



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI  
FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



# Merenje korelacije aktivnosti prirodnih radionuklida u biomonitorima

- diplomski rad -

Mentor: Prof.dr Miodrag Krmar

Kandidat: Peter Farago 338/99

Novi Sad, 2016



# SADRŽAJ

1. UVOD.....	4
2. MAHOVINE KAO BIOMONITORI .....	7
3. PRIRODNA RADIOAKTIVNOST .....	12
3.1. RADIOAKTIVNA RAVNOTEŽA.....	15
4. DETEKTORI RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA .....	17
4.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE DETEKTORA ZRAČENJA.....	17
4.1.1. EFIKASNOST DETEKTORA .....	18
4.1.2. ENERGETSKA REZOLUCIJA DETEKTORA .....	19
4.1.3. VREMENSKA REZOLUCIJA DETEKTORA .....	19
4.1.4. EFIKASNA ZAPREMINA DETEKTORA.....	20
4.2. SCINTILACIONI DETEKTORI.....	20
4.2.1. SCINTILACIONI MATERIJALI.....	20
4.2.2. KONSTRUKCIJA SCINTILACIONOG DETEKTORA.....	21
4.2.3. FORMIRANJE SIGNALA .....	22
4.3. NaI(Tl) DETEKTOR OBLIKA JAME .....	22
4.4 GEOMETRIJSKA EFIKASNOST. RAČUNANJE PROSTORNOG UGLA .....	23
4.5. GERMANIJUMSKI DETEKTOR .....	25
4.6. UPOREĐENJE EFIKASNOSTI I MDA (MINIMALNIH DETEKTABILNIH AKTIVNOSTI) NaI(Tl) I HPGe DETEKTORA .....	27
5. ANALIZA REZULTATA.....	28
5.1. ENERGETSKA KALIBRACIJA I KALIBRACIJA NA OBLIK PIKA U PROGRAMU APTEC.....	28
5.2. KALIBRACIJA DETEKTORA NaI(Tl) NA EFIKASNOST .....	31
5.3. ODREĐIVANJE KORELACIJE AKTIVNOSTI .....	33
5.3.1. PROVERA ISPRAVNOSTI OBRADE SPEKTARA .....	33
5.3.2. ODREĐIVANJE KORELACIJE IZMEĐU DVA RADIONUKLIDA IZ ISTOG RADIOAKTIVNOG NIZA .....	34
5.3.3. ODREĐIVANJE KORELACIJE IZMEĐU DVA RADIONUKLIDA IZ RAZLIČITIH RADIOAKTIVNIH NIZOVA .....	36
5.3.4. KORELACIJE AKTIVNOSTI K-40 I OSTALIH RADIONUKLIDA .....	38
5.3.5. KORELACIJA AKTIVNOSTI IZMEĐU BIZMUTOVIH (Bi-214) LINIJA.....	40
5.3.6. OPŠTA STATISTIKA O OBRADI PODATAKA.....	43
6. ZAKLJUČAK .....	48
7. PRILOG .....	50
8. LITERATURA .....	52
9. BIOGRAFIJA .....	53

*Zahvaljujem se mentoru prof. dr Miodragu Krmaru na podršci i pomoći prilikom izrade ovog  
diplomskog rada.*

## 1. UVOD

Biomonitorске tehnike, prvo su uvedene u Skandinaviji uz korišćenje mahovina, su veoma pogodne za proučavanje prisustva teških elemenata u atmosferi, kao i drugih elemenata u tragovima, uključujući i radionuklide u vazduhu. Mahovine nemaju koren sistem, tako vodu i hranljive materije dobijaju direktno iz vazduha preko padavina i suve depozicije i akkumuliraju ove elemente u merljivim koncentracijama. Merenja koncentracija teških elemenata u mahovinama, koja se obavljuju redovno svakih 5 godina od 1990 godine u većini evropskih zemalja, može se koristiti za određivanje kako prostornog rasporeda atmosferske depozicije, kao i za vremenske promene depozicije na određenim prostorima. Nanošenje radionuklida iz atmosfere može se proučavati korišćenjem biomonitora. Radionuklidi koji se nalaze u atmosferi poput  $^{7}\text{Be}$  i  $^{210}\text{Pb}$ , mogu se koristiti kao marker elementi za proučavanje atmosferskog transporta i taloženja aerosola. Nedavne studije su pokazale da su mahovine odlično sredstvo za proučavanje prostorne i vremenske distribucije atmosferskog taloženja radionuklida iz atmosfere.

Detaljno izučavanje lokacija alarmantno visokih emisija teških elemenata i njihovog atmosferskog taloženja zahteva mreže uzorkovanja relativno visoke gustine. Studije atmosferskog zagađenja na osnovu standardnih tehnika koje koriste vakuum pumpe ili kolektore padavina može da ograniči njihova visoka cena što dovodi do ozbiljnih problema u primeni velikog broja uređaja za dugoročno uzorkovanje gde program zahteva često veliki broj uzoraka za analizu. Dakle, upotreba bioakkumulatora za praćenje zagađenja vazduha je tema od velikog značaja.

Zemaljske mahovine rastu u različitim klimatskim zonama. Mahovine nemaju koren sistem. Zbog toga, oni dobijaju vodu i najvažnije hranljive materije direktno iz vazduha preko padavina i suvog taloženja, a njihova potrošnja hranljivih materijala iz podloge na kojima rastu je zanemarljiva. Odsustvo ili jaka redukcija čelijske opne i njihovi tanki listići omogućavaju lako upijanje vode i hranljivih materija iz atmosfere.

Akkumulacija elemenata dobijenih iz vazduha u merljivim koncentracijama čini mahovine za snažan medijum za uzorkovanje teških elemenata. Dodatne prednosti uzorkovanja mahovina su jednostavnost uzimanja uzoraka i mogućnost da se može postići mnogo veća gustina uzorkovanja nego sa konvencionalnim kolekcijama padavina. Rezultati istraživanja mahovina dozvoljavaju ispitivanja prostornih i vremenskih trendova taloženja teških elemenata, kao i identifikaciju područja koja su izložena visokim nivoima taloženja zagađujućih materija.

Studija taloženja teških metala pomoću mahovina kao biomonitora, prvobitno osnovana u Skandinaviji, pokazala se da je veoma pogodna za proučavanje atmosferskog transporta teških metala, kao i drugih elemenata u tragovima. U poslednje tri decenije, tehnika mahovina kao

biomonitora je korišćena u velikom broju zemalja. Prvo istraživanje mahovina koje je sprovedeno na evropskom nivou urađeno 1990 godine, i to je ponovljeno u petogodišnjim intervalima u sve većem broju zemalja. Ispitivanje mahovina 2005/2006 je sprovedeno u 32 zemalja i analizirani su uzorci sa više od 7000 lokacija širom Evrope. Pilot studija zagađenja vazduha pomoću mahovinske tehnike prvi put je sprovedena u severnom delu Srbije 2000 godine. Kada je studija ponovljena 2005 godine, bila su prekrivena gotovo sva područja Republike Srbije.

Osim toga mahovine su veoma obećavajući mediji za istraživanje i praćenje depozicije radionuklida iz vazduha jer se jeftin postupak uzorkovanja može kombinovati sa jednostavnim merenjem gama spektroskopije bez hemijskog tretmana uzorka. Uzorkovanje vazduha vakuum pumpama obezbeđuje dobro utvrđivanje količine radionuklida u vazduhu, i takvo uzorkovanje se vrši u blizini površine zemlje. Vremenske razlike u koncentraciji aktivnosti radionuklida u površinskom vazduhu (u  $\text{Bq m}^{-3}$ ) se jednostavno mogu meriti korišćenjem ove tehnike. Aerosoli se uklanjanju iz atmosfere preko suve ili vlažne depozicije. Taložni (depozicioni) uzorkovači (kolektori) se obično sastoje od posuda različitih veličina za prikupljanje uzorka iz kišnice ili suvog taloga. Korišćenjem ove tehnike se može meriti koncentracija aktivnosti radionuklida u padavinama (u  $\text{Bq m}^{-2}$ ) za izabrani vremenski interval. Međutim, ograničen broj taložnih kolektora i uzorkivača vazduha ne može da pruži zadovoljavajuću rezoluciju za prostorne analize taloženja atmosferskih radionuklida u vazduhu. S druge strane, mahovine, koje mogu da sakupe radionuklide iz vazduha, transportovane i deponovane istim mehanizmima kao i teški elementi, mogu lako da se prikupljaju na velikim površinama, a koncentracije aktivnosti nekih radionuklida mogu da dostignu merljivi nivo. Mahovine i lišajevi se već koriste kao biološki pokazatelji kontaminacije životne sredine za dugoživeće veštačke radionuklide. Sadržaj radionuklida iz atmosfere u blizini nuklearnih postrojenja, kao i iznos aktivnosti prirodnih radionuklida deponovan u blizini elektrana sa ugljem se mogu detektovati u mahovinama. Mahovine na severnoj hemisferi obično imaju aktivnost  $^{137}\text{Cs}$  koja je veća od praga detekcije standardnog HPGe gamaspektrometrijskog sistema, i značajno viša od nivoa pozadinskog zračenja. Najveća količina  $^{137}\text{Cs}$  koji se nalazi u atmosferi potiče od nuklearne nesreće u Černobilu i više od 400 atmosferskih testova nuklearnog oružja koja su izvršena na severnoj hemisferi. Studija koja se odnosi na nanošenje  $^{137}\text{Cs}$  posle nesreće u Černobilu je jedan od najobimnijih pokušaja upotrebe kopnenih mahovina kao medija za merenje atmosferskog transporta i taloženja radionuklida. Formiranje Berilijuma-7 ( $^7\text{Be}$ ) reakcijom između kosmičkih zraka (uglavnom visokoenergetki protoni) i jezgara kiseonika i azota u stratosferi i u gornjem delu troposfere, može koristiti u istraživanju atmosferskog deponovanja kao i atmosferskih puteva transporta. Praćenje depozicije atmosferskog  $^7\text{Be}$ , između ostalih atmosferskih pojava, moguće je istražiti upad stratosferskih vazdušnih masa u troposferu, debljine tropopauze, vertikalni transport u troposferi, horizontalno kretanje vazdušnih masa i vreme

boravka čestica aerosola u troposferi. Olovo-210 ( $^{210}\text{Pb}$ ) je prirodni radionuklid i član niza  $^{238}\text{U}$ . Za razliku od  $^7\text{Be}$  koji nastaje u višim slojevima atmosfere,  $^{210}\text{Pb}$  ulazi u atmosferu iz tla. Nakon raspada  $^{226}\text{Ra}$ , člana  $^{238}\text{U}$  niza, formira se jezgro  $^{222}\text{Rn}$  (plemeniti gas) koji ne učestvuje u hemijskim vezama i tako dospeva u atmosferu. Nakon nekoliko raspada u nizu se formira  $^{210}\text{Pb}$ .

Dok su minerali iz zemljine kore koji sadrže  $^{238}\text{U}$  izvori  $^{222}\text{Rn}$ , prisustvo  $^{210}\text{Pb}$  i drugih fragmenata niza zavisi od rasporeda kopna i mora, geoloških karakteristika tla, klime i opštih uslova površinskog sloja tla. Međutim,  $^{210}\text{Pb}$  je takođe oslobođen industrijskim procesima, kao što su sinterovanja ruda koje sadrže neku količinu  $^{238}\text{U}$ , spaljivanje uglja ili proizvodnja i korišćenje poljoprivrednog fosfatnog đubriva.  $^7\text{Be}$  i  $^{210}\text{Pb}$  koji se pojavljuju u prirodi, zajedno sa  $^{137}\text{Cs}$ , nakon što dospeju u atmosferu, slede iste transportne rute kao i svi ostali zagađivači koje je čovek stvorio. To znači da se oni mogu koristiti kao markeri u istraživanjima atmosferskog transporta aerosola i drugih zagađivača. Rezultati prethodnih studija [1, 6] pokazuju da zavisnost aktivnosti radionuklida u mahovinama može da pruži informacije koje se mogu uporediti sa tehnikom tipa kolektora padavina ili vazdušnog uzorkovanja.

Aktivnost radionuklida prisutnih u mahovinama se obično određuje metodom gama spektroskopije i to upotrebom poluprovodničkih detektora. Prednost ovih detektora se satoji u tome da imaju dobru energetsku rezoluciju i mogu lako da razdvoje dve gama linije bliske energije. No velika mana ovih detektora je da se u slučaju merenja uzoraka mahovina, koji su obično relativno male mase, do 50 g, potrebno merenja vršiti relativno dug period vremena da bi se dobila zadovoljavajuća statistika brojanja. Čest je slučaj da se neki od uzoraka moraju meriti 24 časa da bi se u spektru dobole gama linije zadovoljavajućeg intenziteta. U slučaju kada se u nekoj akciji monitoringa sakupi veliki broj uzoraka, do par stotina, nerena poluprovodničkim detektorm bi potrajala veoma dugo. Ukoliko postoji interes da se u monitoringu odredi i sadržaj  $^7\text{Be}$ , kome je period poluradpada 50 dana, jasno je da će u uzorcima koji poslednji stignu na red za merenje sadržaj  $^7\text{Be}$  biti veoma mali. Iz tog razloga je neophodno pronaći način da se upotrebom detektora veće efikasnosti merenja vrše za mnogo kraće vreme. Tako se nešto može postići Nal detektorom oblika jame. No velika mana ovog detektora je ta da ima znatno lošiju energetsку rezoluciju od poluprovodničkog.

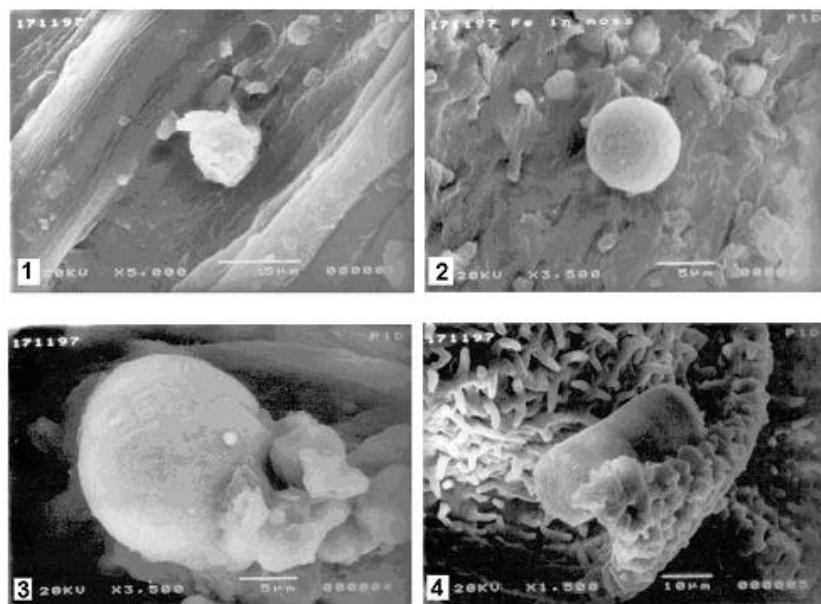
Cilj ovoga rada je da se analizom velikog broja spektara uzoraka mahovina prikupljenih na celoj teritoriji Republike Srbije, koje su merene upotrebom Nal detektora oblika jame ustanove neke mogućnosti ovog detektora za daljnju upotrebu. Za to je iskorišćena aktivnost prirodnih radionuklida koja se nalazi u mahovinama. Kako su aktivnosti članova radioaktivnog niza u ravnoteži, cilj ovoga rada je bio da se prate korelacije aktivnosti nekoliko članova niza  $^{238}\text{U}$ . Takođe su posmatrane korelacije aktivnosti članova uranovog niza sa merenim aktivnostima  $^{40}\text{K}$  i  $^{232}\text{Th}$ .

