuzijom, stvoreni su i teži elementi: ${}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}$ i ${}^7\text{Be}$ [106]. Zbog relativno kratkog vremena poluraspada ($T_{1/2} = 53,2$ dana), jezgra ${}^7\text{Be}$ koja su nastala pri Velikom prasku više ne postoje. Postavlja se pitanje odakle potiču danas prisutna jezgra ${}^7\text{Be}$ u Univerzumu?

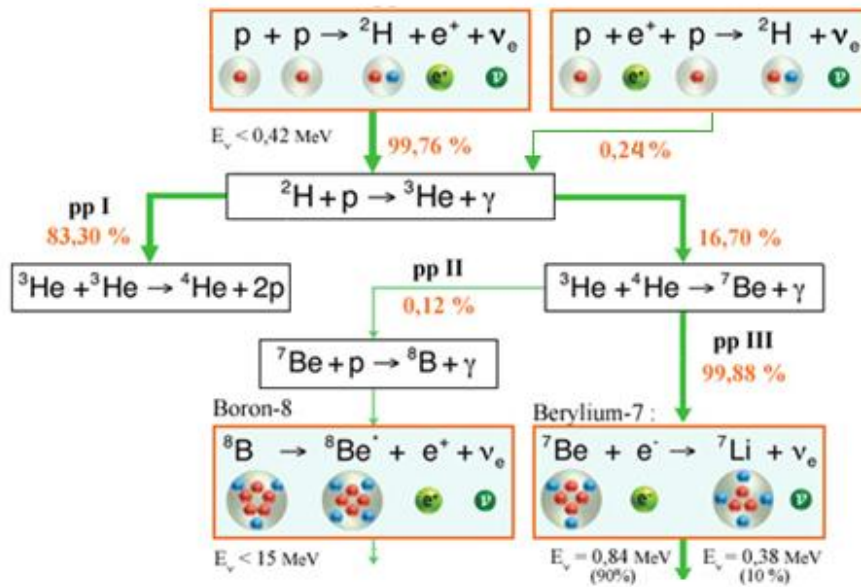
Poznato je da su sva atomska jezgra pozitivno naelektrisana i da se zbog dejstva elektromagnetne sile međusobno odbijaju. Kako je elektromagnetna sila obrnuto proporcionalna rastojanju, što su dva jezgra bliža jedno drugom sila odbijanja između njih je veća. Kako je onda uopšte moguće da se dva jezgra međusobno sjedine i formiraju neko novo, teže, jezgro?

Ako se dva jezgra sudare dovoljno velikim brzinama (reda $10^2 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$), može doći do kvantnog efekta tunelovanja, pri kom će bukvalno uleteti jedno u drugo i tako se naći na rastojanju manjem od radijusa delovanja jake nuklearne sile. Na ovom rastojanju, jačina privlačenja nuklearnih sila prevazilazi jačinu elektrostatičkog odbijanja i dolazi do fuzione reakcije. Brzina koja je potrebna za odigravanje jednog ovakvog sudara protoni mogu posedovati tek na temperaturi od nekoliko 10^6 K . Upravo ovakvi uslovi vladaju u jezgru Sunca i drugih zvezda.

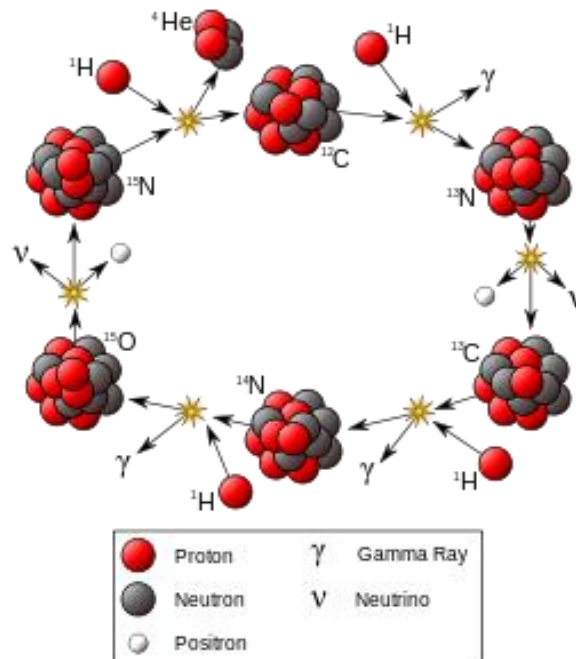
Fuzioni procesi u zvezdama zavise od njihove mase i faze evolucije. U prvoj fazi, zvezde sagorevaju vodonik na dva moguća načina: p-p (proton-proton) lancem (Slika 19) ili CNO (ugljenik-azot-kiseonik) ciklusom (Slika 20), dok u daljim fazama sagorevaju helijum⁶⁸, a mogu slediti i procesi fuzije težih elemenata i proizvodnja elemenata težih od Fe⁶⁹ [106].

⁶⁸ Trostrukim alfa procesima ili alfa zahvatima

⁶⁹ Brzi i spori neutronske zahvati (*r* i *s* procesi), zahvati protona i fotodezintegracija

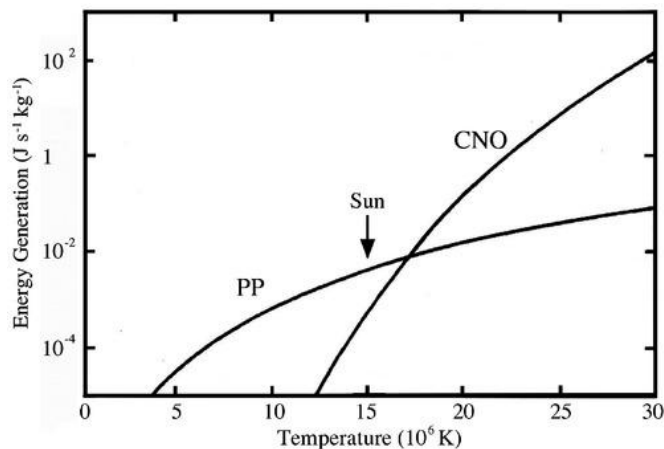


Slika 19. Šematski prikaz p-p lanca [107]



Slika 20. Šematski prikaz CNO ciklusa [108]

Na Slici 21 je prikazan grafik emitovane energije u funkciji temperature za svaki od pomenutih procesa. Uočava se da je prvi tip procesa (p-p) dominantan na nižim temperaturama, koje su karakteristične za lakše zvezde, dok je drugi tip (CNO) dominantan u težim zvezdama, čije temperature prelaze $16 \cdot 10^6$ K. Razlog tome je što su zbog većeg naelektrisanja težih jezgara u odnosu na protone, odbojne elektromagnetne sile koje se javljaju u CNO ciklusu veće, pa su za otpočinjanje procesa fuzije potrebne i veće temperature. Kako je temperatura u jezgru Sunca oko $15 \cdot 10^6$ K, jasno je da je u njemu dominantan p-p proces (čak 90 %). Tokom ovog procesa oko 16,7 % nastalog ${}^3\text{He}$ reaguje sa ${}^4\text{He}$ stvarajući ${}^7\text{Be}$ (druga grana p-p procesa). Zahvaljujući tome manje zvezde (poput Sunca) su jedan od izvora ovog berilijumovog izotopa (Slika 19).



Slika 21. Grafički prikaz emitovane energije u funkciji temperature za p-p i CNO procese [109]

Međutim, najveći deo ${}^7\text{Be}$ nastaje u procesima nuklearnih reakcija spalacije nukleona (protona i neutrona) visoke energije sa atomima vazduha, pre svega azotom i kiseonikom (Slika 22) [110–112]. Na osnovu grafika verovatnoće za reakcije nukleona sa atomima azota i kiseonika (Slika 23), uočava se da je prag energije za formiranje ${}^7\text{Be}$ niži za protone nego za neutrone ($E_{p,\text{min}} \approx 10$ MeV; $E_{n,\text{min}} \approx 30$ MeV), kao i da je najverovatnija reakcija protona energije 20 MeV sa atomom azota. Takođe, veća je i verovatnoća da će protoni sa energijama do nekih 300 MeV interagovati sa azotom ($\sigma_{\text{N}} > 10$ mb) nego sa kiseonikom ($\sigma_{\text{O}} < 10$ mb). Na energijama > 300 MeV, ove verovatnoće se izjednačavaju.

7.3 Vremenska i prostorna distribucija

Veoma brzo po nastanku, ^7Be jonskom vezom formira molekule BeO i $\text{Be}(\text{OH})_2$ koji se, zakačeni na aerosolne čestice, dalje kreću kroz atmosferu. Čak 88 % formiranih molekula se vezuje za čestice čiji je dijametar manji od $1,1 \mu\text{m}$, a manje od 1 % za čestice sa dijametrom većim od $7 \mu\text{m}$.

Usled atenuacije zračenja u višim slojevima atmosfere, proizvodnja kosmogenih radionuklida po jedinici mase vazduha opada sa dubinom prodora u atmosferu, pa je zbog prostiranja Zemljinog magnetnog polja, najveća u višim slojevima polarne stratosfere, a najmanja u nižim slojevima troposfere ekvatorijalnog pojasa (Tabela 3) [114].

Tabela 3. Distribucija koncentracije ^7Be sa nadmorskom visinom i geografskom širinom unutar stratosfere i troposfere [114]

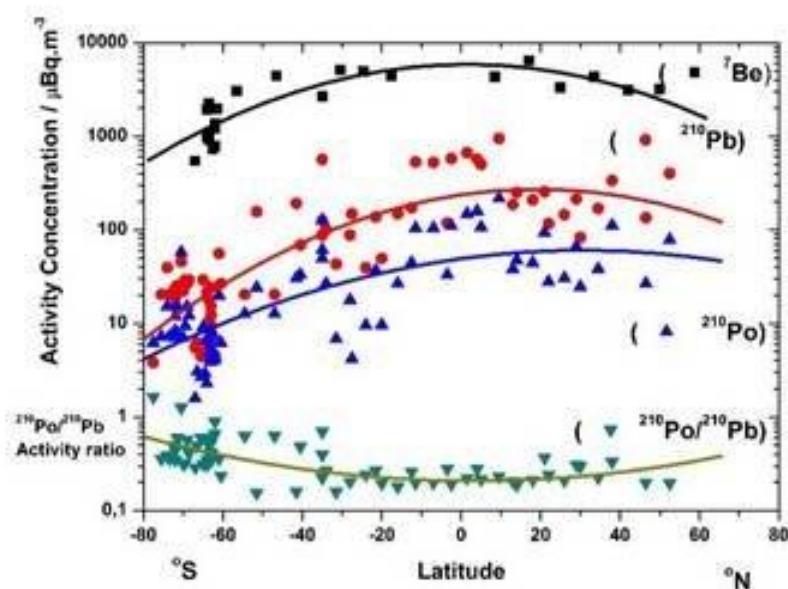
<i>Severna geografska širina</i>	<i>Atmosferski sloj</i>	<i>Nadmorska visina (km)</i>	<i>Izmerene koncentracije ($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)</i>
60°–70°	<i>Stratosfera</i>	<i>18</i>	<i>460</i>
	<i>Stratosfera</i>	<i>20</i>	<i>300</i>
	<i>Troposfera</i>	<i>0</i>	<i>2,8</i>
20°–40°	<i>Stratosfera</i>	<i>18</i>	<i>260</i>
	<i>Troposfera</i>	<i>20</i>	<i>18,5</i>
	<i>Troposfera</i>	<i>0</i>	<i>5,2</i>
0°–20°	<i>Stratosfera</i>	<i>18</i>	<i>180</i>
	<i>Troposfera</i>	<i>20</i>	<i>7,4</i>
	<i>Troposfera</i>	<i>0</i>	<i>2,4</i>

Glavni transportni mehanizmi ^7Be iz viših u niže slojeve troposfere su suvo i mokro taloženje. Sledi da koncentracija ^7Be na nekoj lokaciji unutar troposfere zavisi i od meteoroloških uslova koji na njoj vladaju. Procenjuje se da je gubitak ^7Be usled radioaktivnog raspada oko 59 %, dok se usled depozicije izgubi približno 41 % (najviše prilikom spiranja mokrim padavinama) [115].

Na osnovu podataka Asocijacije za praćenje radioaktivnosti životne sredine (*REM – Radioactivity Environmental Monitoring*), izvršena je analiza vremenske i prostorne distribucije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere na teritoriji Evropske Unije. Studija je pokrila 34 lokacije u opsegu od 35° – 40° severne geografske širine i 20° – 40° istočne geografske dužine, od 4 m do 715 m nadmorske visine, u periodu od 1984. do 2011. (zavisno od trenutka priključenja Asocijaciji). [116]

Najveći procenat varijabilnosti je dobijen za prostornu raspodelu (37 %), dok su varijabilnosti godišnjih i mesečnih vrednosti bile 3,4 % i 9,1 %, respektivno. Iz ovoga se može zaključiti da je varijacija koncentracije ^7Be u Evropi u najvećoj meri uzrokovana prostornom raspodelom (geografskim karakteristikama lokacije uzorkovanja).

Posmatranjem prostorne raspodele, uočeno je opadanje koncentracije ka većim geografskim širinama. Isti rezultati su dobijeni i prilikom ekspedicije tokom koje je merena koncentracija radionuklida od Arktika do Anktartika (Slika 24) [117,118].



Slika 24. Distribucija ^7Be , ^{210}Pb , ^{210}Po i $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ sa geografskom širinom [118]

Takođe, prostorno-vremenska distribucija ukazuje i da koncentracija ^7Be tokom vremena manje varira na većim geografskim širinama, kao i da su otežinjene srednje vrednosti niže od aritmetičkih na svim lokacijama, što govori da su niže vrednosti dominantnije u odnosu na povremene visoke koncentracije [116].

Očekivani porast koncentracije sa nadmorskom visinom nije uočen, što je najverovatnije posledica nedovoljno velikog raspona u nadmorskim visinama lokacija, pa se može zaključiti da u okviru užeg atmosferskog sloja, nadmorska visina nema dominantan uticaj.

Na svim posmatranim lokacijama, uočena je gotovo identična sezonska raspodela, sa maksimalnim vrednostima u toplijim i minimalnim u hladnijim mesecima [116]. Srednje godišnje vrednosti koncentracija ^7Be u vazduhu su se kretale u intervalu (2,0–5,4) $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, sa prosečnom vrednošću od 3,1 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, koja je odgovarala vrednosti od 3 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, objavljenoj u UNSCEAR 2008 [119].

Isti sezonski karakter i prostorna raspodela koncentracije ^7Be izraženi su i u uzorcima depozita [120]. Ukupna godišnja koncentracija ^7Be u totalnom depozitu u Evropi je rada veličine (10^2 – 10^3) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$: (504–1242) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ (Solun), (843–1581) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ (Bolonja), (270–3540) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ (Ujedinjeno Kraljevstvo) [96, 120, 121].

Veruje se da postoje bar četiri faktora koja utiču na ovu sezonsku varijaciju:

- a) povećanje stope transporta stratosferskog vazduha u troposferu tokom kasne zime i ranog proleća;
- b) opadanje stabilnosti troposfere u toplijim mesecima, uzrokujući povećanu stopu vertikalnog transporta iz viših u srednje i niže slojeve troposfere;
- c) kretanje vazdušnih masa iz srednjih ka višim geografskim širinama;
- d) spiranje mokrim padavinama.

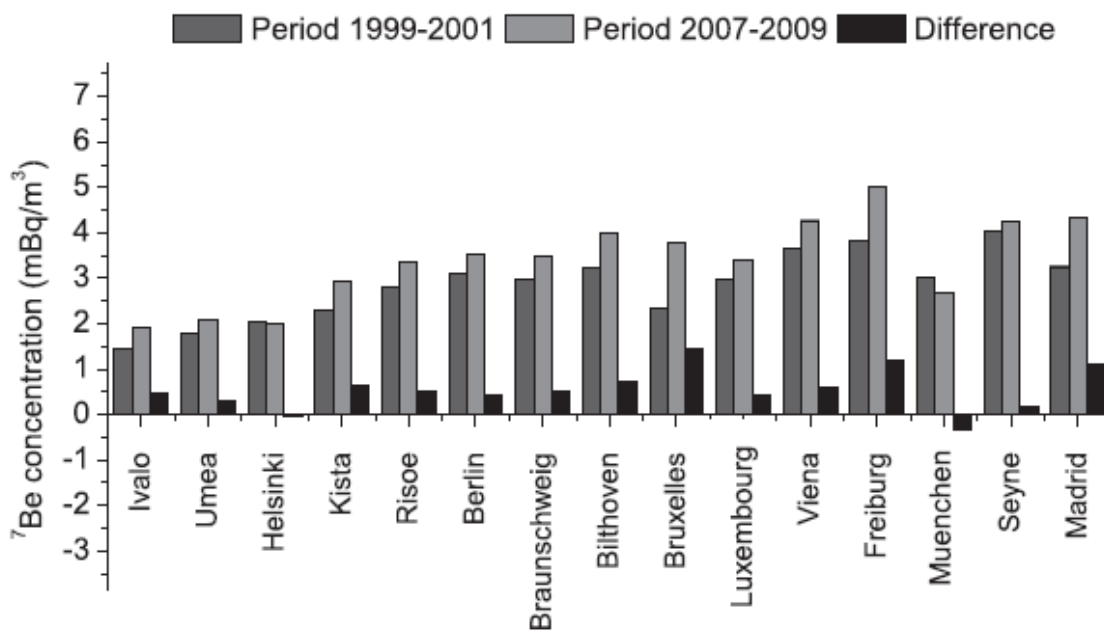
Mnogi autori su ispitivali veze između koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere i meteoroloških parametara. Najčešće analizirana veza je sa količinom padavina, kao osnovnim transportnim procesom ^7Be . Rezultati ovih ispitivanja se vrlo razlikuju: od vrlo slabe koreliranosti [122] do čak 0,97 [120]. Prilikom ispitivanja vršenih u Poljskoj, nije

pronađena veza sa vazdušnim pritiskom, dok je koreliranost između koncentracije ^7Be i brzine vetra, zavisno od lokacije, varirala od -0,032 do -0,53. Nešto jače veze su uočene sa temperaturom (0,43–0,82) i relativnom vlažnošću vazduha, od -0,59 do -0,88 [122].

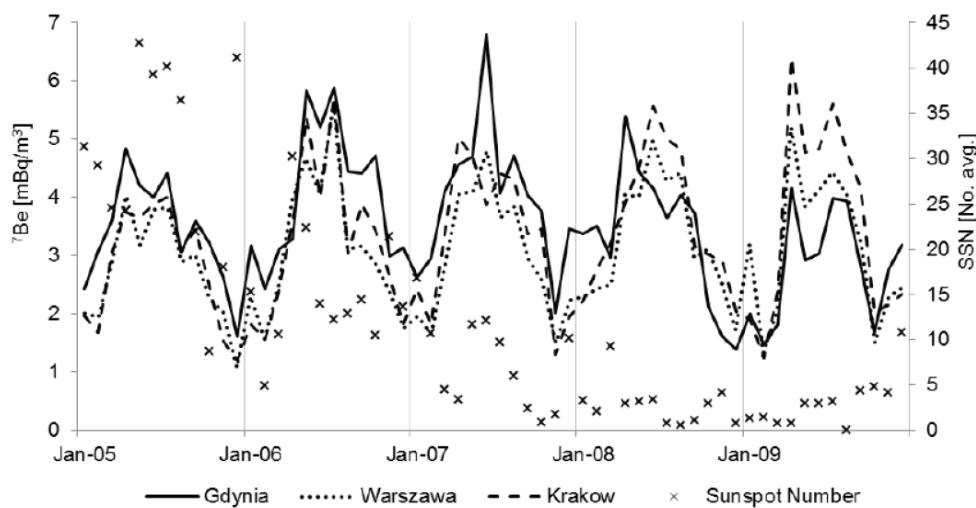
Usled fotohemijjskih reakcija, koncentracija ozona u atmosferi postiže maksimalne vrednosti u letnjem periodu, pa neke grupe autora smatraju da je sezonski karakter koncentracije ^7Be posledica promene koncentracije ozona u stratosferi [123, 124].

Kao posledicu uticaja Sunčeve aktivnosti na intenzitet kosmičkog zračenja, na vremenskim distancama od nekoliko godina posmatrana je veza broja Sunčevih pega i koncentracije ^7Be u atmosferi. Vremensko razdoblje od 1984. do 2011. godine, razmatrano od grupe autora iz Evropskih država, prožima se kroz četiri Solarna ciklusa: sam kraj 21, zatim 22. (1986–1996.) i 23. (1996–2008.), kao i početak 24. [116]. U tom periodu najveće koncentracije ^7Be u Evropi su izmerene 1988. ($3,4 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$), 1993. ($3,7 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$) i 2009. godine ($4,2 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$). Ispostavilo se da trend srednjih godišnjih vrednosti koncentracije ^7Be nema jednostavnu zavisnost od Sunčeve aktivnosti. Naime, tokom perioda rasta Solarne aktivnosti i njenih minimuma, dolazilo je do naglih opadanja koncentracije ^7Be , kao i njenih skokova u periodima povećanja aktivnosti Sunca.

Uticaj Solarne aktivnosti nije bio isti na svim lokacijama, a na pojedinim, poput Helsinkija i Minhena, su izmerene čak i veće koncentracije ^7Be u periodu Solarnog maksimuma 23. ciklusa u odnosu na period Solarnog minimuma 24. ciklusa (Slika 25) [116, 125]. Takođe, koreliranost sa brojem Sunčevih pega nije uočena ni na teritoriji Poljske (Slika 26) [122].



Slika 25. Grafik srednjih vrednosti koncentracija aktivnosti ^7Be u periodima maksimuma (1999–2001.) i minimuma (2007–2009.) Solarne aktivnosti i njihovih razlika na teritoriji Evrope, zavisno od geografske širine (N67°–N40°) [116]



Slika 26. Grafik zavisnosti koncentracije aktivnosti ^7Be na teritoriji Poljske u periodu 2005–2009. godine [122]

8 METODA MERENJA – GAMASPEKTROMetrija

Gamaspektrometrija je nedestruktivna metoda za određivanje sadržaja (identifikacija) i aktivnosti (koncentracija) radionuklida koji pri svom raspadu emituju gama zračenje u različitim vrstama uzoraka. Zasniva se na određivanju broja emisija gama-fotona iz nekog izvora u jedinici vremena u funkciji energije. To može da pruži niz korisnih informacija o uzorku, zbog čega je ona visoko razvijena grana eksperimentalne fizike, koja zauzima važnu ulogu u fundamentalnim istraživanjima, naročito na polju nuklearne fizike i fizike elementarnih čestica.

8.1 Detekcija gama zračenja

Potrebe savremene fizike su dovele do stvaranja velikog broja različitih tipova detektora specijalno konstruisanih da detektuju određene vrste čestica u određenom energetsom intervalu. Da bi bila detektovana, čestica mora ostaviti neki trag o svom prisustvu u medijumu kroz koji prolazi, što najčešće čini jonizacijom sredine kroz koju prolazi, scintilacijom, termoluminescencijom i hemijskim promenama. Mehanizam kojim čestice gube energiju na svom putu kroz neku sredinu zavisi od vrste čestica i njihovih osobina.

8.1.1 Interakcija zračenja sa materijom

Slabljenje intenziteta zračenja nakon prolaska kroz materijal debljine x , opisuje se Jednačinom 26.

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (26)$$

gde su: I_0 – intenzitet upadnog zračenja; $I(x)$ – intenzitet zračenja nakon prolaska kroz materijal; x – debljina materijala; μ – linearni atenuacioni koeficijent.

Linearni atenuacioni koeficijent nekog procesa zavisi od efikasnog preseka za njegovo odigravanje (σ) na sledeći način (Jednačina 27):

$$\mu = \sigma \cdot \rho \cdot \frac{N_A}{M} \quad (27)$$

gde su: σ – presek za interakciju; ρ – gustina materijala; M – molekulska masa; N_A – Avogadrov broj.

Kada je reč o prolasku elektromagnetnog zračenja kroz supstanciju, ukupan presek za interakciju fotona sa materijom (Jednačina 28) se određuje kao zbir preseka tri najčešća procesa:

- Fotoelektrični efekat
- Komptonovo rasejanje
- Kreacija parova

$$\sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{ce} + \sigma_{pp} \quad (28)$$

1) Fotoelektrični efekat

Fotoelektrični efekat je proces pri kojem elektron iz atomskog omotača apsorbuje foton, nakon čega napušta atom. Energija izbačenog elektrona se može izraziti kao (Jednačina 29):

$$E_{k,e} = E_{\gamma} - E_v = h\nu - E_v \quad (29)$$

gde su: $E_{k,e}$ – kinetička energija izbačenog elektrona; E_{γ} – energija upadnog fotona; E_v – energija veze elektrona u atomu; ν – frekvencija upadnog fotona; h – Plankova konstanta.

Presek za najčešći slučaj fotoefekta (oko 80 %), kada foton biva apsorbovan elektronom iz K-ljuske, određen je Jednačinom 30. Na osnovu nje se uočava da on jako zavisi od rednog broja atoma sredine, što ukazuje na to da su materijali velikog rednog broja dobri apsorberi elektromagnetnog zračenja, kao i da presek zavisi obrnuto proporcionalno od energije upadnog fotona. Možemo zaključiti da je fotoefekat dominantan na niskim energijama, dok na visokim energijama postaje zanemarljiv.

$$\sigma_{pe} = \begin{cases} 10^{-9} \frac{Z^5}{E_\gamma^{3,5}}, \text{ za } m_e c^2 > E_\gamma > E_v^k \\ 1,45 \cdot 10^{-9} \frac{Z^5}{E_\gamma}, \text{ za } E_\gamma > m_e c^2 \end{cases} \quad (30)$$

gde su: Z – redni broj atoma sredine; E_γ – energija upadnog fotona; m_e – masa mirovanja elektrona; c – brzina svetlosti; E_v^k – energija veze u K-ljusci.

2) Komptonovo rasejanje

Komptonovo rasejanje je rasejanje fotona na slobodnom ili vezanom elektronu čija je energija veze mnogo manja od energije upadnog fotona. Primenom zakona održanja energije i impulsa dolazi se do sledeće relacije (Jednačina 31):

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (31)$$

gde su: λ' – talasna dužina odbijenog fotona; λ – talasna dužina upadnog fotona; h – Plankova konstanta; m_e – masa mirovanja elektrona; c – brzina svetlosti; θ – ugao između pravca kretanja upadnog i rasejanog fotona.

Verovatnoća za Komptonov efekat (Jednačina 32) je proporcionalna rednom broju atoma sredine sa kojom zračenje interaguje (Z):

$$\sigma_{ce} \sim \frac{Z}{E_\gamma} \quad (32)$$

gde su: Z – redni broj atoma sredine; E_γ – energija upadnog fotona.

3) Kreacija parova

Kreiranje para elektron-pozitron je fenomen direktnog pretvaranja energije u masu. Naime, foton se transformiše u jedan elektron i jedan pozitron. Do ovoga može doći samo

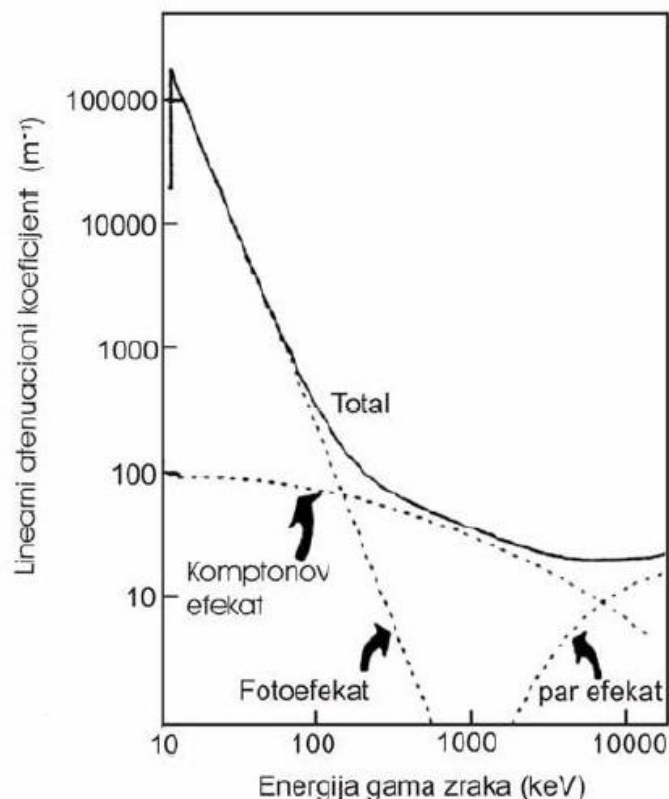
ako je energija fotona veća od dvostruke vrednosti energije mirovanja elektrona ⁷⁰ ($2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$).

Razlika upadne energije fotona i energije mirovanja kreiranog para ($E_\gamma - 2m_e c^2$), ravnopravno se raspodeljuje među česticama kao kinetička energija. Elektron i pozitron se usporavaju u okolnom materijalu, a pozitron na kraju reaguje sa nekim elektronom i anihilira se. Ako do ovoga dođe nakon što pozitron izgubi svoju kinetičku energiju, pri anihilaciji nastaju dva fotona sa energijama 511 keV. U skladu sa zakonom održanja impulsa, ova dva fotona se emituju u suprotnim smerovima. Presek za proizvodnju parova se može smatrati proporcionalnim sa kvadratom atomskog broja (Jednačina 33):

$$\sigma_{pp} \approx Z^2 \ln E_\gamma, \text{ za } 5m_e c^2 > E_\gamma > 50m_e c^2 \quad (33)$$

Na Slici 27 su prikazani linearni atenuacioni koeficijenti za sve tri interakcije i ukupni atenuacioni koeficijent u funkciji energije, za najčešće korišćenu aktivnu sredinu u detekciji gama zračenja (kristal germanijuma). Komptonov efekat je prisutan, sa blagim padom, u celom intervalu datih energija, dok su fotoefekat i kreiranje parova dominantni na nižim energijama i energijama iznad 1022 keV, respektivno. [1, 2, 126]

⁷⁰ Jednaka je masi mirovanja pozitrona



Slika 27. Zavisnosti preseka za fotoefekat, Komptonov efekat i kreaciju parova, kao i ukupnog linearnog atenuacionog koeficijenta od energije upadnog fotona za Ge [126]

8.1.2 Karakteristike detektora

Rad svih detektora se zasniva na principu pretvaranja energije koju zračenje predaje pri prolasku kroz aktivnu zapreminu detektora u oblik pogodan za merenje i obradu (uglavnom u električnu). Najupotrebljavaniji detektori su jonizacione komore, scintilacioni detektori, fotomultiplikatori, poluprovodnički detektori itd. U okviru ovih glavnih grupa, izdvajaju se podgrupe detektora sa specifičnim karakteristikama prilagođenim detektovanju određenih vrsta zračenja. Dakle, izbor detektora koji će se koristiti u konkretnom slučaju zavisi od vrste zračenja koje se detektuje, ali i od osnovnih karakteristika samog detektora. [127, 128]. Pod osnovnim karakteristikama detektora se podrazumevaju: osetljivost, odziv detektora, energetska rezolucija, efikasnost detektora, mrtvo vreme i vreme odziva.

Osetljivost

Detektori su konstruisani da budu osetljivi na određenu vrstu zračenja u određenom energetsom regionu, izvan kog efikasnost značajno opada i signal postaje neupotrebljiv. Stoga se pod osetljivošću podrazumeva sposobnost detektora da proizvede upotrebljiv signal za određenu vrstu zračenja na određenoj energiji.

Verovatnoću da upadno zračenje preda deo ili celokupnu svoju energiju u procesima jonizacije, određuju presek za jonizaciju i masa detektora. Verovatnoće za interakcije neutralnih čestica su obično mnogo manje, u odnosu na naelektrisane, pa je neophodno da detektor ima veću gustinu i zapreminu.

Da bi jonizacioni signal bio upotrebljiv, on mora biti veći od srednjeg nivoa šuma koji se pojavljuje kao fluktuirajući napon ili struja na izlazu iz detektora i prisutan je uvek, bez obzira da li postoji zračenje ili ne.

Takođe, zbog apsorpcije pri prolasku kroz materijal koji pokriva ulazni prozor ka osetljivoj zapremini detektora, debljina ovog materijala određuje donju granicu energije koja može biti detektovana.

Odziv detektora

Kako je izlazni signal električnih detektora u obliku strujnog impulsa, integral impulsa u funkciji vremena je direktno proporcionalan amplitudi ili visini signala. Odnos ukupnog naelektrisanja, odnosno visine izlaznog signala i energije upadnog zračenja predstavlja odziv detektora. On zavisi od vrste i energije zračenja, pa ne znači da će detektor sa linearnim odzivom za jedan tip čestica biti linearan i za druge tipove čestica.

Energetska rezolucija

Kada bi detektor ozračili monoenergetskim snopom, usled fluktuacija u nekim jonizacionim i ekscitacionim procesima, na izlaznom spektru bi dobili pik određene širine, obično Gausovog tipa. Usled ovoga, u spektru može doći do preklapanja i nerazlikovanja dve bliske spektralne linije. Sposobnost detektora da razlikuje takve dve linije, naziva se

rezolucija. Prikazuje se u odnosu na poluširinu maksimuma (*FWHM – Full Width at Half Maximum*), a dve energije koje upadaju u ovaj interval smatraju se nerazloživim.

Ako FWHM označimo sa ΔE , relativna rezolucija na energiji E je data Jednačinom 34.

$$R = \Delta E/E \quad (34)$$

Sa porastom energije, raste i broj jonizacija, što smanjuje relativne fluktuacije i doprinosi poboljšanju rezolucije⁷¹.

Efikasnost detektora

Efikasnost detekcije je mera verovatnoće da zračenje određene energije bude apsorbovano u aktivnoj zapremini detektora i definiše se kao odnos registrovanih događaja i događaja emitovanih iz izvora.

Ona zavisi od geometrije detektora i verovatnoće za interakciju unutar detektora. To znači da je efikasnost funkcija materijala detektora, vrste i energije zračenja, ali i od toga koji deo prostornog ugla zračenja je obuhvaćen detektorom, što zavisi od geometrijske konfiguracije izvora i detektora, kao i ugaone raspodele zračenja.

Obično se razmatraju dve vrste efikasnosti detektora: apsolutna i relativna. Da bi interpretacija dobijenih spektara bila kvalitetna, pre svega je neophodno, snimanjem i analiziranjem spektara referentnih radioaktivnih materijala, odrediti vrednosti apsolutnih efikasnosti u funkciji energije (kalibracija efikasnosti) (Poglavlje 9.2.1).

Za razliku od apsolutne, relativna efikasnost je kataloški podatak, koji izdaje proizvođač u skladu sa standardom “ANSI/IEEE Standard 325-1991”. Ona definiše odnos apsolutne efikasnosti detektora na energiji 1332,5 keV, za tačkasti izvor ⁶⁰Co, postavljenog na udaljenosti od 25 cm i, pod istim uslovima definisane, apsolutne efikasnosti NaI scintilacionog detektora dimenzija (3 × 3) inča, koja iznosi 0,12 %. Relativna efikasnost nema veliki eksperimentalni značaj i uglavnom služi za međusobno poređenje detektora.

⁷¹ Za gama zrake od 1 MeV, germanijumski detektori imaju rezoluciju reda 0,1%.

Mrtvo vreme

Mrtvo vreme je vreme koje je potrebno detektoru da obradi neki događaj i uglavnom je povezano sa dužinom trajanja strujnog signala. U zavisnosti od tipa, detektori mogu biti osetljivi ili neosetljivi za druge događaje unutar ovog intervala.

Ukoliko je detektor neosetljiv, svaki događaj koji se desi u ovom intervalu je izgubljen. Međutim, ako detektor zadržava svoju osetljivost, u slučaju da se u toku trajanja mrtvog vremena dogodi novi događaj, on dodaje svoje mrtvo vreme od momenta kada je stigao. Ako su događaji dovoljno česti, mrtvo vreme detektora može da traje veoma dugo, pri čemu je moguće i gomilanje signala, čime se on izobličuje, dovodeći do gubitka informacija.

Vreme odziva

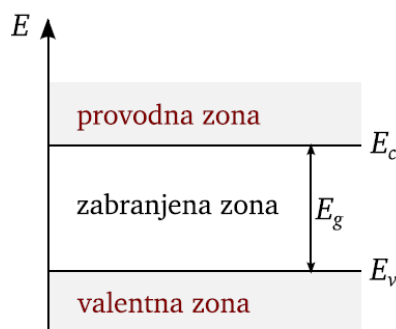
Vreme odziva je period potreban za formiranje signala. Poželjno je da se signal brzo formira u oštar impuls sa što strmijom bočnom stranom, tj. da vreme odziva bude što kraće.

8.1.3 Poluprovodnički detektori

Prednost poluprovodničkih detektora je što pri prolasku zračenja kroz kristal poluprovodnika dolazi do formiranja para elektron-šupljina za šta je potrebna oko deset puta manja energija u odnosu na formiranje elektronsko-jonskog para. Ovo dovodi do toga da je i količina proizvedene jonizacije na određenoj energiji za red veličine veća, rezultujući veću energetska rezoluciju. Međutim, kristalni materijali trpe i oštećenja od zračenja, pa je njihov upotrební vek dosta ograničen. Takođe, izuzev silicijuma, poluprovodnici postaju operativni tek na jako niskim temperaturama (kristal germanijuma mora biti ohlađen do temperature tečnog azota). Ipak, germanijumski detektori su najzastupljeniji u detekciji gama zračenja, jer sa značajno većim rednim brojem ($Z(\text{Si}) = 14$; $Z(\text{Ge}) = 32$) omogućavaju oko 60 puta veći efikasni presek za fotoefekat.

8.1.3.1 Princip rada poluprovodničkih detektora

Poluprovodnički detektori kao jonizacionu sredinu poseduju kristal poluprovodnika. To su materijali koje karakteriše zonska struktura i čija elektronska svojstva zavise od koncentracije primesa i širine energetske procepa. Valentna zona odgovara elektronskim stanjima valentnih elektrona koji učestvuju u formiranju kovalentne veze i na apsolutnoj nuli su ova stanja popunjena. Provodna zona odgovara energetskim stanjima viška energije, koja su na apsolutnoj nuli nepopunjena. Valentna i provodna zona su razdvojene zabranjenom zonom (E_g). Praktično, E_g predstavlja opseg energija koje elektroni ne mogu da imaju (Slika 28). [129]



Slika 28. Šematski prikaz energetske strukture poluprovodnika [129]

Ukoliko elektron iz valentne zone dobije energiju $E \geq E_g$, on može da savlada energetske barijere i pređe u provodnu zonu oslobađajući za sobom šupljinu u valentnoj zoni. Širina zabranjene zone zavisi od temperature⁷², na taj način što se sa porastom temperature smanjuje energija koju je potrebno dodati elektronu da bi iz valentne zone prešao u opseg energija provodne zone.

Elektroni u provodnoj zoni, kao i šupljine u valentnoj zoni, predstavljaju dva osnovna tipa nosilaca naelektrisanja. Koncentracija elektrona u provodnoj zoni označava se sa n , a koncentracija šupljina u valentnoj zoni sa p .

⁷²Za silicijum, na $T = 300$ K, iznosi 1,12 eV.

Stvaranje para elektron-šupljina se može postići termičkom energijom $kT \geq E_g$, dopiranjem, jonizacijom primesa na višim temperaturama ili ozračivanjem poluprovodnika elektromagnetnim talasima energije $h\nu \geq E_g$, što je slučaj kod poluprovodničkih detektora zračenja. U tom slučaju upadni foton predaje svoju energiju elektronu i prebacuje ga iz valentne u provodnu zonu, čime se stvara par elektron-šupljina.

Uvođenjem primesa čija se valentnost razlikuje od osnovne valentnosti poluprovodnika, može se dobiti n-tip (donorske primese) ili p-tip (akceptorske primese) poluprovodnika⁷³. Donorske primese imaju višak elektrona u valentnoj ljusci, čime povećavaju broj slobodnih elektrona (n-nosioca naelektrisanja). Kod akceptorskih primesa, situacija je obrnuta, pa su kod poluprovodnika p-tipa većinski nosioci naelektrisanja šupljine.

Verovatnoća da će energetska nivo energije E biti zauzet elektronom, određena je Fermi-Dirakovom funkcijom raspodele (Jednačina 35):

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (35)$$

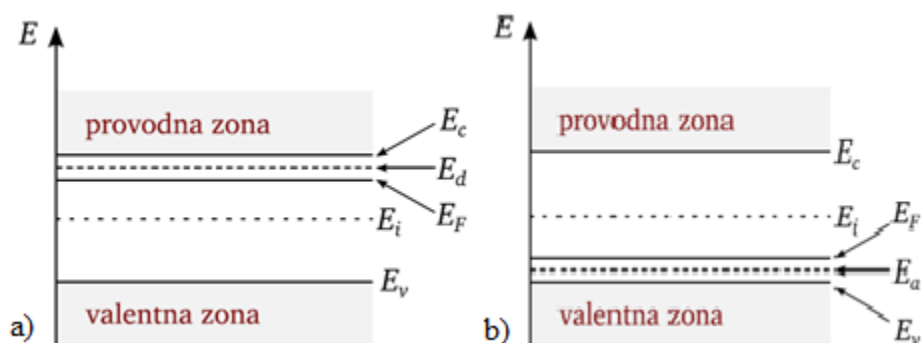
Veličina E_F se naziva Fermijev nivo i za $E = E_F$, Jednačina 35 se svodi na $f(E_F) = 0,5$, za bilo koju temperaturu.

Donorski atomi u zabranjenu zonu unose energetska nivo E_d blizak dnu provodne zone (Slika 29a) koji je, teorijski gledano, potpuno popunjen samo na temperaturi apsolutne nule. Pošto je valentnim elektronima donorskih atoma, koji ne učestvuju u kovalentnim vezama, potrebno dodati jako malo energije da bi se oslobodio matičnog atoma, na sobnoj temperaturi se svi ovi elektroni mogu smatrati slobodnim (svi donorski atomi se mogu smatrati jonizovanim). Zbog veće popunjenosti stanja u provodnoj nego u valentnoj zoni, Fermijev nivo celog sistema (E_F) se pomera ka dnu provodne zone, kao na Slici 29a.

⁷³ Za četvorovalentane elemente (Si i Ge), donorske primese su petovalentni elementi (P, As ili Sb), dok su akceptorske primese trovalentni elementi (B, Ge, Al ili In).

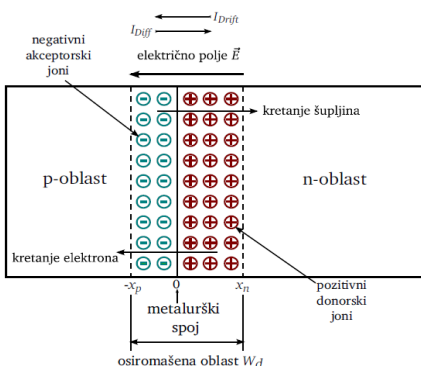
Jonizacijom primesa, elektroni sa donorskog nivoa prelaze u provodnu zonu, povećavajući koncentraciju provodnih elektrona, čime oni postaju većinski nosioci naelektrisanja.

Kod akceptorskih primesa, atomi u zabranjenu zonu unose energetski nivo E_a blizak vrhu valentne zone (Slika 29b). Elektroni iz nje prelaze na akceptorski nivo, povećavajući koncentraciju šupljina u valentnoj zoni, pa su kod ovog tipa poluprovodnika, one većinski nosioci naelektrisanja.



Slika 29. Šematski prikaz donorskih (a), akceptorskih (b) i Fermijevih nivoa u dopiranim poluprovodnicima n (a) i p (b) tipa [129]

Spajanjem ova dva dopirana poluprovodnika, dobija se takozvani p-n spoj (dioda). Unutar ovakvog sistema, zbog težnje za uspostavljanjem ravnotežnog stanja, dolazi do difuzije slobodnih nosilaca naelektrisanja sa obe strane spoja, tj. do njihovog kretanja sa mesta više ka mestu niže koncentracije (Slika 30).



Slika 30. Kretanje nosilaca naelektrisanja u p-n spoju [129]

Šupljine, kao većinski nosioci naelektrisanja u p-oblasti se kreću ka n-oblasti i za sobom ostavljaju negativne akceptorske jone, dok se elektroni, kao većinski nosioci naelektrisanja u n-oblasti, kreću ka p-oblasti i za sobom ostavljaju pozitivne donorske jone. Kada pređu u n-oblast, šupljine postaju manjinski nosioci naelektrisanja i rekombinuju se sa elektronima. Isto se dešava i sa elektronima, kada iz n pređu u p-oblast. Na taj način se u okolini p-n spoja stvara osiromašena oblast, širine Wd , u kojoj nema slobodnih nosilaca naelektrisanja. U njoj ostaju naelektrisani joni koji dovode do stvaranja električnog polja E . Ovo, takozvano "ugrađeno" polje se suprotstavlja daljem difuzionom kretanju slobodnih nosilaca naelektrisanja.

Pri inverznoj polarizaciji (p-oblast na "-" polu), spoljašnji napon generiše električno polje pod čijom dejstvom šupljine iz p-oblasti napuštaju okolinu p-n spoja ostavljajući za sobom negativne akceptorske jone. S druge strane, elektroni iz n-oblasti takođe napuštaju okolinu p-n spoja ostavljajući za sobom pozitivne donorske jone. Na taj način se ukupna širina osiromašene oblasti povećava. Zbog toga se povećava i vrednost ugrađenog električnog polja koje sprečava difuziono kretanje nosilaca naelektrisanja između p i n-oblasti. Pod uticajem ugrađenog električnog polja, jedino se kreću generisani nosioci naelektrisanja, pa je ukupna struja kroz diodu jednaka driftovskoj struji.

Nosioci naelektrisanja, stvoreni u jonizacionim procesima, pod dejstvom električnog polja driftuju ka kontaktima suprotnog polariteta indukujući strujni signal. Detektor se dalje povezuje na pretpojačavač, koji integriše dobijeni signal i šalje ga dalje do pojačavača i multikanalnog analizatora.

Pošto je amplituda pulsa direktno proporcionalna energiji upadnog fotona, to nam govori o prirodi upadnog zračenja i može se povezati sa izvorom zračenja, kao i sa njegovom koncentracijom i aktivnošću.

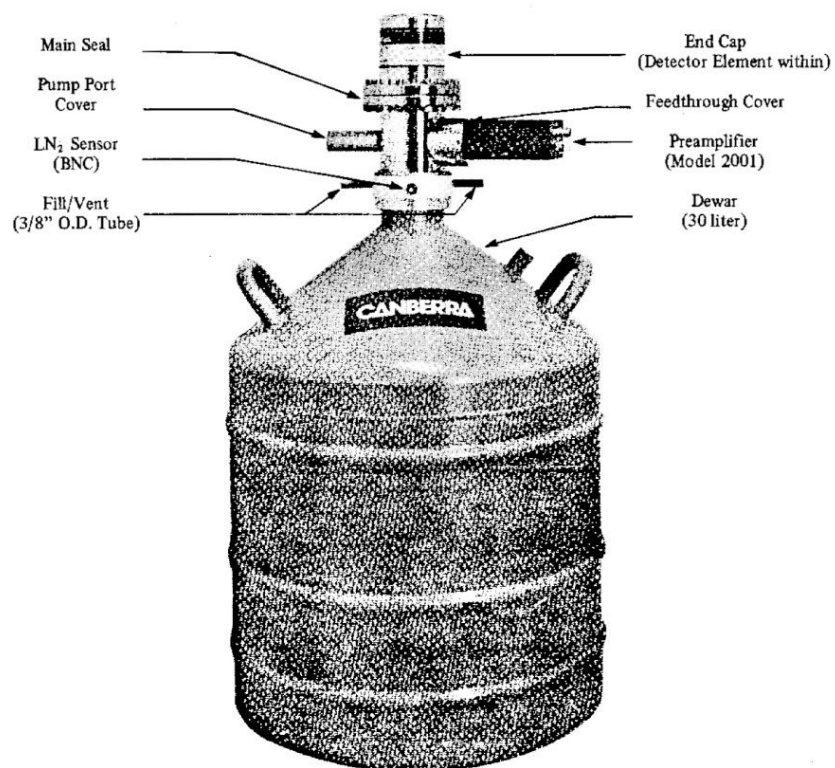
Nosilac naelektrisanja može da bude zahvaćen na nekoj nečistoći poluprovodnika čime prestaje da učestvuje u transportnom procesu. Ipak, posle nekog vremena, on se može osloboditi, a prosečno vreme provedeno u "klopki" zavisi od temperature i odražava se na energetske rezoluciju i pojavljivanje "repeva" u spektru.

8.1.3.2 Bezprimesni germanijumski detektori (HPGe – High Purity Germanium)

Napredak u tehnologiji proizvodnje poluprovodnika je doveo i do mogućnosti stvaranja skoro čistih kristala germanijuma, sa koncentracijama jednog atoma primese na 10^{10} atoma germanijuma u 1 cm^3 . To se može postići kompenzacijom pomoću nanošenja jona Li na germanijumski kristal, pri čemu se formiraju Ge(Li) detektori. Smanjenjem koncentracije nečistoća zonskim rafiniranjem dobija se i tzv. ultra-čisti (*high purity*) germanijum. Od ovakvog germanijuma se formiraju HPGe (**H**igh **P**urity **G**ermanium) detektori.

Kada foton dospe u besprimesni sloj, dolazi do interakcije sa elektronima. Proporcionalno energiji upadnih fotona, kreira se veliki broj parova elektron-šupljina, zbog čega su HPGe detektori posebno značajni u niskoenergetskom regionu.

HPGe detektori se mogu razlikovati po svom obliku, geometriji i osnovnim karakteristikama. U zavisnosti od toga, svaki detektor je pogodan za merenja u određenom energetsom opsegu. Koaksijalni detektori imaju oblik kružnog cilindra (Slika 31) i najširi energetska opseg. Mogu da detektuju gama zrake od ispod 5 keV do nekoliko MeV. Jedna od njihovih specifičnih prednosti je to što mogu da procesiraju fotone od jednog do drugog kraja cilindra i preko cele bočne strane, što rezultuje velikom korisnom površinom i velikom verovatnoćom za interakciju. [127, 128]



Slika 31. Koaksijalni HPGe detektor [130]

8.2 Analiza spektra

Analiza spektra zračenja se može uporediti sa identifikacijom otiska prsta. Naime, svaki radionuklid pri svom raspadu emituje jedinstven “komplet” spektralnih linija (Slika 32). Svaka od ovih linija odgovara jednom od mogućih energetske prelaza pri raspadu. Takođe, verovatnoća za emisiju, nije ista za svaku energiju. Podaci o mogućim prelazima i njihovim verovatnoćama su dostupni u tablicama izotopa [6]. Međutim, iako je celokupan “komplet” spektralnih linija jedinstven, pojedinačne linije se mogu naći u spektrima više različitih izotopa. Zato, ukoliko se u uzorku nađu izotopi sa istim mogućim energetske prelazima, mora se izvršiti računaska raspodela ukupnog broja detekcija za svaki izotop, na osnovu njihovih verovatnoća raspada na dotičnoj energiji. Dešava se i da dođe do istovremene emisije dva istoimena jezgra, pa detektor ova dva fotona vidi kao jedan, čija je energija jednaka zbiru njihovih energija. Tada se u spektru pojavljuju “lažne”

linije, koje ne pripadaju ni jednom od dezintegriranih izotopa. Svoj trag u spektru ostavljaju i pojave poput Komptonovog rasejanja, pozadinskog zračenja, anihilacioni i mnogi drugi procesi. Detaljan opis analize spektra bi bio previše opširan, pa će dalja pažnja biti posvećena samo njenom kvantitativnom delu.

Najpre je potrebno minimizirati uticaj pozadinskog zračenja, što se postiže oduzimanjem odbroja iz spektra pozadinskog zračenja (N_B) od odbroja na posmatranoj energiji u spektru uzorka (N_S): $N = N_S - N_B$. Kao što je račeno, postoji izvesna verovatnoća da izotop emituje foton određene energije (P_γ), kao i verovatnoća da emitovan foton bude detektovan (E_{ff}). Zato je potrebno, za procenu realnog broja raspada određenog izotopa tokom merenja, broj detektovanih raspada podeliti ovim verovatnoćama. Konačno, aktivnost izotopa u uzorku se određuje na osnovu Jednačine 36.

$$A = \frac{N}{E_{ff} \cdot P_\gamma \cdot t} \quad (36)$$

gde su: A – aktivnost radionuklida u uzorku (Bq); N – odbroj na odgovarajućoj energiji (imp); E_{ff} – efikasnost detektora na odgovarajućoj energiji (%); P_γ – verovatnoća emisije fotona na odgovarajućoj energiji (%); t – vreme merenja (s). [2]

9 EKSPERIMENTALNI DEO

9.1 Prikupljanje i priprema uzoraka

U Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine ("Zaštita"), Instituta "Vinča", 60-ih godina XX veka počinje redovna kontrola radioaktivnosti prizemnog dela atmosfere, određivanjem ukupne alfa/beta aktivnosti uzoraka vazduha i depozita, kao i koncentracije ^{222}Rn .

Od aprila 1994. godine se uvodi metoda gamaspektrometrije, čime je omogućeno i redovno praćenje aktivnosti pojedinačnih radionuklida prisutnih u prizemnom sloju atmosfere, poput ^{210}Pb , ^{40}K , ^7Be i drugih. Koncentracije ovih izotopa se prate kroz dva medijuma: vazduh (preko čestica aerosolnog praha) i depozit (ukupan – suvi i mokri), a njihovi podesi uzorkovanja i pripreme se suštinski nisu menjali tokom ovih godina.

Prikupljanje uzoraka se vrši u okviru nekoliko monitoringa na više lokacija, kako u Institutu, tako i širom Republike Srbije. Za izradu ove teze, zbog pokrivanja najdužeg vremenskog perioda, za uzorke depozita, korišćeni su podaci sa meteorološke stanice u Institutu "Vinča" (N: $44^\circ 45' 32,3''$; E: $20^\circ 35' 59,5''$) i nadmorskoj visini od oko 100 m). Prvobitna lokacija uzorkovanja vazduha (od aprila 1994. do kraja 1995.) se nalazila na približno 2 km od instituta (Usek, N: $44^\circ 45' 57,7''$; E: $20^\circ 34' 38,3''$), odakle su uzorci nastavljeni da se skupljaju u samom institutu, na istoj lokaciji kao i uzorci depozita.

Čestice aerosola se talože na filter papirima veličine pora (20–25) μm , relativne efikasnosti 82 % za slobodno nataloženu prašinu (Whatman 41, sagoreva bez ostatka), pomoću sistema za uzorkovanje vazduha, konstantnog protoka od $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (Slika 32). Uzorkovanje se vrši kontinuirano, uz redovnu zamenu filter papira na svaka 2–3 dana. Takođe, na pravougaonim uzorkivačima obloženim plastičnom folijom, površine $0,16 \text{ m}^2$ (Slika 33), neprekidno se talože i suvi i mokri depozit, formirajući kompozitni mesečni uzorak.



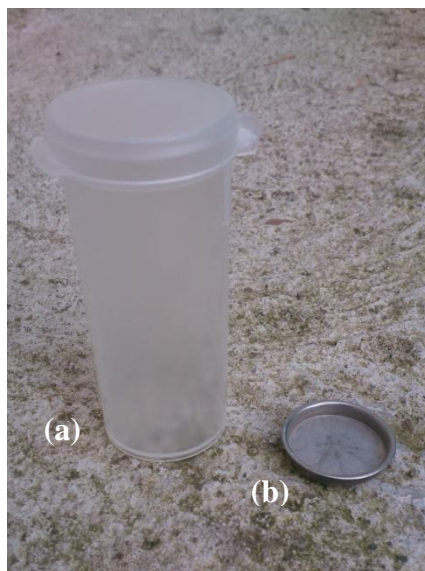
Slika 32. Sistem za uzorkovanje vazduha koji je u upotrebi od 2000. godine



Slika 33. Uzorkivač padavina

Formiranje kompozitnog mesečnog uzorka vazduha, vrši se u laboratoriji, mineralizacijom svih dnevnih filter papira na temperaturi od 380 °C. Na kraju pripremnog procesa, dobijeni mineralizovani aerosolni prah se uz izvesne gubitke na zidovima tigla prenosi u odgovarajuću geometriju merenja.

U početku (do 2008. godine), kao geometrija merenja korišćena je metalna posuda (planšeta) prečnika 23 mm, dubine 3 mm, u kojoj su se, radi smanjenja dodatnih gubitaka usled nemogućnosti njenog zatvaranja, uzorci fiksirali alkoholom (Slika 34b). Zbog navedenog problema, od 2008. godine se prelazi na merenje u plastičnim valjkastim posudama (fiola) prečnika 30 mm i visine 70 mm koje eliminišu potrebu za fiksiranjem uzorka, a zbog materijala izrade imaju i manju apsorpciju zračenja (Slika 34a).



Slika 34. Geometrije merenja: fiola (a) i planšeta (b)

9.2 Merenje uzoraka

Merenja uzoraka vazduha i depozita obavljana su, u zavisnosti od vremenskog perioda, na četiri HPGe detektora, sa rezolucijama 1,89 keV na 1332 keV i relativnim efikasnostima 20 % (proizvođača Ortec), 18 %, 20 % i 50 % (proizvođača Canberra). Prva merenja su vršena na detektorima relativne efikasnosti 23 % (D_1) i 20 % (D_2'), a zatim je zbog kvara, detektor firme Ortec zamenjen detektorom relativne efikasnosti 18 % (D_2''), firme Canberra. Od 2012. u rad se uvodi i detektor relativne efikasnosti 50 % (D_3). Širi obim karakterisrika detektora D_1 i D_2'' , dat je u Tabeli 4.

S obzirom da nekada nisu postojala komercijalna kućišta, zaštite od spoljašnjeg zračenja za detektore D_1 i D_2' su konstruisane i urađene u Laboratoriji "Zaštita". Dimenzije

kućišta su 45 cm • 45 cm • 45 cm. Sa spoljne strane se nalaze olovne cigle debljine 10 cm, dok su sa unutrašnje strane slojevi od bakra debljine 3 mm i gvožđa debljine 10 mm (za D₁) i 6 mm (za D₂’). Poklopci kućišta su napunjeni olovnim limom i ciglama i pomeraju se pomoću pokretnog mehanizma. Detektori su smešteni na sredini kućišta i udaljeni su 17 cm od zidova kućišta. Detektori D₂’’ i D₃ od početka upotrebe imaju komercijalnu zaštitu.

Tabela 4. Karakteristike HPGe detektora D₁ i D₂’’

DETEKTOR		D ₁	D ₂ ’’
Geometrija i tip detektora		Zatvoreni koaksijalni n tipa	Zatvoreni reverzibilni koaksijalni p tipa
Relativna efikasnost		20 % (tab)*	18 % (tab)
Rezolucija	Na 122keV	0,850 keV (tab)	0,759 keV (eks)**
	Na 1332keV	1,8 keV (tab)	1,69 keV (eks)
Odnos Peak/Compton		51:1 (tab)	56,1:1 (eks)
Opis kriostata		Vertikalni (+ predpojačavač)	Vertikalni (+ predpojačavač)
Dijametar kristala		49,5 mm	48 mm
Dužina kristala		56,5 mm	48,5 mm
Rastojanje kristala od prozora		5,5 mm	5 mm
Ulazni prozor		Al	Be
Radni napon		(+) 4500 V	(-) 3000 V
Olovna zaštita		10 cm	10 cm
Dodatak zaštiti		Cu + Fe	Cu + Cd + pleksiglas
Integralna brzina brojanja, merena u intervalu do 3 MeV		0,89 imp·s ⁻¹	0,96 imp·s ⁻¹

*tab – podatak proizvođača

**eks – eksperimentalno određeno

9.2.1 Kalibracija detektora

Kalibracija detektora podrazumeva energetska kalibraciju i kalibraciju efikasnosti. Energetska kalibracija predstavlja određivanje zavisnosti $E = f(\text{kanal})$, dok kalibracija efikasnosti zahteva određivanje funkcije efikasnost detektora u odnosu na energiju detektovanog zračenja (Poglavlje 8.1.2). O značaju kalibracije efikasnosti detektora na konačan rezultat merenja i njenoj kompleksnosti svedoče brojni radovi [131–136].

U ovom poglavlju će biti prikazan pregled metoda kalibracije efikasnosti detektora za određivanje koncentracije radionuklida u uzorcima vazduha i depozita, korišćenih u laboratoriji "Zaštita" od uvođenja gamaspektrometrijske metode (1994. godine). Iako su postupci uzorkovanja i pripreme suštinski ostali isti, vremenom su se menjale geometrije merenja uzorka i dostupnost referentnih radioaktivnih materijala, u skladu sa tim su se usklađivali i načini određivanja efikasnosti detektora.

U početku, za potrebe merenja u geometriji planšete, prva procena efikasnosti detektora D_1 , D_2' i D_2'' urađena je pomoću seta tačkastih referentnih radioaktivnih materijala ^{133}Ba , $^{57,60}\text{Co}$ i ^{137}Cs , aktivnosti reda veličine (10^3 – 10^4) Bq na dan 25.11.1977. (Coffret d' etalon ECGS-2, Sacle, Franse) i planšete punjene aerosolnim prahom dobijenog za interkomparaciju u okviru projekta SEV, koji je sadržao ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{57}Co i ^{40}K i čije su aktivnosti na dan 09.03.1988. bile u intervalu od (5–207) Bq.

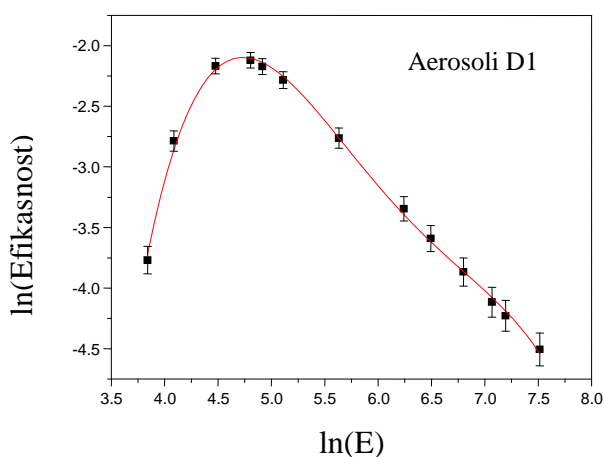
Da bi se odredila efikasnost na energiji 477,6 keV, koja odgovara izotopu ^7Be , snimljena je kalibraciona kriva efikasnosti za geometriju tačkastog izvora i određena razlika efikasnosti na energijama 477,6 keV i 661 keV. Poznavajući efikasnost na energiji od 661 keV u geometriji plašete sa aerosolnim prahom kao matriksom i pretpostavljajući da je nagib kalibracione krive seta tačkastih referentnih radioaktivnih materijala u intervalu energija od 477,6 keV do 661 keV isti kao nagib kalibracione krive u geometriji planšete sa aerosolnim prahom, računskim putem se odredila efikasnost na energiji 477,6 keV u geometriji planšete.

Naime, efikasnosti detektora D_2'' na energijama 477,6 keV i 661 keV u geometriji tačkastog referentnog radioaktivnog materijala, iznosile su 3,45 % i 2,90 %, respektivno.

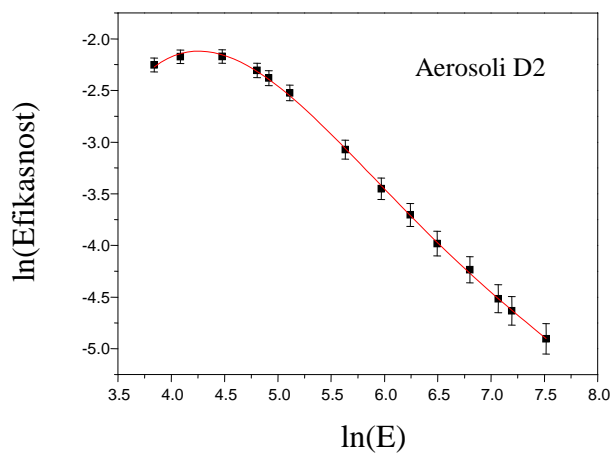
Razlika između ove dve efikasnosti je 0,55 %, a efikasnost na energiji 661 keV u geometriji planšete sa aerosolnim prahom kao matriksom, iznosila je 2,08 %. Na osnovu ranije izložene pretpostavke, dobijena efikasnost na energiji 477,6 keV u geometriji planšete iznosila je 2,63 % (2,08 % + 0,55 %). Na isti način, na ovoj energiji su određene i efikasnosti detektora D₁ i D₂' , čije su vrednosti prikazane u Tabeli 5. Ukupna merna nesigurnost, izražena kao suma relativnih grešaka pojedinačnih parametara, procenjena je na 20 %.

Od 2008. godine, kao geometrija merenja počinje da se koristi fiola. U skladu sa tim, da bi kalibraciona kriva što više odgovarala realnim uzorcima, izrađeni su laboratorijski referentni radioaktivni materijali, matriksa aerosolnog praha, u geometriji fiole, dobijeni od referentnih radioaktivnih materijala oznaka 9031-OL-116/08 (korišćen u periodu 2008–2012.) i 9031-OL-427/12 (period upotrebe 2012–2017.) proizvedenih od strane češkog Instituta za metrologiju (the Czech Metrological Institute, Inspectorate for Ionizing Radiation). Oba rastvora primarnih referentnih radioaktivnih materijala sadržala su: ²¹⁰Pb, ²⁴¹Am, ^{57,60}Co, ¹³⁷Cs, ¹¹³Sn, ¹³⁹Ce, ⁸⁵Sr, ¹⁰⁹Cd, ⁸⁸Y i ²⁰³Hg.

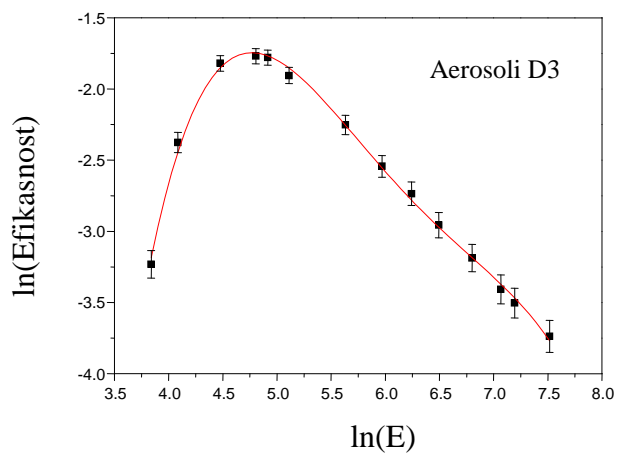
Krive efikasnosti detektora D₁, D₂' i D₃, za period od 2012–2017, dobijene fitovanjem polinomom 4. reda, prikazane su na Slikama 35–37, dok su efikasnosti detektora na energiji 477,6 keV, za periode 2008–2012. i 2012–2017, prikazane u Tabeli 5.



Slika 35. Kriva efikasnosti detektora D1 za geometriju fiole, u periodu 2012–2017.



Slika 36. Kriva efikasnosti detektora D2 za geometriju fiole, u periodu 2012–2017.



Slika 37. Kriva efikasnosti detektora D3 za geometriju fiole, u periodu 2012–2017.

Tabela 5. Efikasnosti korišćenih detektora na energiji 477,6 keV u periodu od 1994–2017.

<i>Efikasnosti detektora na energiji 477,6 keV (%)</i>			
<i>Period</i>	<i>1994–2007.</i>	<i>2008–2011.</i>	<i>2012–2017.</i>
<i>Detektor</i>			
<i>D₁</i>	4,5	4,05	3,25
<i>D₂'</i>	4,1	/	/
<i>D₂''</i>	2,6	3,08	2,39
<i>D₃</i>	/	7,20	6,89

Da bi se uporedio uticaj različitih načina procene efikasnosti na energiji 477,6 keV, primenjivanih za određivanje aktivnosti ${}^7\text{Be}$, napravljen je eksperiment koji je obuhvatio merenje uzorka vazduha, uzorkovanog tokom aprila 2017. godine, na lokaciji Zlatibor, zapremine $V_1 = 29132,03 \text{ m}^3$ [137]. Merenja su obavljena na detektoru D_2 i trajala su 60000 s. Razlog za izbor ovog detektora je to što se, zbog praćenja i izotopa ${}^{210}\text{Pb}$ u vazduhu i depozitu, za merenja vazduha uglavnom bira detektor D_2 , jer u odnosu na D_1 i D_3 ima najveću efikasnost na energiji 46 keV.