## 2. MAHOVINE KAO BIOMONITORI

Biomonitoring životne sredine obuhvata širok spektar tehnika koje razmatraju odnos izmeđi bioloških varijabli i zagađenja. Biološke varijable mogu da variraju od oštećenja žive ćelije do celog ekosistema. Zagađivači mogu biti atmosferski, zemaljski ili vodeni. Sredstva biomonitoringa su bioakkumulatori, organizmi koji akkumuliraju zagađivače i bioindikatori, organizmi koji odgovaraju na specifične zagađivače na dosledan, merljiv način. Relevantne informacije dobijene načinom biomonitoringa (na primer, koriste se biljke ili životinje) su obično izvedene iz promene u ponašanju posmatranog organizma ili iz koncentracije određenih materijala u tkivima organizma. Sa pravilnim izborom organizma generalna prednost pristupa biomonitoringa se pre svega ogleda u stalnoj i čestoj pojavi organizma na terenu, čak i na udaljenim područjima, lakoći uzimanja uzoraka i odustvu bilo kakve neophodne skupe tehničke opreme.

Mahovine nemaju koren sistem, one uglavnom dobijaju mineralne materije iz vazduha. Voda može da obezbedi hranljive sastojke za mahovine kada je površina zasićena. Neke vrste su veoma osetljive na zagađenje, dok su druge veoma tolerantne na zagađenje vazduha i koriste se kao vrsta indikatora. Najnoviji podaci u literaturi pokazuju da je širom sveta prisutno između 15000 i 25000 vrsta mahovina. Bez obzira na razlike u procenama vrsta mahovina, njihova raznovrsnost floristički ih svrstava odmah posle Anthophita. Veličina mahovina varira od 5 cm do 50 cm. Često, mahovine rastu u grupama, formiraju skup, male „jastuke“ ili tepih kao forme. Biljke se sastoje obično od stabla ili grane sa brojnim listovima, a jednostavnii listovi mahovine se sastoje od jednog ili više slojeva ćelija. Njihove ćelijske membrane su veoma tanke i nemaju uticaj na gubitak vode. Mahovine nemaju pravi koren, ali mali koren poput rhiyoides učvrsti stabiliju na podlogu. Mahovine su kozmopolitska vrsta. One rastu u skoro svim staništima, osim mora, ekstremnim pustinjama sa solima klorida i sulfata i ugroženim terenima. Guste kolonije mahovina se mogu naći u hladnim šumama u svim bioklimatskim zonama do arktičkih zona. Čiste zajednice se nalaze u arktičkom regionu, posebno u visokim geografskim širinama. Mahovine se javljaju na svim kontinentima i rastu na širokom spektru podloga, uključujući zemlju, kamenja, koru, trulo drvo, izmet i leševe životinja. Jedini ekosistem u kojoj je kolonizacija mahovina propala su okeani.

Mahovinama su potrebni isti makroelementi i mikroelementi kao i višim biljkama, ali u nižim koncentracijama. One su u stanju da preuzmu hranljive materije iz vode koja teče preko njih i iz atmosfere. Nakon što se nutrijenti natalože, oni mogu da ostanu na površini u obliku adsorbovanih čestica (slika 2.1), u obliku rastvora u apoplastu (intracelularni prostor), na ćelijskom zidu vezani za jone ili u samim ćelijama.



*Slika 2.1. Slike čestica aerosola snimane elektronskim mikroskopom (SEM) otkrivene na površini mahovina thalli, dobijena u JINR u Dubni (1 - Fe čestica sa Mg nečistoćom, 2 - loptica od čistog gvožđa, 3 -Al Fe čestica klaster sa nečistoćama Zn Cu i Ti; 4 - Diatomic alga).*

Nutrijenti koji se javljaju na površini ili u intracelularnim prostorima su slabo vezani i mogu se lako ukloniti delovanjem tečne vode, ali hranljive materije koje su vezane za zid ćelije se transportuju u ćelijama putem čisto fizičko-hemijskih mehanizmima.

Pod povoljnim uslovima ekstraćelijski unos je vrlo brz i do njega može doći za samo nekoliko minuta nakon događaja padavina. Stopa hemijskog upijanja zavisi od brojnih faktora, kao što su hemijska priroda samih molekula, temperatura, pH i koncentracija drugih elemenata u lokalnom okruženju. Ukupna količina jona koja može da se veže sa ćelijama mahovina je ograničena po broju lokacija jona razmene, a ovo je karakteristika koja se razlikuje od vrste do vrste. Stopa hemijskog upijanja takođe zavisi od starosti kolonije. Mlađe mahovine imaju veći afinitet prema monovalentnim katjonima. Proces razmene jona u prirodi je selektivan i afiniteti vezivanja za dvovalentne elemente su rangirane na sledeći način: Pb> Cu> Cd> Co = Fe> Ni> Zn> Pn. Pored toga, tzv. ne-fiziološki elementi se mogu uneti u ćeliju. Za razliku od esencijalnih nutrienata, biljke mogu da akkumuliraju vrlo visoke koncentracije teških metala. Iz celokupnog biljnog carstva, samo mahovine imaju sposobnost da tolerišu preterano visoke koncentracije teških metala. Mahovine reaguju veoma brzo na bilo koju nepovoljnu ljudsku aktivnost. Vrste koje su osjetljive na visoke koncentracije teških metala u svom okruženju su odsutne sa svojih staništa kada preovlađaju negativni životni uslovi (vrste bioindikatora). Nasuprot tome, tolerantne mahovine akkumuliraju otrovne elemente kao što su teški metali, radionuklidi i razni organski zagađivači (biomonitori) u

svom okruženju. Tako, mahovine se mogu koristiti kao indikatori zagađenja životne sredine na osnovu njihove osetljivosti na zagađenje ili njihove sposobnosti da akkumuliraju zagađivače.

Mahovine imaju mnoge prednosti u odnosu na taložne kolektore koji se koriste za praćenje zagađivanje atmosfere. Jedna od prednosti mahovina je da su široko rasprostranjene. Merenjem koncentracija teških metala u mahovinama, može se dobiti detaljan pogled atmosferskog taloženja (depozicije) preko velikih površina.

S druge strane, kolektori taloženja se nalaze samo na određenim mestima. Uzorkovanje mahovina je veoma jednostavno i jeftino. Teški metali koji se javljaju u okruženju mogu da potiču od prirodnih i antropogenih izvora. U atmosferi, prirodni izvori ovih elemenata uključuju vulkanske erupcije, depozite zemljišta, ogromne vatre i morske aerosole. Antropogeni izvori su hemikalije oslobođene u atmosferu iz industrijskih aktivnosti, energetskih postrojenja, emisije iz saobraćaja, emisije fosilnih goriva i nekontrolisanog zagađenja koja proizilazi iz rata i slučajnih ekscesa.

Postoje dva osnovna načina za elemente da se talože u mahovinama: (i) vlažno taloženje (kiša, sneg, rosa, magla i drugi izvori padavina) i (ii) suvo taloženje (prašina). Širok spektar elemenata može da se apsorbuje čelijom mahovina preko mokrog taloženja, uključujući Pb, Cd, In, Hg, Ar, Se, Zn i Cu. Mehanizam suvog taloženja je nešto drugačiji. To uključuje transport i direktno taloženje raspršenih zagađivača koji mogu ući u okruženje mahovina sa ili bez pomoći vode. Pored industrijskih zagađivača, mahovine akkumuliraju i elemente zemljišta kao što su Al, Fe, K, Ca, sa retkim zemljama, U i Th. Uz pomoć difuzije, ovi elementi su preuzeti i distribuirani širom cele biljke. Promene u koncentracijama određenih elemenata koji se mogu javiti u thallus-u mahovina u odnosu na koncentracije u okolnom vazduhu mogu biti veoma velike. Zbog ove funkcije, mahovine se mogu smatrati prirodnim filterima koji apsorbuju hemikalije, i zadržavaju čestice koje se nalaze u vazduhu u neposrednom okruženju. Razlike u koncentracijama nekih od gore navedenih elemenata u odsustvu jakog antropogenog izvora zagađenja u blizini uzetog uzorka mahovine, u najvećem delu, su izvedeni iz sastava okolnog tla. Koncentracije nekih hranljivih elemenata mogu uticati na koncentracije drugih teških metala koji se nalaze u mahovina jer zauzimaju ista jonoizmenjivačka mesta na ćelijskoj membrani. Za elemente koji predstavljaju karakteristične zagađivače koji se stalno emituju i transportuju kroz atmosferu, koncentracija u mahovinama direktno zavisi od njihove koncentracije u okolnom vazduhu, kao i od određenih fizičkih i hemijskih osobina.

Razlike u koncentracijama kod nekih od elemenata koji se nalaze u mahovinama sakupljenim sa dve različite lokacije potiču isključivo od razlika u koncentracijama ovih elemenata u vazduhu oko ove dve lokacije. Ova vrsta poređenja nudi mogućnost za korišćenje mahovina u ekološkim istraživanjima, kao i u rutinskim naporima za praćenje, da se identifikuju oblasti sa visokim

koncentracijama zagađivača. Nakon mnogo godina istraživanja u evropskim zemljama i širom sveta, zaključeno je nesumnjivo da su koncentracije teških metala u mahovinama pod uticajem velikog broja faktora. Pored prirodne varijacije u makro i mikro-klimatskim uslovima, kiselosti, temperature, vlažnosti vazduha, svetlosti, karakteristika podloge, nadmorske visine, mineralnih čestica, prirodnih biogeohemijskih cikličnih procesa (npr atmosferski transport čestica aerosola od morske sredine na zemlju), unos vode sa mineralnim materijama i njen transport do mahovine, vrste mahovina, starosti mahovine, stopa rasta pojedinih vrsta, godišnjeg doba, načina uzorkovanja (slobodno raste, presađeno, mahovina iz vreće), pripreme uzorka i analitičke metode mogu sve da utiču na koncentracije teških metala izmerenih u mahovinama. Efekat ovih faktora je relativno mali, u poređenju sa ljudskim uticajem pogotovo kod Pb, Cd i Cu. Međutim, efekti ovih varijabli mogu biti značajni u slučajevima Cr, Ni, V i Fe. Shodno tome, mahovine predstavljaju odlične indikatore Pb, Cd i Zn u izvesnoj meri, ali uticaji okoline na koncentracije elemenata u mahovinama može da ometa njihovu upotrebu u praćenju Ni, Cr, Mn i Fe.

Na osnovu njihovih morfoloških i fizioloških osobina, mahovine su dobri indikatori zagađenosti ekosistema iz atmosfere. Pomenute su one funkcije koje su najvažnije sa tačke gledišta biomonitoringa: (i) odsustvo sistema korena sprečava primanje jona iz zemlje ili nekog drugog supstrata, (ii) nerazvijena ćelijska opna omogućava apsorpciju metalnih jona duž cele površine ćelija, (iii) specifičan sastav zida ćelije doprinosi brzoj izmeni jona, (iv) sposobnost da akumuliraju i tolerišu visoku koncentraciju metala, (v) pozitivne korelacije između koncentracija u mahovinama u suvom ili vlažnom talogu i (vi) njihova kosmopolitska priroda omogućuje širok spektar prostora za istraživanje. Mahovine imaju nekoliko prednosti u odnosu na taložne kolektore koji se koriste za praćenje zagađenja. Mahovine su rasprostranjene, a njihovo uzorkovanje je vrlo jednostavno i jeftino. Isto tako, neke vrste mahovine su sposobne da akumuliraju teške metale do visokih koncentracija, znatno viših od onih koje se dobijaju u uzorcima iz taložnih kolektora. Tako se raznim analitičkim tehnikama mogu dobiti precizniji rezultati jer su koncentracije teških metala u mahovinama uglavnom znatno iznad granice detekcije.

Švedski ekolozi Ruhling i Tiler su na kraju 1960-ih, bili prvi koji su koristili mahovine kao biološke pokazatelje atmosferskog zagađenja izazvanog teškim metalima. Od tada, ova metoda se vrlo efikasno koristi. Uticaj različitih faktora na rezultate dobijene kada se koristi mahovina za biološki nadzor, uključujući tu sezonske fluktuacije, procedure uzorkovanja, pripreme uzorka i procene sličnosti i razlike između različitih vrsta mahovina od tada je detaljnji izučen. Najbolji biomonitori su mahovine sa razgranatim vegetativnim organima koji rastu u tepih formacija. Takve mahovine dobijaju većinu svojih hranljivih materija ili direktno od padavina ili od suvog taloženja. Da bi se izbegle varijacije u rezultatima dobijenim mahovinama uzorkovanim sa velikih područja, tipa

celog kontinenta, treba pažljivo birati vrstu mahovine. Prethodna istraživanja sprovedena u skandinavskim zemljama i u drugim zemljama severne Evrope su se fokusirali na vrste Pleurozium schreberi (Brid.) i Hilocomium splendens (Hedv.). U međuvremenu, oko 30 evropskih zemalja je uključeno u studije biomonitoringa sa mahovinama. Mahovine su sakupljene ne samo sa staništa koje karakteriše subpolarna klima, nego i sa onih lokacija u kojim je pretežno topla i suva klima, kao u zapadnoj Turskoj. Na ovaj način, našle su se neke vrste mahovina koji su karakteristične za južne regije Evrope. U smernicama Evropskog programa biološkog monitoringa zagađenja vazduha, neke druge vrste mahovina kao što su Hipnum cupressiforme (Hedv.) i Scleropodium Purum (Hedv.) se takođe preporučuju. Ove dve vrste čine 6,9% ukupnih uzoraka mahovina koji se koriste za istraživanja u mahovinskom biomonitoringu za period 1990 - 2005.

Pored procene nivoa zagađenja vazduha u kontinentalnim i nacionalnim razmerama, mahovine su korišćene za regionalni biomonitoring. Takva istraživanja obuhvataju gustu mrežu lokaliteta i na taj način se mogu proizvesti detaljne informacije o prostornoj distribuciji zagađenja vazduha. Isto tako, ovaj tip biomonitoringa može se koristiti u oblasti oko industrijskih postrojenja i puteva.

Pored pasivnog biomonitoringa, to jest, preko mahovina koje se javljaju u njihovim prirodnim staništima, zagađenje vazduha može da se proceni i pomoću tzv. aktivnog biomonitoringa, pomoću vrećica sa mahovinama. Uzorci se prikupljaju sa nezagađenih područja u vrećama koje su potom prenete u region koji se izučava. Merenja se vrše pre i posle izlaganja. Obično se postavljaju u oblastima u kojima nisu pronađene pogodne vrste mahovina i / ili želimo da se dobije preciznija kvantifikacija depozicije teških metala u funkciji vremena.

Goodarzi je [36] pokazao upotrebu mahovinskih vrećica za predviđanje dugoročne akumulacije zemljišta sa As, Cd, Cu, Hg, Pb i Zn u blizini topionice cink-olova u Kanadi. Taloženje je procenjeno u Finskoj i Kini koristeći vrećice sa mahovinama. Vrećice sa mahovinama su takođe uspešno korišćene za praćenje zagađenja urbanih područja ili srednjeg dometa obima zagađenja.

Radioaktivni elementi se mogu akkumulirati u mahovinama do veoma visokih koncentracija. U mahovinama, povećana je koncentracija radioaktivnog cezijuma nakon nuklearnih proba i posle nesreće u Černobilu. Ovaj skromni skup podataka pokazuju da mahovine mogu biti vrlo efikasni biološki indikatori radionuklida.

### 3. PRIRODNA RADIOAKTIVNOST

Pojava prirodne radioaktivnosti vezana je za proces sinteze jezgara. Prva jezgra, i to uglavnom ona najlakša, formirana su pre nekoliko milijardi godina, kada je po nekim teorijama nastao Sveti mir, a proces nukleonsinteze se od tog momenta kontinuirano odvija u središtima zvezda. Tom prilikom, osim poznatih stabilnih jezgara, formira se i veliki broj nestabilnih. Geološka starost planete Zemlje je dovoljno duga tako da se najveći deo nestabilnih jezgara koji je ušao u njen sastav prilikom formiranja sunčevog sistema već raspao. Do današnjih dana, preživeli su neki dugoživeći izotopi, sa periodom poluraspada većim od 500 miliona godina, kao na primer  $^{40}\text{K}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  itd.