Upotrebom efikasnosti detektora korišćenih u odgovarajućim periodima, izračunata je koncentracija aktivnosti ovog radionuklida (Poglavlje 9.2.2, Jednačine 37 i 38). Zatim je uzorak, uz gubitak od 11 % prvobitne zapremine ($V_2 = 25927,51 \text{ m}^3$), izmeren u nekada korišćenoj planšeti. Odbroji na energiji 477,6 keV su iznosili 19711 imp. za V_1 i 18911 imp. za V_2 . Izračunate aktivnosti radionuklida prikazane su u Tabeli 6.

Tabela 6. Aktivnosti ${}^7\text{Be}$ izračunate na osnovu procenjenih efikasnosti detektora D_2 za periode merenja 1994–2007. i 2012–2017.

${}^7\text{Be}$ (477,6 keV, $P_\gamma = 10,39 \%$)		
<i>Period</i>	<i>1994–2007.</i>	<i>2012–2017.</i>
<i>Geometrija merenja</i>	<i>Planšeta</i>	<i>Fiola</i>
<i>Originalna vrednost E_{ff} (%)</i>	<i>2,63</i>	<i>2,39</i>
<i>Aktivnost ($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)</i>	<i>8,44</i>	<i>8,51</i>
<i>Procenjena ukupna merna nesigurnost (%)</i>	<i>20</i>	<i>10</i>
<i>Interval izmerene vrednosti ($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)</i>	<i>6,75–10,13</i>	<i>7,66–9,36</i>

Dobijeni rezultati pokazuju da se vrednosti određivanja aktivnosti ${}^7\text{Be}$, na načine koji su se menjali od perioda uvođenja gamaspektrometrije u Laboratoriju "Zaštita" do danas, razlikuju oko 1 %.

Kako je ukupna merna nesigurnost⁷⁴ u tom periodu procenjena na 20 %, interval izmerenih koncentracija aktivnosti ⁷Be u geometriji planšete iznosi (6,75–10,13) mBq·m⁻³. U geometriji fiole, sadašnja procena merne nesigurnosti je ≈ 10 %, pa interval koncentracije aktivnosti ⁷Be u istom uzorku iznosi (7,66–9,36) mBq·m⁻³. Uočava se da između ova dva intervala postoji presek, što govori da i tadašnji rezultati odgovaraju vrednostima koje bi bile dobijene na osnovu trenutnih metoda procene efikasnosti detektora.

Provera energetske kalibracije i parametara detektora, poput efikasnosti, FWHM i mrtvog vremena obavlja se jednom nedeljno u okviru kontrole kvaliteta, tačkastim izvorima ¹³³Ba i ⁶⁰Co, aktivnosti 271,5 kBq i 732,9 kBq, respektivno, na dan 01.08.2011.

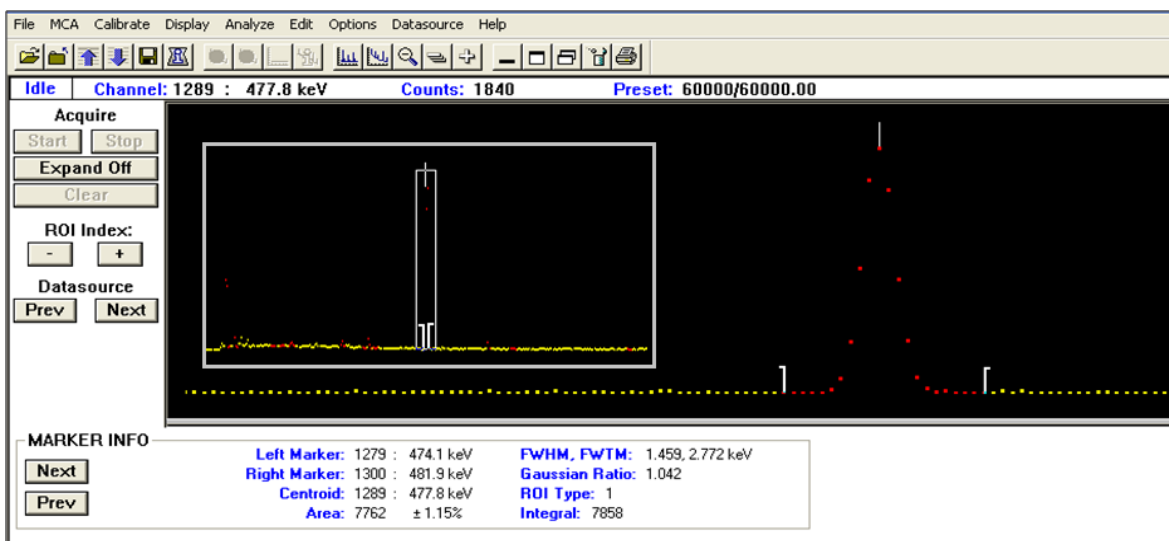
9.2.2 *Određivanje aktivnosti*

Posle kalibisanja detektora, neposredno pre merenja uzoraka, snima se spektar pozadinskog zračenja, koji se softverski oduzima od spektra uzorka. Sva merenja su trajala u intervalu od 60000 s do 234000 s, nakon čega su za statističku obradu snimljenih podataka korišćena dva softverska paketa SPECTRAN-AT (do marta 2005.) i Genie 2000 (2005–danas). Izmeren spektar uzorka aerosola, prikazan je na Slici 38.

Rezultati merenja su izraženi kao koncentracija aktivnosti (Jednačina 37), a merena količina (M) je izražena u jedinicama zapremine (m³) za uzorke vazduha, odnosno površine (m²) za uzorke depozita. Treba uočiti da, procesom pripreme dolazi do izvesnog gubitka dela uzorka, pa se merena količina određuje na osnovu proporcija prikupljenih i merenih masa uzoraka.

$$A_M = \frac{N}{E_{ff} \cdot P_\gamma \cdot t \cdot M} \quad (37)$$

⁷⁴ Ukupna merna nesigurnost obuhvata nesigurnosti pripreme i merenja uzoraka.



Slika 38. Spektar aerosola i spektralna linija ${}^7\text{Be}$ na energiji 477,6 keV

Kod određivanja aktivnosti radionuklida, vrlo je važno obratiti pažnju na vremenski period koji je protekao od uzorkovanja do merenja. Ukoliko je ova vremenska razlika uporediva sa vremenom poluraspada života radionuklida, potrebno je izvršiti takozvanu “korekciju na dan uzorkovanja”. Ova korekcija se vrši na osnovu jednačine radioaktivnog raspada, gde $A_{M,0}$ i $A_{M,m}$ predstavljaju aktivnosti na dan uzorkovanja, odnosno merenja, Δt vremenski period između uzorkovanja i merenja i $T_{1/2}$ vreme poluživota ispitivanog izotopa⁷⁵ (Jednačina 38).

$$A_{M,0} = A_{M,m} \cdot \exp\left(\ln 2 \cdot \frac{\Delta t}{T_{1/2}}\right) = A_{M,m} \cdot e^{\lambda \cdot \Delta t} \quad (38)$$

Shodno tome da je vreme poluraspada ${}^7\text{Be} \approx 53,2$ dana i da, usled perioda prikupljanja (30 dana) i pripreme uzorka, vremenska distanca između sakupljanja pojedinih delova uzorka i merenja može biti i više od 45 dana, nakon određivanja koncentracije u svim uzorcima je izvršena korekcija na dan uzorkovanja. Međutim, zbog specifičnosti “dana” uzorkovanja, koji suštinski predstavlja ceo jedan mesec, korekcija se vrši na jedan

⁷⁵ Obratiti pažnju da Δt i $T_{1/2}$ budu izraženi u istim jedinicama

odabran dan u periodu uzorkovanja. U suštini, za praćenje promene koncentracije izotopa je važno samo da se korekcija vrši uvek na isti dan u odnosu na početak uzorkovanja, pa je izbor "dana" uzorkovanja čisto stvar dogovora (Jednačine 39–44).

$$A_0 = \sum_{i=1}^D A_{i,o} = \sum_{i=1}^D A_{i,m} \cdot e^{\lambda(T_m - T_i)} \cdot e^{-\lambda(T_0 - T_i)} \quad (39)$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^D A_{i,o} = \sum_{i=1}^D A_{i,m} \cdot e^{\lambda(T_m - T_i - T_0 + T_i)} \quad (40)$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^D A_{i,o} = \sum_{i=1}^D A_{i,m} \cdot e^{\lambda(T_m - T_0)} \quad (41)$$

$$A_0 = \sum_{i=1}^D A_{i,o} = e^{\lambda(T_m - T_0)} \sum_{i=1}^D A_{i,m} \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^D A_{i,m} = A_m = \frac{N}{E_{ff} \cdot P_\gamma \cdot t} \rightarrow \text{Izmerena vrednost} \quad (43)$$

$$A_0 = A_m e^{\lambda(T_m - T_0)} \quad (44)$$

gde su: A_0 – ukupna mesečna aktivnost na izabrani dan za prikazivanje rezultata; $A_{i,o}$ – aktivnost i-tog uzorka na izabrani dan; $A_{i,m}$ – aktivnost i-tog uzorka na dan merenja (delić izmerene vrednosti); A_m – koncentracija ukupne mesečne aktivnosti na dan merenja (izmerena vrednost); D – broj dana; T_m – dan merenja; T_i – dan uzorkovanja; T_0 – izabrani dan na koji se prikazuje aktivnost.

Ispostavlja se da ukoliko se za "dan" uzorkovanja izabere sredina perioda uzorkovanja, dobijena vrednost je približno jednaka sumi prosečnih dnevnih vrednosti, pa je u ovoj studiji, aktivnost ^7Be korigovana na 15. dan u mesecu uzorkovanja.

10 PRIMENJENA ANALIZA

10.1 Deskriptivni statistički parametri

Deskriptivni statistički parametri se mogu podeliti na mere središnje (centralne) tendencije (položajne, lokacijske) i mere rasipanja oko središnje tendencije (mere varijabilnosti, varijacije, disperzije). U prvu grupu spadaju srednja vrednost, otežinjena srednja vrednost, medijana i mode, dok drugu grupu čine raspon (opseg, interval) podataka, varijansa, standardna devijacija, koeficijent varijacije, srednje algebarsko i apsolutno odstupanje, kvantili, interkvartilni interval i koeficijent i dr. [138]

Srednju vrednost najčešće predstavlja aritmetička sredina podataka. Odlikuje je to što uzima u obzir sve vrednosti, pa tako i ekstremne. Procena greške određivanja aritmetičke sredine skupa, može se predstaviti količnikom njene vrednosti i kvadratnog korena ukupnog broja članova skupa (standardna greška). Ovakav način procene greške proizilazi iz toga da se smatra da je srednja vrednost skupa bolje određena ukoliko je veći broj njegovih članova. Da bi se ublažio ili isključio uticaj ekstremnih vrednosti, mogu se koristiti otežinjena srednja vrednost (AS_w), kod koje doprinos svake vrednosti zavisi od njenog značaja ("težine", npr. broj njenih ponavljanja) u skupu podataka (Jednačina 45), ili medijana (Me), koja predstavlja vrednost centralnog položaja rezultata poređanih po veličini ili moda (Mo), koja predstavlja najčešće ponovljenu vrednost (ima najveći doprinos u otežinjenoj srednjoj vrednosti). Za razliku od srednje vrednosti i medijane koje imaju jedinstvenu vrednost (za paran broj rezultata, medijana je aritmetička sredina dve središnje vrednosti), moda može biti više od jedne, ali da ih ni nema.

$$AS_w = \frac{\sum_{i=1}^N w_i x_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (45)$$

Na primer, za skup: 1, 9, 8, 3, 5, 2, 7, 3, 6, 2, 5, 3 (niz: 1, 2, 2, **3, 3, 3, 5**, 5, 6, 7, 8, 15), parametri centralne tendencije iznose: $AS = 5$; $AS_w = 4,18$; $Me = \underline{4}$; $Mo = \mathbf{3}$

Međusoban odnos AS , Me i Mo , govori o simetričnosti, odnosno asimetričnosti skupa. Ukoliko su njihove vrednosti jednake, skup je simetričan, dok relacija $Mo < Me < AS$ ukazuje na pozitivnu simetriju i suprotno.

Pojedinačni članovi skupa se, između ostalog, mogu opisati njihovim algebarskim, apsolutnim i relativnim odstupanjem od srednje vrednosti, Z -vrednošću, a razlika između maksimalne i minimalne vrednosti u skupu predstavlja njegov raspon.

Varijabilnost skupa se može opisati srednjom vrednošću apsolutnih odstupanja (srednja apsolutna devijacija, MAD – *Mean Absolut Deviation*), kao i srednjim kvadratnim odstojanjem od srednje vrednosti (varijansa), čiji kvadratni koren predstavlja opseg oko srednje vrednosti u kom se nalazi 68,2 % izmerenih vrednosti, pod uslovom da je raspodela vrednosti normalna (standardna devijacija, SD , σ).

Odnos SD i AS predstavlja koeficijent varijacije (C_{var}) i jedan je od najboljih reprezentata varijabilnosti skupa.

Količnik algebarskog odstupanja od srednje vrednosti i standardne devijacije, predstavlja standardizovano odstupanje pojedinačnih vrednosti (Z -scor). Z -vrednost govori o tome koliko puta pojedinačna vrednost odstupa od srednje vrednosti, u odnosu na standardnu devijaciju. Kako se, za normalnu raspodelu, u opsegu $\pm 3\sigma$ nalazi 99,7 % članova skupa, vrednosti čija je apsolutna vrednost standardizovanog odstupanja veća od 3, smatraju se ekstremnim.

Još jedan od načina reprezentovanja varijabilnosti skupa podataka je pomoću kvantila, koji dele skup vrednosti poređanih u rastući niz na q jednakih delova ($q = 100$ – percentili, $q = 10$ – decili (P_q), $q = 4$ – kvartili (Q_q), $q = 3$ – tercili). Tako na primer, 50. percentil je jednak 3. kvartilu. Ono što je značajno za kvantitilni način opisivanja je da se, na primer, u opsegu između 3. i 1. kvartila nalazi 50 % vrednosti koje pripadaju sredini rastućeg niza vrednosti iz skupa podataka. Na ovaj način je odbačeno po 25 % vrednosti sa oba kraja niza (najniže i najviše vrednosti). Takođe, ukoliko se želi predstaviti 90 % središnjih vrednosti (odbacuje se po 5 % vrednosti sa oba kraja niza), to se može učiniti

prikazivanjem vrednosti 5. i 95. percentila. Kao mera homogenosti skupa, često se koristi interkvartilni koeficijent (IC_{var}), koji predstavlja odnos razlike i zbira 3. i 1. kvartila.

Vremenski nizovi podataka, neretko imaju sezonski karakter, pa se mogu grupisati po mesecima, godišnjim dobima, godinama itd.

Srednja vrednost za ceo period od Y godina iznosi (Jednačina 46):

$$AS = \frac{\sum_{m=1}^{12} \sum_{y=1}^Y X_{m,y}}{12 \cdot Y} \quad (46)$$

Srednje vrednosti za pojedinačne mesece m ($m = 1, 2, \dots, 12$) iz istog perioda godina, računaju se kao (Jednačina 47).

$$AS_m = \frac{\sum_{y=1}^Y X_{m,y}}{Y} \quad (47)$$

Srednje vrednosti kvartala k se računaju kao (Jednačina 48):

$$AS_k = \frac{\sum_{m=i}^j \sum_{y=1}^Y X_{m,y}}{3 \cdot Y} \quad (48)$$

gde je $i = 1, 4, 7, 10$, a $j = 3, 6, 9, 12$, respektivno za $k = I, II, III$ i IV .

Analogno prethodnim jednačinama, srednje godišnje vrednosti glase (Jednačina 49):

$$AS_y = \frac{\sum_{m=i}^{12} X_{m,y}}{12} \quad (49)$$

Za predstavljanje ovakvih vremenskih nizova, često se koriste sezonski indeksi, koji se dele na mesečne i kvartalne. Konstruišu se tako da predstavljaju odnos srednje vrednosti pojedinih istoimenih perioda (meseca ili kvartala) izračunatih na osnovu višegodišnjih podataka (Jednačine 47 i 48) i srednje vrednosti za ceo period (Jednačina 46), čime se isključuje uticaj neregularnih kolebanja.

Mesečni sezonski indeks, za mesec m računa se po Jednačini 50,

$$SI_m = \frac{AS_m}{AS} \quad (50)$$

a kvartalni indeks kao (Jednačina 51):

$$SI_k = \frac{AS_k}{AS} \quad (51)$$

Sezonski indeksi čija je vrednost veća od 1, ukazuju na povećanu srednju vrednost ispitivanog parametra u toku određenog meseca ili kvartala u odnosu na celokupan period ispitivanja. Vrednost manja od 1 ima suprotan značaj. Može se izvršiti i normiranje sezonskih indeksa na nultu vrednost, smanjenjem njihovih vrednosti za 1.

Pri konstrukciji regresione funkcije ($f(x)$), težište tendencije je izmerena vrednost, pa se za deskripciju njenog kvaliteta najčešće koristi vrednost srednjeg apsolutnog odstupanja aproksimiranih ($f(x_i)$) od odgovarajućih izmerenih (y_i) vrednosti (MAD). On govori o tome koliko su aproksimirane vrednosti bile netačne i služi za procenu greške predviđanja. Zato, pri poređenju više različitih metoda ili parametara u svrhu prognoze, je poželjno odabrati one sa manjom vrednošću ovog parametra.

Međutim, MAD ne ukazuje na smer greške, pa se za te potrebe razmatra takozvana pristrasnost ($B - Bias$). Njena vrednost se računa kao srednje algebarsko odstupanje izmerenih i aproksimiranih vrednosti (Jednačina 52), pri čemu pozitivna vrednost ukazuje na to da formirana regresiona relacija potcenjuje izmerene vrednosti, i suprotno.

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))}{N} \quad (52)$$

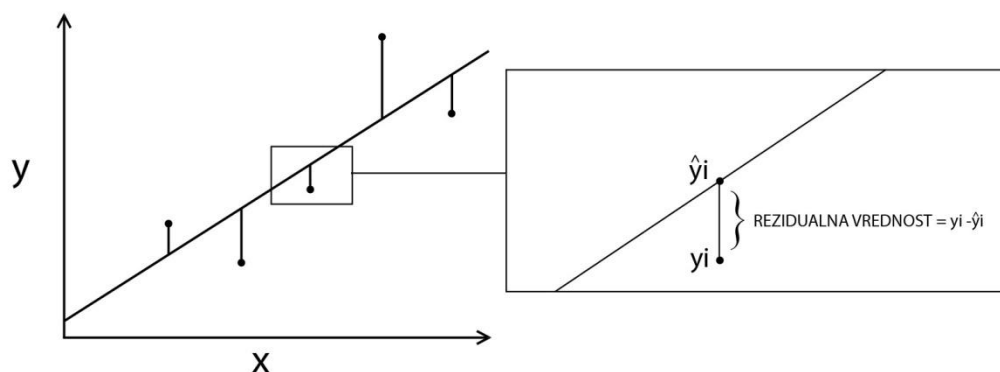
gde je ε_i algebarska devijacija (algebarska greška prognoze).

Slične uloge imaju i srednje kvadratno odstupanje ili greška ($MSD - Mean Squared Deviation$ ili $MSE - Mean Squared Error$) i standardna devijacija regresije ($SDR - Standard Deviation of Regression$), čija se vrednost računa po Jednačini 53:

$$SDR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2}{N - 2}} \quad (53)$$

10.2 Linearna regresija

Regresiona analiza je tehnika koja se koristi da bi se iskazala veza između dve promenljive. Na taj način se na osnovu izabrane vrednosti nezavisne promenljive x_i , može oceniti vrednost zavisne promenljive y_i . Linearna regresiona analiza se zasniva na pronalaženju koeficijenata (α i β) linearne jednačine $\hat{y}_i = \alpha + \beta x_i$ koja će najbolje moguće definisati linearnu vezu između dve promenljive.



Slika 39. Linerana regresija

Treba napomenuti da regresija daje najbolju moguću procenu, ali ne i tačnu vrednost zavisne promenljive, stoga će između tačne (izmerene, y_i) i procenjene (\hat{y}_i) vrednosti postojati izvesno odstupanje $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$ (rezidualna vrednost) (Slika 39). Pri linearnoj regresiji cilj je da se koeficijenti α i β odrede tako da se rezidualna vrednost minimizira.

Na osnovu rečenog i metode najmanjih kvadrata, važi sledeće (Jednačine 54–56):

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (54)$$

$$\varepsilon_i = y_i - (\alpha + \beta x_i) \quad (55)$$

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (\alpha + \beta x_i))^2 \quad (56)$$

Izjednačavanjem prvog izvoda Jednačine 56 po α sa 0, sledi (Jednačina 57):

$$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n (\hat{\alpha} + \hat{\beta}x_i) \quad (57)$$

Deljenjem obe strane jednakosti sa n , sledi (Jednačina 58):

$$\bar{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}\bar{x} \quad (58)$$

gde su \bar{x} i \bar{y} srednje vrednosti varijabli x i y .

Ako se u Jednačini 54 koeficijenti α i β zamene koeficijentima $\hat{\alpha}$ i $\hat{\beta}$ iz prethodne jednačine, dobija se (Jednačine 59–61):

$$y_i = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} + \beta x_i + \varepsilon_i \quad (59)$$

$$y_i - \bar{y} = \beta(x_i - \bar{x}) + \varepsilon_i \quad (60)$$

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y}) - \beta(x_i - \bar{x})]^2 \quad (61)$$

Izjednačavanjem prvog izvoda Jednačine 61 po β sa 0, sledi (Jednačina 62):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x}) = \hat{\beta} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (62)$$

Na osnovu Jednačina 74 i 70, koeficijenti linearne regresije $\hat{\alpha}$ i $\hat{\beta}$ se određuju kao

(Jednačine 63 i 64):

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (63)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \quad (64)$$

O tome koliko je jaka linearna veza između promenljivih x i y govori koeficijent linearne korelacije r . Razvio ju je Karl Pirson (*Karl Pearson*) 1900. godine, pa se po njemu, ovaj koeficijent naziva i Pirsonovim koeficijentom (Jednačina 65).

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] \left[n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2 \right]}} \quad (65)$$

Ovaj koeficijent može uzeti vrednosti u intervalu $-1 < r < 1$, pri čemu pozitivne vrednosti ukazuju na direktnu korelaciju, a negativne na inverznu koreliranost. O nivou koreliranosti govori njegova apsolutna vrednost, tako što je ona bliža 1, koreliranost je jača.

Kvadrat vrednosti koeficijenta korelacije (r^2) predstavlja koeficijent determinacije, na osnovu kojeg se procenjuje u kolikom procentu se varijacija zavisne promenljive y može objasniti varijacijom nezavisne promenljive x .

Međutim, visoka vrednost koeficijenta koreliranosti ne mora biti i statistički značajna. Na malom broju uzoraka, visoka vrednost ovog koeficijenta može biti posledica slučajnosti. Zato je potrebno testirati značajnost parametra r . Jedan od načina je Studentov t -test koji u obzir uzima samo broj članova skupa, N (Jednačina 66):

$$t = r \cdot \sqrt{\frac{N - 2}{1 - r^2}} \quad (66)$$

U zavisnosti od željenog nivoa poverenja (p), iz statističkih tablica se određuje kritična t -vrednost (t_c), koja određuje minimalnu t -vrednost koju treba da zadovolji koeficijent koreliranosti r da bi se sa željenom sigurnošću moglo tvrditi da između ispitanih parametara postoji linearna veza. Određivanje t_c moguće je odrediti u okviru Microsoft Office Excel 2007 pomoću funkcije “= TINV(p ;df)”, koja za zadati nivo poverenja p i broj stepeni slobode $df = N - 2$, kao rezultat vraća kritičnu t vrednost. Nivo poverenja za koji su testirani Pirsonovi koeficijenti u ovoj disertaciji je bio 95 % ($p = 0,05$). Postoji i suprotna mogućnost, da se za izračunatu t -vrednost odredi nivo poverenja (funkcija “= TDIST(t ;df;2)”). U tom slučaju, za nivo poverenja veći od 95 %, p vrednost treba da je manja od 0,05.

10.3 Furijeova analiza

Kao što je u prethodnim poglavljima navedeno, vremenske varijacije intenziteta kosmičkog zračenja i meteoroloških parametara posledice su periodičnosti intenziteta Sunčeve aktivnosti i rotacionog kretanja Zemlje. Činjenica da ${}^7\text{Be}$ nastaje u atmosferi kao posledica njene interakcije sa kosmičkim zračenjem, implicira da bi i njena koncentracija na Zemlji trebalo da ima periodičan karakter. Višegodišnjim merenjima je uočen uticaj sezonskih parametara, međutim pretpostavlja se da u frekvencijskom spektru vremenske promene ovog radioizotopa postoji i komponenta koju uzrokuje promena Sunčeve aktivnosti. Da bi se ovo ispitalo, izmerene vrednosti koncentracije ${}^7\text{Be}$ u atmosferi su podvrgnute Furijeovoj analizi.

Koncept Furijeove analize zasniva se na ideji da se svaka periodična funkcija $X(t)$ može predstaviti kao suma sinusnih i kosinusnih funkcija različitih frekvencija (Jednačina 67). Kao rezultat analize, dobija se spektar intenziteta odgovarajućih frekvencija (harmonika) sadržanih u ispitanoj periodičnoj vremenskoj promeni (periodogram).

$$X(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \cong \sum_{n=1}^N A_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (67)$$

Na osnovu adicione formule (Jednačina 68)

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cos \beta + \sin \beta \cos \alpha \quad (68)$$

i izborom koeficijenata α_n i β_n kao (Jednačine 69 i 70)

$$\alpha_n = A_n \sin \varphi_n \quad (69)$$

$$\beta_n = A_n \cos \varphi_n \quad (70)$$

funkcija $X(t)$ se može predstaviti na sledeći način (Jednačina 71)

$$X(t) = \sum_{n=1}^N (\alpha_n \cos \omega_n t + \beta_n \sin \omega_n t) \quad (71)$$

Takođe, ukoliko se koeficijenti α_n and β_n definišu Jednačinama 72 i 73 [139]:

$$\alpha_n = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N X(t) \cos \omega_n t \quad (72)$$

$$\beta_n = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N X(t) \sin \omega_n t \quad (73)$$

gde je $\omega_n = 2\pi f_n$, intenzitet harmonika f_n , a $I(f_n)$ se definiše Jednačinom 74 [139]:

$$I(f_n) = \frac{2}{N} (\alpha_n^2 + \beta_n^2), n = 1, 2, \dots, q \quad (74)$$

gde je $q = (N - 1)/2$ za neparno, odnosno $q = N/2$ za parno N , a $f_n = n/N$ predstavlja n -ti harmonik osnovne frekvencije $1/N$. Broj harmonika određen je Nikvistovim pravilom, odnosno do polovine ukupnog broja uzoraka (ta frekvencija odgovara najmanjoj identifikabilnoj talasnoj dužini).

Ako se aktivnost ${}^7\text{Be}$ predstavi kao (Jednačina 75):

$$A({}^7_4\text{Be}, t) = X(t) = \sum_{n=1}^N (\alpha_n \cos \omega_n t + \beta_n \sin \omega_n t) \quad (75)$$

intenzitet harmonika frekvencije f_n iznosi (Jednačina 76):

$$I(f_n) = \frac{2}{N} \left\{ \left[\sum_{t=1}^N (A({}^7_4\text{Be}, t) \cos(2\pi f_n t)) \right]^2 + \left[\sum_{t=1}^N (A({}^7_4\text{Be}, t) \sin(2\pi f_n t)) \right]^2 \right\} \quad (76)$$

Ako postoje izvesna ponavljanja u vremenskoj promeni aktivnosti ${}^7\text{Be}$ sa periodima koji odgovaraju frekvencijama f_{mi} , vrednosti $I(f_{mi})$ će se istaći značajnim porastom u odnosu na ostale intenzitete. Zatim se metodom višestruke linearne regresije "*Multiple Linear Regression*" odrede linearni koeficijenti α_{mi} i β_{mi} između vremenske promene koncentracije aktivnosti ${}^7\text{Be}$ i funkcija $\cos \omega_{mi} t$ i $\sin \omega_{mi} t$ ($t = 0, 1, \dots, N - 1$; N – br. uzoraka). Od statistički značajnih koeficijenata ($p < 0,05$) formira se aproksimativna funkcija (Jednačina 77):

$$X(t) = \sum_{i,j} (\alpha_{mi} \cos(\omega_{mi} t) + \beta_{mi} \sin(\omega_{mi} t)) \quad (77)$$

11 REZULTATI I DISKUSIJA

11.1 Vremenska distribucija koncentracije ^7Be

U ovom poglavlju je dat detaljan statistički opis vremenske distribucije izmerenih koncentracija aktivnosti u uzorcima vazduha (čestice aerosola) i ukupnog (suvog i mokrog) depozita na teritoriji Beograda, u periodu 1995–2016. godine. Treba napomenuti da zbog načina izražavanja rezultata merenja, izmerene vrednosti koncentracija aktivnosti u uzorcima vazduha približno odgovaraju sumi prosečnih dnevnih koncentracija aktivnosti, dok su za uzorke depozita izmerene vrednosti bliske prosečnom dnevnom fluksu aktivnosti izotopa ^7Be .

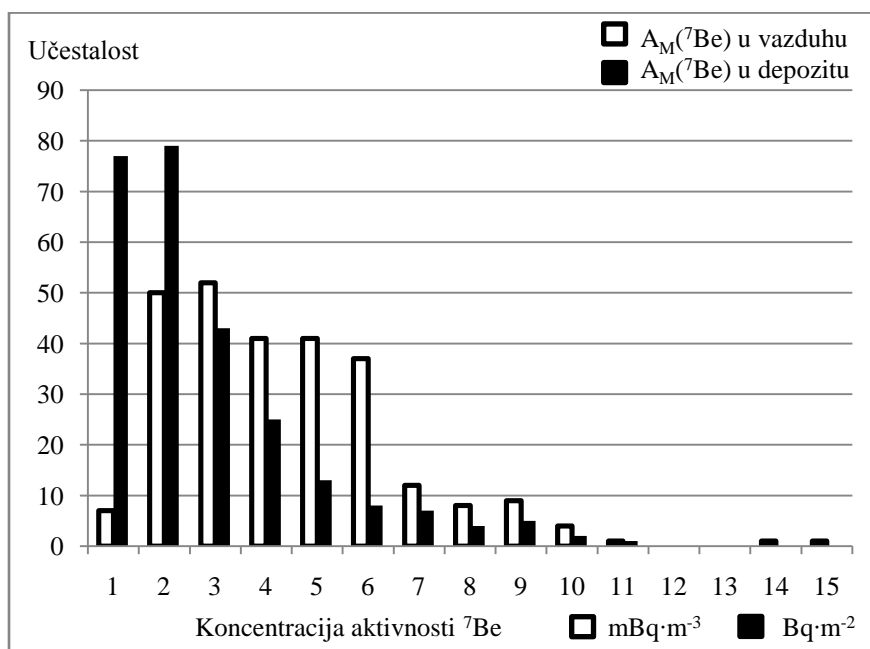
Na osnovu lokacijskih parametara, čiji je prikaz dat u Tabeli 7, uočva se da su izmerene koncentracije aktivnosti ^7Be u vazduhu varirale od $0,61 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (januar 2000.) do $14,20 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ (jun 2016.), sa medijanom od $3,69 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ i gotovo jednakom otežinjnom srednjom vrednošću od $3,68 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Raspon izmerenih vrednosti odgovara vrednostima izmerenim u ostalim delovima Evrope i sveta [23, 84, 85, 100, 116, 122, 125, 140–151].

Tabela 7. Koncentracija aktivnosti ^7Be u periodu 1995–2016.

<i>Vrsta uzorka</i>	<i>Jedinica mere</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Srednja vrednost (AS)</i>	<i>Otežinjena srednja vrednost (AS_w)</i>	<i>Medijana (Me)</i>	<i>Moda (Mo)</i>
<i>Vazduh</i>	$\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$	0,61	14,20	$3,96 \pm 0,24$	3,68	3,69	2,0
<i>Depozit</i>	$\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	0,05	10,40	$2,30 \pm 0,14$	2,08	1,71	2,0

Koncentracija aktivnosti ^7Be u depozitu tokom ovog perioda kretala se od $0,05 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ (decembar 2013.) do $10,40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ (jul 2013.), sa medijanom od $1,71 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, dok je otežinjena srednja vrednost iznosila $2,08 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$. Sličan opseg izmernih vrednosti pronađen je i u literaturi iz drugih delova sveta [83, 91, 97, 120, 143, 140, 152]. Sa Slike 40

se vidi da se najveći broj izmerenih koncentracija aktivnosti kretao između (2–3) $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ u uzorcima vazduha i (1–2) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ u depozitu. Najfrekventnija vrednost koncentracije aktivnosti u oba medujuma imala je vrednost 2 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, odnosno 2 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$. Slične vrednosti (2–4) $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ su najfrekventnije i u Španiji [146], dok su u Češkoj i Švedskoj zabeležene nešto više vrednosti (4–7) $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ [125].



Slika 40. Učestalost vrednosti koncentracija aktivnosti ⁷Be u prizemnom sloju atmosfere

Poređenjem medijana i moda sa vrednostima aritmetičkih sredina, koje su redom iznosile $3,96 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $2,30 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ za uzorke vazduha i depozita, zaključuje se da su koncentracije ⁷Be u prizemnom sloju atmosfere u većem broju slučajeva nešto niže od prosečnih (pozitivna asimetrija). U ispitanom periodu, i otežinjene srednje vrednosti su bile niže od aritmetičkih sredina. Vrednosti aritmetičkih sredina na teritoriji Evrope pokazuju slične prosečne koncentracije [91, 101, 118, 141, 145, 148, 152].

Varijabilnost koncentracije izotopa ⁷Be bila je nešto veća u uzorcima depozita u odnosu na uzorke vazduha. Naime, njihove standardne devijacije u ovom periodu su iznosile $\sigma_{\text{aer}} = 2,25 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $\sigma_{\text{dep}} = 2,02 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, pa su njihovi odgovarajući koeficijenti varijacije bili $C_{\text{var,aer}} = 57 \%$, odnosno $C_{\text{var,dep}} = 88 \%$ (Tabela 8).

Tabela 8. Koncentracija aktivnosti ^7Be u periodu 1995–2016.

<i>Vrsta uzorka</i>	<i>Standardna devijacija (σ)</i>	<i>Koeficijent varijacije (C_{var})</i>	<i>Interkvartilni interval</i>	<i>P_5-P_{95}</i>	<i>Koeficijent kvartilne devijacije (IC_{var})</i>	<i>$Z > 3$</i>
<i>Vazduh</i>	2,25 $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$	57 %	(2,15–5,20) $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$	(1,2–8,27) $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$	42 %	4
<i>Depozit</i>	2,02 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	88 %	(0,84–2,99) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	(0,26–6,65) $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$	56 %	7

Iako su interkvartilni interval i raspon između 95. i 5. percentila uži u slučaju depozitnih uzoraka, koeficijent interkvartilne devijacije pokazuje da je veća homogenost izmerenih vrednosti izražena u uzorcima vazduha. Takođe, u uzorcima depozita je postojalo i više ekstremnih vrednosti ($|Z| > 3$).

Na osnovu specifične aktivnosti ^7Be , $A_S(^7\text{Be}) = 1,3\cdot 10^{16} \text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ (Jednačina 4) i izmerenih vrednosti, u Tabeli 9 su prikazane odgovarajuće koncentracije ovog izotopa u vazduhu i depozitu.

Tabela 9. Koncentracija ^7Be u vazduhu i depozitu u periodu 1995–2016.

<i>Period (1995–2016.)</i>	<i>Koncentracija ^7Be u vazduhu ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)</i>	<i>Koncentracija ^7Be u depozitu ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)</i>
<i>Interval vrednosti</i>	$(0,5-10,9)\cdot 10^{-19}$	$(0,04-8,00)\cdot 10^{-16}$
<i>Srednja vrednost</i>	$3,1\cdot 10^{-19}$	$1,8\cdot 10^{-16}$
<i>Otežinjena vrednost</i>	$2,8\cdot 10^{-19}$	$1,1\cdot 10^{-16}$

11.2 Inhalaciona doza

Na osnovu maksimalne (za decu mlađu od godinu dana) očekivane efektivne doze po jediničnom unošenju vazduha u organizam ($e(g)_{7\text{Be,inh}} = 2,8 \cdot 10^{-10} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$) [5], u Tabeli 10 su prikazane i odgovarajuće procenjene efektivne godišnje doze primljene inhalacijom ^7Be u periodu 1995–2016. Dobijene vrednosti su daleko ispod dozvoljene efektivne doze od $1 \text{ mSv} \cdot \text{god}^{-1}$ [5], što znači da prisutna koncentracija ^7Be u vazduhu nema veliki doprinos u radijacionom opterećenju ljudskog organizma.

Tabela 10. Procenjene efektivne doze primljene inhalacijom ^7Be u periodu 1995–2016.

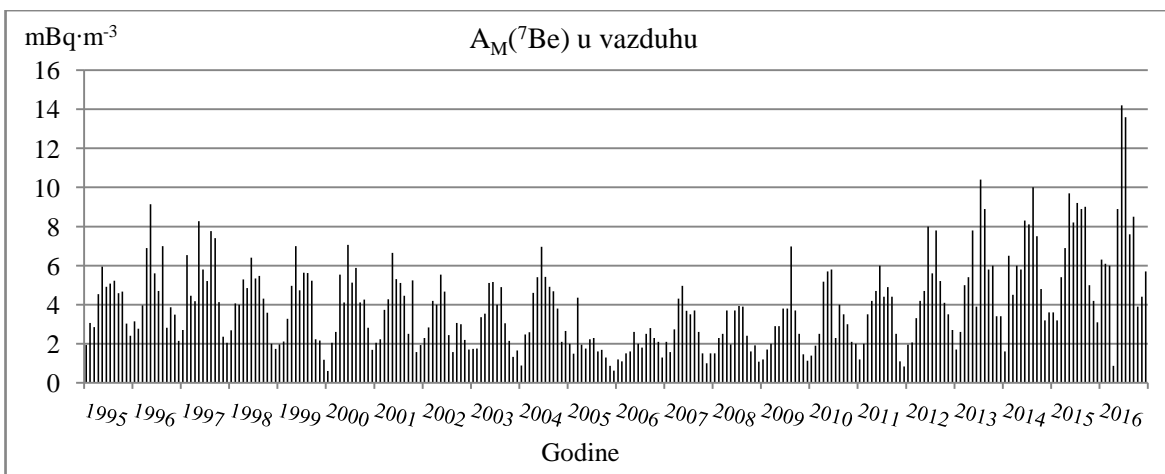
<i>Period (1995–2016.)</i>	<i>Doza u vazduhu (mSv·god⁻¹)</i>
<i>Interval vrednosti</i>	$(3,9–91,4) \cdot 10^{-8}$
<i>Srednja vrednost</i>	$26,3 \cdot 10^{-8}$
<i>Otežinjena vrednost</i>	$23,7 \cdot 10^{-8}$

11.3 Sezonski karakter koncentracije ^7Be

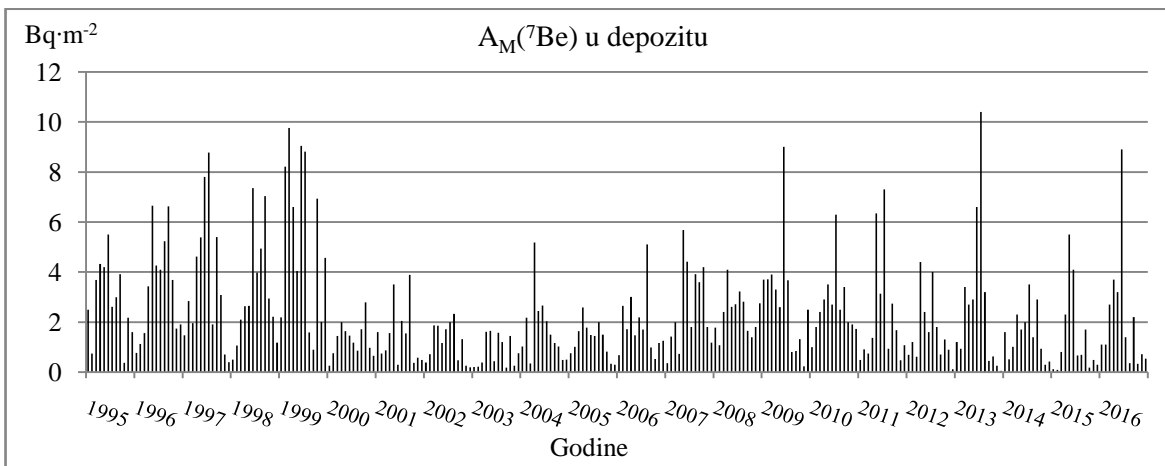
11.3.1 Grupisanje po mesecima i kvartalima

Na vremenskim raspodelama koncentracije ^7Be u vazduhu i depozitu (Slike 41 i 42, respektivno), jasno se uočava sezonska periodičnost. Grupisanjem izmerenih vrednosti po mesecima, iz Tabele 11 se uočava da najveću prosečnu koncentraciju ^7Be dostiže u junu u oba medijuma, a najnižu u januaru (vazduh) i novembru (depozit) [153]. Meseci sa najvećim koeficijentom varijacije su januar i februar, dok nasuprot njima, najniže koeficijente varijacije imaju mart i april.

Na osnovu vrednosti parametara prikazanih u Tabeli 11, može se izračunati da su meseci sa najvećom vrednošću standardne devijacije jun i jul, dok njena najniža vrednost pripada grupi uzoraka prikupljenih tokom meseca novembra.



Slika 41. Koncentracija aktivnosti ^7Be u vazduhu



Slika 42. Koncentracija aktivnosti ^7Be u depozitu

Ukoliko se posmatraju varijabiliteti različitih matriksa uzoraka, standardene devijacije su približno ujednačene. U odnosu na vazduh, depozit ima veće koeficijente varijacija. Raspon koeficijenata varijacije, takođe je znatno veći u uzorcima depozita, gde iznosi 0,62, dok je u uzorcima vazduha svega 0,25. Ovo bi moglo biti posledica varijacije količine padavina, koja takođe, u odnosu na ispitane meteorološke parametre ima najviše vrednosti ovog koeficijenta.

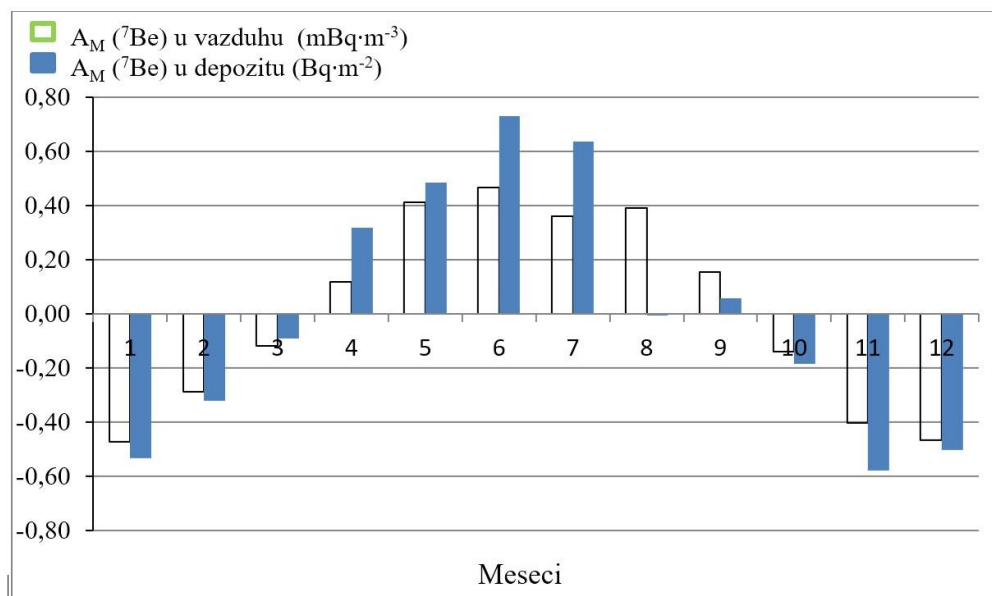
Tabela 11. Srednje vrednosti i varijabilnost koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha i depozita, grupisanih po mesecima

<i>Matriks:</i>	<i>Vazduh</i>		<i>Depozit</i>	
<i>Mesec</i>	<i>Srednja vrednost</i> ($AS_{m,vaz}$)	<i>Koeficijent varijacije</i> ($C_{var,vaz}$)	<i>Srednja vrednost</i> ($AS_{m,dep}$)	<i>Koeficijent varijacije</i> ($C_{var,dep}$)
<i>Januar</i>	$2,16 \pm 0,46$	$0,57$	$1,07 \pm 0,23$	$0,79$
<i>Februar</i>	$2,92 \pm 0,62$	$0,56$	$1,57 \pm 0,33$	$1,08$
<i>Mart</i>	$3,61 \pm 0,77$	$0,32$	$2,10 \pm 0,45$	$0,92$
<i>April</i>	$4,58 \pm 0,98$	$0,35$	$3,04 \pm 0,65$	$0,46$
<i>Maj</i>	$5,79 \pm 1,23$	$0,40$	$3,43 \pm 0,73$	$0,50$
<i>Jun</i>	$6,01 \pm 1,28$	$0,45$	$4,00 \pm 0,85$	$0,71$
<i>Jul</i>	$5,58 \pm 1,19$	$0,53$	$3,78 \pm 0,81$	$0,75$
<i>Avgust</i>	$5,70 \pm 1,21$	$0,41$	$2,29 \pm 0,49$	$0,64$
<i>Septembar</i>	$4,73 \pm 1,01$	$0,46$	$2,44 \pm 0,52$	$0,80$
<i>Oktobar</i>	$3,53 \pm 0,75$	$0,38$	$1,88 \pm 0,40$	$0,91$
<i>Novembar</i>	$2,45 \pm 0,52$	$0,42$	$0,97 \pm 0,21$	$0,73$
<i>Decembar</i>	$2,19 \pm 0,47$	$0,54$	$1,15 \pm 0,24$	$0,97$

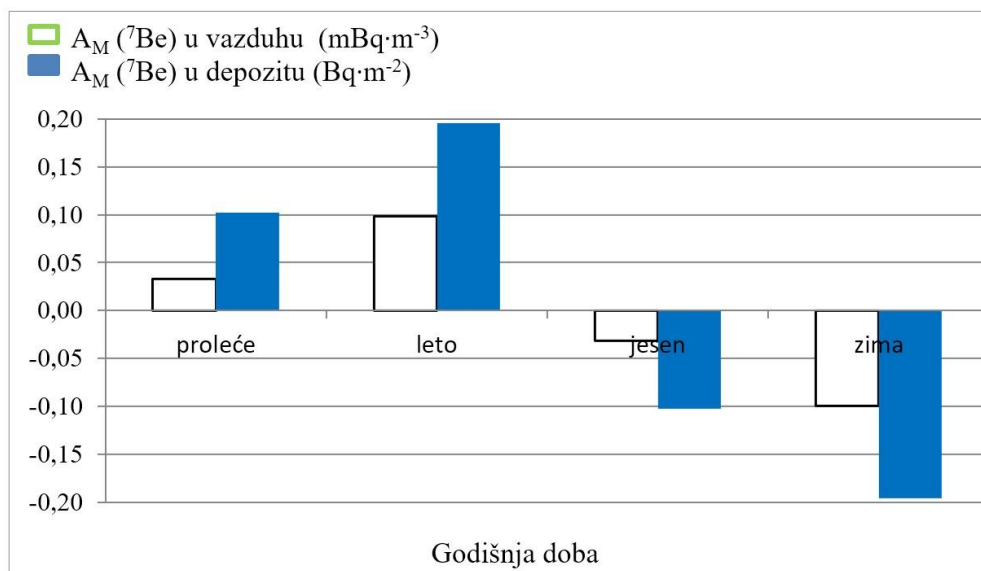
Posmatranjem mesečnih i kvartalnih indeksa koncentracije ^7Be , sa Slika 43 i 44, se vidi da srednju vrednost cele populacije izmerenih $A_M(^7\text{Be})$ najviše formiraju prolećne i jesenje vrednosti, dok su najveća odstupanja tokom letnjeg i zimskog perioda, kada $A_M(^7\text{Be})$ dostiže svoje maksimume i minimume, respektivno. Slično ponašanje je uočeno i u drugim delovima Evrope, gde se maksimumi koncentracije javljaju u letnjim, a minimumi u zimskim mesecima [85, 122, 116, 125, 140–142, 154].

Sa Slike 43 se može videti i da do najvećeg porasta koncentracije ^7Be dolazi između marta i aprila, u uzorcima depozita, odnosno aprila i maja u uzorcima vazduha. Do najvećeg pada koncentracije u uzorcima depozita, dolazi između jula i avgusta, a nešto kasnije (od septembra do oktobra) i u uzorcima vazduha. Uočava se da promena koncentracije u depozitu prednjači u odnosu na koncentraciju u vazduhu, što ide u prilog

tvrdnjama da su padavine glavni transportni put izotopa ^7Be iz viših u niže slojeve atmosfere. Kako su sezonski indeksi u većini slučajeva viši za uzorke depozita, i na ovaj način se može potvrditi da je u njima veća i varijabilnost koncentracije ovog izotopa.



Slika 43. Normirani mesečni indeksi koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha (prazni stubići) i depozita (puni stubići)



Slika 44. Normirani kvartalni indeksi koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha (prazni stubići) i depozita (puni stubići)

11.3.2 Grupisanje po godinama

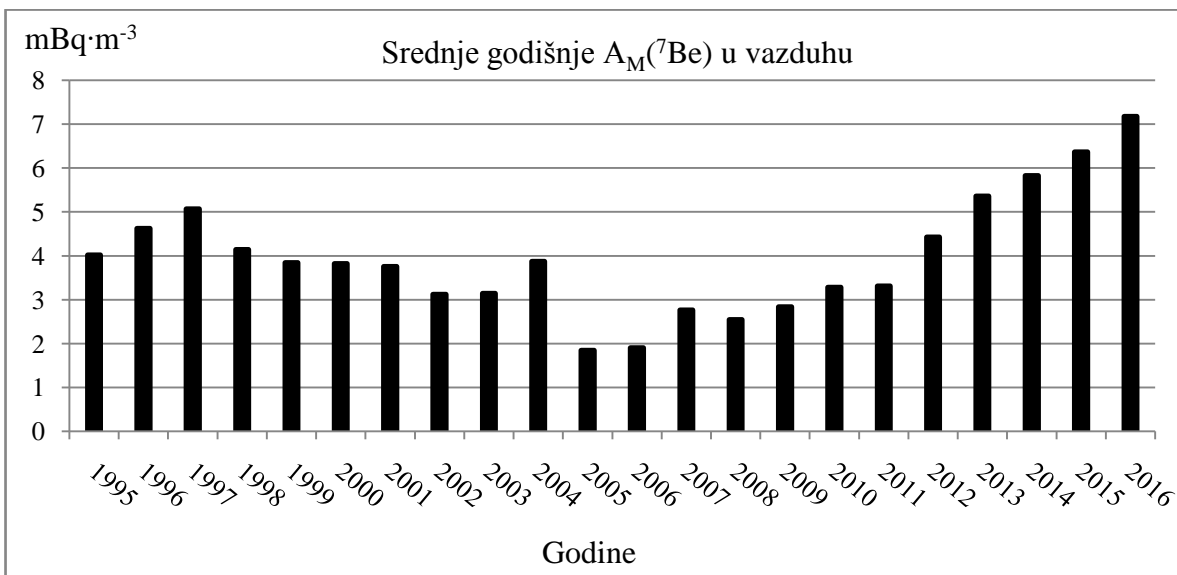
Na osnovu deskriptivnih statističkih parametara varijabiliteta izmerenih koncentracija ^7Be , grupisanih po mesecima, uočava se da nivo koncentracije ^7Be , za isti period, varira od godine do godine. Shodno tome da se ove promene odražavaju i na promenu prosečnih i medijalnih godišnjih vrednosti koncentracija, razmatrane su i promene centralnih tendencija i varijabilnost koncentracije tokom pojedinačnih godina. Radi lakšeg razmatranja, na Slikama 45 i 46 su prikazane promene srednjih godišnjih vrednosti koncentracije aktivnosti izotopa ^7Be u uzorcima vazduha i depozita, respektivno.

U uzorcima vazduha, prvi maksimum srednje godišnje koncentracije ^7Be je imao 1997. godine, nakon čega (u periodu 2005–2006. god.) ulazi u fazu svog minimuma ($1,9 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$). Od tada, koncentracija ovog izotopa konstantno raste i još 2013. godine ($7,2 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$) nadmašuje prethodni maksimum iz 1997. ($5,1 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$).

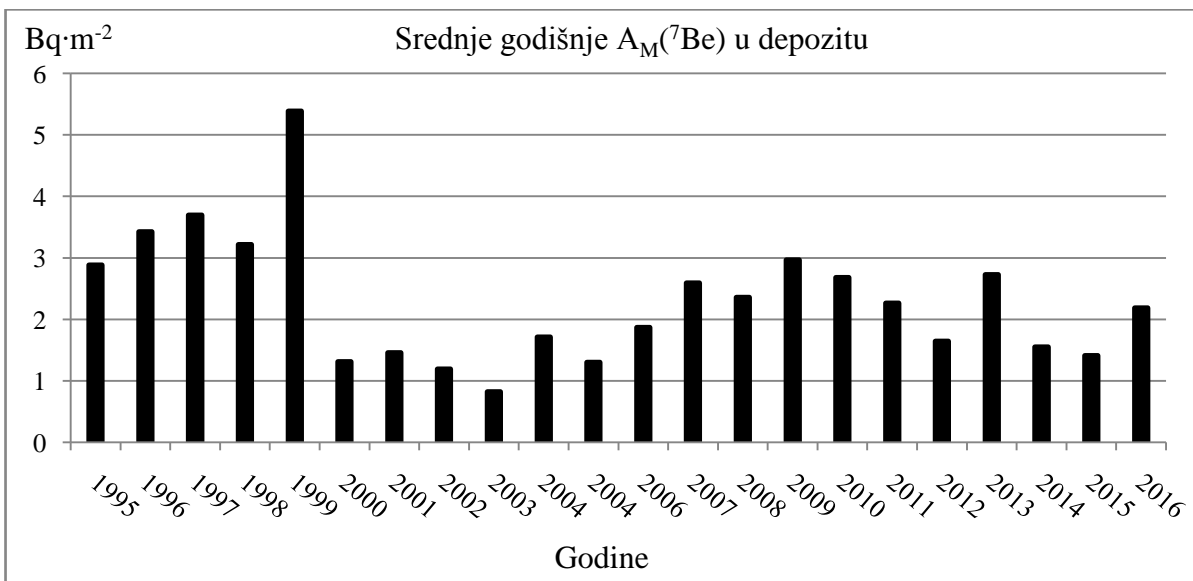
Srednje godišnje vrednosti koncentracije ^7Be u uzorcima depozita imaju nešto drugačiji tok. Pre svega, uočava se lokalni ekstremum 1999. godine ($5,4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$), za koji se trenutno nema racionalno objašnjenje. Ukoliko se on izuzme iz razmatranja, vidljiva su dva maksimuma, 1997. i 2009. godine ($3,7 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ i $3,0 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, respektivno), kao i dva minimuma u periodima oko 2003. i 2015. godine ($0,8 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ i $1,4 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, respektivno).

Sa prikazanih vremenskih distribucija se stiče utisak da promena godišnjih koncentracija izotopa ^7Be ima izvestan periodičan karakter. Da bi se ispitala ova pretpostavka, kao i utvrdili potencijalni periodi promena, Furijeovom analizom se iz vremenske raspodele koncentracije ovog radionuklida prelazi u njen frekventni domen (Poglavlje 10.3).

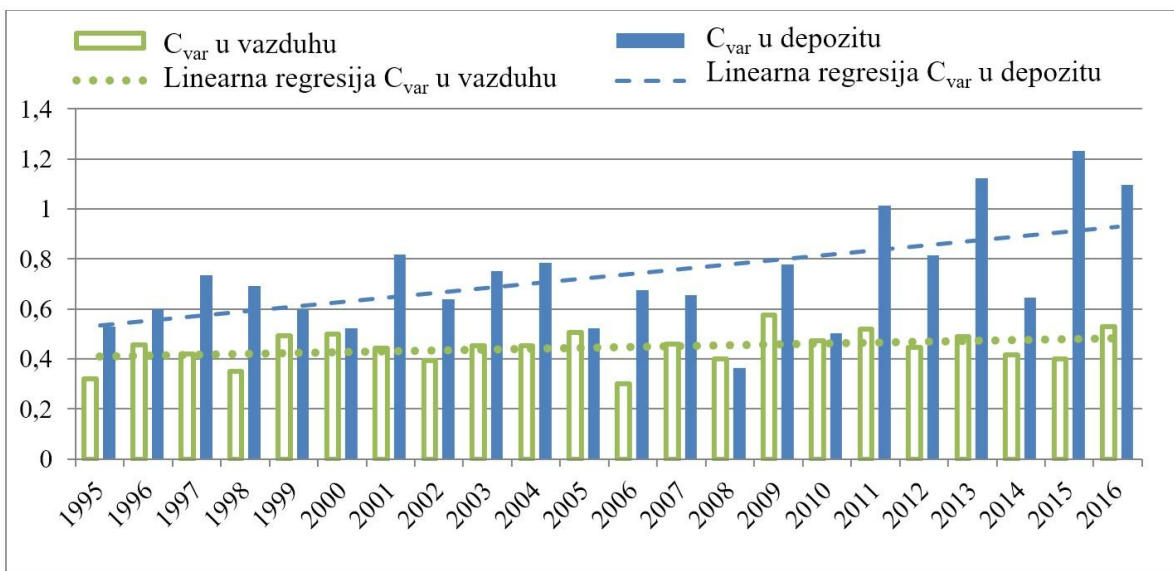
Promena varijabilnosti, opisana koeficijentima varijacije za svaku godinu, prikazana je na Slici 47. Uočava se da je varijabilnost koncentracije u uzorcima vazduha relativno konstantna, uz blagi porast tokom godina, dok su u uzorcima depozita razlike vrlo izraženije i sa znatno većom tendencijom porasta.



Slika 45. Srednje godišnje vrednosti koncentracija aktivnosti ^7Be u vazduhu tokom perioda 1995–2016. godine.



Slika 46. Srednje godišnje vrednosti koncentracija aktivnosti ^7Be u depozitu tokom perioda 1995–2016. godine



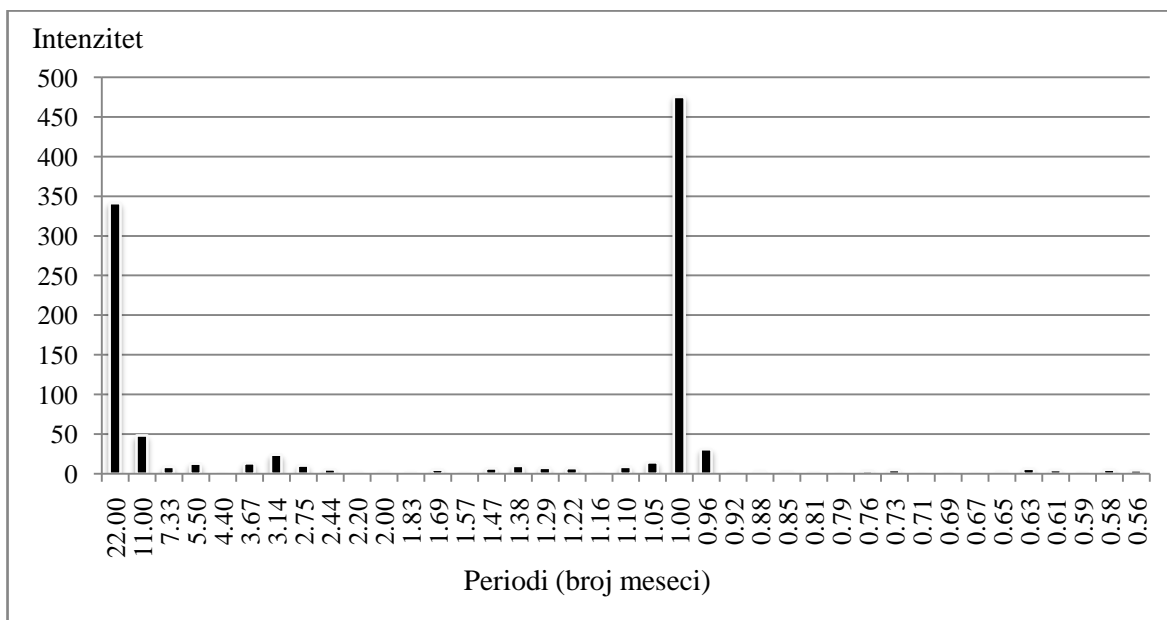
Slika 47. Godišnji koeficijenti varijacije koncentracije ^7Be u vazduhu (prazni stubići) i depozita (puni stubići)

11.4 Furijeova analiza

11.4.1 Perodogram koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha

Na periodogramu koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha (Slika 48) se ističu dve frekvencije (harmonika). Najintenzivnija komponenta frekvencijskog spektra odgovara periodu rotacije Zemlje oko Sunca (1 godina). Sledeća komponenta (po intenzitetu) ukazuje na to da u vremenskoj promeni aktivnosti ^7Be u vazduhu postoji izvesno ponavljanje sa periodom od 22 godine, koji se poklapa sa periodom promene magnetne aktivnosti Sunca [155]. Takođe, sa značajno manjim intenzitetom, uočljiv je i period promene intenziteta Sunčeve aktivnosti od 11 godina. U pronađenoj literaturi, u kojoj se na sličan način pristupilo određivanju periodičnosti koncentracije ^7Be u atmosferi, uvek se isticao period od 1 godine. Ostali harmonici su varirali od 6 meseci [146], preko 20–30 meseci, do 11 godina [147]. Sva ova istraživanja su izvršena na rezultatima merenja kraćim od ciklusa Sunčevog magnetnog polja.

S obzirom na to da su varijacije kosmičkog zračenja tokom godine vrlo slabe, pretpostavlja se da je jednogodišnji period posledica uticaja meteoroloških parametara, dok bi se uticaj promene orijentacije magnetnog polja Sunca mogao pripisati efektu drifta koji se ispoljava kroz promenu oblika krive intenziteta kosmičkog zračenja na Zemlji tokom različitih polariteta Sunčevog magnetnog polja (Poglavlje 4).

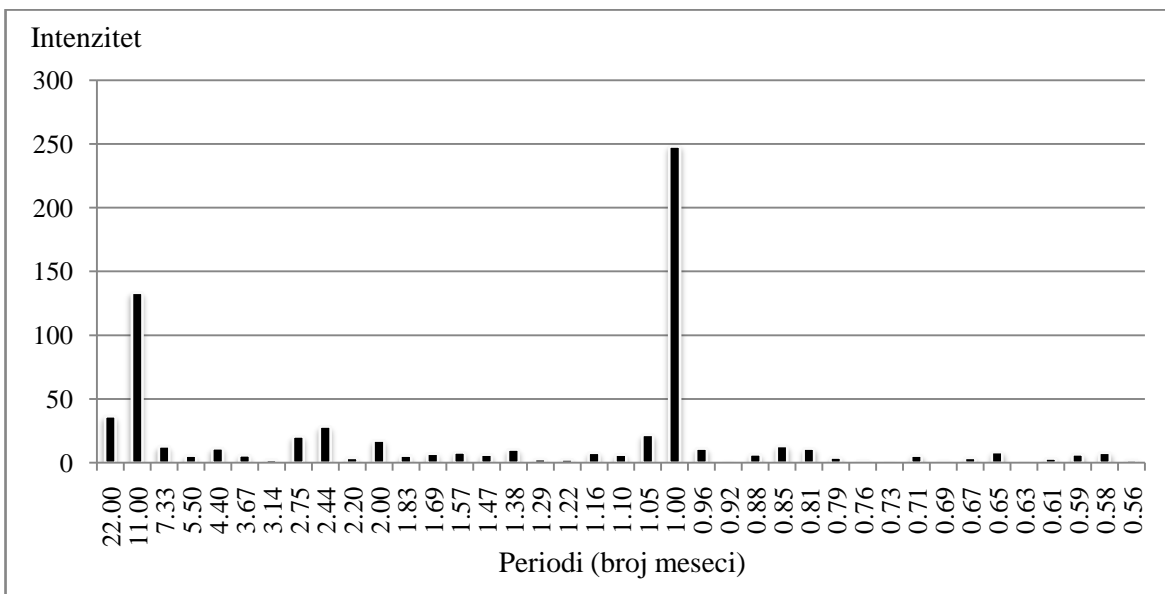


Slika 48. Perodogram koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha

11.4.2 Perodogram koncentracije ^7Be u uzorcima depozita

U frekvencijskom spektru koncentracije ^7Be u uzorcima depozita (Slika 49) takođe dominiraju dva harmonika. Kao i u slučaju uzoraka vazduha, najintenzivniji period odgovara periodu rotacije Zemlje oko Sunca. Međutim, sledći po intenzitetu harmonik odgovara periodu promene intenziteta aktivnosti Sunca (Poglavlje 3), dok je 22-godišnja modulacija uočljivija sa značajno manjim intenzitetom [155].

Na isti način, kao i u vazduhu, može se pretpostaviti da jednogodišnja promena potiče od promene meteoroloških uslova, a da je period od 11 godina projekcija uticaja promene aktivnosti Sunca na intenzitet kosmičkog zračenja.



Slika 49. Perodogram koncentracije ^7Be u uzorcima depozita

Da bi se ispitao nivo povezanosti pretpostavljenih uzročnika modulisanosti sa vremenskom promenom koncentracije, izračunati su Pirsonovi koeficijenti njihove međusobne korelacije.

11.5 Koreliranost koncentracije ^7Be sa mogućim uzročnicima njene promene

11.5.1 Korelacija sa meteorološkim parametrima

Koreliranosti mesečnih vrednosti koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere sa meteorološkim parametrima poput: srednje dnevne temperature vazduha, insolacije, vazdušnog pritiska, oblačnosti, vlažnosti vazduha i količine padavina, čije su vrednosti preuzete sa sajta Republičkog hidrometeorološkog zavoda [156], predstavljene su Pirsonovim koeficijentima, prikazanim u Tabeli 12 [155].

Tabela 12. Koreliranost mesečnih vrednosti koncentracije ^7Be u vazduhu i depozitu sa meteorološkim parametrima

<i>Pirsonovi koeficijenti, r</i>	<i>Temperatura vazduha ($^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>Insolacija (h)</i>	<i>Vazdušni pritisak (mb)</i>	<i>Oblačnost (0–8)</i>	<i>Relativna vlažnost vazduha (%)</i>	<i>Količina padavina (mm)</i>
<i>^7Be u vazduhu</i>	0,59	0,60	-0,52	-0,26	-0,50	0,06
<i>^7Be u depozitu</i>	0,35	0,32	-0,15	-0,08	-0,18	0,26

Druga ispitivanja koreliranosti koncentracije ^7Be sa meteorološkim parametrima uglavnom pokazuju slične rezultate. Pirsonov koeficijent koreliranosti koncentracije ^7Be u vazduhu sa temperaturom iznosio je 0,5 u Španiji [145], od 0,6 do 0,97 u Grčkoj [140, 148], od 0,4 do 0,8 u Poljskoj [122]. U Grčkoj i Poljskoj nije ustanovljena značajna koreliranost sa vazdušnim pritiskom, dok je koreliranost sa vlažnošću vazduha od -0,45, preko -0,65 [140, 148], do -0,88 [122] pokazala dobro slaganje sa rezultatima ovog istraživanja na teritoriji Srbije [155]. Interesantno je da je u Španiji dobijen gotovo identičan nivo koreliranosti od 0,44 kao i u Grčkoj, ali potpuno suprotne orijentacije. Takođe, odsustvo koreliranosti koncentracije ^7Be u vazduhu sa količinom padavina pokazalo se i na Tajvanu [149] i u Grčkoj [148]. U Španiji je dobijena slaba negativna korelacija od svega -0,21 [145], dok je u Poljskoj varirala od -0,014 do čak 0,22 [122].