Većina radionuklida koji postoje na Zemlji se mogu grupisati u tri prirodne radioaktivne familije, ili niza. To su uranijum-radijumski, uranijum-aktinijumski i torijumski niz. Osim ova tri, u laboratorijskim uslovima, je putem nuklearnih reakcija stvoren i četvrti, neptunijumska niz. Prirodni radioaktivni nizovi nastaju raspadom tri radioizotopa  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$  koji se zbog svog dugog perioda poluraspada još uvek nalaze u prirodi. Potomci ovih izotopa su takođe nestabilni pa se raspadaju, stvarajući nova nestabilna lakša jezgra, sve do stabilnog izotopa, na kome se niz završava. Osnovni procesi transformacije jezgara kod ovih nizova su alfa i beta raspad. Kako do znatnije promene mase dolazi nakon emisije alfa čestice, koja poseduje četiri nukleona, to članovi jednog niza imaju mase koje se međusobno razlikuju za četiri atomske jedinice mase. Osnovne karakteristike četiri radioaktivna niza, date su u Tabeli 3.1.

ime niza	maseni broj	polazno jezgro	period poluraspada [godina]	krajnji član
torijumov	$4n$	$^{232}\text{Th}$	$1.4 \cdot 10^{10}$	$^{208}\text{Pb}$
neptunijumov	$4n+1$	$^{237}\text{Np}$	$2.2 \cdot 10^6$	$^{209}\text{Bi}$
uranijum-radijumov	$4n+2$	$^{238}\text{U}$	$4.5 \cdot 10^9$	$^{206}\text{Pb}$
uranijum-aktinijumov	$4n+3$	$^{235}\text{U}$	$7.2 \cdot 10^8$	$^{207}\text{Pb}$

Tabela 3.1. Neke od osnovnih karakteristika radioaktivnih nizova

U prirodi se takođe može naći i nekoliko nestabilnih radionuklida koji ne pripadaju radioaktivnim nizovima. Radi se o izotopima koji takođe imaju veoma dug period poluraspada, tako da se još uvek mogu pronaći na Zemlji. U Tabeli 3.2. data je lista ovih izotopa. Od njih je svakako najznačajniji  $^{40}\text{K}$ , koga u prirodnom kalijumu ima samo 0.0117%, no s obzirom da je kalijum kao element veoma zastupljen u zemljinoj kori, prilikom gama spektrometrijskih merenja, neizbežno se

pojavljuje i kalijumova gama linija od 1.46 MeV. Ona potiče od mogućeg prisustva kalijuma u uzorku koji se meri, ili od kalijuma koji se nalazi u objektima koji okružuju detektor.

Značajan izvor prirodne radijacije je i kosmičko zračenje. Primarno kosmičko zračenje je galaktičkog i solarnog porekla, a sastoje se nanelektrisanih čestica veoma visoke energije. Do zemljine površine ono veoma retko dospeva pošto nestaje u interakcijama u atmosferi, kojom prilikom se stvara sekundarno zračenje. Ono se sastoje od nukleona, mezona, miona, elektrona, fotona i još nekih čestica energija do nekoliko stotina MeV. U gama spektrima najveći deo ovoga zračenja ne proizvodi linije već samo učestvuje u kontinuumu. Neke od čestica iz sekundarnog kosmičkog zračenja, kao na primer neutroni mogu stupiti u nuklearne reakcije između ostalog i sa materijalom koji sačinjavaju ili okružuju detektor. Tom prilikom mogu nastati nestabilna jezgra a njihove karakteristične gama linije mogu biti detektovane. U gornjim slojevima atmosfere nuklearnim reakcijama kosmičkog zračenja sa jezgrima azota i kiseonika dolazi do stvaranja nekolicine radioaktivnih jezgara, kao što su to  $^{14}\text{C}$  i  $^{7}\text{Be}$ . Nakon toga dolazi do njihovog ravnomernog raspoređivanja putem atmosferskih transportnih procesa te na taj način i oni daju svoj doprinos ukupnoj prirodnoj radioaktivnosti.

radioaktivni izotop	period poluraspada [godina]	način raspada
$^{40}\text{K}$	$1.3 \cdot 10^9$	$\beta^-$
$^{50}\text{V}$	$5 \cdot 10^{15}$	$\beta^-$
$^{87}\text{Pb}$	$5 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$
$^{115}\text{In}$	$6 \cdot 10^{14}$	$\beta^-$
$^{138}\text{La}$	$1 \cdot 10^{11}$	$\beta^-$
$^{144}\text{Nd}$	$3 \cdot 10^{15}$	$\alpha$
$^{147}\text{Sm}$	$1.3 \cdot 10^{11}$	$\alpha$
$^{176}\text{Lu}$	$4.5 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$
$^{187}\text{Re}$	$4 \cdot 10^{12}$	$\beta^-$

Tabela 3.2. Prirodni radioizotopi koji ne pripadaju radioaktivnim nizovima

Osim prirodnih radioizotopa u atmosferi, vodi i u tlu mogu se naći i fisioni produkti nastali prilikom proba nuklearnog oružja ili tokom havarija na nuklearnim elektranama. Ovi fisioni fragmenti su putem vazdušnih struja i padavina gotovo ravnomerno raspoređeni po celoj površini Zemlje. Jedan od njih je i  $^{137}\text{Cs}$ , perioda poluraspada od 30 godina, sa jednom intenzivnom gama linijom uspektru od 0.661 MeV.

*URAN-RADIJUMOV NIZ* počinje prirodnim radioizotopom  $^{238}\text{U}$  i nakon 8 alfa raspada, 6 beta raspada i tri grananja kojom prilikom se član niza raspada i alfa i beta raspadom, dolazi do stvaranja stabilnog  $^{206}\text{Pb}$ .  $^{238}\text{U}$  je alfa emiter a izotopska obilnost u prirodnom uranijumu mu je 99.274%. Nakon raspada  $^{238}\text{U}$  ne dolazi do emisije intenzivnog gama zračenja, tako da se ovaj niz putem gama spektroskopije identificuje preko intenzivnih gama linija nekih drugih članova niza. Najznačajnije gama linije u gama spektru uran-radijumovog niza su date u Tabeli 3.3.

*URAN-AKTINIJUMOV NIZ* počinje izotopom  $^{235}\text{U}$  i nakon 7 alfa i četiri beta raspada uz tri grananja se završava stabilnim izotopom olova  $^{207}\text{Pb}$ . U prirodnom uranijumu, izotopska zastupljenost  $^{235}\text{U}$  je 0.7204%. Za razliku od prethodnog niza koji se identificuje intenzivnim gama linijama nekih od potomaka  $^{238}\text{U}$ , uran-aktinijumov niz se može prepoznati na osnovu dve gama linije karakteristične za raspad prvog čalana ovoga niza. Naime nakon alfa raspada  $^{235}\text{U}$  dolazi do emisije relativno intenzivnog gama zračenja energija od 143.78 keV i 185.72 keV. Kvantni prinosi ova dva prelaza su 10.5% i 54% respektivno. Najznačajnije gama linije koje se mogu identifikovati u uzorku koji sadrži kompletan uranijum-aktinijumski niz su date u Tabeli 3.4.

radioizotop	Energija [keV] i (kvantni prinos [%])
$^{226}\text{Ra}$	186.1 (4.0)
$^{214}\text{Bi}$	609.318 (46), 768.361 (4.88), 934.05 (3.66), 1120.276 (15), 1238.11 (5.92), 1377.65 (4.02) 1509.19 (2.199, 1764.51 (15.9), 2204.12 (4.99), 2447.71 (1.55)
$^{214}\text{Pb}$	295.2 (19.2), 351.9 (37.2)

Tabela 3.3. Neke od najintenzivnijih gama linija uranijum-radijumovog niza

radioizotop	Energija [keV] i (kvantni prinos [%])
$^{235}\text{U}$	143.78 (10.5), 185.72 (54)
$^{227}\text{Th}$	94.00 (1.4), 210.65 (1.13), 236.00 (11.2), 256.25 (6.8), 286.15 (1.85), 299.90 (2.75), 330.07 (1.3)
$^{223}\text{Ra}$	122.31 (1.19), 143.76 (10.5), 154.19 (5.59), 160.00 (1.4), 269.41 (13.6), 323.89 (3.9), 338.32 (2.78), 444.94 (1.27)
$^{219}\text{Rn}$	401.78 (6.6)
$^{211}\text{Bi}$	351.00 (12.76)
$^{211}\text{Pb}$	404.84 (3.83), 426.99 (1.72)

Tabela 3.4. Neke od najintenzivnijih gama linija uranijum-aktinijumovog niza

*TORIJUMOV NIZ* počinje izotopom  $^{232}\text{Th}$  i nakon 6 alfa i 4 beta raspada se uz dva grananja završava stabilnim izotopom  $^{208}\text{Pb}$ . U prirodi se  $^{232}\text{Th}$  pojavljuje kao monoizotop. Alfa raspad  $^{232}\text{Th}$  je praćen emisijom gama zračenja od 59.0 keV veoma slabog intenziteta (kvantni prinos 0.15%), tako da se postojanje ovoga niza u gama spekrometrijskim merenjima može ustanoviti na osnovu gama zračenja koje emituju neki drugi članovi niza. Najznačajnije gama linije po kojima se prepoznaje torijumov niz su navedene u Tabeli 3.5.

radioizotop	Energija [keV] i (kvantni prinos [%])
$^{228}\text{Ac}$	129.1 (2.1), 209.4 (4.6), 270.3 (3.8), 328.0 (3.4) 338.4 (12.0), 409.4 (2.2), 463.0 (4.6), 727.17 (11.83), 794.8 (4.8), 964.6 (5.5), 968.9 (17.5), 1630.4 (1.95)
$^{212}\text{Pb}$	238.626 (44.6), 300.09 (3.4)
$^{208}\text{Tl}$	583.14 (31.06), 860.37 (12.3), 2614.61 (34.50)

Tabela 3.5. Neke od najintenzivnijih gama linija torijumovog niza

### 3.1. RADIOAKTIVNA RAVNOTEŽA

Složeni raspad jednog radioaktivnog niza od  $n$  članova se opisuje sistemom od  $n$  diferencijalnih jednačina:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t)$$

.

$$\frac{dN_n(t)}{dt} = \lambda_{n-1} N_{n-1}(t) - \lambda_n N_n(t)$$

Poslednji,  $n$ -ti član niza je stabilan. Ukoliko je u prvom trenutku postojao samo početni izotop, gornji sistem jednačina se rešava uz pomoć početnih uslova:

$$N_1(t = 0) = N_{01}$$

$$N_2(t = 0) = N_3(t = 0) = N_4(t = 0) = \dots = N_n(t = 0) = 0$$

U tom slučaju je opšti integral  $n$ -te jednačine, tj. broj atoma  $n$ -tog člana niza u određenom vremenskom trenutku:

$$N_n(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t}$$

gde su konstante  $C_n$  date sledećim izrazima:

$$C_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_n - \lambda_1)} N_{01}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_n - \lambda_2)} N_{01}$$

.

$$C_n = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{(\lambda_1 - \lambda_n)(\lambda_2 - \lambda_n) \dots (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} N_{01}$$

U slučaju kada je period poluraspada prvog elementa mnogo duži od perioda poluraspada ostalih članova niza, što zaista i jeste slučaj kod sva tri prirodna niza, nakon određenog vremena nastaje takozvana vekovna ravnoteža. Iz gornjih jednačina se može dobiti da je u tom slučaju:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots = \lambda_n N_n = const.$$

To znači da su nakon trenutka kada je dostignuta vekovna ravnoteža aktivnosti svih članova niza podjednake i konstantne u nekom intervalu vremena koji je mnogo kraći od perioda poluraspada prvog člana niza. U Tabeli 3.6. dati su neki primeri za vekovnu radioaktivnu ravnotežu.

Predak i njegov period poluraspada [godina]	Potomak i njegov period poluraspada [godina]	Vreme potrebno za postizanje ravnoteže [godina]
$^{238}\text{U}$ $4.5 \cdot 10^9$	$^{234}\text{U}$ $2.5 \cdot 10^5$	$1.75 \cdot 10^6$
$^{235}\text{U}$ $7 \cdot 10^8$	$^{231}\text{Ra}$ $3.3 \cdot 10^4$	$2.24 \cdot 10^5$
$^{232}\text{Th}$ $1.4 \cdot 10^{10}$	$^{228}\text{Ra}$ 5.7	39.9
$^{226}\text{Ra}$ $1.6 \cdot 10^3$	$^{222}\text{Rn}$ 4.8 dana	28 dana

Tabela 3.6. Neki primeri za vekovnu radioaktivnu ravnotežu

## 4. DETEKTORI RADIOAKTIVNOG ZRAČENJA

Detektori su uređaji koji vrše registrovanje ionizujućeg ili neutronskega zračenja. U njihovoj aktivnoj zapremini se odvija interakcija zračenja sa materijom, a kao rezultat te interakcije dobija se signal ili slika. Obradom signala ili slike se dolazi do informacija o osobinama zračenja. Tako može da se odredi intenzitet zračenja, energija fotona, brzina i enegrija čestica, njihova masa, nanelektrisanje, magnetni moment, spin i druge osobine. Materija u kojoj se odvija interakcija sa zračenjem može biti običan gas, poluprovodnik, scintilator, filmska emulzija, pregrevana tečnost, podhlađena para i slično. Razlikuju se dva tipa detektora, a to su integralni i diferencijalni. Integralni detektori mere ukupan efekat prolaska zračenja kroz materiju dok diferencijalni detektori imaju mogućnost da registruju pojedinačne čestice zračenja. Još jedna podela bi bila u zavisnosti koji tip informacija o zračenju dobijamo. Električni signal se dobija pomoću električnih detektora, dok se slika dobija pomoću optičkih detektora.

### 4.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE DETEKTORA ZRAČENJA

Zahvaljujući detektorskoj tehnici danas imamo obilje informacija koje se odnose na strukturu jezgra i neke procese koji se odvijaju u jezgru, kao i informacije o elementarnim česticama. Realizovani su detektori različitog tipa i dizajna koji se dalje prilagođavaju potrebama istraživanja. Jasno je da napredak nuklearne fizike i fizike elementarnih čestica u velikoj meri zavisi od mogućnosti detektora, pa je zato jako bitno da se radi na poboljšanju osnovnih karakteristika detektora kao što su na primer:

- efikasnost
- osetljivost
- energetska rezolucija
- vremenska rezolucija
- efikasna zapremina

#### 4.1.1. EFIKASNOST DETEKTORA

Pod ovim pojmom podrazumeva se verovatnoća da čestica zračenja bude detektovana. Od detektora se zahteva da registruje što je moguće veći broj čestica koje su na njega pale. Apsolutna ili totalna efikasnost definiše se kao odnos broja registrovanih događaja i broja događaja emitovanih iz izvora:

$$\varepsilon = \frac{N_R}{N_E} \quad (4.1)$$

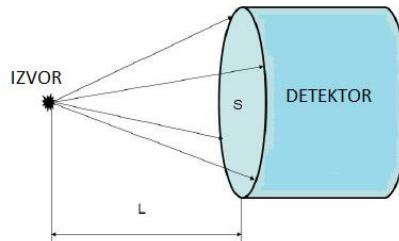
gde je:

$N_R$  - ukupan broj registrovanih događaja

$N_E$  – ukupan broj emitovanih događaja

Ovako definisana efikasnost zavisi od geometrijske efikasnosti i sopstvene efikasnosti detektora. Geometrijska efikasnost zavisi od geometrijskih uslova eksperimenta i može se definisati kao odnos broja čestica koje padnu na detektor i ukupnog broja čestica emitovanih iz izvora. U slučaju kada je emisija izotropna, geometrijska efikasnost bi predstavljala odnos prostornog ugla  $\Omega$  pod kojim čestice iz izvora padaju na detektor i ukupnog prostornog ugla od  $4\pi$  steradijana.

$$\varepsilon_g = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{S}{L^2 4\pi} \quad (4.2)$$



Slika 4.1. Geometrija položaja izvora

Verovatnoća da čestica koja je dospela do detektora bude i registrovana pod pikom totalne apsorpcije predstavlja sopstvenu ili unutrašnju efikasnost detektora. Ona zavisi od energije upadnog zračenja i od atenuacionih svojstava detektora. Nazovimo odnos broja registrovanih čestica  $N_R$  i ukupnog broja čestica koje padnu na detektor  $N_u$ .

$$\varepsilon_s = \frac{N_R}{N_u} \quad (4.3)$$

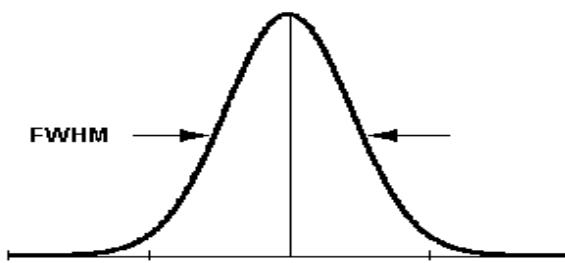
Prema tome, totalna efikasnost je data kao:

$$\varepsilon = \varepsilon_s \varepsilon_g \quad (4.4)$$

Sve ovo se odnosi na efikasnost tačkastih izvora. Dok kod voluminoznih uzoraka ovo izgleda malo komplikovanije.

#### 4.1.2. ENERGETSKA REZOLUCIJA DETEKTORA

Energetska rezolucija se odnosi na sposobnost detektora koji radi u diferencijalnom režimu da razlikuje dve čestice bliskih energija. Ako bismo poslali monoenergetski snop zračenja u detektor, očekivali bismo da dobijemo oštar pik (delta funkciju). Međutim, ono što se u stvarnosti dobija je



gausijan

Slika 4.2. Fotopik

Fotopik ima određenu širinu koji je posledica fluktuacija u ionizacionim i ekscitacionim procesima. Kako su sve bitne informacije sadržane pod ovim pikom, kao meru za rezoluciju uzimamo širinu na polovini visine fotopika. Dve energije koje su u ovom intervalu se ne mogu razložiti. Ako rezoluciju određujemo u energijskoj skali i izražavamo u procentima onda je možemo predstaviti na sledeći način:

$$R = \frac{\Delta E}{E_\gamma} \cdot 100[\%] \quad (4.5)$$

gde je:

$\Delta E$  - širina fotopika na polovini visine (FWHM – full width at half maximum)

$E_\gamma$  - energija upadnog  $\gamma$  zraka

Rezolucija zavisi od energije koja se deponuje u detektoru i bolja je kada se radi o višim energijama.

Poznato je da germanijumski detektori imaju najbolju energetsку rezoluciju.[3]

#### 4.1.3. VREMENSKA REZOLUCIJA DETEKTORA

Kada detektor registruje jednu česticu potrebno je da prođe određeno vreme pa da bi bio u stanju da registruje i sledeću koju bi tretirao kao nezavisan događaj. Ovo vreme, tokom kog detektor nije u mogućnosti da detektuje sledeću česticu, naziva se mrtvo vreme detektora. U aktivnoj zapremini detektora zračenje će da vrši ionizaciju. Prikupljanjem nastalog nanelektrisanja u detektoru električnog tipa stvara se naponski signal. Vreme potrebno da se nastalo nanelektrisanje sakupi

određuje vremenku rezoluciju. Ako bi za to vreme naišla druga čestica, nanelektrisanje koje ona stvori bi se pridodalo prethodnom i izgledalo bi kao da je registrovana samo jedna čestica, a ne dve[3].

#### 4.1.4. EFIKASNA ZAPREMINA DETEKTORA

Pod ovim pojmom podrazumeva se zapremina onog dela prostora koji nakon interakcije sa zračenjem može da proizvede neki signal ili da za slučaj optičkih detektora, pokaže trag kojim su se čestice zračenja kretale. Često je potrebno da ova zapremina bude što je moguće veća. Iz tog razloga danas imamo detektore velikih dimenzija.

### 4.2. SCINTILACIONI DETEKTORI

#### 4.2.1. SCINTILACIONI MATERIJALI

Pronalazak materijala koji su prozirni za sopstvenu svetlost omogućio je konstruisanje i razvoj scintilacionih detektora. Kod njih je bitno da je cela zapremina upotrebljena za registraciju ionizujućeg zračenja, a ne samo njihova površina kao što je bio slučaj sa prethodno korištenim tankim slojevima cink-sulfida koji su se nanosili na karton. To je bilo posebno značajno za beta i gama zračenje jer imaju veću prodornost u odnosu na alfa zračenje. Razlikujemo scintilacione materijale organskog i neorganskog porekla.

Organski scintilacioni materijali koji se pojavljuju u kristalnoj formi su naftalin, antracen, stilben i drugi. Ksilen i toluen su tečne supstance koje su takođe scintilatori. Kod molekula ovih jedinjenja, u okviru svakog energetskog stanja postoji još i veliki broj vibracionih i rotacionih stanja[2]. Kada se jedan ovakav molekul pobudi na neko više elektronsko stanje, deo energije pobude se potroši i na prelaze između vibracionih nivoa tog pobuđenog elektronskog stanja. Prilikom prelaska molekula na osnovno elektronsko stanje, može se desiti da energija emitovanog fotona bude manja od energije sa kojom je molekul prethodno bio pobuđen. Zbog ovoga se dešava da opseg talasnih dužina svetlosti koji se emituje biva pomeren u odnosu na opseg talasnih dužina apsorbovane svetlosti, uz malo preklapanje. Emitovana svetlost će uspeti da izbegne apsorpciju i izade iznoseći informaciju o interakciji koja se dogodila.

Neorganski scintilatori se koriste u obliku monokristala, a neki od njih su LiI, CsI, CsF, KI i naravno najčešće korišteni NaI. Da bi ovi kristali bili prozirni za svetlost koju emituju potrebno im je u malim količinama dodati primešane. Ove primešane nazivamo aktivatorima, a najčešće su u pitanju telur (Tl) i talijum (Ta). Uloga primešane je da stvaraju luminescentne centre. Zračenje koje prolazi kroz kristal stvara elektrone i šupljine koji se pomeraju duž kristalne rešetke. Šupljine mogu da budu popunjene elektronima iz luminescentnog centra, pa on biva pobuđen i emituje svetlost pri prelasku na osnovno stanje. Na taj način se energija pobude kristala predaje luminescentnom centru, a svetlost koju on emituje ne biva apsorbovana.

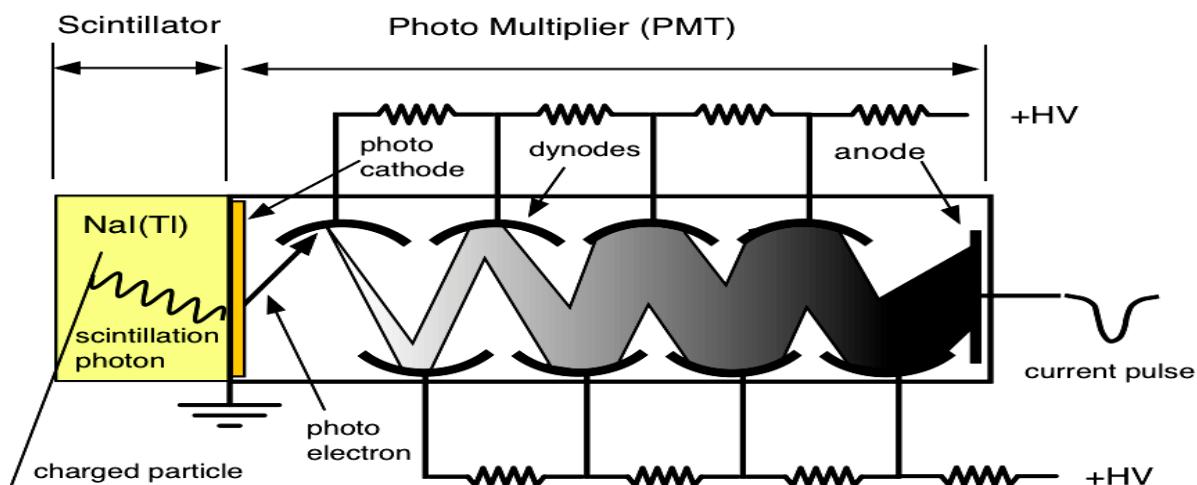
Razlikujemo plastične i tečne scintilatore. Plastični scintilatori se dobijaju rastvaranjem organskih scintilatora u čvrstoj prozirnoj plastici. Rastvaranjem scintilacionih materijala u organskim tečnostima nastaju tečni scintilatori. I jedni i drugi su pogodni za pravljenje detektora raznih oblika i zapremina.

Prednost scintilacionih detektora je velika brzina brojanja. Srednje vreme trajanja scintilacije kod NaI(Tl) je  $10^{-7}$  s a kod nekih drugih je čak i kraće. Deo energije detektovane čestice koja se pretvori u svetlost se naziva konverziona efikasnost i najveća je za NaI(Tl).

#### 4.2.2. KONSTRUKCIJA SCINTILACIONOG DETEKTORA

U scintilacionom materijalu dolazi do formiranja svetlosnih signala i potrebno ih je na neki način pretvoriti u električni signal. Ovo se najjednostavnije izvodi uz pomoć fotomultiplikatora (Slika 4.3).

Potrebno je samo ostvariti optički kontakt između scintilacionog materijala i prozora fotomultiplikatora. Ova veza mora da bude izvedena tako da spoljašnja svetlost nikako ne može da prodre do fotokatode, tako da signali koji se dobiju na izlazu fotomultiplikatora potiču samo od svetlosti stvorene interakcijom zračenja sa kristalom. Da bi se izbegle refleksije i gubici na granicama kristala obično se uzima scintilator u obliku monokristala. NaI(Tl) se najčešće reže u obliku cilindra, jedna baza se spaja sa fotomultiplikatorom pomoću viskoznih materijala velikog indeksa prelamanja, a ostale (neprozirne) površine se oblažu aluminijumom da bi što više zračenja dospelo do kristala. I unutrašnjost ovih obloga je prekrivena odgovarajućim materijalom koji ima zadatku da difuznom refleksijom što je moguće veću količinu svetlosti koja se emituje u svim pravcima usmeri ka prozoru fotomultiplikatora. U slučaju NaI koji je vrlo higroskopan, jako je bitno da bude hermetički zatvoren.



Slika 4.3. Fotomultiplikator

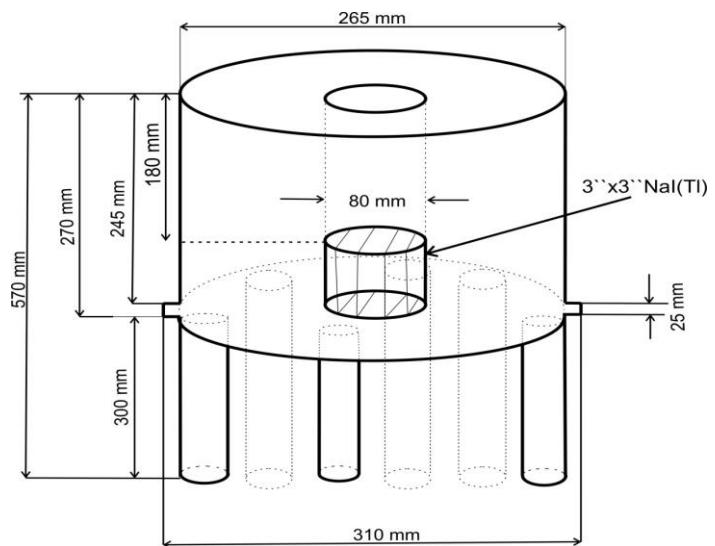
#### 4.2.3. FORMIRANJE SIGNALA

Kada se čestica zračenja, najčešće je foton, kreće kroz scintilacioni materijal, dolazi do kratkotrajne emisije svetlosti. Kada ova svetlost padne na fotokatodu, napravljenu od materijala sa malim izlaznim radom, dolazi do emisije elektrona. Oni se pomoću električnog polja ubrzavaju i usmeravaju ka prvoj dinodi iz koje izbijaju od 3 do 10 novih elektrona. Svaka dinoda je postavljena na višem potencijalu od prethodne, tako da će se ovi elektroni kretati ka drugoj dinodi i iz nje ponovo izbiti nove elektrone. Ovaj proces se dalje nastavlja do poslednje dinode, a ukupan broj elektrona se umnožava za nekoliko redova veličine. Iza poslednje dinode je anoda koja ima najviši potencijal i ona prikuplja sve elektrone. Ovo dovodi do kratkotrajnog pada napona na radnom otporniku i signal se prenosi na pojačavačku elektroniku. Dakle, visina signala odgovara količini svetlosti koja je pala na fotokatodu, a ona je proporcionalna energiji koju je zračenje ostavilo u scintilatoru. Iz ovog sledi da je visina signala direktno proporcionalna energiji koju je zračenje ostavilo u scintilatoru. Jasno je da se scintilacionim detektorima mogu meriti energije detektovanih česticu pod uslovom da su svoju kompletну energiju ostavile u scintilatoru.

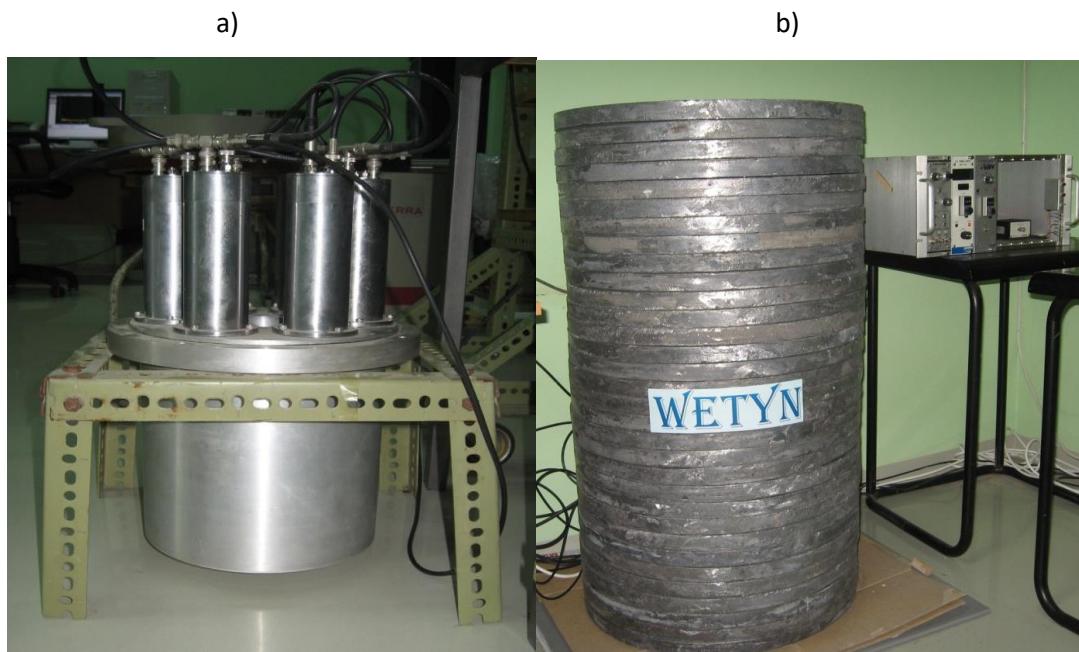
Neorganski scintilatori su napravljeni od materijala relativno visokog rednog broja (I, Cs) što povećava verovatnoću interakcije, pa stoga oni imaju dobru efikasnost i široku primenu i gama spektroskopiji. Tečni i plastični scintilatori imaju veoma dobru vremensku rezoluciju. Kod njih je trajanje emisije luminescentne svetlosti najkraće, što omogućava detekciju velikog broja čestic. Organski scintilatori se ređe koriste u gama spektroskopiji jer se većina njihovih interakcija odvija preko Komptonovog efekta (zbog malog rednog broja), pa se energija fotona ne može tačno ustanoviti. Oni su vrlo pogodni za spektroskopiju beta čestic.

#### 4.3. NaI(Tl) DETEKTOR OBLIKA JAME

Scintilacioni detektor koji se nalazi u Laboratoriji za nuklearnu fiziku u Novom Sadu, šematski je prikazan na Slici 4.4. Navedene dimenzije predstavljaju spoljašnje dimenzije detektora a ne dimenzije kristala NaI(Tl). U NaI(Tl) detektoru oblika jame dimenzija 9''x 9'' ubačen je jedan manji NaI(Tl) detektor dimenzija 3''x 3''. Na ovaj sistem je povezano šest fotomultiplikatora (Slika 4.5).