Koreliranost sa pojedinim parametrima se najčešće pripisuje stabilnosti atmosfere. Ona je tokom hladnijeg perioda mirnija, dok pri visokim temperaturama dolazi do većeg vertikalnog mešanja vazdušnih masa, pri čemu ^7Be lakše migrira iz stratosfere u troposferu.

Nataložena količina ^7Be u depozitu ne pokazuje jaču povezanost ni sa jednim ispitanim meteorološkim parametrom, ali je u najvećoj meri izražena veza sa temperaturom (0,35) i insolacijom (0,32). Kao i u slučaju uzoraka vazduha, negativna koreliranost je dobijena sa vazdušnim pritiskom i vlažnošću vazduha. Sa oblačnošću nije dobijena statistički značajna vrednost korelacionog koeficijenta ($p > 0,05$). Jedini ispitani meteorološki parametar, koji je pokazao veću koreliranost sa koncentracijom ^7Be u

depozitu (0,26) nego u vazduhu (0,06) je količina padavina. Njena vrednost, iako je neočekivano niska, odgovara rezultatima drugih istraživanja [96, 149]. Značajna pozitivna korelacija među ovim parametrima dobijena je u Australiji, 0,85 [143]. U Kini se došlo do jedne kontradiktornosti, gde se pri prelasku sa mesečnih na godišnje vrednosti Pirsonov koeficijent promenio sa 0,7 na -0,9 [144].

Vrednosti odgovarajućih koeficijenata determinacije, prikazane u Tabeli 13, pokazuju da se od ispitanih parametara, promena mesečnih koncentracija ^7Be u prizemnom sloju atmosfere u najvećoj meri može opisati varijacijom insolacije (36 %).

Tabela 13. Određenost mesečnih vrednosti koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere meteorološkim parametrima

<i>Koeficijenti determinacije, r^2 (%)</i>	<i>Srednja dnevna temperatura (°C)</i>	<i>Insolacija (h)</i>	<i>Vazdušni pritisak (mb)</i>	<i>Oblačnost (0–8)</i>	<i>Relativna vlažnost vazduha (%)</i>	<i>Količina padavina (mm)</i>
<i>^7Be u vazduhu</i>	35,81	36,00	27,42	6,73	25,12	0,44
<i>^7Be u depozitu</i>	12,25	10,24	2,23	0,59	3,36	4,49

Međutim, značajno veća koreliranost između koncentracije ^7Be i pomenutih meteoroloških parametara se uočava ukoliko se posmatraju promene aritmetičkih sredina vrednosti grupisanih po mesecima. Vrednosti Pirsonovih koeficijenata (prikazanih u Tabeli 14) pokazuju jaku povezanost koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere i meteoroloških parametara. Na osnovu odgovarajućih koeficijenata determinacije (Tabela 15), može se reći da čak 95 % varijacije koncentracije ^7Be u vazduhu tokom različitih meseci može da se objasni varijacijom insolacije, kao i 79 % promene koncentracije ^7Be u depozitu.

Tabela 14. Koreliranost vrednosti koncentracija ^7Be u vazduhu i depozitu sa meteorološkim parametrima, grupisanim po mesecima

<i>Pirsonovi koeficijenti, r</i>	<i>Srednja dnevna temperatura ($^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>Insolacija (h)</i>	<i>Vazdušni pritisak (mb)</i>	<i>Oblačnost (0–8)</i>	<i>Relativna vlažnost vazduha (%)</i>	<i>Količina padavina (mm)</i>
<i>^7Be u vazduhu</i>	0,94	0,98	-0,91	-0,84	-0,90	0,84
<i>^7Be u depozitu</i>	0,82	0,89	-0,87	-0,66	-0,85	0,66

Tabela 15. Determinisanost vrednosti koncentracija ^7Be u prizemnom sloju atmosfere meteorološkim parametrima, grupisanim po mesecima

<i>Koeficijenti determinacije, r^2 (%)</i>	<i>Srednja dnevna temperatura ($^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>Insolacija (h)</i>	<i>Vazdušni pritisak (mb)</i>	<i>Oblačnost (0–8)</i>	<i>Relativna vlažnost vazduha (%)</i>	<i>Količina padavina (mm)</i>
<i>^7Be u vazduhu</i>	89,29	95,07	82,26	70,12	80,21	69,88
<i>^7Be u depozitu</i>	66,94	79,02	76,22	43,64	72,93	43,22

Korelacija aritmetičkih sredina vrednosti parametara grupisanih po godinama, imala je statistički značajnu vrednost ($p < 0,05$) samo u slučaju antikoreliranosti koncentracije ^7Be u vazduhu i vazdušnog pritiska (-0,74). Na osnovu dobijenih rezultata se može zaključiti da meteorološki uslovi u najvećoj meri utiču na sezonske varijacije koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere, dok za varijacije na dužim vremenskim skalama uzročnike treba potražiti u drugim parametrima. Do istog zaključka se došlo i u istraživanju sprovedenom u Španiji [145]. U narednim podpoglavljima biće ispitano u kojoj meri varijacije kosmičkog zračenja i Sunčeve aktivnosti utiču na promenu koncentracije izotopa ^7Be u prizemnom sloju atmosfere.

11.5.2 Koreliranost sa intenzitetom kosmičkog zračenja

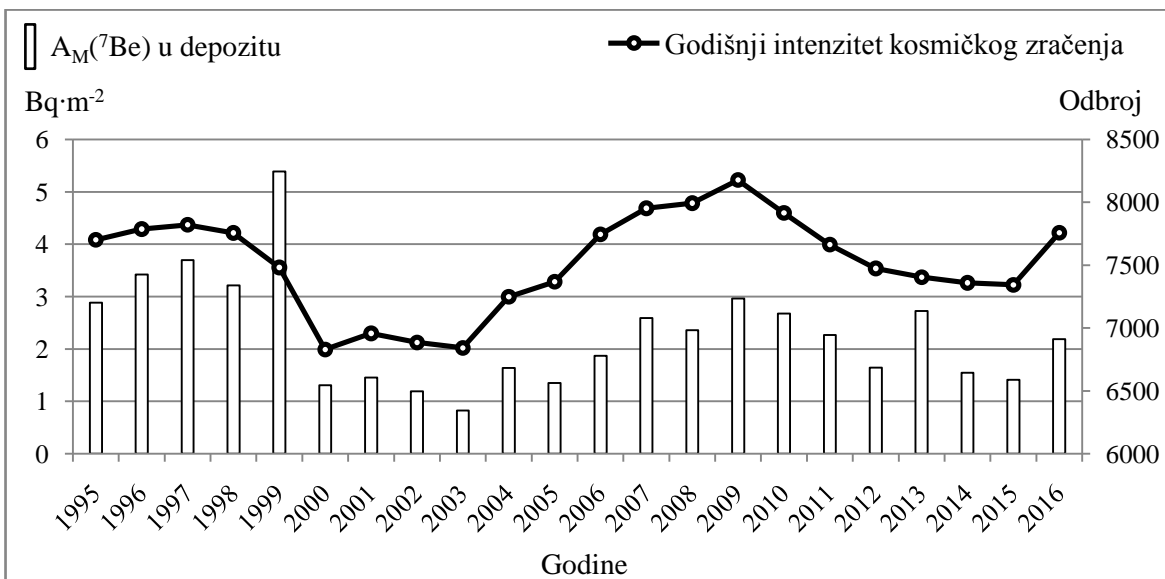
Kako je proizvodnja kosmogena izotopa u Zemljinj atmosferi direktna posledica prisustva kosmičkog zračenja, ispitan je nivo koreliranosti varijacije intenziteta kosmičkog zračenja sa promenom koncentracije ^7Be .

Jedan od detektora površinskog zračenja (neutronske monitor “Standard 18-NM-64”) nalazi se u Rusiji, stanica “Apatity” (N: 67,57°; E: 33,39°), na 181 m nadmorske visine, sa rigidnošću od 0,65 GV. Ona od maja 1969. godine kontinualno beleži podatke na svakih sat vremena, a od jula 2000. i sa periodom od svega 1 minut [157].

Određivanjem koeficijenta korelacije i t-testa između pomenutih parametara, može se reći da statistički značajna ($p < 0,05$) linearna veza varijacije intenziteta kosmičkog zračenja postoji samo sa koncentracijom ^7Be u uzorcima depozita. Ovi rezultati nisu u saglasnosti sa istraživanjima sprovedenim na teritorijama Švedske, Češke i Francuske, gde je između ^7Be u vazduhu i intenziteta kosmičkog zračenja dobijena koreliranost od čak 0,71 [125].

Poređenjem mesečnih vrednosti ovih parametara, dobija se slaba koreliranost od $r = 0,29$, kojom se može objasniti svega 8 % varijacije mesečnih vrednosti koncentracija ^7Be . Primetno jača koreliranost se ostvaruje poređenjem godišnjih vrednosti (Slika 50), pri čemu ona iznosi 0,56 i ukazuje na to da modulisanost kosmičkog zračenja može objasniti 33 % varijacije godišnjih vrednosti koncentracije ^7Be u depozitu. Najslabija i statistički neznačajna koreliranost se ispostavila između vrednosti ovih parametara grupisanih po mesecima.

Uzimanjem u obzir sva tri koeficijenta determinacije, može se reći da fluktuacije u energetskom delu kosmičkog zračenja koji je podložan modulaciji usled promene Sunčeve aktivnosti utiču samo na godišnje varijacije koncentracije ^7Be u depozitu, dok na mesečne vrednosti nemaju značajniji uticaj.



Slika 50. Vremenske distribucije godišnjih vrednosti koncentracije ^7Be u depozitu i intenziteta kosmičkog zračenja

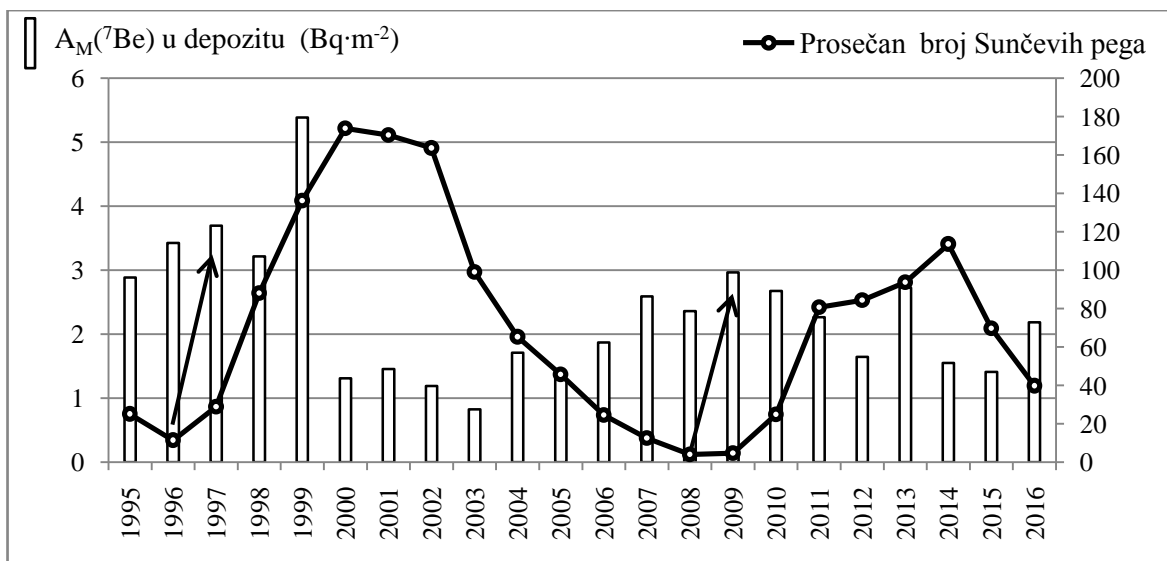
11.5.3 Koreliranost sa brojem Sunčevih pega

Za promenu intenziteta kosmičkog zračenja na Zemlji u najvećoj meri je odgovorno Sunčevo magnetno polje. Korišćenjem broja Sunčevih pega kao trasera za praćenje promene apsolutne vrednosti intenziteta magnetnog polja (aktivnost) Sunca, dostupnih na internet stranici Svetskog centra podataka o broju Sunčevih pega [158], ispitano je i u kojoj meri aktivnost Sunca utiče na nivo koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere.

Upoređene su mesečne i godišnje vrednosti koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha i depozita sa odgovarajućim brojem Sunčevih pega, kao i njihovih vrednosti grupisanih po mesecima. Jedina vrednost Pirsonovog koeficijenta, čiji je i nivo statističke značajnosti bio 95,35 % ($p = 0,0465$), ukazivala je na vrlo slabu antikoreliranost mesečnih vrednosti koncentracija izotopa ^7Be u depozitu sa brojem Sunčevih pega ($r = -0,12$).

Koreliranost koncentracije ^7Be u depozitu sa intenzitetom Sunčeve aktivnosti je više nego dvostruko niža u odnosu na intenzitet kosmičkog zračenja. Pretpostavljeno je da razlog za ovakav rezultat može biti vremensko kašnjenje između ova dva događaja. U skladu sa pretpostavkom, izvršeno je jednogodišnje transliranje izmerenih koncentracija

^7Be u odnosu na odgovarajući broj Sunčevih pega, tako da minimumi Sunčeve aktivnosti (1996. i 2008.) odgovaraju maksimumima koncentracije ^7Be (1997. i 2009.), što je na Slici 51 prikazano strelicama.



Slika 51. Vremenske distribucije godišnjih vrednosti koncentracije ^7Be u depozitu i broja Sunčevih pega

Odabrana vremenska translacija je doprinela povećanju vrednosti Pirsonovog koeficijenta na čak $-0,56$, koja odgovara direktnoj korelaciji koncentracije ^7Be i intenziteta kosmičkog zračenja (Poglavlje 11.5.2). Jednogodišnjom translacijom, povećava se i koeficijent koreliranosti godišnjih vrednosti korišćenih podataka o intenzitetu kosmičkog zračenja i broju Sunčevih pega, sa $-0,85$ na $-0,95$.

U literaturi nisu pronađeni podaci o koreliranosti ^7Be u depozitu sa brojem Sunčevih pega, dok je ispitivanje koreliranosti ^7Be u vazduhu vršeno u više navrata, produkujući različite rezultate. Na primer, u Poljskoj su u okviru jednog istraživanja sa podacima prikupljenim na različitim lokacijama dobijene vrednosti od $-0,045$, preko $-0,225$, do čak pozitivne koreliranosti od svega $0,095$ [122]. Slična situacija je zabeležena i u jednoj studiji koja je obuhvatila čak 34 lokacije širom Evrope i pokazala visok nivo negativne koreliranosti među ovim parametrima. Međutim, na lokacijama poput Helsinkija i Minhena dobijena je pozitivna korelacija [116]. U Španiji i Grčkoj su se maksimumi koncentracije

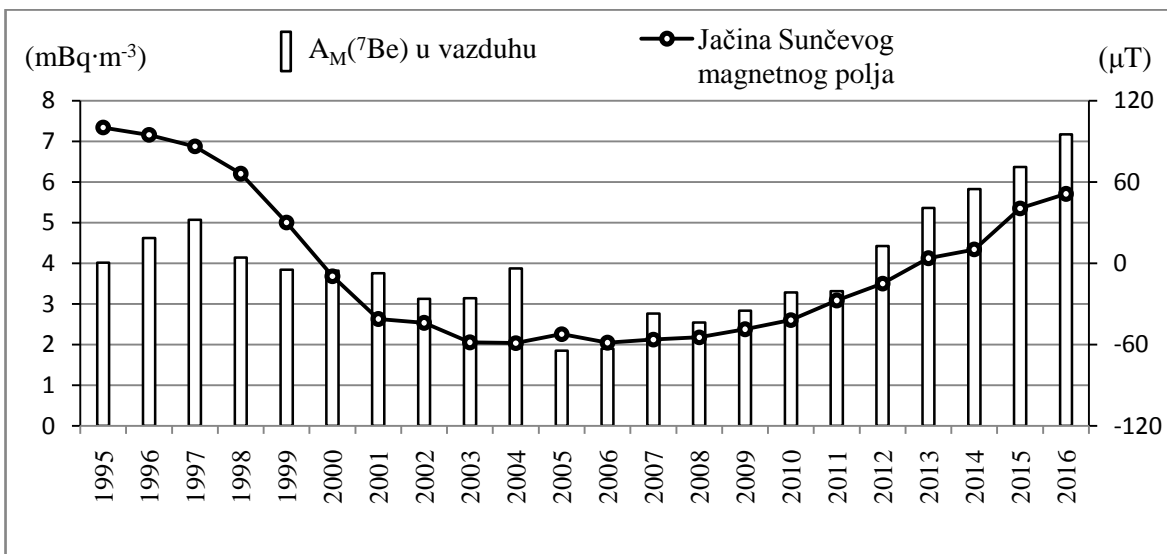
^7Be javljali u periodima mirovanja Sunčeve aktivnosti i obrnuto [145, 148], dok su u Italiji [142], Švedskoj, Češkoj i Francuskoj [125], kao i Grčkoj dobijeni koeficijenti koreliranosti u rasponu od -0,70 do -0,86 [147, 159].

11.5.4 Koreliranost sa orijentacijom Sunčevog magnetnog polja

Postavlja se pitanje u kojoj meri se 22-godišnji harmonik, iz periodograma koncentracije ^7Be , može objasniti promenom polariteta Sunčevog magnetnog polja. Da bi se dobio odgovor na ovo pitanje, sa sajta Wilcox solarne opservatorije, u okviru Univerziteta u Stanfordu [160], preuzeti su podaci o jačini i orijentaciji Sunčevog magnetnog polja i upoređeni sa koncentracijom ^7Be u prizemnom sloju atmosfere.

Ispostavilo se da mesečne i godišnje vrednosti koncentracije ^7Be u ispitanim sredinama imaju pozitivne koeficijente korelacije sa odgovarajućim vrednostima jačine magnetnog polja Sunca, dok koreliranost između njihovih mesečnih indeksa nema statističku značajnost ($p > 0,05$).

Korelacija prisutnosti ovog izotopa u uzorcima depozita sa jačinom Sunčevog magnetnog polja na mesečnom nivou odgovara vrednosti Pirsonovog koeficijenta od 0,27, dok u uzorcima vazduha, ova vrednost iznosi 0,39. Poređenjem godišnjih vrednosti, koreliranost koncentracije ^7Be sa jačinom Sunčevog magnetnog polja ima skoro dvostruko viši nivo i iznosi 0,51 za uzorke depozita i 0,65 za uzorke vazduha (Slika 52) [161]. Odgovarajuće vrednosti koeficijenata determinacije ukazuju na to da bi varijacija magnetnog polja Sunca mogla objasniti 26 % godišnje varijacije koncentracije ^7Be u depozitu i 42 % varijacije u uzorcima vazduha.



Slika 52. Vremenske distribucije godišnjih vrednosti koncentracije ^7Be u vazduhu i jačine Sunčevog magnetnog polja

11.6 Aproksimacija i Predikcija

11.6.1 Metod inverzne Furijeove transformacije

Aproksimacija vrednosti izmerenih koncentracija ^7Be u uzorcima vazduha i depozita tokom perioda 1995–2016, metodom inverzne Furijeove transformacije, zasniva se na odabiru najintenzivnijih harmonika iz odgovarajućih periodograma.

Prelaskom sa frekventnog na vremenski domen, određeni su regresioni koeficijenti uz promenljive čije su vrednosti jednake sinusnim i kosinusnim funkcijama odabranih harmonika ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$ i β_4), kao i odsečak a .

Ekstrapolacijom formirane regresione jednačine predviđene su vrednosti koncentracija za naredni period. Pogodnost ovakvog načina predikcije je testiran za period tokom 2017. godine, a odstupanja predviđenih od izmerenih vrednosti su opisana deskriptivnim statističkim parametrima.

Glavna prednost predikcije ovim modelom je što ne zahteva nikakva merenja i zasniva se samo na dosadašnjem iskustvu.

11.6.1.1 Aproksimacija koncentracije ${}^7\text{Be}$ u uzorcima vazduha

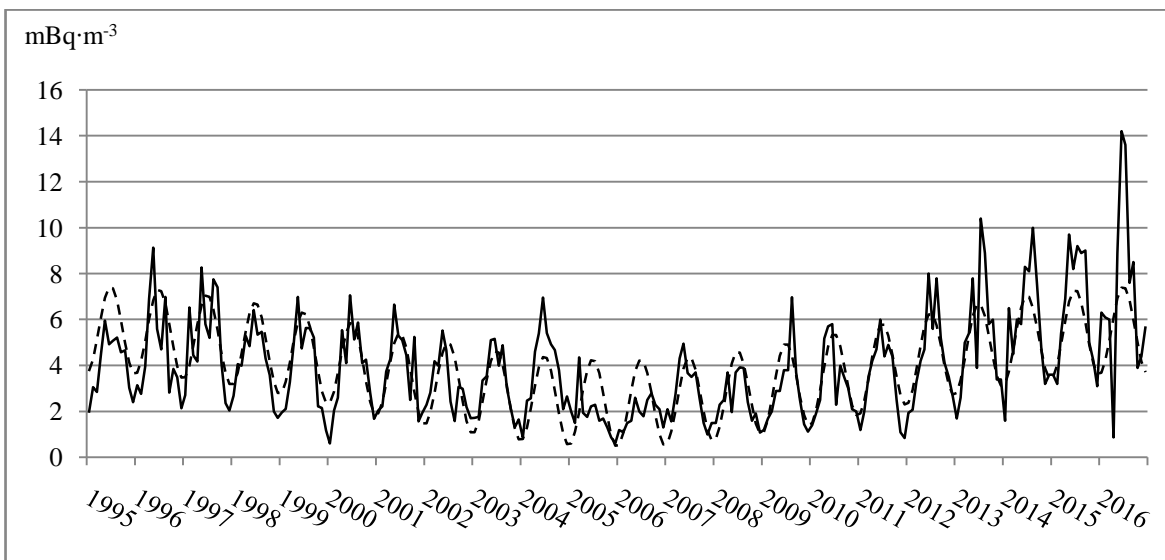
Odabirom najintenzivnijih harmonika iz periodograma koncentracije ${}^7\text{Be}$ u uzorcima vazduha ($T_1 = 1$ god. i $T_2 = 22$ god.), formirani su parametri $\cos(\omega_1 t)$, $\sin(\omega_1 t)$, $\cos(\omega_2 t)$ i $\sin(\omega_2 t)$. Nakon toga su određeni njihovi koeficijenti koreliranosti sa izmerenim vrednostima koncentracije. Linearnost parametra $\sin(\omega_2 t)$ nije imala statističku značajnost ($p > 0,05$), pa je on odbačen iz daljeg razmatranja. Konačna aproksimativna funkcija koncentracije aktivnosti ${}^7\text{Be}$ u uzorcima vazduha, $F_a(t)$, prikazana je Jednačinom 78. Rezultati aproksimacije izmerenih vrednosti su prikazani na Slici 53.

$$F_{aer}(t) = 3,96 - 1,82 \cdot \cos(0,5236 \cdot t) + 0,55 \sin(0,5236 \cdot t) + 1,60 \cdot \cos(0,0238 \cdot t) \quad (78)$$

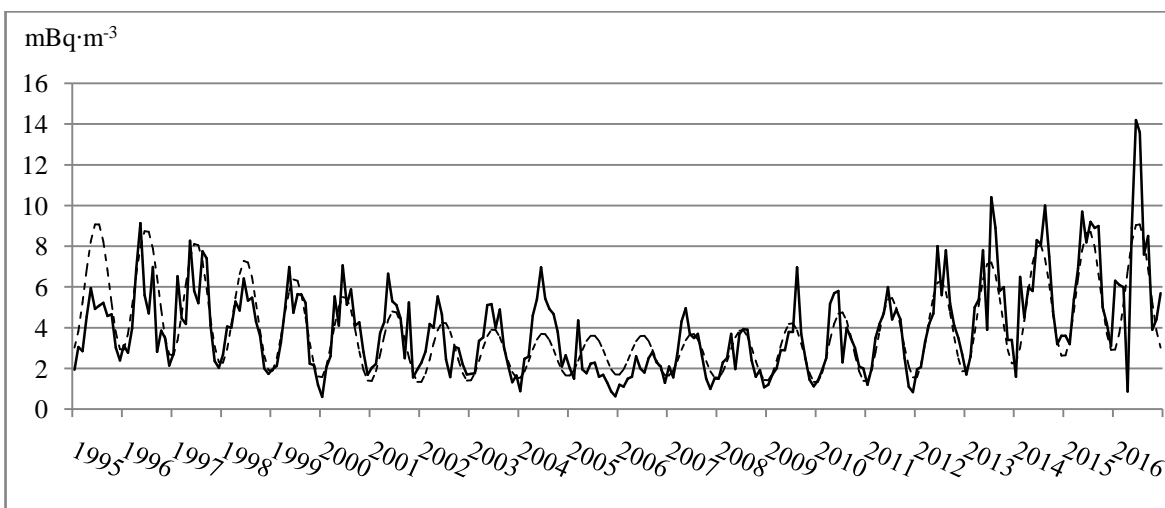
Kako se vidi sa slike, odstupanja između maksimalnih i minimalnih godišnjih vrednosti mesečnih koncentracija variraju od godine do godine i uglavnom su srazmerna maksimalnim godišnjim vrednostima. Razlog za ovo je to što je raspon između minimalnih godišnjih vrednosti, u periodu 1995–2016. bio svega $1,34 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$. U slučaju maksimalnih vrednosti, ovaj raspon je iznosio čak $10,27 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Najveći raspon mesečnih koncentracija je bio 2016. godine i iznosio je $13,3 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, dok je najmanje odstupanje zabeleženo 2006. godine sa vrednošću od svega $1,7 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Zbog toga je u aproksimaciju uvedena i amplitudna modulacija sa periodom od 22 godine, prikazana Jednačinom 79 (Slika 54).

$$F_{aer}(t) = 3,56 + [-1,82 \cdot \cos(0,5236 \cdot t) + 0,55 \sin(0,5236 \cdot t) + 1,60 \cdot \cos(0,0238 \cdot t)] \cdot (0,5 \cdot \cos(0,0238 \cdot t) + 0,95) \quad (79)$$

Razlika u kvalitetu aproksimacija sa i bez amplitudne modulacije, poređenjem deskriptivnih statističkih parametara, prikazana je u Tabelama 16–18.



Slika 53. Aproximirane vrednosti (isprekidana linija) izmerenih koncentracija aktivnosti ${}^7\text{Be}$ (puna linija) u uzorcima vazduha bez amplitudne modulacije



Slika 54. Amplitudno modulisane ($T = 22$ god.) aproksimirane vrednosti (isprekidana linija) izmerenih koncentracija aktivnosti ${}^7\text{Be}$ (puna linija) u uzorcima vazduha

Tabela 16. Uticaj amplitudne modulacije aproksimativne funkcije $A_M(^7\text{Be})$ u vazduhu na promenu statističkih parametara aproksimiranih vrednosti: Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Apsolutna odstupanja od izmerene vrednosti ($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>Srednja vrednost (MAD)</i>	<i>Medijana</i>	Q_2-Q_3	P_5-P_{95}	<i>Sr. vred. kvadrata (MSD)</i>
<i>Bez modulacije</i>	1,05	0,84	0,38–1,42	0,09–2,61	1,99
<i>T: 22 god.</i>	0,89	0,68	0,28–1,37	0,06–3,14	1,92

Tabela 17. Uticaj amplitudne modulacije aproksimativne funkcije $A_M(^7\text{Be})$ u vazduhu na promenu statističkih parametara aproksimiranih vrednosti: Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Relativna odstupanja od izmerene vrednosti (%)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>Srednja vrednost</i>	<i>Medijana</i>	Q_2-Q_3	P_5-P_{95}	< 20 %
<i>Bez modulacije</i>	34	24	11–39	3–101	42 %
<i>T: 22 god.</i>	30	20	8–35	2–85	50 %

Tabela 18. Uticaj amplitudne modulacije aproksimativne funkcije $A_M(^7\text{Be})$ u vazduhu na promenu statističkih parametara aproksimiranih vrednosti: Standardna devijacija regresije, pristrasnost i Pirsonov koeficijent

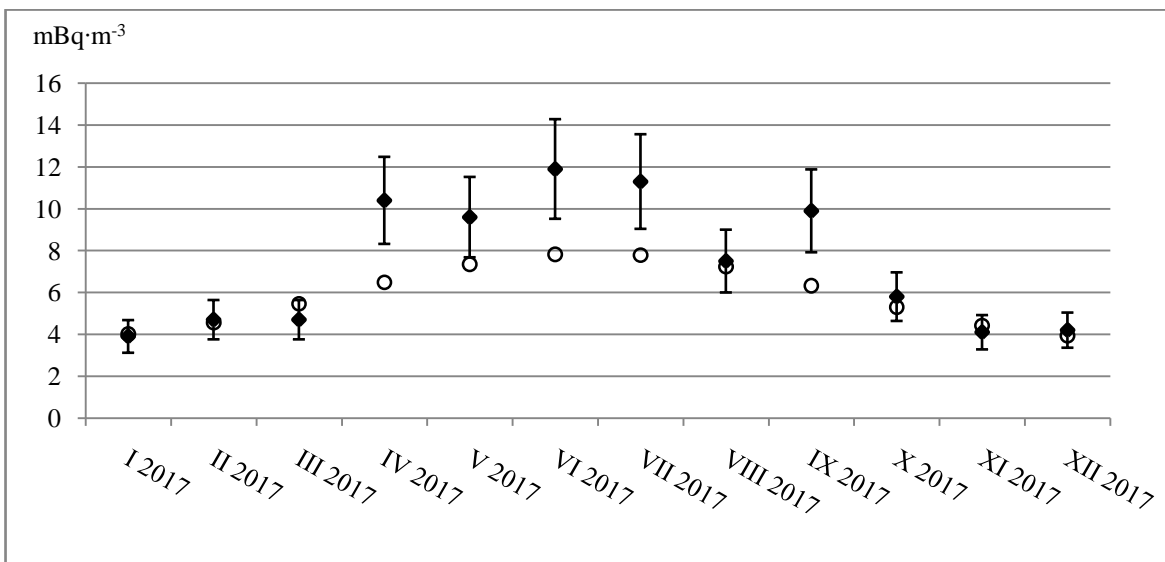
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>Standardna devijacija (SDR), $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$</i>	<i>Pristrasnost (B), $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$</i>	<i>r</i>
<i>Bez modulacije</i>	1,42	0,00	0,78
<i>T: 22 god.</i>	1,39	0,05	0,79

Iako rezultati statističkih poređenja prikazanih u Tabelama 16–18 ukazuju da uvođenje amplitudne modulacije u regresionu funkciju nije dovelo do drastičnog povećanja kvaliteta aproksimacije, ipak se uočava približavanje aproksimiranih vrednosti odgovarajućim izmerenim vrednostima. Ovo se najviše ispoljilo kod smanjenja apsolutnog i relativnog odstupanja, kao i povećanja broja vrednosti čija su relativna odstupanja $< 20\%$ $A_{M,m}$. Prisutna su manja smanjenja vrednosti *MSD* i *SDR*, kao i povećanje koeficijenta koreliranosti. Vrednost pristrasnosti ukazuje da modulirana aproksimacija ima blagu tendenciju potcenjivanja izmerenih vrednosti.

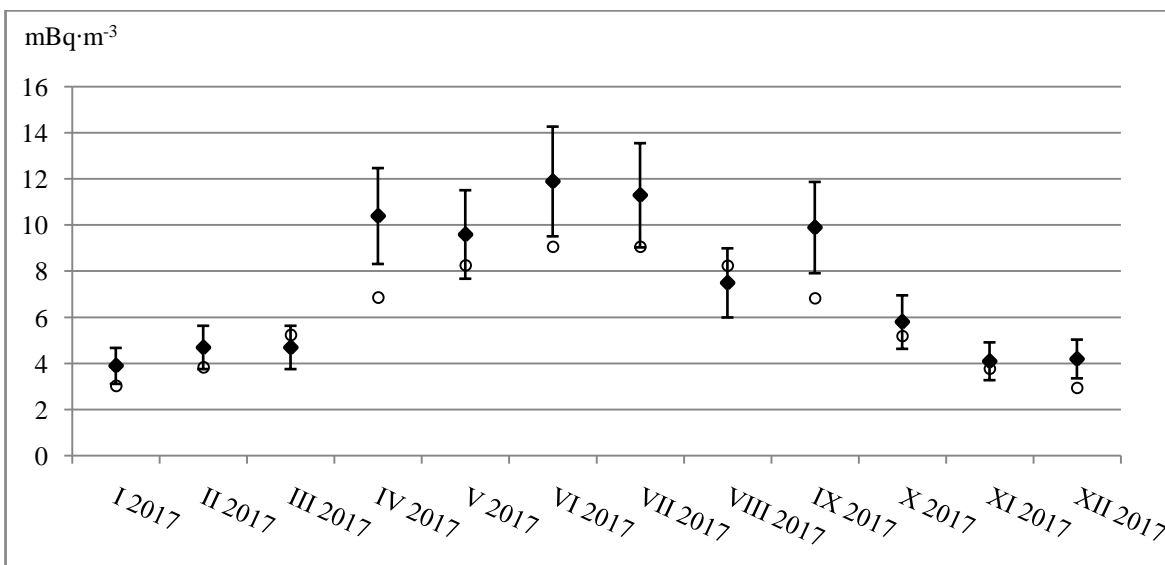
11.6.1.2 Predikcija koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha

Ekstrapolacijom nemodulisane (Jednačina 78) i amplitudno modulisane aprosimativne funkcije (Jednačina 79) su određene očekivane mesečne vrednosti koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha za 2017. godinu. Rezultati predikcija su predstavljeni na Slikama 55 i 56 kružićima, dok su kvadratićima sa intervalom greške $\pm 20\%$ $A_{M,m}$, predstavljene izmerene vrednosti.