Slika 4.4. Šema Detektora NaI(Tl)



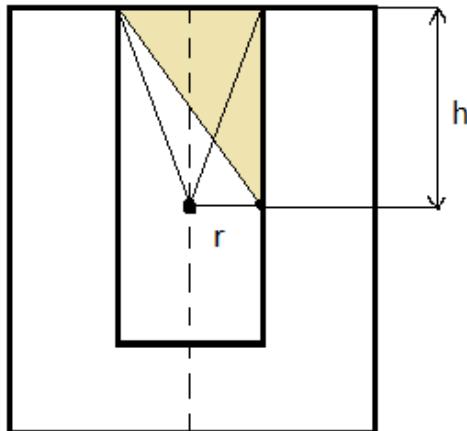
Slika 4.5. Detektor Nal(Tl) u Laboratoriji za nuklearnu fiziku

Signali iz velikog i malog detektora se preko fotomultiplikatora sakupljaju u pojačavaču Canberra model 2022 i kao jedan zajednički signal se vode u Canberra Multiport II Multichanell Analyzer i dalje u kompjuter sa softverom Genie 2000. Pre montiranja ovog sistema, svi fotomultiplikatori su provereni posebno i prilagođeni pomoću tačkastog izvora Cs-137 tako da daju signal na istom kanalu u spektru. Visoki napon na 9''x 9'' Nal(Tl) detektoru je podešen na 1000 V a na 3''x 3'' Nal(Tl) detektoru na 680 V. Bitno je da se ovi naponi tačno podeše jer i namjanje odstupanja od 1V može da dovede do širenja i razmazivanja linija u spektru. Da bi se redukovalo ili eliminisalo pozadinsko zračenje ovaj detektor je smešten u olovnu zaštitu cilindričnog oblika sa širinom zidova 15cm. Zaštita je sklopljena od segmenata u obliku prstenova i poklopca. Ukupna masa zaštite iznosi 2622kg. Na slici 4.5 a) je prikazan detektor za fotomultiplikatorima okrenutim na gore. Takođe na slici 4.5 b) može da se vidi i olovna zaštitu detektora.

Nal(Tl) detektori oblika jame su veoma korisni u niskoenergetkoj spetroskopiji zbog velikog prostornog ugla (približno  $4\pi$ ) pod kojim se mogu detektovati događaji. Upravo zbog geometrije detektora, prvo mora da se odredi zavisnost efikasnosti detekcije ne samo od energije fotona već i od visine izvora u jami.

#### 4.4 GEOMETRIJSKA EFIKASNOST. RAČUNANJE PROSTORNOG UGLA

U ovom radu se analiziraju spektri snimljeni za različite položaje izvora. To znači da se menjala geometrijska efikasnost detektovanja događaja. Pojednostavljena slika jame je prikazana na slici 4.6.



Slika 4.6. Geometrija jame

Geometrijska efikasnost detektora se određuje za slučaj kada se izvor nalazi na sredini detektora i menja se njegovo rastojanje od dna jame. Prostorni ugao pod kojim tačkasti izvor vidi otvor na detektoru je određen za sve visine izvora počevši od 0cm pa sve do 22cm po koracima od 1cm.

Prvo treba da se odredi prostorni ugao, koji se lako dobije na osnovu geometrije jame detektora (slika 4.6).

$$d\Omega' = \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (4.6)$$

Kada integralimo ovu jednačinu dobije se

$$\Omega' = -2\pi \cos\theta \quad (4.7)$$

jer integral po uglu  $\varphi$  daje  $2\pi$ . Ugao teta se dobije na sledeći način:

na slici se vidi da je  $\theta$  ugao između  $h$  koji označava visinu ozvora i  $r$  koji označava poluprečnik jame detektora, pa se može napisati sledeća zavisnost:

$$\tan\theta = \frac{r}{h} \quad (4.8)$$

Iz (4.6) jednačine sa lako dobije ugao  $\theta$  pa i  $\cos\theta$ .

Ovaj prostorni ugao koji je ovde označen sa  $\Omega'$  je prostorni ugao pod kojim zračenje može da pobegne iz detektora. Prostorni ugao koji je nama od interesa se dobije kao:

$$\Omega = 4\pi - \Omega' \quad (4.9)$$

Veza između prostornog ugla pod kojim se može detektovati zračenje i geometrijske efikasnosti je:

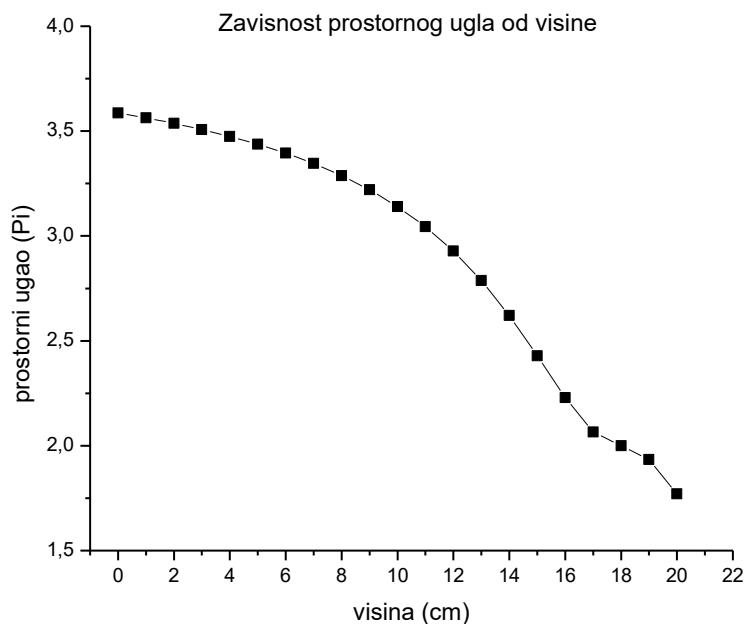
$$\varepsilon_g = \frac{\Omega}{4\pi} \quad (4.10)$$

Efikasnost detekcije je određen za tačkasti izvor koji se nalazi u centru jame. Rezultati su predstavljeni u tabeli 4.1.

*Tabela 4.1. Zavisnost efikasnosti*

*od visine*

H [cm]	Efikasnost
18	0,89646
17	0,89065
16	0,88418
15	0,87691
14	0,8687
13	0,85938
12	0,84869
11	0,83636
10	0,82198
9	0,80508
8	0,78501
7	0,76097
6	0,73197
5	0,69695
4	0,65515
3	0,60716
2	0,55729
1	0,51638
0	0,5
-1	0,48362
-2	0,44271
-3	0,39284



*Slika 4.7. Zavisnost prostornog ugla od visine*

U tabeli 4.1.  $h$  prestavlja rastojanje od vrha jame detektora. Na visine od 0 cm, efikasnost je 0,5, jer je prostorni ugao pod kojim se može detektovati zračenje tačno  $2\pi$ . Na osnovu dobijenih vrednosti je nacrtan grafik koji je predstavljen na slici 4.7

#### 4.5. GERMANIJUMSKI DETEKTOR

Germanijumski detektori su poluprovodnički detektori, što znači da njihovu osetljivu zapreminu predstavlja poluprovodnički kristal.

Poluprovodnici imaju četiri valentna elektrona. Provodljivost poluprovodnika se povećava dodavanjem primesa - dopiranjem, koji stvaraju nove energijske nivoe između valentne i provodne

zone (donorski i akceptorski nivo). Ako se materijal dopira atomima koji imaju tri valentna elektrona tada se pojavljuju šupljine koje su pozitivno nanelektrisane. One postaju glavi nosioci nanelektrisanja. Takvi poluprovodnici su poluprovodnici P tipa. Ukoliko se kristal dopira atomima koji imaju pet valentnih elektrona, jedan od njih će ostati slobodan i elektroni postaju glavni nosioci nanelektrisanja. Tako je dobijen poluprovodnik N tipa.

Poluprovodnički kristali koji se koriste u detektorima treba da imaju sposobnost da izdrže veliki gradijent električnog polja, da imaju veliku otpornost, a vreme života kao i pokretnost šupljina i elektrona treba da imaju što veću vrednost.

Osetljiva zapremina germanijumskih detektora ima strukturu PN spoja. Proces detekcije zračenja se zasniva na veoma povoljnim osobinama PN spoja u okolini samog kontakta dva dela poluprovodnika u oblasti prostornog nanelektrisanja koji nastaje zahvaljujući difuziji nanelektrisanja usled postojanja unutrašnjeg gradijenta električnog polja. Kada dođe do interakcije zračenja sa ovim osetljivim delom poluprovodničke diode stvaraju se parovi slobodnih elektrona i šupljina.

Parovi elektron - šupljina se razdvajaju i prelaze u P i u N deo poluprovodnika, respektivno. Količina stvorenog nanelektrisanja je u linearnoj korelaciji sa energijom detektovanog zračenja. Spoljašnje električno polje pomoću kojeg se prikupljaju nanelektrisanja inverzno polarizuje PN spoj, čime se postiže da oblast prostornog nanelektrisanja bude velika i da slobodna nanelektrisanja koja su stvorena pri detekciji zračenja proizvode značajni signal.

Širina zabranjene zone kod poluprovodnika je mala, 0,74 eV za germanijum i 1,12 eV za silicijum, i provodljivost tako zavisi od temperature. Pri povećanju temperature neki elektroni ili šupljine dobijaju dovoljnu energiju da pređu u provodnu zonu, i time stvaraju šum. Naime, sva slobodna nanelektrisanja koja nisu stvorena putem interakcije zračenja sa materijom predstavljaju šum. [3] Upravo se zbog toga vrši hlađenje ovih detektora tečnim azotom, koji smanjuje protok struje usled termičkih efekata.

Širina zabranjene zone kod poluprovodničkih materijala je 1/10 deo one energije koje je potrebno za stavljanje para elektron-šupljina u gasu, što znači da zračenje iste energije proizvodi više slobodnih nanelektrisanja u poluprovodniku nego u gasu, pa je zahvaljujući većoj statistici, bolja je energijska rezolucija.

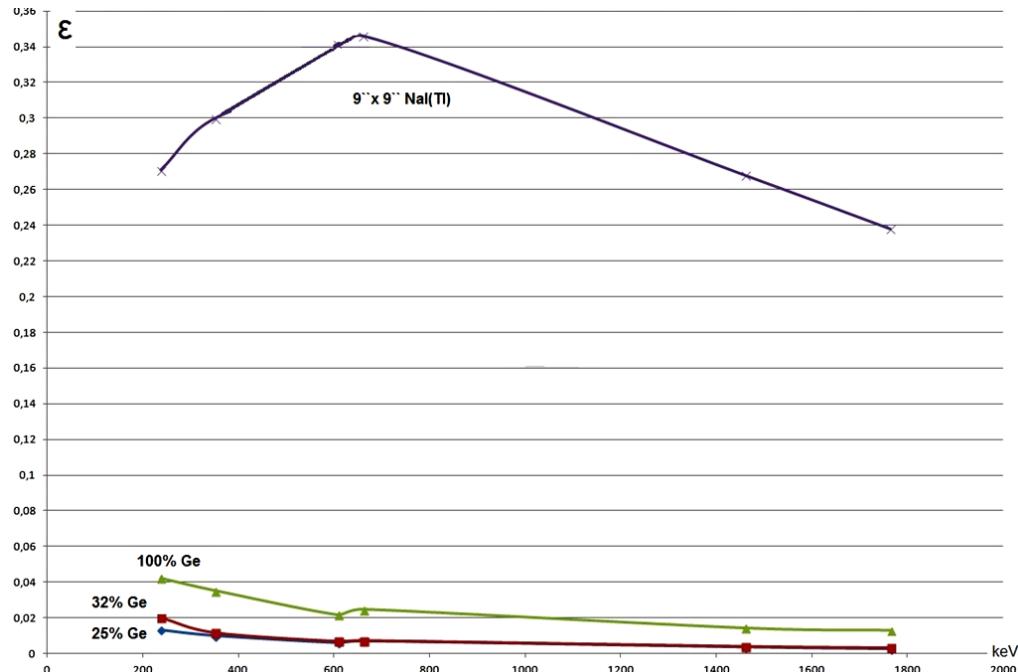
Germanijumski detektori su poluprovodnički detektori koje sadrže kristal veoma čistog germanijuma (hyperpure germanium - HPGe) koji je smešten u vakuumsku komoru. Pomoću kriostata tečnog azota se sistem održava na niskoj temperaturi.

Prednosti germanijumskih detektora su velika energijska rezolucija, kompaktna veličina, relativno brzo brojanje događaja i mala efektivna debljina. Nedostaci su limitirana veličina kristala, potreba za hlađenjem, mogućnost pojave kvara usled radiacionog oštećenja.

## 4.6. UPOREĐENJE EFIKASNOSTI I MDA (MINIMALNIH DETEKTABILNIH AKTIVNOSTI)

### Nal(Tl) I HPGe DETEKTORA

Efikasnost detekcije praktično  $4\pi$  Nal(Tl) detektora je neuporedivo veća u odnosu na standardne germanijumske detektore. Iz eksperimentalnih podataka dobijenih snimanjem voluminoznih uzoraka u Laboratoriji za nuklearnu fiziku, Novi Sad dobijeni su rezultati za efikasnost predstavljeni na slici 4.8, gde se vidi da je efikasnost velikog  $9'' \times 9''$  Nal(Tl) detektora za 20-100 puta veća nego efikasnost tipičnog germanijumskog detektora.



Slika 4.8 - upoređenje efikasnosti Nal(Tl) i HPGe detektora

Uzimajući u obzir ovako visoku efikasnost detekcije, može se zaključiti takođe da će ovakav detektorski sistem imati i niske vrednosti MDA (minimalnih detektabilnih aktivnosti) u upoređenju sa germanijumskim detektorima. MDA su izračunate prema:

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{I_B t}}{\varepsilon t p_\gamma} \quad (4.11)$$

gde su:

$I_B$  - odbroj posmatrane linije u spektru fona;

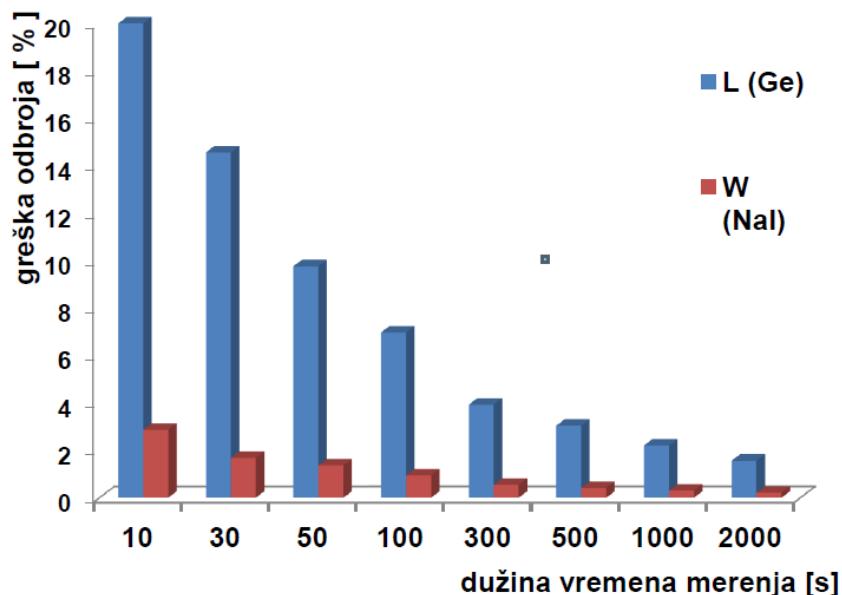
$t$  - vreme merenja spektra;

$\varepsilon$  - efikasnost detekcije na datoј energiji;

$p_\gamma$  - kvantni prinos.

Vrednosti su MDA za NaI(Tl) sistem puno niže tj. iste vrednosti MDA kao kod HPGe detektora se ovakvim detektorskim sistemom mogu dostići za kraće vreme merenja i time omogućiti brži i efikasniji rad laboratorije i mogućnost merenja više uzoraka u toku radnog dana.