Međutim, treba napomenuti da se tokom 2017. godine, nijedna izmerena vrednost koncentracije ^7Be nije našla unutar intervala standardnih grešaka srednjih vrednosti koncentracija za odgovarajući mesec, dok su samo vrednosti izmerene u martu i avgustu ušle u okvir $AS_m \pm SD_m$. Koncentracija izmerena u aprilu je imala ekstremno visoku vrednost koja je od prosečne vrednosti za april odstupala više od $3 SD_m$. Pristrasnost je iznosila čak $-3,23 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, što govori da su izmerene koncentracije ^7Be u vazduhu tokom 2017. godine bile daleko iznad prosečnih za odgovarajući period godine.



Slika 55. Predviđene (kružići) $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima vazduha za 2017. godinu, nemodulisanom aproksimativnom jednačinom i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)



Slika 56. Predviđene (kružići) $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima vazduha za 2017. godinu, amplitudno modulisanom aproksimativnom jednačinom i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)

Iz Tabela 19–21, u kojima su prikazani statistički parametri predikcija, se vidi da predikcija modulisanom jednačinom ima manje srednje kvadratno odstupanje i manji varijabilitet između predviđenih i izmerenih vrednosti.

U oba slučaja je postignut isti nivo koreliranosti sa izmerenim vrednostima (0,91) i isti procenat predviđenih koncentracija aktivnosti ${}^7\text{Be}$ u okvirima $\pm 20\%$ izmerenih vrednosti (58 %). Vrednosti pristrasnosti ukazuju na to da su obe regresione jednačine predvidele vrednosti niže od izmerenih, s tim da je i u ovom slučaju manje odstupanje dala amplitudno modulirana jednačina.

Tabela 19. Statistički parametri predikcije $A_M({}^7\text{Be})$ u 2017. godini, pomoću nedomulirane i amplitudno modulirane aproksimativne funkcije za uzorke vazduha: Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Apsolutna odstupanja od izmerene vrednosti ($\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>min-max</i>	<i>Srednja vrednost (MAD)</i>	<i>Medijana</i>	<i>Q_2-Q_3</i>	<i>Sr. vred. kvadrata (MSD)</i>
<i>Bez modulacije</i>	0,11–4,07	1,6	0,63	0,26–3,51	5,26
<i>T: 22 god.</i>	0,32–3,55	1,5	1,07	0,60–2,23	3,43

Tabela 20. Statistički parametri predikcije $A_M({}^7\text{Be})$ u 2017. godini, pomoću nedomulirane i amplitudno modulirane aproksimativne funkcije za uzorke vazduha: Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Relativna odstupanja od izmerene vrednosti (%)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>min-max</i>	<i>Srednja vrednost</i>	<i>Medijana</i>	<i>Q_2-Q_3</i>	<i>< 20 %</i>
<i>Bez modulacije</i>	3–38	18	12	3–31	58,33 %
<i>T: 22 god.</i>	8–34	19	19	10–24	58,33 %

Tabela 21. Statistički parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u 2017. godini, pomoću nemodulisane i amplitudno modulisane aproksimativne funkcije za uzorke vazduha: Standardna devijacija regresije, pristrasnost i Pirsonov koeficijent

<i>Amplitudna modulación</i>	<i>Standardna devijacija (SDR), $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$</i>	<i>Prištrasnost (B), $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$</i>	<i>r</i>
<i>Bez modulación</i>	2,51	1,44	0,91
<i>T: 22 god.</i>	2,03	1,31	0,91

Predviđene vrednosti su u većini slučajeva bile niže u odnosu na izmerene u ovoj godini. Ovo bi moglo biti posledica toga što jačina Sunčevog magnetnog polja još uvek ima tendenciju porasta, iako je prethodni maksimum bio pre više od 22 godine (1994.). Međutim, oba modela predviđaju da bi koncentracije tokom 2017. godine trebalo da budu veće od prosečnih ($B \approx -2 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$). Ipak, izmerene vrednosti su nadmašile i ova predviđanja.

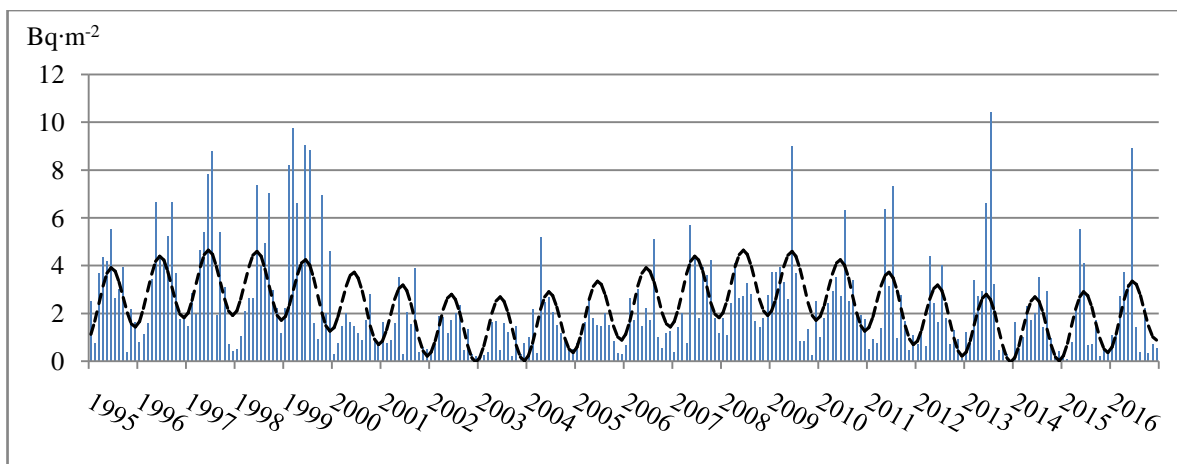
Stoga, ovaj model bi pre svega mogao biti pogodan za uočavanje anomalnih promena, kao i okvirna predviđanja koncentracije, jer ne uključuje trenutne vrednosti pretpostavljenih uzročnika promene koncentracije, već se zasniva na pretpostavljanju njihove najverovatnije vrednosti u odnosu na njihov prosečan period ponavljanja. Duži vremenski period praćenja bi mogao dovesti do poboljšanja modela. Aproksimacija i predikcija koncentracije ^7Be na osnovu vrednosti pretpostavljenih uzročnika će biti ispitana u Poglavlju 11.6.2.1.

11.6.1.3 Aproksimacija koncentracije ^7Be u uzorcima depozita

U skladu sa rezultatima Furijeove analize (Poglavlje 11.4.2), za parametre regresione jednačine su odabrane sinusne i kosinusne funkcije harmonika sa periodima $T_1 = 1 \text{ god.}$ i $T_2 = 11 \text{ god.}$ S obzirom na to da koeficijent linearnosti sa parametrom $\cos(\omega_2 t)$ nije imao statističku značajnost, ovaj član nije uključen u aproksimacionu funkciju (Jednačina 80).

$$F_{dep}(t) = 2,30 - 1,18 \cos(0,5236 \cdot t) + 0,69 \sin(0,5236 \cdot t) + 0,99 \sin(0,0476 \cdot t) \quad (80)$$

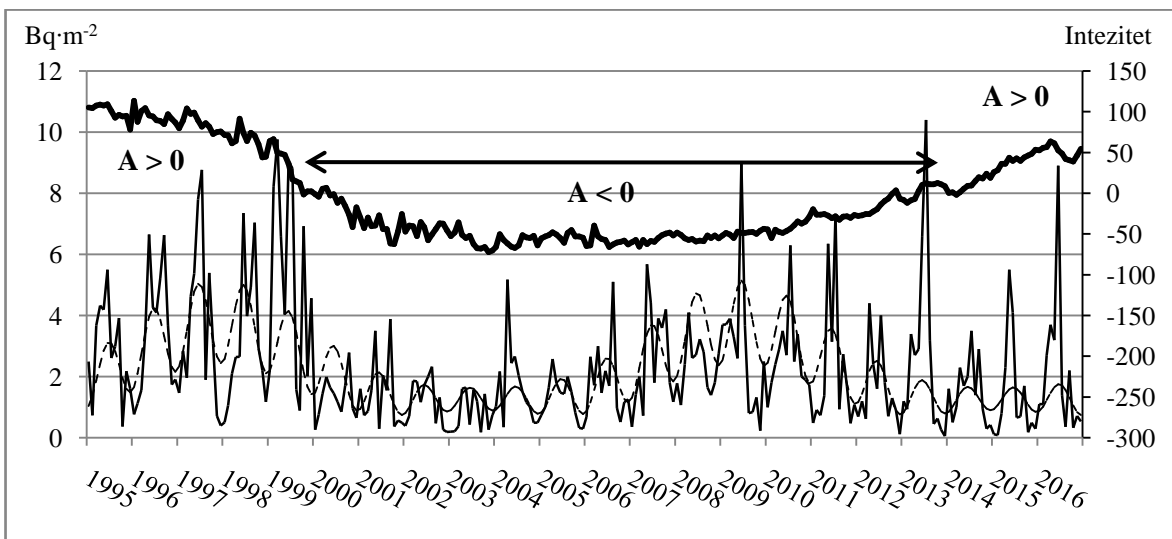
Rezultati aproksimacije su prikazani na Slici 57. Isprekidanom linijom su predstavljene aproksimirane vrednosti, dok su izmerene koncentracije prikazane vertikalnim linijama.



Slika 57. Aproksimirane vrednosti (isprekidana linija) izmerenih $A_M(^7\text{Be})$ (vertikalne linije) u uzorcima depozita, bez amplitudne modulacije

Kao i u slučaju uzoraka vazduha, u odnosu na razliku minimalnih godišnjih vrednosti mesečnih koncentracija ($1,02 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$), maksimalne vrednosti odstupaju znatno više ($6,9 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$). To dovodi do toga da i raspon između maksimalnih i minimalnih koncentracija varira od godine do godine. Zbog toga je i u ovu aproksimaciju uvedena amplitudna modulacija sa periodom od 11 godina (Jednačina 81), a rezultati su (isprekidanom linijom) predstavljeni na Slici 58.

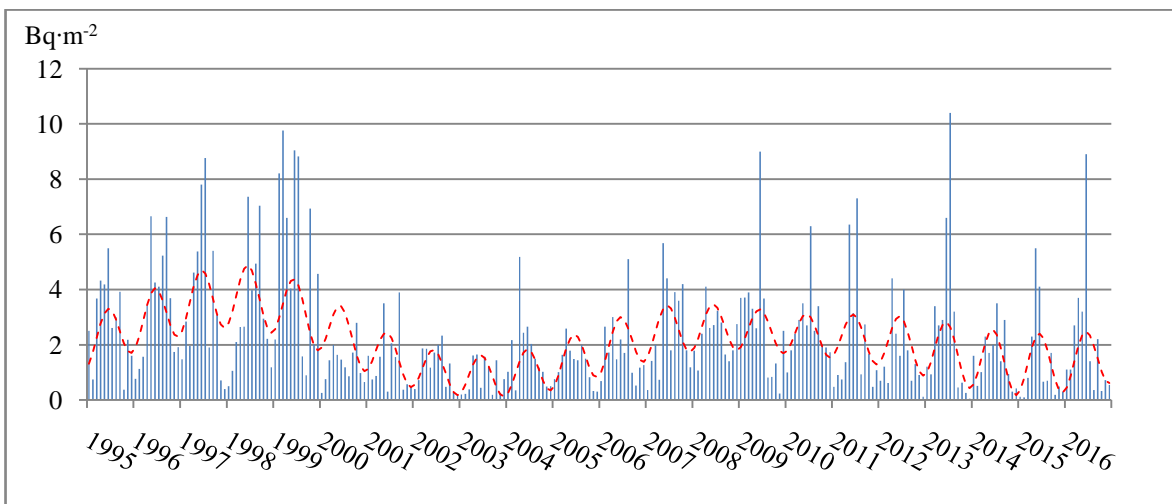
$$F_{dep}(t) = 1,81 + [-1,1 \cos(0,5236 \cdot t) + 0,55 \sin(0,5236 \cdot t) + 1,8 \sin(0,0455 \cdot t)] \cdot (0,4 \sin(0,0455 \cdot t) + 0,7) \quad (81)$$



Slika 58. Amplitudno modulirane ($T = 11$ god.) aproksimirane vrednosti (isprekidana linija) izmerenih $A_M(^7\text{Be})$ (puna tanka linija) u uzorcima depozita i jačina Sunčevog magnetnog polja (puna debela linija)

Posmatranjem odstupanja maksimalnih od minimalnih vrednosti tokom godine, uočava se da su one izraženije u periodima više koncentracije (do 2000. godine) u odnosu na period oko maksimuma 2009. godine. Takođe, period niže koncentracije (oko 2003. godine) je manje varijabilan u odnosu na period oko minimuma 2015. godine. Ovo bi moglo biti puka slučajnost, ali i ispoljavanje uticaja Sunčevog magnetnog polja, koje je u periodu manjih oscilacija bilo negativno polarisano. Iz tog razloga je aproksimaciona funkcija još jednom modulirana i to, ovoga puta periodom od 22 godine (Jednačina 82). Rezultati ovako modulirane aproksimacione funkcije, prikazani su na Slici 59, a prikaz statističkih parametara aproksimacija sa i bez amplitudne modulacije, kao i sa modulacijom od 22 godine, dat je u Tabelama 22–24.

$$\begin{aligned}
 F_{dep}(t) = & 2,89 \\
 & + [-1,1 \cdot \cos(0,5236 \cdot t) + 0,69 \sin(0,5236 \cdot t) + 1,4 \\
 & \cdot \sin(0,0455 \cdot t)] \cdot (0,2 \cdot \sin(0,0455 \cdot t) + 0,7) \cdot \sin(0,0228 \cdot t) \\
 & + 0,73)
 \end{aligned} \quad (82)$$



Slika 59. Amplitudno modulirane ($T_1 = 11$ god. i $T_2 = 22$ god.) aproksimirane vrednosti (isprekidana linija) izmerenih $A_M(^7\text{Be})$ (vertikalne linije) u uzorcima depozita

Tabela 22. Uticaj amplitudne modulacije aproksimativne funkcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita na promenu statističkih parametara aproksimiranih vrednosti: Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>Srednja vrednost (MAD)</i>	<i>Medijana</i>	<i>Q_2-Q_3</i>	<i>P_5-P_{95}</i>	<i>Sr. vred. kvadrata (MSD)</i>
<i>Bez modulacije</i>	1,15	0,84	0,34–1,55	0,06–3,31	2,67
<i>T: 11 god.</i>	1,14	0,82	0,29–1,56	0,03–3,71	2,82
<i>T: 11 i 22 god.</i>	1,08	0,73	0,28–1,47	0,03–3,41	2,56

Tabela 23. Uticaj amplitudne modulacije aproksimativne funkcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita na promenu statističkih parametara aprosimiranih vrednosti: Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti (%)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>Srednja vrednost</i>	<i>Medijana</i>	<i>Q_2-Q_3</i>	<i>P_5-P_{95}</i>	<i>< 20 %</i>
<i>Bez modulacije</i>	87	44	22–87	4–345	23,86 %
<i>T: 11 god.</i>	98	44	19–89	2–384	28,41 %
<i>T: 11 i 22 god.</i>	83	41	18–80	3–304	28,41 %

Tabela 24. Uticaj amplitudne modulacije aproksimativne funkcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita na promenu statističkih parametara aprosimiranih vrednosti: Standardna devijacija regresije, pristrasnost i Pirsonov koeficijent

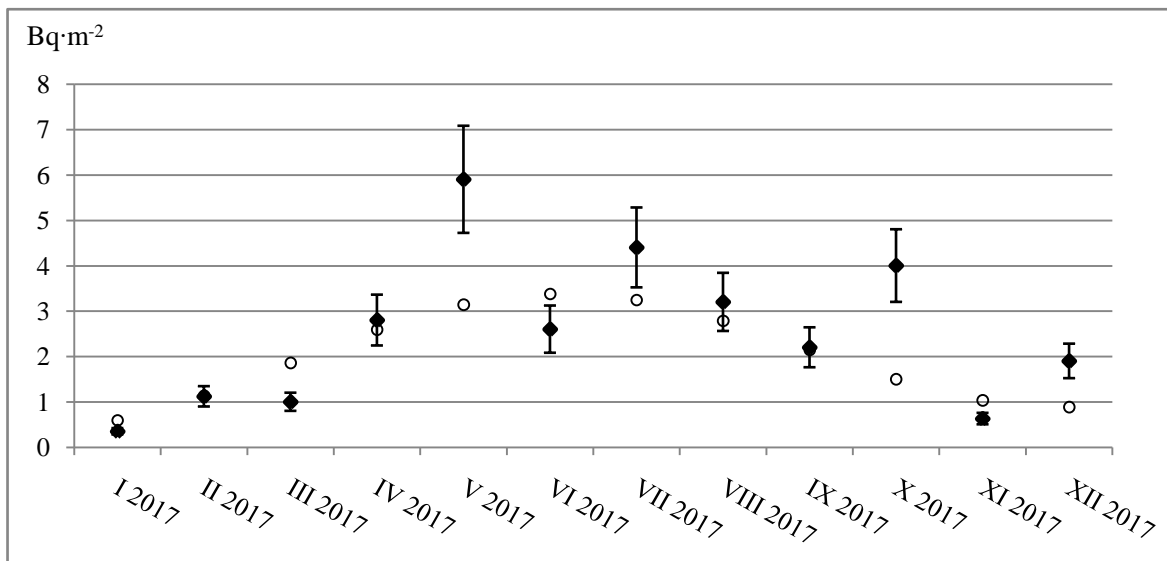
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>Standardna devijacija (SDR), $Bq \cdot m^{-2}$</i>	<i>Pristrasnost (B), $Bq \cdot m^{-2}$</i>	<i>r</i>
<i>Bez modulacije</i>	1,64	0,00	0,59
<i>T: 11 god.</i>	1,68	0,10	0,56
<i>T: 11 i 22 god.</i>	1,61	2,09	0,63

Poređenjem statističkih parametara sve tri aproksimacije, uočava se da su se najmanja apsolutna odstupanja postigla modulacijom koja uključuje oba perioda, kao i da ista modulacija daje najmanje relativno odstupanje od izmerenih vrednosti. Obe modulirane funkcije daju isti veći broj vrednosti čija su odstupanja manja od 20 % vrednosti izmerene koncentracije. Najbolja koreliranost sa izmerenim vrednostima, kao i najmanja devijacija, takođe su se postigle modulacijom koja uključuje i period od 22 godine. Obe amplitudno modulirane funkcije imaju pozitivnu pristrasnost, što znači da imaju težnju potcenjivanja izmerenih vrednosti.

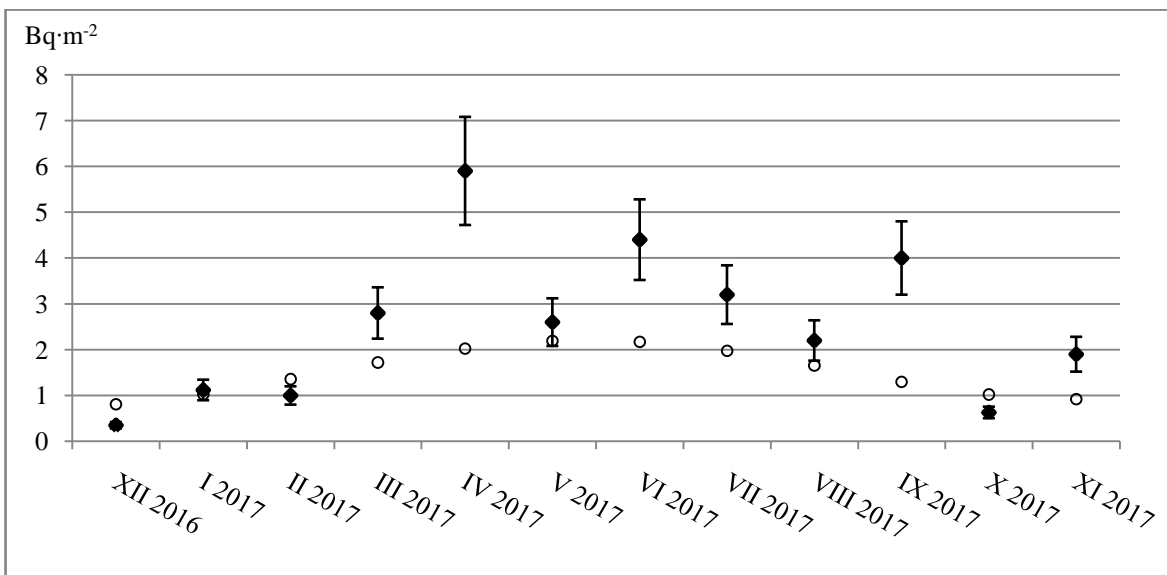
11.6.1.4 Predikcija koncentracije ${}^7\text{Be}$ u uzorcima depozita

Očekivane mesečne koncentracije ${}^7\text{Be}$ u uzorcima depozita za 2017. godinu, određene su ekstrapolacijom nemodulisane (Jednačina 92) i amplitudno modulisanih aprosimativnih funkcija (Jednačine 93 i 94.). Rezultati sve tri predikcije su predstavljeni kružićima na Slikama 60–62, dok su kvadratićima prikazane odgovarajuće izmerene koncentracije sa intervalom greške od $\pm 20\%$.

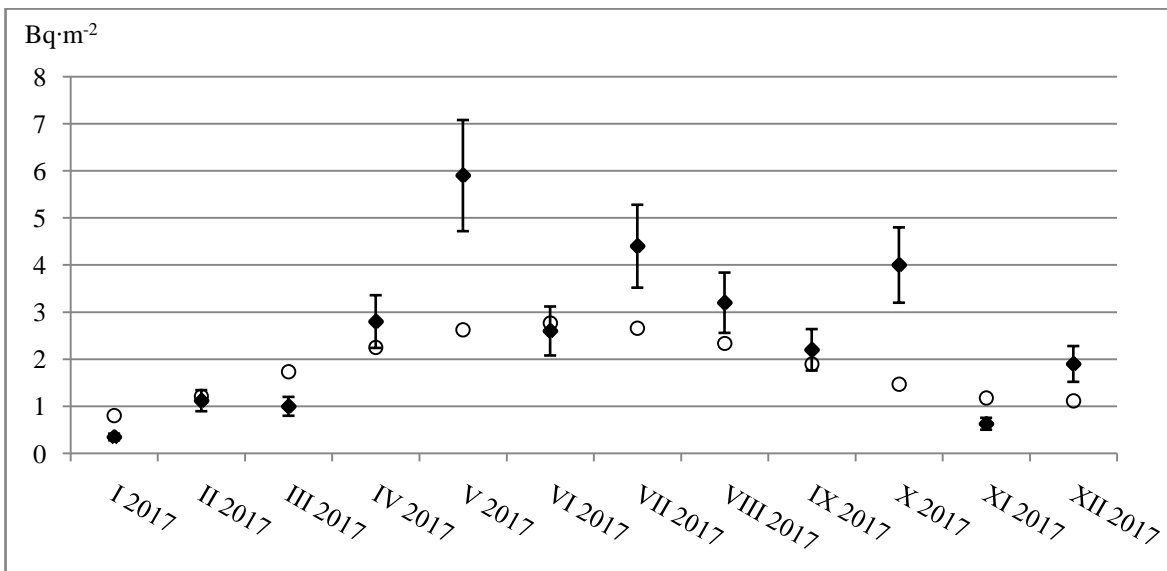
Pre svega, trebalo bi razmotriti rezultate izmerenih koncentracija aktivnosti ${}^7\text{Be}$ u uzorcima depozita tokom 2017. godine i uporediti ih sa prosečnim vrednostima u prethodnim godinama. Unutar intervala standardnih grešaka procenjenih srednjih vrednosti koncentracija za odgovarajući mesec, u 2017. godini su se našle dve izmerene vrednosti (u julu i septembru). Izvan opsega $\pm 1 SD_m$ su bile samo koncentracije izmerene u majskom i oktobarskom uzorku. Nijedna vrednost nije odstupila više od $\pm 3 SD_m$, a pristrasnost je bila svega $-0,2 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$. U poređenju sa aerosolnim uzorcima, koncentracije ${}^7\text{Be}$ u 2017. godini su znatno više odgovarale prosečnim vrednostima iz prethodnih godina.



Slika 60. Predviđene (kružići) $A_M({}^7\text{Be})$ u uzorcima depozita za 2017. godinu, nemodulisanom aproksimativnom jednačinom i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)



Slika 61. Predviđene (kružići) $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita za 2017. godinu, aproksimativnom jednačinom modulisanom periodom od 11 godina, kao i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)



Slika 62. Predviđene (kružići) $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita za 2017. godinu, aproksimativnom jednačinom modulisanom periodima od 11 i 22 godine, kao i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)

Osim u neznatno nižem koeficijentu koreliranosti sa izmerenim vrednostima, najmanja apsolutna i relativna odstupanja, kao i najmanje vrednosti srednjeg kvadratnog odstupanja i standardne devijacije, pokazala je nemodulisana aproksimativna jednačina. Takođe, i najmanja pristrasnost je ostvarena ovom jednačinom. Zajedno sa dvostruko modulisanom jednačinom postignut je i veći procenat vrednosti koje su ušle u okvir $\pm 20\%$ izmerenih vrednosti tokom 2017. godine (Tabele 25–27).

Tabela 25. Statistički parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u 2017. godini, pomoću nemodulisane i amplitudno modulisanih aproksimativnih funkcija za uzorke depozita: Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>min–max</i>	<i>Srednja vrednost (MAD)</i>	<i>Medijana</i>	<i>Q_3-Q_4</i>	<i>Sr. vred. kvadrata (MSD)</i>
<i>Bez modulacije</i>	<i>0,01–2,76</i>	<i>0,87</i>	<i>0,59</i>	<i>0,21–1,01</i>	<i>1,50</i>
<i>T: 11 god.</i>	<i>0,09–3,87</i>	<i>1,19</i>	<i>0,76</i>	<i>0,39–1,22</i>	<i>2,65</i>
<i>T: 11 i 22 god.</i>	<i>0,09–3,27</i>	<i>1,00</i>	<i>0,65</i>	<i>0,30–0,86</i>	<i>1,91</i>

Tabela 26. Statistički parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u 2017. godini, pomoću nemodulisane i amplitudno modulisanih aproksimativnih funkcija za uzorke depozita: Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti (%)</i>					
<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>min–max</i>	<i>Srednja vrednost</i>	<i>Medijana</i>	<i>Q_3-Q_4</i>	<i>< 20 %</i>
<i>Bez modulacije</i>	<i>1–86</i>	<i>39</i>	<i>38</i>	<i>7–62</i>	<i>33,33 %</i>
<i>T: 11 god.</i>	<i>8–131</i>	<i>49</i>	<i>45</i>	<i>25–62</i>	<i>16,67 %</i>
<i>T: 11 i 22 god.</i>	<i>7–130</i>	<i>47</i>	<i>40</i>	<i>14–63</i>	<i>33,33 %</i>

Tabela 27. Statistički parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u 2017. godini, pomoću nemodulisane i amplitudno moduliranih aproksimativnih funkcija za uzorke depozita: Standardna devijacija regresije, pristrasnost i Pirsonov koeficijent

<i>Amplitudna modulacija</i>	<i>Standardna devijacija (SDR), $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$</i>	<i>Pristupačnost (B), $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$</i>	<i>r</i>
<i>Bez modulacije</i>	1,34	0,48	0,72
<i>T: 11 god.</i>	1,78	0,99	0,73
<i>T: 11 i 22 god.</i>	1,52	0,67	0,73

Pristrasnosti između srednjih i predviđenih vrednosti se kreću u intervalu od 0,28 (nemodulisana) do 0,80 (jednostruko modulirana). Ovo govori da sve tri jednačine za 2017. godinu predviđaju vrednosti niže od prosečnih, što je u suprotnosti sa izmerenim vrednostima.

11.6.2 Metod Linearne regresije

Kao što je u Poglavlju 11.6.1 napomenuto, predikcija na osnovu aproksimativne funkcije određene inverznom Furijeovom transformacijom ne uključuje trenutne vrednosti drugih parametara koji bi se mogli smatrati potencijalnim uzročnicima promene ispitivane pojave i zasniva se isključivo na prethodnom iskustvu o njenoj dotadašnjoj vremenskoj distribuciji.

Da bi ispitali mogućnost predikcije koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere na osnovu pretpostavljenih uzročnika njene promene, određeni su koeficijenti linearne regresije između njenih izmerenih vrednosti u periodu 1995–2016. godine i parametara sa kojima je ispoljila najveći stepen linearne koreliranosti. Na osnovu dobijenih koeficijenata i vrednosti odabranih parametara za 2017. godinu, za istu godinu predviđene su koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere u uzorcima vazduha i depozita.

11.6.2.1 Aproksimacija i predikcija koncentracije ^7Be u uzorcima aerosola

U slučaju aerosolnih uzoraka vazduha, među ispitanim potencijalnim uzročnicima jednogodišnje periodičnosti (meteorološki parametri) najveću koreliranost (0,60) sa izmerenim koncentracijama ^7Be , imala je insolacija (Tabela 12). Međutim, zbog nedostupnosti podataka na sajtu Republičkog hidrometeorološkog zavoda o njenim vrednostima tokom 2017. godine, ovaj parametar je isključen iz daljeg razmatranja. Iza njega su sledile temperatura (0,59), vazdušni pritisak (-0,52) i vlažnost vazduha (-0,50). Kao potencijalni uzročnik 22-godišnjeg harmonika u periodogramu koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha, razmatrala se jačina Sunčevog magnetnog polja (B_S).

Nakon određivanja koeficijenata linearne regresije između koncentracije aktivnosti ^7Be i odabranih potencijalnih uzročnika njene promene tokom perioda 1995–2016, određena su srednja apsolutna odstupanja izmerenih i aproksimiranih vrednosti za taj period. Za linearnu kombinaciju jačine Sunčevog magnetnog polja i temperature, vazdušnog pritiska i vlažnosti vazduha, *MAD* su redom iznosile $1,19 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, $1,38 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $1,25 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$.

Na osnovu izmerenih vrednosti odabranih parametara tokom 2017. godine, uvršćenih u formirane regresione jednačine, izračunate su predviđene koncentracije aktivnosti ^7Be za tu godinu. Dobijeni rezultati predikcije su upoređeni sa izmerenim $A_{M,m}(^7\text{Be})$ iste godine, a njihov međusobni odnos je predstavljen deskriptivnim statističkim parametrima, prikazanim u Tabelama 28–30.

Na isti način definisane su i linearne jednačine koje razmatraju vezu samo između koncentracije ^7Be i temperature, pritiska i vlažnosti vazduha (isključujući jačinu Sunčevog magnetnog polja). Srednja apsolutna odstupanja aproksimiranih od izmerenih vrednosti su redom iznosila: $1,72 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$, $1,49 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ i $1,48 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$. Rezultati predikcije koja isključuje uticaj magnetnog polja Sunca, takođe su statistički opisani u Tabelama 28–30.

Tabela 28. Deskriptivni parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima vazduha, metodom linearne regresije: Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti (mBq·m⁻³)</i>				
<i>Parametri</i>	<i>min–max</i>	<i>Srednja vrednost (MAD)</i>	<i>Medijana</i>	<i>Sr. vred. kvadrata (MSD)</i>
<i>Temperatura</i>	0,89–6,48	3,21	2,30	14,40
<i>T + B_M</i>	0,21–5,32	2,17	1,13	8,54
<i>Pritisak</i>	0,11–5,17	2,44	2,12	8,21
<i>P + B_M</i>	0,59–4,72	2,51	2,53	7,70
<i>Vlažnost</i>	0,09–6,48	2,94	1,61	13,60
<i>Vlaž. + B_M</i>	0,08–5,37	2,08	1,09	8,35

Tabela 29. Deskriptivni parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima vazduha, metodom linearne regresije: Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti

<i>Relativna odstupanja od izmerenih vrednosti (%)</i>				
<i>Parametri</i>	<i>min–max</i>	<i>Srednja vrednost</i>	<i>Medijana</i>	<i>< 20 %</i>
<i>Temperatura</i>	18–67	41	44	8 %
<i>T + B_M</i>	4–51	25	27	50 %
<i>Pritisak</i>	2–55	33	34	25 %
<i>Prit. + B_M</i>	8–68	37	35	17 %
<i>Vlažnost</i>	2–55	35	32	25 %
<i>Vlaž. + B_M</i>	2–45	22	22	50 %

Tabela 30. Deskriptivni parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima vazduha, metodom linearne regresije: Standardna devijacija regresije, pristrasnost i Pirsonov koeficijent

<i>Parametri</i>	<i>Standardna devijacija (SDR), $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$</i>	<i>Pristrasnost (B), $\text{mBq}\cdot\text{m}^{-3}$</i>	<i>r</i>
<i>Temperatura</i>	4,16	3,21	0,79
<i>T + B_M</i>	3,20	2,09	0,79
<i>Pritisak</i>	3,14	1,07	0,73
<i>P + B_M</i>	3,04	0,52	0,70
<i>Vlažnost</i>	4,04	2,93	0,75
<i>Vlaž. + B_M</i>	3,17	1,79	0,73

Iz prikazanih statističkih parametara se uočava da najveći stepen koreliranosti ne znači i najbolju opciju za odabir mogućih parametara koji utiču na promenu zavisne promenljive. Tako je, od ispitanih parametara, najmanje srednje i medijalno apsolutno i relativno odstupanje predviđenih vrednosti za 2017. godinu, u odnosu na odgovarajuće izmerene koncentracije, dala linearna kombinacija vlažnosti vazduha i jačine magnetnog polja Sunca (Jednačina 83.). Sledeća po pokazanom kvalitetu je mogućnost kombinovanja temperature i jačine Sunčevog magnetnog polja (Jednačina 84). Ona je imala i najveći stepen koreliranosti predviđenih i izmerenih vrednosti. Obe kombinacije su dale po 50 % predviđenih vrednosti u okvirima ± 20 % vrednosti izmerenih koncentracija. Takođe, u oba slučaja je priključivanje jačine Sunčevog magnetnog polja linearnoj kombinaciji doprinelo poboljšanju ovih statističkih parametara.

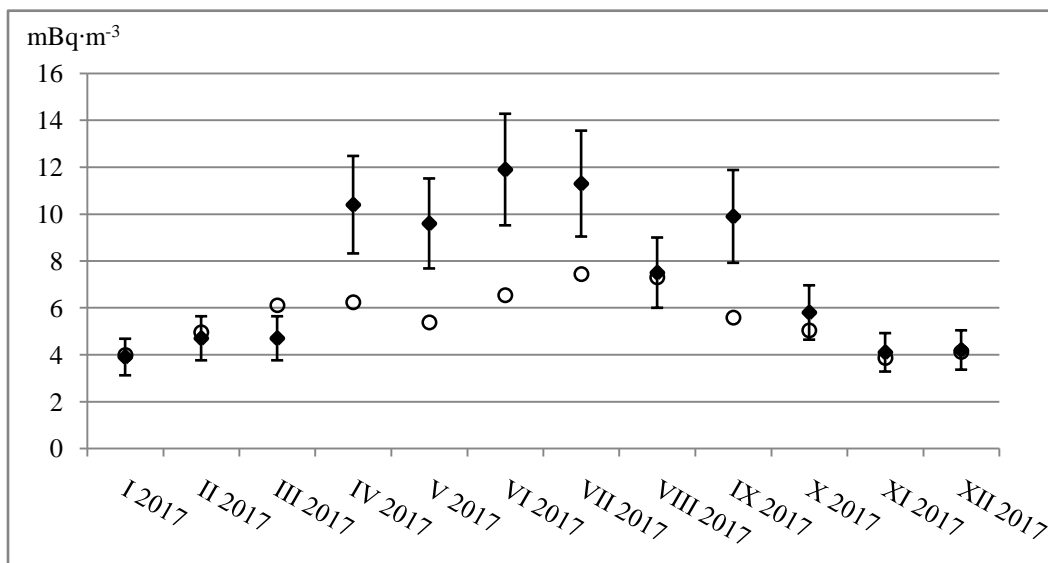
Najlošija linearna kombinacija, u pogledu apsolutnih i relativnih odstupanja, bila je sa vazдушnim pritiskom i jačinom magnetnog polja Sunca. Ovo je bio i jedini slučaj kada je priključivanje jačine magnetnog polja Sunca dalo veća odstupanja od izmerenih vrednosti.

Međutim, kombinacija vazdušnog pritiska i jačine Sunčevog magnetnog polja pokazuje najmanji varijabilitet oko predviđenih vrednosti. U tom pogledu, priključivanje

magnetnog polja Sunca doprinosi poboljšanju parametara MSD , SD i B . U pogledu pristrasnosti, sve razmotrene jednačine predviđale su vrednosti koje su bile niže od izmerenih.

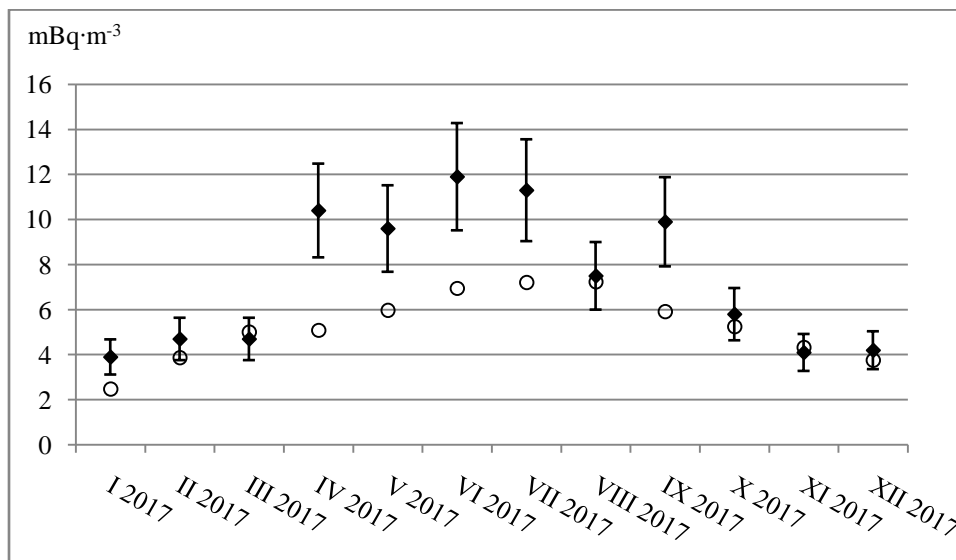
Prikaz rezultata predikcija sa najmanjim apsolutnim i relativnim odstupanjima od izmerenih vrednosti (sa intervalima greške od $\pm 20\%$), dat je na Slikama 63 i 64.

$$A_{M,aer}(V, B_S) = 12,800 - 0,130 \cdot V + 0,017 \cdot B_S \quad (83)$$



Slika 63. Predviđene (kružići) $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima vazduha za 2017. godinu, linearnom kombinacijom vlažnosti vazduha i jačine Sunčevog magnetnog polja, i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)

$$A_{M,aer}(T, B_S) = 1,847 - 0,169 \cdot T + 0,017 \cdot B_S \quad (84)$$



Slika 64. Predviđene (kružići) $A_M({}^7\text{Be})$ u uzorcima vazduha za 2017. godinu, linearnom kombinacijom temperature vazduha i jačine Sunčevog magnetnog polja, i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)

11.6.2.2 Aproksimacija i predikcija koncentracije ${}^7\text{Be}$ u uzorcima depozita

Izmerene koncentracije aktivnosti ${}^7\text{Be}$ u uzorcima depozita su najveću koreliranost sa ispitanim meteorološkim parametrima, ispojile sa temperaturom vazduha (0,35). Međutim, zbog toga što se u slučaju uzoraka vazduha pokazalo da linearnost nije opravdan parametar za odabir potencionalnog uzročnika promene, ispitane su i mogućnosti predikcije na osnovu količine padavina (0,26) i vlažnosti vazduha (-0,18). Kao potencijalni uzročnik 11-godišnje promene koncentracije ${}^7\text{Be}$, pretpostavljena je promena intenziteta površinskog kosmičkog zračenja, odnosno intenziteta Sunčeve aktivnosti.

Uzimanjem u obzir vrednosti odabranih parametara u periodu 1995–2016, metodom linearne regresije su određeni odgovarajući parametri regresionih jednačina. Njihove aproksimirane vrednosti su imale srednja apsolutna odstupanja od izmerenih koncentracija u nizu: 1,26 Bq·m $^{-2}$, 1,35 Bq·m $^{-2}$, 1,35 Bq·m $^{-2}$ i 0,9 Bq·m $^{-2}$ za linearne kombinacije intenziteta kosmičkog (CR) zračenja sa temperaturom vazduha, količinom padavina i vlažnošću vazduha i vremenski pomenog kosmičkog zračenja (za 5 meseci, CR_{5m}) sa temperaturom respektivno. Linearne kombinacije broja Sunčevih pega (kao trasera

intenziteta njegove aktivnosti) sa ispitanim meteorološkim parametrima su, u odnosu na intenzitet kosmičkog zračenja, u proseku dale veće apsolutne greške: 1,33 Bq·m⁻², 1,40 Bq·m⁻² i 1,42 Bq·m⁻², za temperaturu, količinu padavina i vlažnost vazduha, redom.

Takođe, kao i u slučaju uzoraka vazduha, formirane su i jednačine koje ne uzimaju u obzir intenzitet kosmičkog zračenja. Aproximirane vrednosti koje rezultuju ove regresione funkcije imaju srednja apsolutna odstupanja od izmerenih vrednosti u nizu: 1,38 Bq·m⁻², 1,44 Bq·m⁻² i 1,46 Bq·m⁻² za odabir temperature, količine padavina i vlažnosti vazduha, respektivno, kao potencionalnih uzročnika promene $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita.

Iz navedenih vrednosti *MAD*, kao parametra ocene kvaliteta aproksimacije, uočava se da priključivanje intenziteta kosmičkog zračenja jednačinama linearne regresije koncentracije ⁷Be u depozitu, doprinosi povećanju tačnosti aproksimacije.

Statistički parametri predikcije koncentracije izotopa ⁷Be za 2017. godinu, na osnovu formiranih jednačina i izmerenih vrednosti odgovarajućih parametara tokom iste godine, predstavljeni su u Tabelama 31–33.

Tabela 31. Deskriptivni parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita, metodom linearne regresije: Apsolutno odstupanje od izmerenih vrednosti

<i>Apsolutno odstupanje od izmerenih vrednosti (Bq·m⁻²)</i>				
<i>Parametri</i>	<i>min–max</i>	<i>Srednja vrednost (MAD)</i>	<i>Medijana</i>	<i>Sr. vred. kvadrata (MSD)</i>
<i>Temperatura</i>	<i>0,29–3,10</i>	<i>0,96</i>	<i>0,66</i>	<i>1,75</i>
<i>T + CR</i>	<i>0,21–2,36</i>	<i>1,14</i>	<i>1,05</i>	<i>1,49</i>
<i>T + CR_{5m}</i>	<i>0,05–2,46</i>	<i>1,10</i>	<i>1,05</i>	<i>1,72</i>
<i>Padavine</i>	<i>0,07–3,35</i>	<i>1,24</i>	<i>1,14</i>	<i>0,42</i>
<i>Pad. + CR</i>	<i>0,05–2,73</i>	<i>1,28</i>	<i>1,30</i>	<i>2,30</i>
<i>Vlažnost</i>	<i>0,10–3,49</i>	<i>1,08</i>	<i>1,20</i>	<i>2,07</i>
<i>Vlaž. + CR</i>	<i>0,37–2,75</i>	<i>1,35</i>	<i>1,06</i>	<i>2,42</i>

Tabela 32. Deskriptivni parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita, metodom linearne regresije: Relativno odstupanje od izmerenih vrednosti

<i>Relativno odstupanje od izmerenih vrednosti (%)</i>				
<i>Parametri</i>	<i>min–max</i>	<i>Srednja vrednost</i>	<i>Medijana</i>	<i>< 20 %</i>
<i>Temperatura</i>	9–201	60	34	25 %
<i>T + CR</i>	7–310	95	42	25 %
<i>T + CR_{5m}</i>	1–305	89	49	33 %
<i>Padavine</i>	3–441	90	49	25 %
<i>Pad. + CR</i>	2–603	120	42	25 %
<i>Vlažnost</i>	5–447	90	36	42 %
<i>Vlaž. + CR</i>	12–607	130	37	17 %

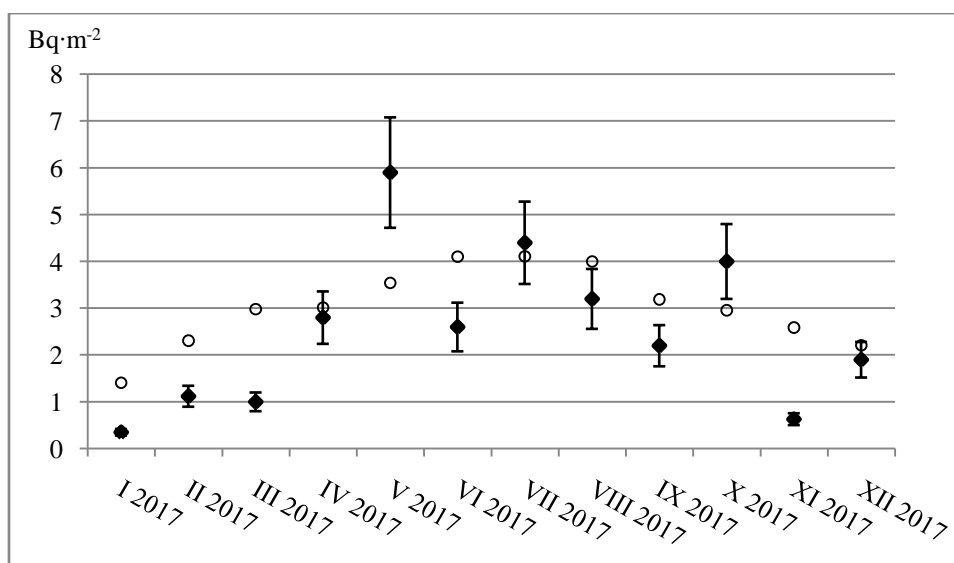
Tabela 33. Deskriptivni parametri predikcije $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita, metodom linearne regresije: Standardna devijacija regresije, pristrasnost i Pirsonov koeficijent

<i>Parametri</i>	<i>Standardna devijacija (SDR), Bq·m⁻²</i>	<i>Pristrasnost (B), Bq·m⁻²</i>	<i>r</i>
<i>Temperatura</i>	1,34	0,12	0,68
<i>T + CR</i>	1,45	-0,52	0,67
<i>T + CR_{5m}</i>	1,44	-0,55	0,67
<i>Padavine</i>	1,69	0,42	0,63
<i>Pad. + CR</i>	1,66	-0,17	0,47
<i>Vlažnost</i>	1,58	0,06	0,52
<i>Vlaž. + CR</i>	1,71	-0,59	0,49

Na osnovu rezultata prikazanih u Tabelama 31–33, može se reći da je za procenu koncentracije izotopa ^7Be u uzorcima depozita, od ispitanih parametara, najpogodnije

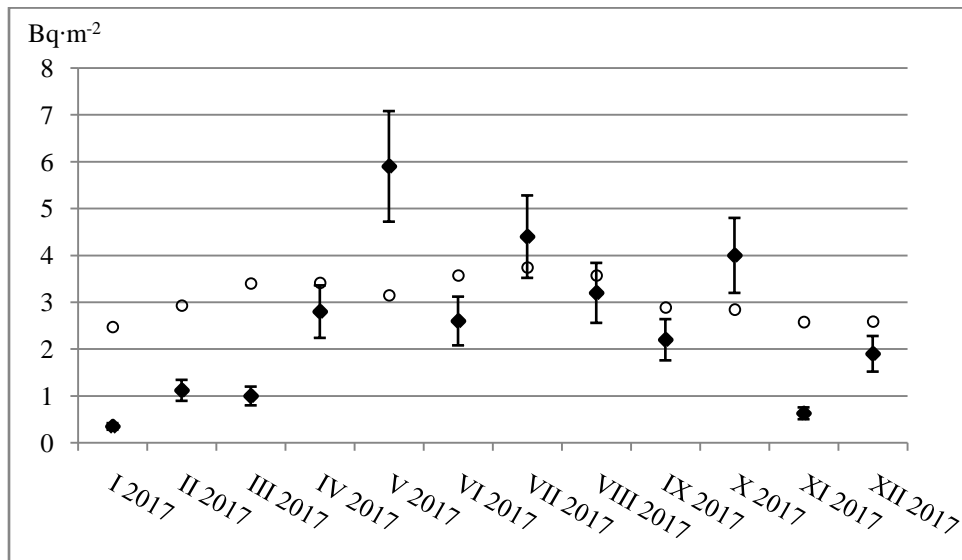
koristiti vrednosti temperature vazduha i to bez kombinovanja sa intenzitetom prizemnog kosmičkog zračenja. Ovaj meteorološki parametar je dao najmanja apsolutna i relativna odstupanja od izmerenih vrednosti, kao i najveći stepen koreliranosti sa izmerenim vrednostima. Kao parametar sa najvećim procentom predviđenih vrednosti unutar intervala $\pm 20\%$ $A_{M,m}$, istakla se vlažnost vazduha, koja je takođe pokazala i najmanji stepen pristrasnosti. Procenjene vrednosti koncentracije izotopa ^7Be na osnovu temperature i vlažnosti vazduha (Jednačine 85 i 86), kao i odgovarajuće izmerene vrednosti tokom 2017. godine sa intervalima greške od $\pm 20\%$, prikazane su na Slikama 65 i 66.

$$A_{M,dep}(T) = 1,144 + 0,090 \cdot T \quad (85)$$



Slika 65. Predviđene $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita za 2017. godinu (kružići) na osnovu rezultata merenja temperature vazduha i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)

$$A_{M,dep}(V) = 5,101 - 0,041 \cdot V \quad (86)$$



Slika 66. Predviđene $A_M(^7\text{Be})$ u uzorcima depozita za 2017. godinu (kružići) na osnovu rezultata merenja vlažnosti vazduha i njihove izmerene vrednosti (kvadratići)

Iznenadjuće je da, iako su sve regresione jednačine pokazale bolje rezultate aproksimacije u slučajevima kada je u njih bio uvršćen i intenzitet kosmičkog zračenja, ovaj parametar u većini slučajeva nije doprineo poboljšanju predikcije za narednu godinu.

12 ZAKLJUČAK

Zaključke proistekle iz ove disertacije možemo grupisati na osnovu dobijenih korelacionih odnosa. Razmatranjem međusobnih odnosa lokacijskih parametara, zaključuje se da koncentracija izotopa ^7Be u prizemnom sloju atmosfere ima pozitivnu asimetriju, što znači da u većini slučajeva dostiže vrednosti niže od prosečnih ($3,96 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$ u vazduhu i $2,30 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ u depozitu). Varijabilnost koncentracije u uzorcima vazduha je relativno konstantna, dok su u uzorcima depozita razlike dosta izraženije sa tendencijom porasta tokom vremena.

Na osnovu intervala vrednosti procenjene efektivne godišnje doze primljene inhalacijom ^7Be u periodu 1995–2016, može se reći da prisutna koncentracija ^7Be u vazduhu nema veliki doprinos u radijacionom opterećenju ljudskog organizma.

U ispitivanim matriksima, ^7Be najveću prosečnu koncentraciju dostiže u junu, dok su u januaru (vazduh) i novembru (depozit) njene vrednosti najniže. Najveće koeficijente varijacije ispoljavaju zimski meseci, dok nasuprot njima, prolećni period ima najmanje izraženu varijabilnost.

Posmatranjem mesečnih i kvartalnih indeksa koncentracije ^7Be , vidi se da srednju vrednost $A_M(^7\text{Be})$ tokom celog posmatranog perioda najviše formiraju prolećne i jesenje vrednosti, dok tokom letnjih i zimskih meseci $A_M(^7\text{Be})$ dostiže svoje maksimume i minimume, respektivno.

Prosečne godišnje koncentracije izotopa ^7Be variraju od godine do godine, ispoljavajući pri tome izvestan periodičan karakter. Na periodogramima koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha i depozita se ističu po dva harmonika. Njihovi periodi, respektivno u odnosu na intenzitet, iznose $T_1 = 1 \text{ god.}$ i $T_2 = 22 \text{ god.}$, za uzorke vazduha, i $T_1 = 1 \text{ god.}$ i $T_2 = 11 \text{ god.}$, za uzorke depozita.

S obzirom na to da su varijacije kosmičkog zračenja tokom godine vrlo slabe, pretpostavlja se da je jednogodišnji period posledica uticaja meteoroloških parametara, dok bi se 22-godišnja promena mogla pripisati promeni orijentacije magnetnog polja Sunca koja izaziva drift efekat u obliku krive intenziteta kosmičkog zračenja na Zemlji. Period od 11

godina je najverovatnije posledica uticaja promene aktivnosti Sunca na intenzitet kosmičkog zračenja na Zemlji.

Rezultati ispitivanja međusobne koreliranosti mesečnih vrednosti koncentracije ^7Be u vazduhu i pretpostavljenih uzročnika njene promene pokazuju najveću direktnu linearnu zavisnost sa brojem sunčanih sati (0,60) i temperaturom vazduha (0,59), dok je značajan nivo antikoreliranosti dobijen sa vrednostima vazdušnog pritiska (-0,52) i vlažnosti vazduha (-0,50). Oblačnost je pokazala nešto slabiji uticaj na koncentraciju ^7Be , a nivo koreliranosti sa količinom padavina, kao osnovnim transportnim putem ovog izotopa u niže slojeve atmosfere, nije imao statistički značajnu vrednost ($p > 0,05$).

Izmerena koncentracija ^7Be u uzorcima depozita ne pokazuje jaču povezanost ni sa jednim ispitanim meteorološkim parametrom, ali je u najvećoj meri izražena veza sa temperaturom vazduha (0,35) i insolacijom (0,32). Kao i u slučaju uzoraka vazduha, negativna koreliranost je dobijena sa vazdušnim pritiskom i vlažnošću vazduha, dok sa oblačnošću nije dobijena statistički značajna vrednost korelacionog koeficijenta ($p > 0,05$). Jedini ispitani meteorološki parametar koji je pokazao veću koreliranost sa koncentracijom ^7Be u depozitu (0,26) nego u vazduhu (0,06) je količina padavina.

Vrednosti Pirsonovog koeficijenta korelacije aritmetičkih sredina vrednosti grupisanih po mesecima pokazuju jaku povezanost koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere i meteoroloških parametara. Čak 95 % varijacije koncentracije ^7Be u vazduhu, kao i 79 % promene koncentracije ^7Be u depozitu tokom različitih meseci može da se objasni varijacijom insolacije.

Korelacija aritmetičkih sredina vrednosti parametara grupisanih po godinama, imala je statistički značajnu vrednost ($p < 0,05$) samo u slučaju antikoreliranosti koncentracije ^7Be u vazduhu i vazdušnog pritiska (-0,74). Na osnovu ovih rezultata može se zaključiti da meteorološki uslovi u najvećoj meri utiču samo na sezonske varijacije koncentracije ^7Be u prizemnom sloju atmosfere.

Varijacije intenzita kosmičkog zračenja ispoljavaju statistički značajnu linearnu vezu ($p < 0,05$) samo sa koncentracijom ^7Be u uzorima depozita. Varijaciji intenziteta

kosmičkog zračenja se može pripisati svega 8 % varijacije mesečnih vrednosti i oko 33 % varijacije godišnjih vrednosti koncentracije ^7Be u depozitu. Najslabija i statistički neznčajna koreliranost je dobijena između vrednosti ovih parametara grupisanih po mesecima, pa se može reći da fluktuacije u kosmičkom zračenju utiču samo na godišnje varijacije koncentracije ^7Be u depozitu, dok na mesečne vrednosti nemaju značajniji uticaj.

Poređenjem mesečnih i godišnjih vrednosti koncentracije ^7Be u oba matriksa, kao i njihovih vrednosti grupisanih po mesecima sa odgovarajućim brojem Sunčevih pega, ispoljena je samo jedna statistički značajna linearna veza. Ona je ukazivala na vrlo slabu antikoreliranost ($r = -0,12$) mesečnih vrednosti koncentracije ^7Be u depozitu sa brojem Sunčevih pega. Međutim, jednogodišnje transliranje godišnjih koncentracija ^7Be u depozitu u odnosu na odgovarajući broj Sunčevih pega, doprinelo je povećanju vrednosti Pirsonovog koeficijenta na čak $-0,56$. Ova vrednost odgovara direknoj korelaciji ^7Be sa intenzitetom kosmičkog zračenja. Vremenska translacija broja Sunčevih pega dovodi i do povećanja koreliranosti godišnjih vrednosti podataka o intenzitetu kosmičkog zračenja i broju Sunčevih pega sa $-0,85$ na $-0,95$.

Koncentracija izotopa ^7Be u mesečnim uzorcima depozita korelira sa jačinom Sunčevog magnetnog polja na nivou $r = 0,27$, dok u uzorcima vazduha ova vrednost iznosi $0,39$. Vrednosti koeficijenta determinacije ukazuju na to da bi varijacija magnetnog polja Sunca mogla objasniti 26 % godišnje varijacije koncentracije ^7Be u depozitu i 42 % varijacije u uzorcima vazduha.

Poređenjem srednjih apsolutnih odstupanja (*MAD*) aproksimiranih vrednosti tokom perioda 1995–2016. pomoću oba metoda (formiranjem regresionih jednačina metodom inverzne Furijeove transformacije i linearne regresije pretpostavljenih potencijalnih uzročnika njene promene) u odnosu na odgovarajuće izmerene koncentracije aktivnosti ^7Be u uzorcima vazduha i depozita, mogu se izvući sledeći zaključci:

➤ Ukoliko se odaberu dva najintenzivnija harmonika iz periodograma koncentracije ^7Be , u oba medijuma se postižu manja odstupanja aproksimacijom pomoću metoda inverzne Furijeove transformacije.

➤ Amplitudna modulacija regresionih funkcija formiranih metodom inverzne Furijeove transformacije dovodi do poboljšanja svih deskriptivnih statističkih parametara.

➤ U slučaju aproksimacije koncentracije ${}^7\text{Be}$ u uzorcima depozita, najbolja aproksimacija se postiže dvostrukom amplitudnom modulacijom periodima od 11 i 22 god.

➤ Samo je u jednom slučaju metod linearne regresije ispoljio manje srednje apsolutno odstupanje od svega $0,18 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$. Do ovoga je došlo kada su za nezavisne promenljive izabrane temperatura vazduha i 5 meseci transliran intenzitet kosmičkog zračenja.

Razmatranjem deskriptivnih statističkih parametara predviđenih vrednosti za 2017. godinu pomoću oba metoda (ekstrapolacijom regresione jednačine formirane metodom inverzne Furijeove transformacije i uvrščavanjem izmerenih vrednosti odabranih nezavisnih promenljivih tokom 2017. godine u formirane linearne regresione jednačine) u odnosu na odgovarajuće izmerene koncentracije aktivnosti ${}^7\text{Be}$ u uzorcima vazduha i depozita, može se reći da:

➤ Kao i u slučaju aproksimiranih vrednosti, metod Furijeove analize je predvideo približnije vrednosti za oba ispitana medijuma.

➤ U slučaju uzoraka vazduha, uključivanje jačine magnetnog polja Sunca u linearnu regresionu jednačinu je doprinelo poboljšanju svih ispitanih statističkih parametara. Isto se dogodilo i pri amplitudnoj modulaciji regresione jednačine formirane metodom inverzne Furijeove transformacije periodom od 22 godine.

➤ Suprotna situacija se dogodila sa rezultatima predikcije koncentracije ${}^7\text{Be}$ u depozitnim uzorcima. Tada su približnije vrednosti dobijene bez uključivanja intenziteta kosmičkog zračenja u linearne regresione jednačine, kao i bez amplitudne modulacije periodom od 11 godina, odnosno 11 i 22 godine.

➤ Treba napomenuti da, bez obzira na prethodni zaključak, inverzna Furijeova transformacija je pokazala bolje rezultate u slučaju formiranja regresione jednačine koja uključuje period od 11 godina, nego ukoliko se zasniva samo na periodu od jedne godine.

➤ Takođe, treba skrenuti pažnju i na to da su tokom 2017. izmerene koncentracije aktivnosti ${}^7\text{Be}$ u uzorcima vazduha bile daleko iznad prosečnih za odgovarajuće periode godine ($B = -3,23 \text{ mBq}\cdot\text{m}^{-3}$). U slučaju depozitnih uzoraka, ova odstupanja su bila znatno niža i iznosila su svega $B = -0,20 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$.

Međusobnim poređenjem rezultata predikcije koncentracije ^7Be u ispitanim sredinama, pokazalo se da na ovaj način znatno približnije rezultate pružaju aproksimacione funkcije koncentracije ovog izotopa u uzorcima vazduha. U uzorcima depozita, srednja relativna odstupanja predviđenih vrednosti u odnosu na odgovarajuće rezultate merenja između (40–50) %. U slučaju uzoraka vazduha, ova odstupanja su ispod 20 %. Zatim, u uzorcima vazduha skoro dvostruko veći procenat predviđenih vrednosti ulazi u opseg ± 20 % odgovarajućih izmerenih vrednosti. Veći nivo koreliranosti je takođe postignut za uzorke vazduha. Ostali parametri nisu kompetentni za poređenje, jer njihove vrednosti zavise od varijabilnosti koncentracije ispitanog izotopa unutar različitih vrsta uzoraka.

Najvažniji zaključak sprovedenog istraživanja je da se u vremenskoj distribuciji koncentracije ^7Be u uzorcima vazduha uočava uticaj jačine Sunčevog magnetnog polja i da bi u slučajevima njene simulacije svakako trebalo uključiti period promene od 22 godine.

LITERATURA

- [1] Marmier P. and Sheldon E., *Physics of nuclei and particles*, Pub. Academic Press, New York, San Francisco, London, Library of Congress Catalog Card Number: 68-14644 (1969)
- [2] L'Annunziata M., *Handbook of Radioactivity Analysis*, Pub. Elsevier Inc, ISBN: 978-0-12-384873-4 (2012)
- [3] Canada's Nuclear Regulator, *Introduction to Radiation*, Pub. The Canadian Nuclear Safety Commission, ISBN: 978-1-100-21572-3 (2012)
- [4] *Pravilnik o granicama izlaganja jonizujućim zračenjima i merenjima radi procene nivoa izlaganja jonizujućim zračenjima ("Sl. glasnik RS", br. 86/2011)*
- [5] *Pravilnik o granicama radioaktivne kontaminacije lica, radne i životne sredine i načinu sprovođenja dekontaminacije ("Sl. glasnik RS", br. 38/2011)*
- [6] http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm, 04.09.2018.
- [7] <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>, 04.09.2018.
- [8] Todorović D., *Distribucija prirodnih (^7Be , ^{210}Pb) i proizvedenih (^{137}Cs) radionuklida u prizemnom sloju atmosfere i slobodno nataloženoj sredini u urbanim sredinama*, Doktorska disertacija, Fizički fakultet, Univerzitet u Beogradu (2000)
- [9] Todorović D., Rajačić M., Janković M., Krneta Nikolić J., Sarap N. i Pantelić G., *Radioaktivnost atmosfere u Institutu za nuklearne nauke "Vinča" u periodu 1985–2015*, Poglavlje u Monografiji "Černobilj 30 godina posle", ISBN: 978-86-7306-138-2 (2016) 53–71
- [10] Mihailović D., *Meteorologija za studente Poljoprivrednog fakulteta u Novom Sadu*, Poljoprivredni fakultet, Novi Sad (2017)
- [11] <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7b.html>, 04.09.2018.
- [12] Milosavljević M., *Meteorologija*, IDP Naučna knjiga, Beograd, ISBN: 86-23-21075-1 (1990)
- [13] http://www.hidmet.gov.rs/ciril-meteorologija/klimatologija_temp_rezim.php, 04.09.2018.