Još jedan pokazatelj velike efikasnosti brojanja  $9'' \times 9''$  NaI(Tl) detektora jeste upoređenje greške merenja za jako kratka vremena merenja. Uzet je uzorak KCl, koji je upakovan u cilindričnu geometriju promera 72 mm a visine 60 mm. Masa uzorka je bila 252,8 g. Spektri su snimani na detektoru oznake L efikasnosti 32% i na  $9'' \times 9''$  NaI(Tl) detektoru. Vreme snimanja spektara je bilo 10,30,50,100,300,500,1000 i 2000 sekundi. Vrednost greški odbroja za određeno vreme merenja je predstavljena na grafiku 4.9. Na prvi pogled se vidi da je vreme potrebno da se dostigne praktično ista vrednost odbroja i ista greška merenja, na germanijumskom detektoru 2000 sekundi dok je na  $9'' \times 9''$  NaI(Tl) detektoru ta vrednost SAMO 30 sekundi!



slika 4.9 - razlika u greškama odbroja na detektorima L (Ge) i W(NaI(Tl)) za navedena vremena merenja

## 5. ANALIZA REZULTATA

### 5.1. ENERGETSKA KALIBRACIJA I KALIBRACIJA NA OBLIK PIKA U PROGRAMU APTEC

Mahovine su sakupljene na jesen 2015 godine skoro na celoj teritoriji Republike Srbije u cilju praćenja prostornih distribucija nekih elemenata koji se u mahovinama mogu naći. Gama – spektroskopija je urađena na Prirodno – matematičkom Fakultetu u Novom Sadu iste godine, korišćenjem NaI(Tl) detektora.

Prva stvar koja treba da se odredi je energetska kalibracija. Program Aptec može sam da kalibriše spektar ukoliko se zadaju određeni parametri, brojevi nekih kanala i njima odgovarajuće energije. Za ovu kalibraciju su se koristili u svim slučajevima isti parametri (Tabela 5.0). U spektru Pb-210 se lako identificuje linija koja se dobije detekcijom gama zračenja energija 46 keV. Mn-54 emituje gama zračenje energije 834.83 keV i kao treći parametar koristi se gama linija K-40 sa energijom 1460 keV.. Zabeleže se kanali u kojima se registruju ovi fotoni i na osnovu poznatih vrednosti energija i broja kanala se vrši energetska kalibracija.

Izvor	Energija	Broj kanala
Pb-210	46	5
Mn-54	835	86
K-40	1460	147

Tabela 5.0 Energetska kalibracija

Zbog slabije energetske rezolucije Nal detektora, čest je slučaj da se Gausovi pikovi koji predstavljaju gama linije u spektru preklapaju. U našem slučaju, kao što ćemo videti kasnije dolazi do preklapanja tri gama linije su energetski bliske i u spektru nisu razdvojene. Da bi se odredio odbroj ispod ta tri pika pojedinačno mora se koristiti računska tehnika putem koje se oblik u spektru koji je nastao spajanjem nekoliko Gama pikova razloži na gama pojedinačne gama linije. U ovom slučaju sem energetske izvršena je i kalibracija na oblik pika. Kao što je napisano u poglavju 4.1.2 svaki pik ima odgovarajući FWHM (širina na polovini visine). Ova vrednost se menja sa promenom energije tj. povećava se sa porastom energije. Dakle, potrebne su bar 2-3 vrednosti FWHM na određenim energijama. Sama računska metoda dekonvolucije nekog složenog spektralnog oblika se sastoji u tome da se u tom posmatranom energetskom intervalu ucrtaju Gausovi pikovi tačno određene širine. Amplitudne Gausovih pikova se variraju dok njihov zbir ne da oblik koji se u najvećoj mogućoj meri poklapa sa segmentom energetskog spektra koji se analizira. Na taj se način jedan složeni oblik nastao preklapanjem gama linija bliskih energija može razdvojiti na pojedinačne Gausove pikove kojima se nakon toga veoma jednostavno odredi površina. Vrednosti FWHM koje su nam u ovoj proceduri neophodne su određene iz jednostavnih spektara kao što su spektri Pb-210, Mn-54 i K-40 energije 46 keV, 834.8 keV i 1460 keV respektivno. Na osnovu tih podataka se dobijaju parametri za kalibraciju. (Tabela 5.1). Program Aptec na osnovu podataka sam kalibriše spektar.

Izvor	Energija	Broj kanala	FWHM
Pb-210	46	5	1.706
Mn-54	835	86	6.37
K-40	1460	147	9.26

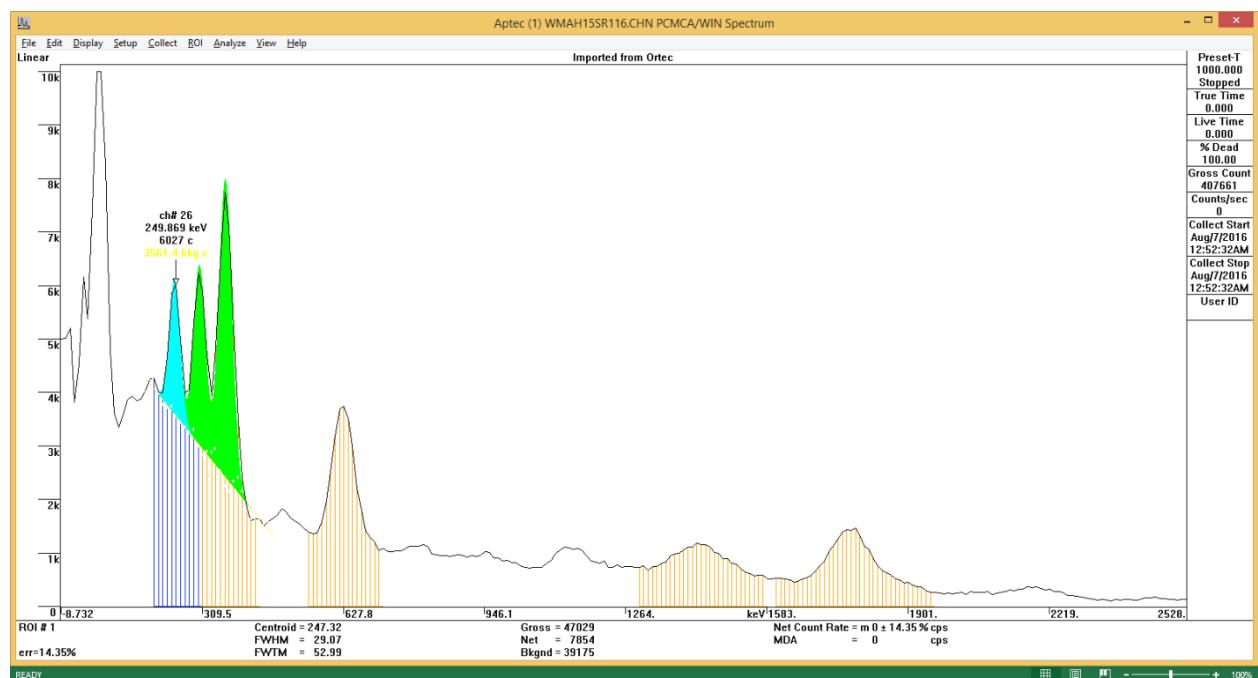
Tabela 5.1 Kalibracija spektra

Dobijena je sledeća kalibracija:

$$\begin{aligned} \text{FWHM (Channels)} = & 1.549456541998754 + 0.05385420710136352(\text{ch}) \\ & + 0(\text{ch})^2 + 0(\text{ch})^3 \\ & + 0(\text{ch})^4 + 0(\text{ch})^5 \end{aligned}$$

Point	Centroid		FWHM (Channels)		FWHM (keV)		Deviation
	Channel	keV	Measured	Calculated	Measured	Calculated	
1	4.80	39.01	1.706	1.806	16.968	17.958	-5.84 %
2	86.00	846.64	6.370	6.138	63.357	61.049	3.64 %
3	147.00	1453.36	9.260	9.393	92.102	93.420	-1.43 %
						Average Deviation	3.64 %

Sledeći korak je određivanje odbroja gama-fotona. To se radi na sledeći način: markiraju se određeni pikovi i koristi se opcija multifit, koja pikove aproksimira Gausovom raspodelom, a samim tim oduzme fon i određuje relativnu grešku (Slika 5.1). Površina ispod pika je proporcionalna broju gama-fotona, tj. intenzitetu zračenja.



Slika 5.1.Određivanje odbroja gama-fotona u programu Aptec

## 5.2. KALIBRACIJA DETEKTORA NaI(Tl) NA EFIKASNOST

Da bi smo odredili specifičnu aktivnost radionuklida u mahovinama, moramo kalibrirati detektor NaI(Tl) na efikasnost. Šest spektara je izmereno na NaI detektoru, ali i na Ge detektoru takođe. Kako za Ge detektore postoji dosta referentnih materijala da se može izvršiti kalibracija efikasnosti detekcije, može se odrediti koncentracija radioizotopa u uzorcima, pa se oni mogu smatrati referentnim.

U spektrima se analiziraju šest pikova i to: linija od 238 keV olova Pb-212 koji je član Th-232 niza, linije 295 keV i 352 keV pripadaju Pb-214 iz U-238 niza, dve linije 609 keV i 1764 keV su od Bi-214 takođe iz niza U-238 i linija 1460 keV koja pripada K-40-S obzirom da Laboratorija za nuklearnu fiziku poseduje dovoljan broj referentnih materijala da bi se izvršila zadovoljavajuća energetska kalibracija poluprovodničkih detektora, vrednosti za aktivnosti pomenutih radionuklida koje su dobijene merenjima HPGE detektorima su nam poslužile kao referentne.

Sledeći korak je da se nađe koeficijent k koji pretvara intenzitet gama linije tj. površinu ispod pika u aktivnost A [Bq/kg]. To se dobija prosti množenjem:

$$A = k \cdot I \quad (5.1)$$

odnosno

$$k = \frac{A}{I} \quad (5.2)$$

Za potrebe energetske kalibracije NaI detektora, vrednost A koja figuriše u gornjim izrazima je aktivnost posmatranog radionuklida određena pomoću kalibriranog poluprovodničkog detektora, dok je A površina ispod pika posmatrane energije dobijena merenjem NaI detektorom. Procedura se obavlja za svaku liniju pojedinačno pošto efikasnost detekcije nije ista za sve energije. Rezultati su pokazani u Tabeli 5.2.

Pb-212 238 keV									
ŠIFRA UZORKA	A	ΔA	I	ΔI	k	Δk	ksr	Δksr	
BGRMDM12	9.8	1.6	2690	240	0.0036	0.0007	0.0045	0.0004	
BGRMDM13	10.7	1	2200	400	0.0049	0.0010			
LGRMKM1	11.4	2	2800	400	0.0041	0.0009			
LGRMTH13	30	4	5700	800	0.0053	0.0010			
LGRMTH14	14.3	2.2	4500	500	0.0032	0.0006			
LGRMTH15	43	5	6900	800	0.0062	0.0010			

<b>Pb-214 295 keV</b>								
<b>BGRMDM12</b>	12.2	2.7	1390	220	0.0088	0.0024	0.017	0.004
<b>BGRMDM13</b>	10.7	1.5						
<b>LGRMKM1</b>	17	3						
<b>LGRMTH13</b>	40.4	2.2	1500	600	0.027	0.011		
<b>LGRMTH14</b>	14.9	1.7	1000	400	0.015	0.006		
<b>LGRMTH15</b>	40.7	2.6	2200	700	0.019	0.006		
<b>Pb-214 352 keV</b>								
<b>BGRMDM12</b>	12.2	2.7	3960	230	0.0031	0.0007	0.0070	0.0008
<b>BGRMDM13</b>	10.7	1.5	1800	300	0.0059	0.0013		
<b>LGRMKM1</b>	17	3	1400	400	0.012	0.004		
<b>LGRMTH13</b>	40.4	2.2	4400	600	0.0092	0.0013		
<b>LGRMTH14</b>	14.9	1.7	3700	500	0.0040	0.0007		
<b>LGRMTH15</b>	40.7	2.6	5500	700	0.0074	0.0011		
<b>Bi-214 609 keV</b>								
<b>BGRMDM12</b>	17	4	3500	400	0.0049	0.0013	0.0132	0.0016
<b>BGRMDM13</b>	14.8	2	1900	400	0.0078	0.0019		
<b>LGRMKM1</b>	18	4	890	230	0.020	0.007		
<b>LGRMTH13</b>	42.2	2.7	2000	500	0.021	0.005		
<b>LGRMTH14</b>	19.3	2.4	2060	160	0.0094	0.0014		
<b>LGRMTH15</b>	42	4	2600	300	0.0162	0.0024		
<b>K-40 1460 keV</b>								
<b>BGRMDM12</b>	235	19	3710	270	0.063	0.007	0.0760	0.0029
<b>BGRMDM13</b>	262	13	3600	300	0.073	0.007		
<b>LGRMKM1</b>	391	27	4800	400	0.081	0.009		
<b>LGRMTH13</b>	750	40	7900	400	0.095	0.007		
<b>LGRMTH14</b>	361	24	5500	300	0.066	0.006		
<b>LGRMTH15</b>	400	30	5140	260	0.078	0.007		
<b>Bi-214 1764 keV</b>								
<b>BGRMDM12</b>	17	4	1860	130	0.0091	0.0022	0.0175	0.0021
<b>BGRMDM13</b>	14.8	2	720	140	0.021	0.005		
<b>LGRMKM1</b>	18	4	610	170	0.030	0.011		

<b>LGRMTH13</b>	42.2	2.7	2400	400	0.018	0.003		
<b>LGRMTH14</b>	19.3	2.4	2100	100	0.0092	0.0012		
<b>LGRMTH15</b>	42	4	2200	200	0.0191	0.0025		

Tabela 5.2. Kalibracija detektora NaI(Tl)

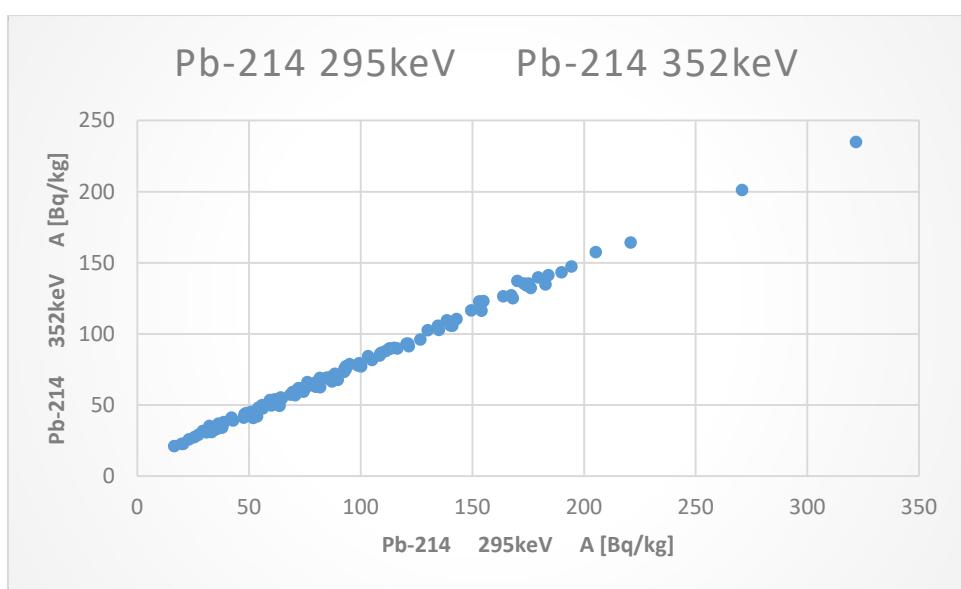
Na osnovu gornjih rezultata određuje se aktivnost svih linija u uzorcima izmerenim detektorom NaI.

Kompletan rezultat dat je u Prilogu 1.

### 5.3. ODREĐIVANJE KORELACIJE AKTIVNOSTI

#### 5.3.1. PROVERA ISPRAVNOSTI OBRADE SPEKTARA

Da bi dobili relevantne rezultate obrade podataka, tj. aktivnosti spektara, potrebno je proveriti ispravnost ovog postupka. Ovu proveru, međutim, možemo uraditi na jednostavan način tako, što nacrtamo grafik korelacije između dve linije koje pripadaju istom izotopu iz spektra. Te dve linije su energije 295 keV i 352 keV i pripadaju radioaktivnom izotopu Pb-214. Grafik zavisnosti između te dve linije je prikazan na slici 5.2.



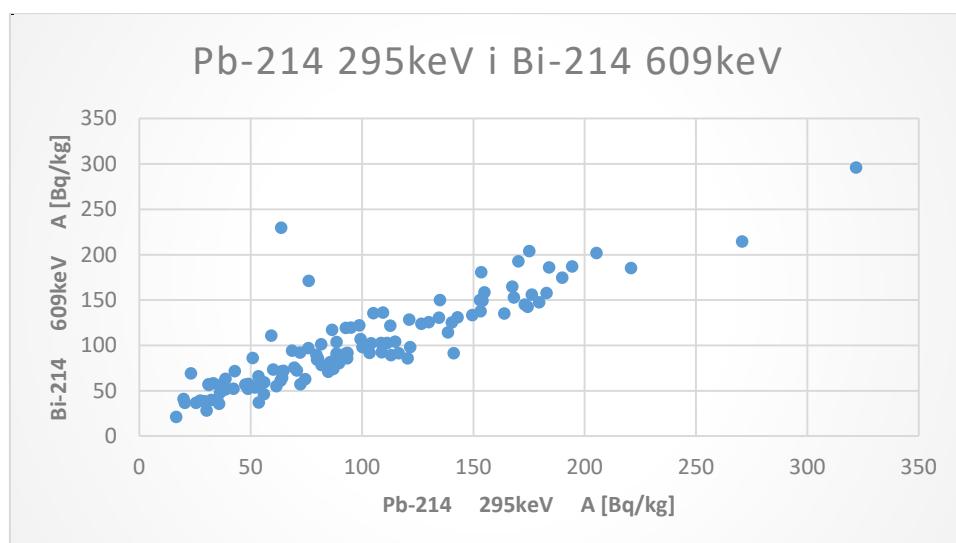
Slika 5.2. Grafik zavisnosti između linije 295 keV i 352 keV radioizotopa Pb-214

Na grafiku je uočljiva linearne zavisnosti aktivnosti između te dve linije, koju možemo smatrati dokazom da je posao obrade spektara dobro urađen. Ovako dobra korelacija je posebno značajna zbog činjenice da su obe posmatrane linije određene metodom fitovanja relativno kompleksnog tripleta koji se u svim spektrima pojavljuje. Evidentno je da je proces fitovanja tripleta dao dobre rezultata.

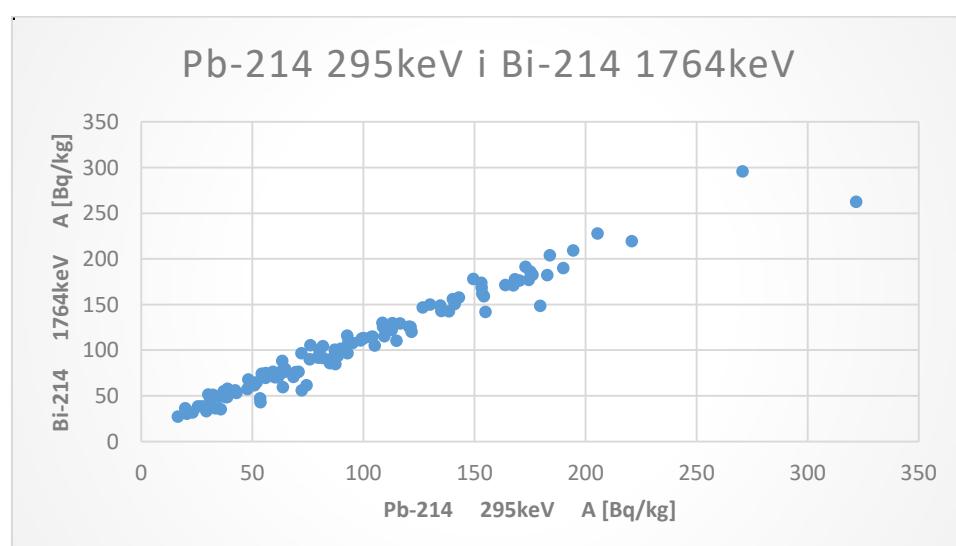
### 5.3.2. ODREĐIVANJE KORELACIJE IZMEĐU DVA RADIONUKLIDA IZ ISTOG RADIOAKTIVNOG NIZA

U ovom radu smo analizirali šest gama linija različitih energija i to: linija energije 239 keV pripada radionuklidu Pb-212 koji je član torijumovog (Th-232) niza, linije energija 295 keV i 352 keV pripadaju olovu Pb-214, člana niza uranijum-radijum (U-238), zatim linije energija 609 keV i 1764 keV, koje emituje radionuklid Bi-214, takođe član niza uranijum-radijum (U-238) i liniju energije 1460 keV koji potiče od radioaktivnog izotopa K-40.

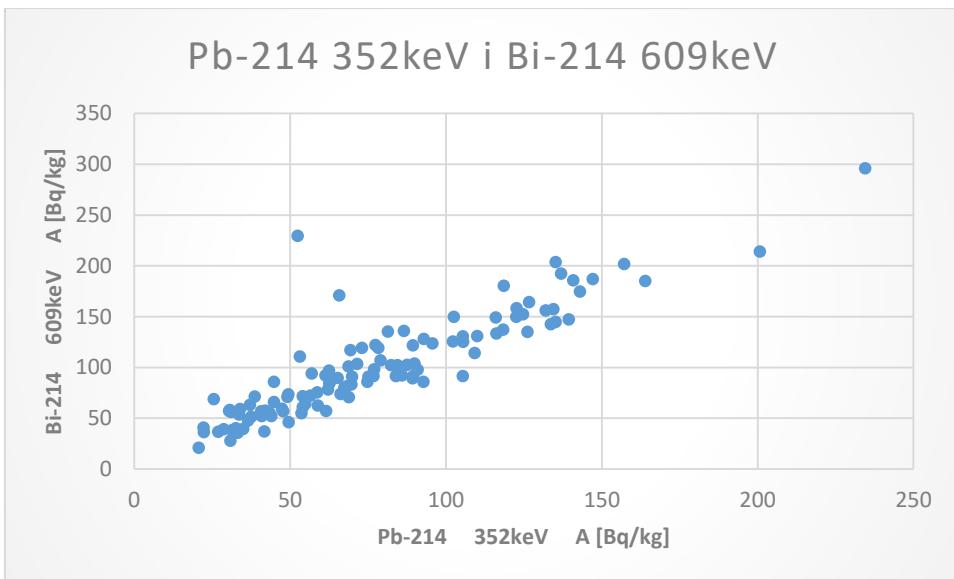
Jasno je pretpostaviti, na osnovu gore navedenih činjenica, da između aktivnosti radionuklida, koji pripadaju istom radioaktivnom nizu, treba da postoji neka linearna korelacija. U ovom slučaju to su izotopi Pb-214 i Bi-214. Na slikama 5.3 – 5.6. su prikazane grafičke zavisnosti određenih linija ta dva radionuklida:



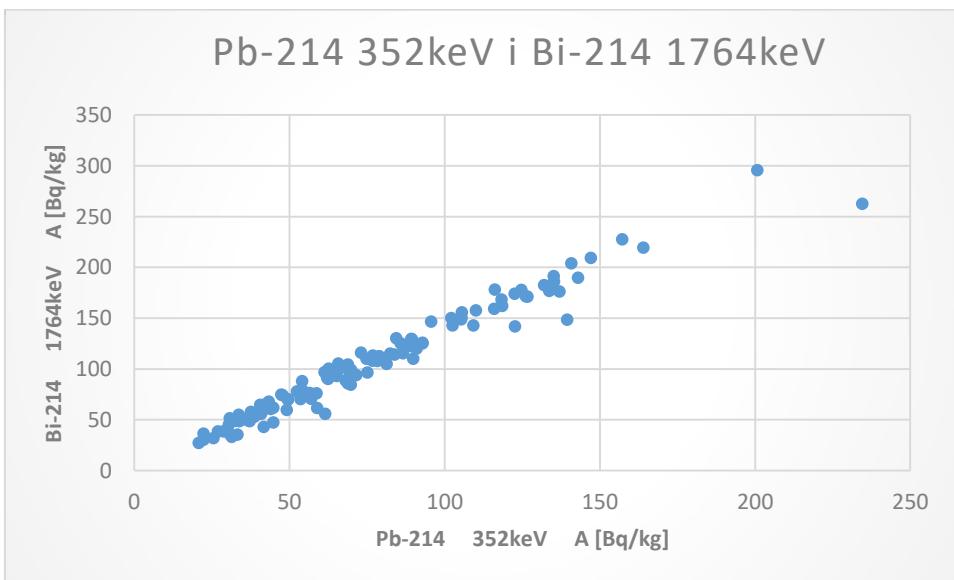
Slika 5.3. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 295 keV i Bi-214 609 keV



Slika 5.4. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 295 keV i Bi-214 1764 keV



Slika 5.5. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 352 keV i Bi-214 609 keV

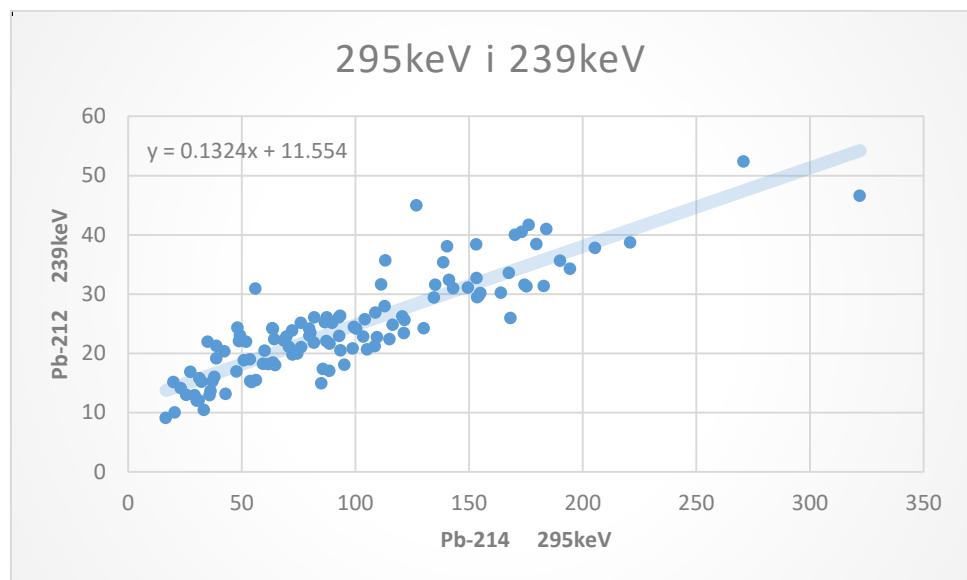


Slika 5.6. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 352 keV i Bi-214 1764 keV

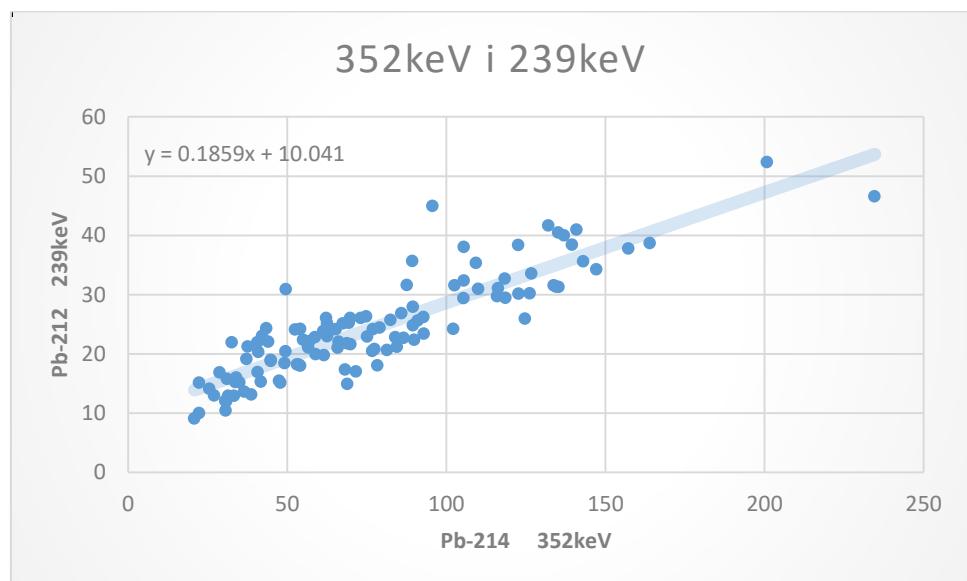
Na graficima se jasno vidi, da postoji linearna zavisnost između radionuklida iz istog radioaktivnog niza, međutim da se primetiti, da te dve zavisnosti se ne podudaraju. Naime, između obe linije olova Pb-214 i linije Bi-214 energije 1764 keV je uočljiva linearna zavisnost sa veoma malim rasturom tačaka oko nekog centralnog linearног trenda, dok u korelaciji sa linijom 609 keV linearност је видна, али је растури тачака видљив а у неким случајевима је linearна zavisnost narušena. Тачније рећено, постоји неколико тачака које јасно одударaju od linearne zavisnosti. Detaljna analiza ове чинjenice ће бити обрађена у pogлављу 5.3.5.

### 5.3.3. ODREĐIVANJE KORELACIJE IZMEĐU DVA RADIONUKLIDA IZ RAZLIČITIH RADIOAKTIVNIH NIZOVA

Interesantno je prodiskutovati i korelacije aktivnosti između dva različita radionuklida koji pripadaju i različitom radioaktivnom nizu. To su linija olova Pb-212 energije 239 keV i četiri linije iz već spomenutog uranijum-radijumovog (U-238) niza, i linija K-40 energije 1460 keV (kalijum K-40 ne pripada ni jednom radioaktivnom nizu) i četiri linije iz niza U-238, zatim korelaciju aktivnosti između olova Pb-212 i kalijuma K-40. Grafici zavisnosti su prikazani na slikama 5.7. – 5.15.