- [14] http://www.hidmet.gov.rs/ciril-meteorologija/klimatologija_padav_rezim.php, 04.09.2018.
- [15] Panofsky H., *Temperature and Wind in the Lower Stratosphere*, [Advances in Geophysics 7](#) (1961) 215–247
- [16] *Evaluation of Guidelines for Exposures to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*, Committee on Evaluation of EPA Guidelines for Exposure to Naturally Occurring Radioactive Materials, National Research Council, ISBN: 0-309-58070-6 (1999)
- [17] Ziegler J., *Terrestrial cosmic rays*, IBM Journal of Research and Development, Vol.40 No.1 (1996) 19–39, Pub. International Business Machines Corporation, ISSN : 2311-3278
- [18] Choppin G., Liljenzin J. and Rydberg J., *Radiation and Elementary Particles*, Chapter 10 in Radiochemistry and Nuclear Chemistry, Pub. Butterworth-Heinemann (2002) 283–298
- [19] Smart D. and Shea M., *The Change in Geomagnetic Cutoffs Due to Changes in the Dipole Equivalent of the Earth's Magnetic Field*, 23rd International Cosmic Ray Conference, Vol. 3, 19–30 July, 1993 at University of Calgary, Alberta, Canada, Bibliographic Code: [1993ICRC...3..781S](#) (1993) 781
- [20] Aguilar J., *Cosmic Rays*, Lecture 3 in Particle Astrophysics, Université Libre de Bruxelles, <http://w3.iihe.ac.be/~aguilar/PHYS-467/PA3.pdf>
- [21] Compton A. H. and Turner R. N., *Cosmic Rays on the Pacific Ocean*, Physical Review 52 (1937) 799–813
- [22] Beer J., McCracken K. and von Steiger R., *Cosmogenic Radionuclides: Theory and Applications in the Terrestrial and Space Environments*, Part of the Physics of Earth and Space Environments book series, Pub. Springer, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-642-14650-3 (2012)
- [23] Yoshimori M., *Production and behavior of beryllium 7 radionuclide in the upper atmosphere*, Advances in Space Research 36 (2005) 922–926
- [24] Liu H., Considine D.B., Horowitz L.W., Crawford J.H., Rodriguez J.M., Strahan S.E., Damon M.R., Steenrod S.D., Xu X., Kouatchou J., Carouge C. and Yantosca

- R.M., *Using beryllium-7 to assess cross-tropopause transport in global models*, Atmospheric Chemistry and Physics 16 (2016) 4641–4659
- [25] Šegan S. i Pejović N., *Osnovi astronomije*, Vesta Co. (2006) ISBN: 86-7212-009-4
- [26] Eddy J.A., *The Sun, the Earth, and Near-Earth Space*, A Guide to the Sun-Earth System, National Aeronautics and Space Administration (NASA) ISBN 978-0-16-08308-8
- [27] Briggs R.P. and Carlisle R.J., *The Structure of the Sun*, Chapter 2 in Solar Physics and Terrestrial Effects, Space Weather Prediction Center, Third Edition (2016)
- [28] Astronomski magazin, <http://static.astronomija.org.rs/suncsist/Sunce/sunce/5.htm>, 04.09.2018.
- [29] Schwabe S.H., *Die Sonne*, Astronomische Nachrichten 20 No.17 (1843) 238–286
- [30] Thomas S., Owens M. and Lockwood., *The 22-Year Hale Cycle in Cosmic Ray Flux - Evidence for Direct Heliospheric Modulation*, Solar Physics 289 (2014) 407–421
- [31] Owens M.J., McCracken K.G., Lockwood M. and Barnard L., *The heliospheric Hale cycle over the last 300 years and its implications for a ‘lost’ late 18th century solar cycle*, Journal of Space Weather and Space Climate 5 (2015) A30, DOI: 10.1051/swsc/2015032
- [32] https://www.hko.gov.hk-m/article_e.htm?title=ele_00424, 04.09.2018.
- [33] Smith E., *The Helispheric current sheet*, Journal of Geophysical 106 No.A8 (2001) 15819–15831
- [34] Sharma U., Singh G. and Shrivastava P., *Long-term relationship between the tilt of the heliospheric neutral current sheet and cosmic ray intensity variation*, Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference (ICRC) Vol. 2, India, Pune, August 3–11 (2005) 179–182
- [35] <https://slideplayer.com/slide/4519498/>, 04.09.2018.
- [36] <http://www.angelfire.com/rnb/pp0/plasma.html>, 04.09.2018.
- [37] <http://inspirehep.net/record/856138/plots>, 04.09.2018.
- [38] Maris G., Popescu M., Donea A. and Mierla M., *The 22-Year Solar Magnetic Cycle. II Flare Activity*, Proceedings of the Regional Meeting on Solar Physics "Solar

- Researches in the South-Eastern European Countries: Present and Perspectives", Romania, Bucharest, April 24–28 (2001) 48–55
- [39] Singh P. R., Ahmad S., Pandey A. C., Saxena A. K., Tiwari C. M. and Mishra A. P., *Cosmic Ray Associated with Coronal Index and Solar Flare Index during Solar Cycle 22–23*, International Journal of Astronomy and Astrophysics 7 (2017) 162–173
- [40] Venkatesan D. and Badruddin., *Cosmic-ray intensity variations in the 3-dimensional heliosphere*, Space Science Reviews 52 (1990) 121–194
- [41] Potgieter M.S., Burger R.A. and Ferreira S.E.S., *Modulation of Cosmic Rays in the Heliosphere From Solar Minimum to Maximum: a Theoretical Perspective*, Space Science Reviews 97 (2001) 295–307
- [42] Kudela K., Storini M., Hofer M. and Belov A., *Cosmic Rays in Relation to Space Weather*, Space Science Reviews 93 (2000) 153–174
- [43] Aslam O.P.M. and Badruddin., *Solar Modulation of Cosmic Rays during the Declining and Minimum Phases of Solar Cycle 23: Comparison with Past Three Solar Cycles*, Solar Physics 279 (2012) 269–288
- [44] Usoskin I.G., Mursula K., Kananen H. and Kovaltsov G.A., *Dependence of cosmic rays on solar activity for odd and even solar cycles*, Advances in Space Research 27 No.3 (2001) 571–576
- [45] Dorman I.V. and Dorman L.I., *Solar Wind Properties Obtained from the Study of the 11-year Cosmic Ray Cycle*, Journal of Geophysical Research 72 No.5 (1967) 1513–1520
- [46] Nagashima K. and Morishita I., *Twenty-Two Year Modulation of Cosmic Rays Associated with Polarity Reversal of Polar Magnetic Field of the Sun*, Planetary and Space Science 28 No.2 (1980) 195–205
- [47] Webber W.R. and Lockwood J.A., *Characteristics of the 22-Year Modulation of Cosmic Rays as Seen by Neutron Monitor*, Journal of Geophysical Research 93 No.8 (1988) 8735–8740

- [48] Burlaga L.F., McDonald F.B., Goldstien M.L. and Lazarus A.J., *Cosmic ray modulation and turbulent interaction regions near 11 AU*, Journal of Geophysical Research 90 (1985) 12027–12039
- [49] Storini M., Borello-Filisetti D., Mussinov V., Parisi M. and Sykora J., *Aspects of the long-term cosmic-ray modulation*, Solar Physics 157 (1995) 375–387
- [50] Ahluwalia H.S. and Wilson M.D., *Present Status of the Recovery Phase of Cosmic Ray 11-year Modulation*, Journal of Geophysical Research 101 (1996) 4879–4884
- [51] Cliver E.W. and Ling A.G., *22 Year Patterns in the Relationship of Sunspot Number and Tilt Angle to Cosmic-Ray Intensity*, The Astrophysical Journal Letters 551 No.2 (2001) 189–192
- [52] Kane R.P., *Lags, hysteresis, and double peaks between cosmic rays and solar activity*, Journal of Geophysical Research 108 No.A10 (2003) 1379–1388
- [53] Badruddin., Singh M. and Singh Y. P., *Modulation loops, time lag and relationship between cosmic ray intensity and tilt of the heliospheric current sheet*, Astronomy & Astrophysics 466 (2007) 697–704
- [54] Singh M., Singh Y.P. and Badruddin., *Solar modulation of galactic cosmic rays during the last five solar cycles*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 70 (2008) 169–183
- [55] Hatton C.J., *Solar flares and the cosmic ray intensity*, Solar Physics 66 (1980) 159–165
- [56] Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Kananen H., Mursula K. and Tanskanen P. J., *Phase evaluation of Solar activity and cosmic-ray variation cycles*, Solar Physics 170 (1997) 447–452
- [57] Heber B., *Cosmic Rays Through the Solar Hale Cycle*, Space Science Reviews 176 (2013) 265–278
- [58] Parker E.N., *The passage of energetic charged particles through interplanetary space*, Space Science 13 (1965) 9–49
- [59] Potgieter M.S. and Le Roux J.A., *The long-term heliospheric modulation of galactic cosmic rays according to a time-dependent drift model with merged interaction regions*, The Astrophysical Journal 423 (1994) 817–827

- [60] Van Allen J., *On the modulation of galactic cosmic ray intensity during solar activity cycles 19, 20, 21, 22 and early 23*, Geophysical Research Letters 27 No.16 (2000) 2453–2456
- [61] Jokipii J. R. and Levy E. H., *Effect of particle drifts on Solar modulation of galactic cosmic rays*, The Astrophysical Journal 213 (1977) 85–88
- [62] Le Roux J.A. and Potgieter M.S., *The simulation of complete 11 and 22 year modulation cycles for cosmic rays in the heliosphere using a drift model with global merged interaction regions*, The Astrophysical Journal 442 (1995) 847–851
- [63] Kudela K., Ananth A.G. and Venkatesan D., *The Low-frequency Spectral Behavior of Cosmic Ray Intensity*, Journal of Geophysical Research 96 (1991) 15871–15875
- [64] Mavromichalaki H., Belehaki A. and Rafios X., *Simulated Effects at Neutron Monitor Energies: Evidence for a 22-Year Cosmic-Ray Variation*, Astronomy and Astrophysics 330 (1998) 764–772
- [65] McDonald F.B., Lal N. and McGuire R.E., *Cosmic Ray Recovery and Solar Minimum Phase of Solar Cycle 22 – an Interim Report*, Journal of Geophysical Research 103 No.A1 (1998) 373–379
- [66] Usoskin I.G., Kananen H., Mursula K., Tanskanen P. and Kovaltsov G.A., *Period of unusual modulation of cosmic ray intensity: The declining phase of cycle 20*, Proceeding of the 31st ESLAB Symposium "Correlated Phenomena at the Sun, in the Heliosphere and in Geospace", ESTEC, The Netherlands, Noordwijk, September 22–25 (1997) 491–495
- [67] Usoskin I.G., Kananen H., Mursula K., Tanskanen P. and Kovaltsov G.A., *Correlative study of solar activity and cosmic ray intensity*, Journal of Geophysical Research 103 No.A5 (1998) 9567–9574
- [68] Jokipii J.R., *Variations of the Cosmic-Ray Flux with Time*, IN: The sun in time (A92-46664 19-92), Tucson, AZ, University of Arizona Press, Bibliographic Code: 1991suti.conf..205J (1991) 205–220
- [69] Kane R.P., *Hysteresis of Cosmic Rays with Respect to Sunspot Numbers During the Recent Sunspot Minimum*, Solar Physics 269 (2011) 451–454

- [70] <https://indico.in2p3.fr/event/7012/contributions/40414/attachments/32683/40251/FragW2012.SM-FBarao.pdf>, 04.09.2018.
- [71] Siingh D. and Singh R.P., *The role of cosmic rays in the Earth's atmospheric processes*, PRAMANA-Journal of Physics 74 No.1 (2010) 153–168
- [72] Weizheng Q., Jinping Z., Fei H. and Shenggui D., *Correlation between the 22-year Solar magnetic cycle and the 22-year quasicycle in the Earth's atmospheric temperature*, The Astronomical Journal 144:6 (2012) 7, doi: 10.1088/0004-6256/144/1/
- [73] Lal D., Malhotra P.K. and Peters B., *On the production of radioisotopes in the atmosphere by cosmic radiation and their application to meteorology*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics 12 (1958) 306-328
- [74] Yoshimori M., *Beryllium-7 radionuclide as a tracer of vertical air mass transport in the troposphere*, Advances in Space Research 36 (2005) 828–832
- [75] Koch D. and Rind D., *Beryllium10/beryllium7 as a tracer of stratospheric transport*, Journal of Geophysical Research 103 No.D4 (1998) 3907–3917
- [76] Zanis P., Gerasopoulos E., Priller A., Schnabel C., Stohl A., Zerefos C., Gäggeler H.W., Tobler L., Kubik P.W., Kanter H.J., Scheel H.E., Luterbacher J. and Berger M., *An estimate of the impact of stratosphere-to-troposphere transport (STT) on the lower free tropospheric ozone over the Alps using ^{10}Be and ^7Be measurements*, Journal of Geophysical Research 108 No.D12 (2003) 8520, doi:10.1029/2002JD002604
- [77] McCracken K.G., Beer J. and McDonald F.B., *Variations in the cosmic radiation, 1890–1986, and the solar and terrestrial implications*, Advances in Space Research 34 (2004) 397–406
- [78] Christl M., Lippold J., Steinhilber F., Bernsdorff F. and Mangini A., *Reconstruction of global ^{10}Be production over the past 250ka from highly accumulating Atlantic drift sediments*, Quaternary Science Reviews 29 (2010) 2663–2672
- [79] Solanki S.K., Usoskin I.G., Kromer B., Schüssler M. and Beer J., *Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years*, Nature 431 (2014) 1084–1087

- [80] Svalgaard L. and Cliver E., *Heliospheric magnetic field 1835–2009*, Journal of Geophysical Research 115 A9 (2010) A091111, doi:10.1029/2009JA015069
- [81] Yamamoto M., Sakaguchi A., Sasaki K., Hirose K., Igarashi Y. and Kim C.K., *Seasonal and spatial variation of atmospheric ^{210}Pb and ^7Be deposition: features of the Japan Sea side of Japan*, Journal of Environmental Radioactivity 86 (2006) 110–131
- [82] Gourdin E., Evrard O., Huon S., Reyss J.-L., Ribolzi O., Bariac T., Sengtaheuanghoung O. and Ayrault S., *Spatial and temporal variability of ^7Be and ^{210}Pb wet deposition during four successive monsoon storms in a catchment of northern Laos*, Journal of Environmental Radioactivity 136 (2014) 195–205
- [83] Pham M.K., Povinec P.P., Nies H. and Betti M., *Dry and wet deposition of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs in Monaco air during 1998–2010: seasonal variations of deposition fluxes*, Journal of Environmental Radioactivity 120 (2013) 45–57
- [84] Lee H.N., Tositti L., Zheng X. and Bonasoni P., *Analyses and comparisons of variations of ^7Be , ^{210}Pb , and $^7\text{Be}/^{210}\text{Pb}$ with ozone observations at two Global Atmosphere Watch stations from high mountains*, Journal of Geophysical Research 112 (2007) DO5303, doi:10.1029/2006JD007421
- [85] Bourcier L., Masson O., Laj P., Pichon J.M., Paulat P., Freney E. and Sellegri K., *Comparative trends and seasonal variation of ^7Be , ^{210}Pb and ^{137}Cs at two altitude sites in the central part of France*, Journal of Environmental Radioactivity 102 No.3 (2011) 294–301
- [86] Baskaran M. and Swarzenski P.W., *Seasonal variations on the residence times and partitioning of short-lived radionuclides (^{234}Th , ^7Be and ^{210}Pb) and depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb in Tampa Bay, Florida*, Marine Chemistry 104 (2007) 27–42
- [87] Todorović D., Popović D., Nikolić J. and Ajtić J., *Radioactivity monitoring in ground level air in Belgrade urban area*, Radiation Protection Dosimetry 142 No.2–4 (2010) 308–313
- [88] Janković M.M., Todorović D.J., Nikolić J.D., Rajačić M.M., Pantelić G.K. and Sarap N.B., *Temporal changes of beryllium-7 and lead-210 in ground level air in Serbia*, Hemijska industrija 68 No.1 (2014) 83–88

- [89] Todorović D., Popović D., Ajtić J. and Nikolić J., *Leaves of higher plants as biomonitors of radionuclides (^{137}Cs , ^{40}K , ^{210}Pb and ^7Be) in urban air*, Environmental Science and Pollution Research 20 No.1 (2013) 525–532
- [90] Lozano R. L., San Miguel E. G., Bolívar J. P. and Baskaran M., *Depositional fluxes and concentrations of ^7Be and ^{210}Pb in bulk precipitation and aerosols at the interface of Atlantic and Mediterranean coasts in Spain*, Journal of Geophysical Research 116 (2011) D18213
- [91] Ajtić J., Todorović D., Filipović A. and Nikolić J., *Ground level air beryllium-7 and ozone in Belgrade*, Nuclear Technology and Radiation Protection 23 No.2 (2008) 65–71
- [92] D'Amours R., Mintz R., Mooney C. and Wiens B.J., *A modeling assessment of the origin of Beryllium-7 and Ozone in the Canadian Rocky Mountains*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118 (2013) 10125–10138, doi:10.1002/jgrd.50761
- [93] Esquivel L A.D., Moreira R.M., Monteiro R.P.G., Rochido Dos Santos A.A., Ayub J.J. and Valladares D.L., *Wet deposition and soil content of Beryllium-7 in a micro-watershed of Minas Gerais (Brazil)*, Journal of Environmental Radioactivity 169–170 (2017) 56–63
- [94] Taylor A., Blake W.H., Smith H.G., Mabit L. and Keith-Roach M.J., *Assumptions and challenges in the use of fallout beryllium-7 as a soil and sediment tracer in river basins*, Earth-Science Reviews 126 (2013) 85–95
- [95] Krmar M., Mihailović D.T., Arsenić I., Radnović D. and Pap I., *Beryllium-7 and ^{210}Pb atmospheric deposition measured in moss and dependence on cumulative precipitation*, Science of the Total Environment 541 (2016) 941–948
- [96] Bettoli M.G., Cantelli L., Degetto S., Tositti L., Tubertini O. and Valcher S., *Preliminary investigation on ^7Be as a tracer in the study of environmental processes*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 190 No.1 (1995) 137–147

- [97] Zhu J. and Olsen C.R., *Beryllium-7 atmospheric deposition and sediment inventories in the Neponset River estuary, Massachusetts, USA*, Journal of Environmental Radioactivity 100 (2009) 192–197
- [98] Zhang F., Zhang B. and Zang M., *Beryllium-7 atmospheric deposition and soil inventory on the northern Loess Plateau of China*, Atmospheric Environment 77 (2013) 178–184
- [99] Igarashi Y., Hirose K. and Otsuji-Hatorim., *Beryllium-7 Deposition and Its Relation to Sulfate Deposition*, Journal of Atmospheric Chemistry 29 (1998) 217–231
- [100] Yong-Liang Y., Nan G., Cun-Zhen G., Xiao-Hua Z., Yong L., Yuan X., Han-Qing Y. and Ke-Yan T., *East Asia monsoon's influence on seasonal changes of beryllium-7 and typical POPs in near-surface atmospheric aerosols in mid-latitude city Qingdao, China*, Atmospheric Environment 79 (2013) 802–810
- [101] Hernandez F., Rodriguez S., Karlsson L., Alonso-Perez S., Lopez-Perez M., Hernandez-Armas J. and Cuevas E., *Origin of observed high ^7Be and mineral dust concentrations in ambient air on the Island of Tenerife*, Atmospheric Environment 42 (2008) 4247–4256
- [102] *Health Assessment Document for Beryllium*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA/600/8-84/026F (1987)
- [103] http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/Be-7_tables.pdf, 05.09.2018.
- [104] <https://www.britannica.com/science/radioactivity>, 05.09.2018.
- [105] <https://chemistry.tutorvista.com/nuclear-chemistry/nuclear-decay.html>, 05.09.2018.
- [106] Rauscher T. and Patkós A., *Origin of the Chemical Elements*, <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept16/Rauscher/paper.pdf>
- [107] http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Solar_Neutrinos.htm, 05.09.2018.
- [108] https://en.wikipedia.org/wiki/CNO_cycle, 05.09.2018.
- [109] https://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=1408, 05.09.2018.
- [110] Nakamura Y., Mabuchi H. and Hamaguchi H., *Beryllium-7 production from oxygen by atmospheric cosmic rays*, Geochemical Journal 6 (1972) 43–47
- [111] Armengaud A. and Genthon C., *Modelling global distributions of ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^7Be in the atmosphere with general circulation models*, Symposium Isotope techniques

in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere, Vienna (1993) 15–24.

- [112] Usoskin I.G. and Kovaltsov G.A., *Production of cosmogenic ^7Be isotope in the atmosphere: Full 3-D modeling*, Journal of Geophysical Research 113 (2008) D12107, doi:10.1029/2007JD009725
- [113] Paul A. Benioff., *Cosmic-Ray Production Rate and Mean Removal Time of Beryllium-7 from the Atmosphere*, Physical Review 104 No.1 (1956) 1122–1130
- [114] Papastefanou C. and Ioannidou A., *Aerodynamic Size Association of ^7Be in Ambient Aerosols*, Journal of Environmental Radioactivity 26 (1995) 273–282
- [115] Persson B.R.R. and Holm E., *^7Be , ^{210}Pb and ^{210}Po in the surface air from the Arctic to Antarctica*, Journal of Environmental Radioactivity 138 (2014) 364–374
- [116] Persson B.R.R., Holm E., Roos P., Roos B. and Carlsson K.-Å., *Radioactivity Exploration from the Arctic to the Antarctic Part 3: The SWEDARP expedition*, Acta Scientiarum Lundensia 2015-004 (2015) 1–17, ISSN 1651-5013
- [117] Feely H.W., Larsen R.J. and Sanderson C.G., *Factors that cause seasonal variations in Beryllium-7 concentrations in surface air*, Journal of Environmental Radioactivity 9 No.3 (1989) 223–249
- [118] Hernandez-Ceballos M.A., Cinelli G., Marín Ferrer M., Tollefsen T., De Felice L., Nweke E., Tognoli P.V., Vanzo S. and De Cort M., *A climatology of ^7Be in surface air in European Union*, Journal of Environmental Radioactivity 141 (2015) 62–70
- [119] *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008
- [120] Taylor A., Keith-Roach M.J., Iurian A.R., Mabit L. and Blake W.H., *Temporal variability of beryllium-7 fallout in southwest UK*, Journal of Environmental Radioactivity 160 (2016) 80–86
- [121] Papastefanou C., Ioannidou A., Stoulos S. and Manolopoulou M., *Atmospheric deposition of cosmogenic ^7Be and ^{137}Cs from fallout of the Chernobyl accident*, The Science of Total Environment 170 (1995) 151–156

- [122] Krajny E., Osrodka L. and Wojtylak M., *Meteorological Conditions for the Variability of ^7Be and ^{210}Pb Concentrations in Surface Layer Air in Poland*, Journal of Environmental Science and Engineering Technology 2 (2014) 14–25
- [123] Irlweck K., Hinterdorfer K. and Karg V., *Beryllium-7 and Ozone correlations in surface atmosphere*, Naturwissenschaften 84 (1997) 353–356.
- [124] Tremblay J. and Servranckx R., *Beryllium-7 as a tracer of stratospheric ozone: a case study*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 172 No.1 (1993) 49–56
- [125] Kulan A., Aldahan A., Possnert G. and Vintersved I., *Distribution of ^7Be in surface air of Europe*, Atmospheric Environment 40 (2006) 3855–3868
- [126] Nelson G. and Reilly D., “*Gamma-Ray Interactions with Matter*”, Chapter 2 in Passive Nondestructive Analysis of Nuclear Materials (1991) ISBN: 0-16-032724-5
- [127] Debertin K. and Helmer R.G., *Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors*, Elsevier (1988) ISBN: 0-444-87107-1
- [128] Knoll G.F., *Radiation detection and measurement*, John Wiley and Sons, Inc. (1979) ISBN: 0-471-49545-X
- [129] Prijić Z. i Prijić A., *Uvod u Poluprovodničke komponente i njihovu primenu*, Izd. Univerzitet u Nišu Elektronski fakultet (2014) ISBN 978-86-6125-107-8
- [130] Coaxial Ge Detector System - Introduction Manual, *Canberra industries*
- [131] Nikolić J., Joković D., Todorović D., Rajačić M., *Application of GEANT4 simulation on calibration of HPGe detectors for cylindrical environmental samples*, Journal of Radiological Protection Vol. 34 No.2 (2014) 47–55, ISSN: 0952-4746
- [132] Nikolić J., Vidmar T., Joković D., Rajačić M., Todorović D., *Calculation of HPGe efficiency for environmental samples: comparison of EFFTRAN and GEANT 4*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 763 (2014) 347–353
- [133] Nikolić J., Puzović J., Todorović D., Rajačić M., *Application of PHOTON simulation software on calibration of HPGe detectors*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 799 (2015) 159–165, ISSN: 0168-9002
- [134] Nikolić J., Pantelić G., Zivanović M., Rajačić M., Todorović D., *Comparison of two methods for HPGe detector efficiency calibration for charcoal canister radon*

- measurement*, Radiation Protection Dosimetry Vol.162 No.1–2 (2014) 47–51, ISSN: 0144-8420 (IF = 0.913 / 2014)
- [135] Krneta Nikolić J., Rajačić M., Todorović D., Vidmar T., *The first experimental test of the MEFFTRAN software on HPGe detector calibration for environmental samples*, Journal of Environmental Radioactivity 165 (2016), 191–196, ISSN: 0265-931X (IF=2.483 / 2014)
- [136] Krneta Nikolić J., Rajačić M., Todorović D., Janković M., Sarap N., Pantelić G., Vukanac I., *Semiempirical Efficiency Calibration in Semiconductor HPGe Gamma-Ray Spectroscopy*, Journal of Spectroscopy (2018) Article ID 5392658, <https://doi.org/10.1155/2018/5392658>, ISSN: 2314-4920
- [137] Rajačić M., Todorović D., Krneta Nikolić J., Vukanac I., Pantelić G., Sarap N. i Janković M., *Uticaj kalibracije efikasnosti na određivanje koncentracije ^7Be i ^{210}Pb u vazduhu*, Zbornik radova XXIX Simpozijuma DZZ SCG, Srbija, Srebrno jezero, Septembar 27–29 (2017) 443–448, ISBN: 978-86-7306-144-3
- [138] Weiss N.A., *Introductory Statistics*, 9th Edition, Addison-Wesley (2012) ISBN 978-0-321-69122-4
- [139] Ekpenyong E.J., Omekara C.O. and Ekerete M.P., *Modeling Inflation Rates using Periodogram and Fourier Series Analysis Methods*, International Journal of African and Asian Studies - An Open Access International Journal 4 (2014) 49–62
- [140] Papandreou S., Savva M., Karfopoulos K., Karangelos D., Anagnostakis M. and Simopoulos S., *Monitoring of ^7Be atmospheric activity concentration using short term measurements*, Nuclear Technology and Radiation Protection 26 No.2 (2011) 101–109
- [141] Durana L., Chudy M. and Masarik J., *Investigation of ^7Be in the Bratislava atmosphere*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 207 No.2 (1996) 345–356
- [142] Cannizzaro F., Greco G., Raneli M., Spitale M.C. and Tomarchio E., *Behaviour of ^7Be air concentration observed during a period of 13 years and comparison with Sun activity*, Nuclear Geophysics 9 No.6 (1995) 597–607

- [143] Doering C. and Akber R., *Beryllium-7 in near-surface air and deposition at Brisbane, Australia*, Journal of Environmental Radioactivity 99 (2008) 461–467
- [144] Gai N., Pan J., Yin X.C., Zhu X.H., Yu H.Q., Li Y., Tan K.Y., Jiao X.C. and Yang Y.L., *Latitudinal distributions of activities in atmospheric aerosols, deposition fluxes, and soil inventories of ^7Be in the East Asian monsoon zone*, Journal of Environmental Radioactivity 148 (2015) 59–66
- [145] Bas M.C., Ortiz J., Ballesteros L. and Martorell S., *Analysis of the influence of solar activity and atmospheric factors on ^7Be air concentration by seasonal-trend decomposition*, Atmospheric Environment 145 (2016) 147–157
- [146] Baeza A., Del Rio L.M., Jimenez A., Miro C., Paniagua J.M. and Rufo M., *Analysis of the temporal evolution of atmospheric ^7Be as a vector of the behavior of other radionuclides in the atmosphere*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 207 No.2 (1996) 331–344
- [147] Gerasopoulos E., Zerefos C.S., Papastefanou C., Zanis P. and O'Brien K., *Low-frequency variability of beryllium-7 surface concentrations over the Eastern Mediterranean*, Atmospheric Environment 37 (2003) 1745–1756
- [148] Kotsopoulou E. and Ioannidou A., *^7Be atmospheric concentration at mid latitudes (40°N) during a year of solar minimum*, EPJ Web of Conferences 24 (2012) 05005, DOI:10.1051/epjconf/20122405005
- [149] Chao J.H., Chiu Y.J., Lee H.P. and Lee M.C., *Deposition of beryllium-7 in Hsinchu, Taiwan*, Applied Radiation and Isotopes 70 (2012) 415–422
- [150] Du J., Du J., Baskaran M., Bi Q., Huang D. and Jiang Y., *Temporal variations of atmospheric depositional fluxes of ^7Be and ^{210}Pb over 8 years (2006–2013) at Shanghai, China, and synthesis of global fallout data*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 120 No.9 (2015) 4323–4339
- [151] Kikuchi S., Sakurai H., Gunji S. and Tokanai F., *Temporal variation of ^7Be concentrations in atmosphere for 8 y from 2000 at Yamagata, Japan: solar influence on ^7Be time series*, Journal of Environmental Radioactivity 100 (2009) 515–521

- [152] Zhang L., Yang W., Chen M., Wang Z., Lin P., Fang Z., Qiu Y. and Zheng M., *Atmospheric Deposition of ^7Be in the Southeast of China: A Case Study in Xiamen*, Aerosol and Air Quality Research 16 (2016) 105–113
- [153] Rajačić M., Todorović D., Janković M., Nikolić J., Sarap N. and Pantelić G., *^7Be in atmospheric deposition: determination of seasonal indices*, Journal Radioanalytical Nuclear Chemistry 303 No.3 (2015) 2535–2538, ISSN: 0236-573
- [154] Cannizzaro F., Greco G., Raneli M., Spitale M.C. and Tomarchio E., *Concentration measurements of ^7Be at ground level air at Palermo, Italy-comparison with solar activity over a period of 21 years*, Journal of Environmental Radioactivity 72 (2004) 259–271
- [155] Rajačić M., Todorović D., Krneta Nikolić J., Janković M. and Djurdjević V., *The Fourier analysis applied to the relationship between ^7Be activity in the Serbian atmosphere and meteorological parameters*, Environmental Pollution 216 (2016) 919–923, ISSN: 0269-7491
- [156] http://www.hidmet.gov.rs/ciril-meteorologija/klimatologija_godisnjaci.php, 04.09.2018.
- [157] <http://cr0.izmiran.ru/pty-main.htm>, 04.09.2018.
- [158] <http://www.sidc.be/silso/datafiles>, 04.09.2018.
- [159] Ioanidou A. and Papastefanou C., *Atmospheric Beryllium-7 Concentrations and Sun Spots*, Nuclear Geophysics 8 No.6 (1994) 539–543
- [160] <http://wso.stanford.edu/#MeanField>, 04.09.2018.
- [161] Rajačić M., Todorović D., Krneta Nikolić J. and Puzović J., *The impact of the Solar magnetic field on ^7Be activity concentration in aerosols*, Applied Radiation and Isotopes 125 (2017) 27–29, ISSN: 0969-8043

Biografija

Milica Rajačić, rođena 12.05.1986. u Beogradu, diplomirala je na Fizičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, na smeru Primenjena fizika i informatika 2011. godine. Iste godine, upisala je doktorske studije na studijskoj grupi Fizika jezgra i čestica i zaposlila se u Laboratoriji za zaštitu od zračenja i zaštitu životne sredine, Instituta za nuklearne nauke „Vinča“.

Angažovana je na projektu „Nove tehnologije za monitoring i zaštitu životnog okruženja od štetnih hemijskih supstanci i radijacionog opterećenja“, finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru koga se bavi određivanjem radioaktivnosti u uzorcima iz životne sredine, ispitivanjem mogućnosti poboljšanja metoda kalibracije u gamaspektrometriji u slučajevima rada na terenu i sa nestandardnim oblicima uzoraka. Uža oblast interesovanja joj je prisustvo gama emitera u atmosferi.

Učestvovala je u međunarodnoj saradnji „RER0033 Supporting Quality Assurance for the Measurement and Monitoring of Radioactivity in the Environment“ (2012–2013) i član je grupe za praćenje nivoa radionuklida u vazduhu (*The Ring of Five Network*).

Pohađala je sledeće obuke: „Applications of gamma-ray spectrometry to environmental samples“ (2001. i 2014. godine), organizovane od strane EC-JRC-IRMM (*Joint Research Centre - Institute for Reference Materials and Measurements*), “Harmonization of Procedures for Sampling Techniques including Practical Field Exercise” (2013.), organizovanog od strane IAEA (*International Atomic Energy Agency*) Terrestrial Environment Laboratory Agency’s Laboratories i Kurs za rad sa otvorenim i zatvorenim izvorima jonizujućeg zračenja (2015. godine), Centra za permanentno obrazovanje Instituta za nuklearne nauke “Vinča”.

Milica Rajačić je autor 3 rada kategorije M21a, 7 M21, 3 M22, 8 M23 i 1 rada kategorije M24. Takođe, jedan je od autora dva poglavlja u monografijama kategorizacije M14 i dva poglavlja u monografiji kategorizacije M45. Na naučnim skupovima je objavila 20 radova u kategoriji M33, 19 u M34, 22 u M63 i 3 u kategoriji M64. Radioaktivnost atmosfere je obrađena u 15 publikacija.

Radovi proistekli iz ove disertacije:

M21a Međunarodni časopis izuzetnih vrednosti

1. Rajačić M., Todorović D., Krneta Nikolić J., Janković M., Djurdjević V., The Fourier analysis applied to the relationship between ^7Be activity in the Serbian atmosphere and meteorological parameters, *Environmental Pollution* 216 (2016) 919-923, ISSN: 0269-7491 (IF=5,099 / 2016)

M21 Vrhunski međunarodni časopis

1. Rajačić M., Todorović D., Janković M., Nikolić J., Sarap N., Pantelić G., ^7Be in atmospheric deposition: determination of seasonal indices, *Journal Radioanalytical Nuclear Chemistry* Vol.303 No.3 (2015) 2535-2538, ISSN: 0236-5731 (IF= 1,415/ 2013)

M22 Istaknuti međunarodni časopis

1. Rajačić M., Todorović D., Krneta Nikolić J., Puzović J., The impact of the Solar magnetic field on ^7Be activity concentration in aerosols, *Applied Radiation and Isotopes* 125 (2017) 27-29, ISSN: 0969-8043 (IF= 1,136 / 2015)

M23 Međunarodni časopis

1. Janković M., Todorović D., Nikolić J., Rajačić M., Pantelić G., Sarap N., Temporal changes of beryllium-7 and lead-210 in Serbia, *Hemijska industrija* Vol.68 No.1 (2014) 83–88, ISSN: 0367-598X (IF = 0,562 / 2013)

M45 Poglavlje u knjizi M42 ili rad u tematskom zborniku nacionalnog značaja

1. Todorović D., Rajačić M., Janković M., Krneta Nikolić J., Sarap N., Pantelić G., Radioaktivnost atmosfere u Institutu za nuklearne nauke "Vinča" u periodu 1985-2015,

Poglavlje u monografiji "Černobilj 30 godina posle" (2016), ISBN: 978-86-7306-138-2, 53-71

M63 Rad saopšten na skupu nacionalnog značaja, štampan u celini

1 Rajačić M., Todorović D., Đurđević V., Petrović I., Janković M., Krneta Nikolić J., Pantelić G., Sarap N., Korelacija između specifične aktivnosti ^7Be u aerosolima i ukupnom depozitu i meteoroloških indeksa NAO, EA, EAWR I SCA, *XXVIII Simpozijum DZZ SCG*, Srbija, Vršac, 30. Septembar - 02. Oktobar (2015), Zbornik radova, ISBN: 978-86-7306-135-1, 28-34

2 Rajačić M., Todorović D., Krneta Nikolić J., Vukanac I., Pantelić G., Sarap N., Janković M., Uticaj kalibracije efikasnosti na određivanje koncentracije ^7Be i ^{210}Pb u vazduhu, *XXIX Simpozijum DZZ SCG*, Srbija, Srebrno jezero, Septembar 27-29 (2017), Zbornik radova, ISBN: 978-86-7306-144-3, 443-448

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора _____ Милица Рајачић _____

Број индекса _____ D-22/2011 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**АНАЛИЗА УТИЦАЈА СОЛАРНЕ АКТИВНОСТИ И МЕТЕОРОЛОШКИХ
ПАРАМЕТАРА НА КОНЦЕНТРАЦИЈУ ^{7}Be У ПРИЗЕМНОМ СЛОЈУ АТМОСФЕРЕ**

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

Потпис аутора

У Београду, 05.10.2018.

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милица Рајачић

Број индекса D-22/2011

Студијски програм Физика језгра и честица

Наслов рада АЛИЗА УТИЦАЈА СОЛАРНЕ АКТИВНОСТИ И МЕТЕОРОЛОШКИХ ПАРАМЕТАРА НА КОНЦЕНТРАЦИЈУ ^7Be У ПРИЗЕМНОМ СЛОЈУ АТМОСФЕРЕ

Ментор др Драгана Тодоровић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.**

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

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

Потпис аутора

У Београду, 05.10.2018.

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

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

АНАЛИЗА УТИЦАЈА СОЛАРНЕ АКТИВНОСТИ И МЕТЕОРОЛОШКИХ
ПАРАМЕТАРА НА КОНЦЕНТРАЦИЈУ ^{7}Be У ПРИЗЕМНОМ СЛОЈУ АТМОСФЕРЕ

која је моје ауторско дело.

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

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

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 05.10.2018.

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

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

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

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

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

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