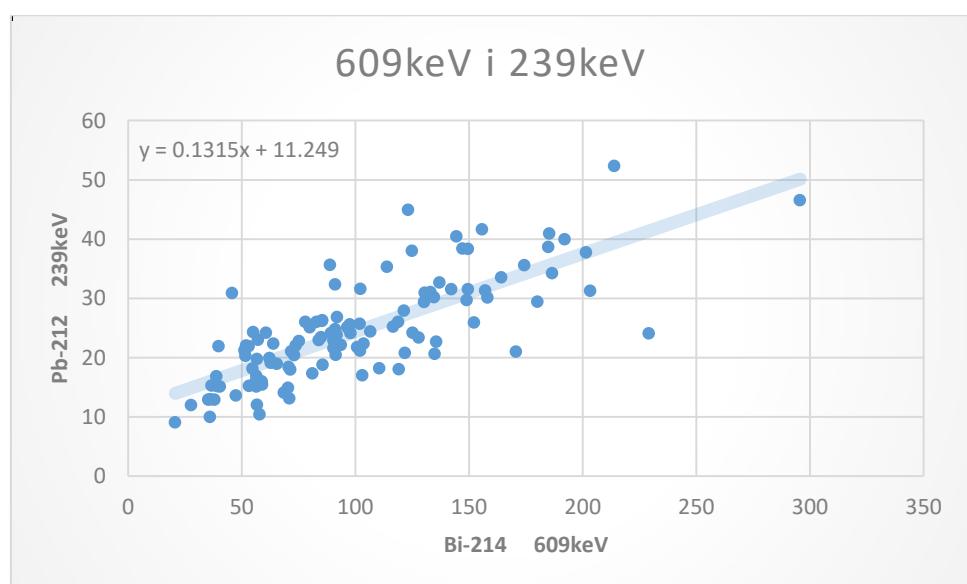
Slika 5.7. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 295 keV i Pb-212 239 keV



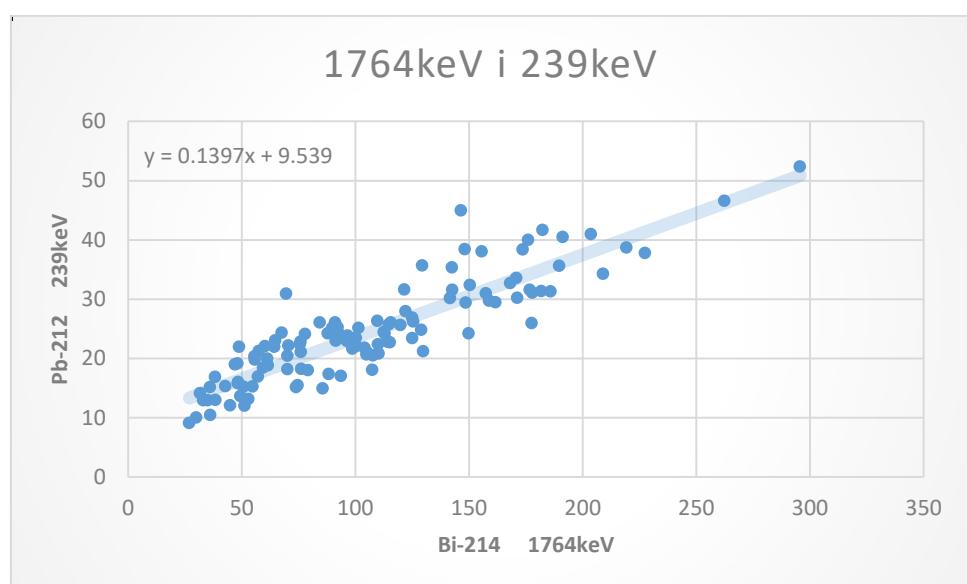
Slika 5.8. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 352 keV i Pb-212 239 keV

Sa slike 5.7 se može videti da je koncentracija dva izotopa olova, i to Pb-212 koji pripada nizu Th-232 i Pb-214 koji je član niza U-238, veoma dobra. I uranijum i torijum se nalaze u zemljištu i

jedini način da dospeju do mahovina je putem suve depozicije prašine. Prašina potiče od zemljišta koje je putem erodivnih dejstava nastala od stena. Uranijuma i torijuma takođe ima i u stenama i mineralima. U zavisnosti od prirode i vrste stene, u njima su merene različite koncentracije uranijuma i torijuma. Kako su uzorci zemljišta uzeti sa gotovo celokupne teritorije Republike Srbije, može se očekivati da sastav zemljišta nije jednak u svim krajevima. Iz tog razloga možemo očekivati i da različita zemljišta imaju i različite iznose uranijuma i torijuma u svom sastavu. No slika 5.7 nam kaže da uz izvestan rastur eksperimentalnih vrednosti jasna linearna zavisnost između koncentracija Pb-212 i Pb-214 postoji.



Slika 5.9. Grafik zavisnosti između linija Bi-214 609 keV i Pb-212 239 keV



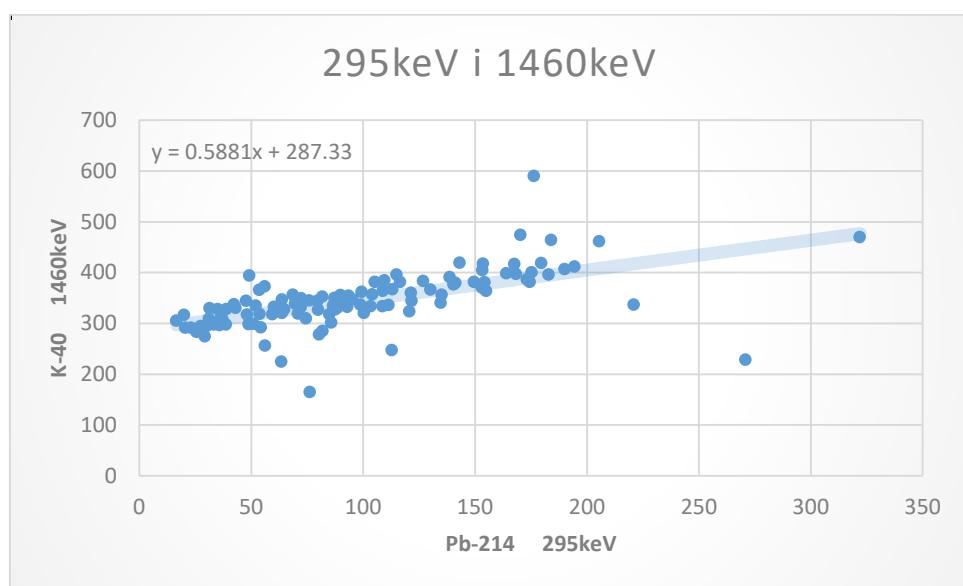
Slika 5.10. Grafik zavisnosti između linija Bi-214 1764 keV i Pb-212 239 keV

U slučaju korelacije merenih vrednosti aktivnosti Pb-212 i Bi-214 može se videti da je rastur eksperimentalnih tačaka oko dominantne linearne zavisnosti jasnije izražena kod linije od 609 keV.

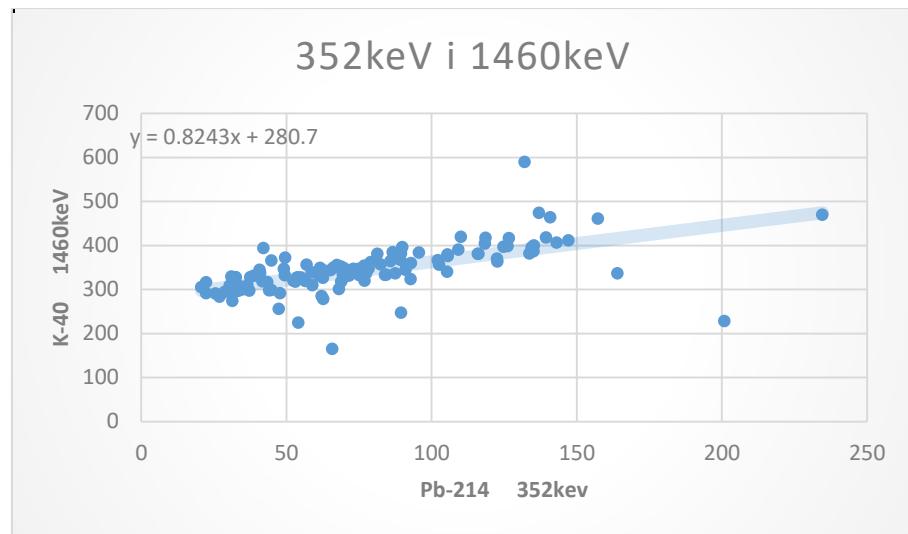
Na graficima 5.7. – 5.10. se na osnovu jednačine prave vidi da u mahovinama imamo nešto malo Pb-212 i kada nema Pb-214. Tačnije rečeno, u jednačini prave (koja je data na svakoj slici) se pojavljuje i član kojim je data vrednost odsečka na y-osi. To znači da se u mahovinama uvek nalazi neka mala vrednost koncentracije Th, čak i kada uranijum nije prisutan u tom uzorku. S obzirom da oba radionuklida do mahovina mogu da stignu preko zemljišta, ili suve depozicije prašine, tj. iz istog izvora, ispostavlja se da će mahovine u većoj meri zadržati torijum nego uraniju. Na osnovu toga možemo zaključiti da mahovine imaju veći afinitet za Th-232 nego za U-238, što je poznato za alge i neke druge biljne vrste.

#### 5.3.4. KORELACIJE AKTIVNOSTI K-40 I OSTALIH RADIONUKLIDA

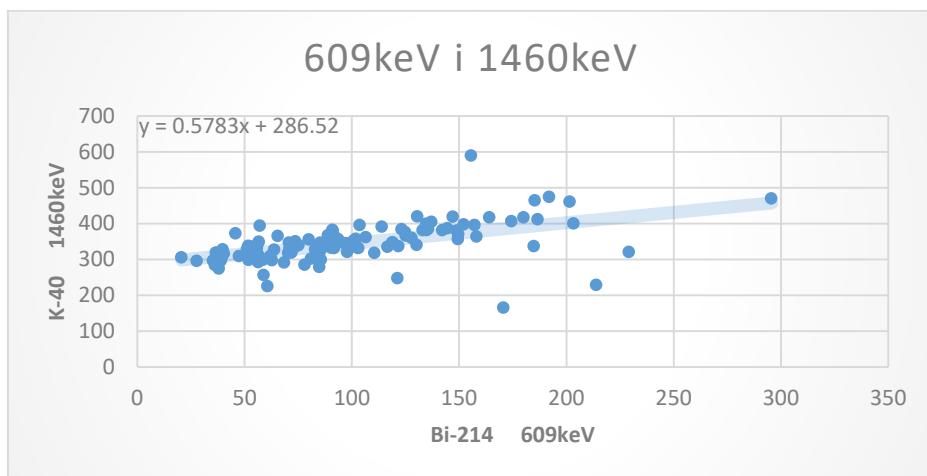
U svim spektrima je primećena i gama linija K-40. Budući da ovaj radionuklid ne pripada nizovima urana ili torijuma, zanimljivo je pogledati kakve su korelacije između K-40 i ostalih radionuklida dobijene u našim merenjima. Rezultati su prikazani na slikama od 5.11 do 5.15.



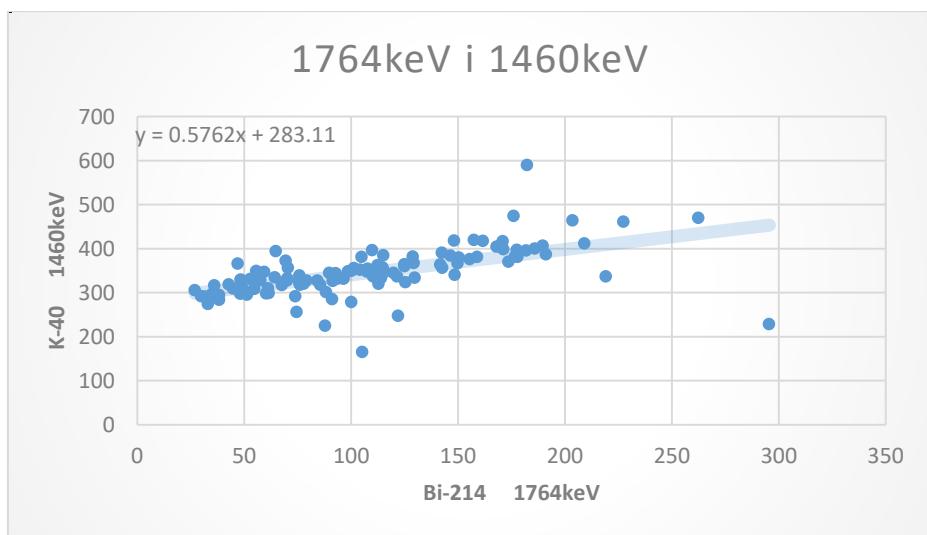
Slika 5.11. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 295 keV i K-40 1460 keV



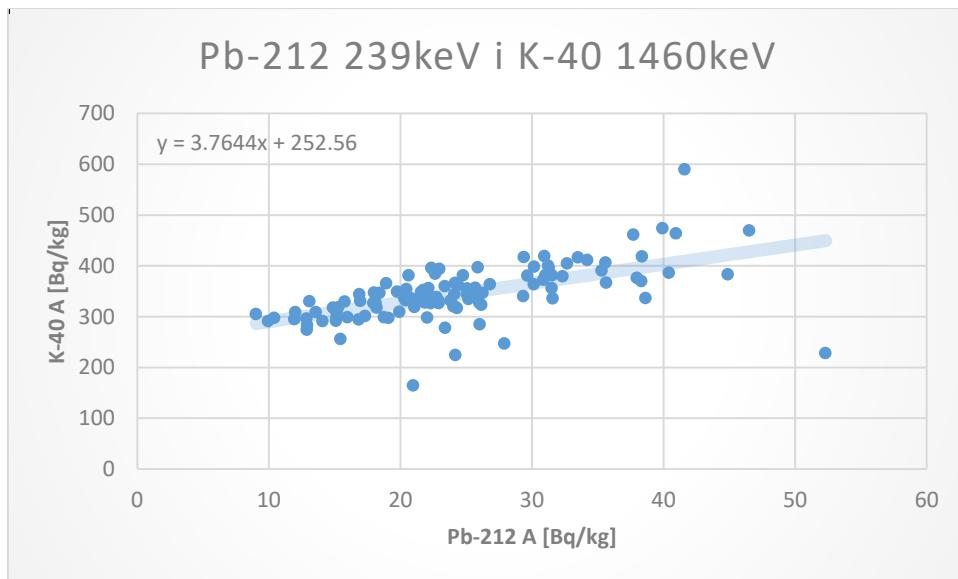
Slika 5.12. Grafik zavisnosti između linija Pb-214 352 keV i K-40 1460 keV



Slika 5.13. Grafik zavisnosti između linija Bi-214 609 keV i K-40 1460 keV



Slika 5.14. Grafik zavisnosti između linija Bi-214 1764 keV i K-40 1460 keV



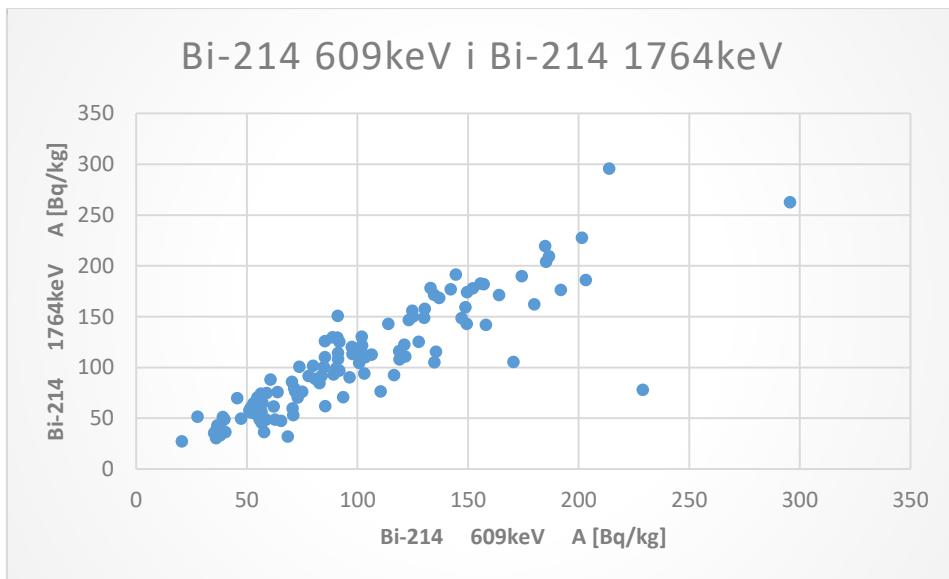
Slika 5.15. Grafik zavisnosti između linija Pb-212 239 keV i K-40 1460 keV

Grafići zavisnosti aktivnosti K-40 od niza U-238 su prikazani na slikama 5.11. – 5.14.

Još je interesantnija zavisnost merene koncentracije aktivnosti K-40 od aktivnosti drugih radionuklida. Može se videti da u svim slučajevima postoji neka aktivnost K-40 čak i kada je merena ili ekstrapolirana aktivnost drugih radionuklida jednaka nuli. U za svaki od grafika na kojima je prikazan K-40 se može odrediti neka linearna zavisnost rasporeda tačaka. Pri čemu se u svim slučajevima pojavljuje slobodni član, tj. odsečak na y-osi. Na osnovu ovoga se može doneti zaključak da je K-40 prisutan i onda kada nema Pb-212 i drugih radionuklida. K-40 je životno važan element i biljke ga usvajaju iz prirode. Mahovine kalijum dobijaju iz vazduha, najverovatnije iz zemljišta procesom suve depozicije, i ugrađuju ga u svoja tkiva. Jasan je afinitet biljaka za kalijumom. Kako se u prirodnom kalijumu nalazi i dugoživeći K-40, on postaje obavezan sastojak biljnog materijala. Grafik zavisnosti koncentracije K-40 od merene koncentracije Pb-212 je prikazan na slici 5.15.

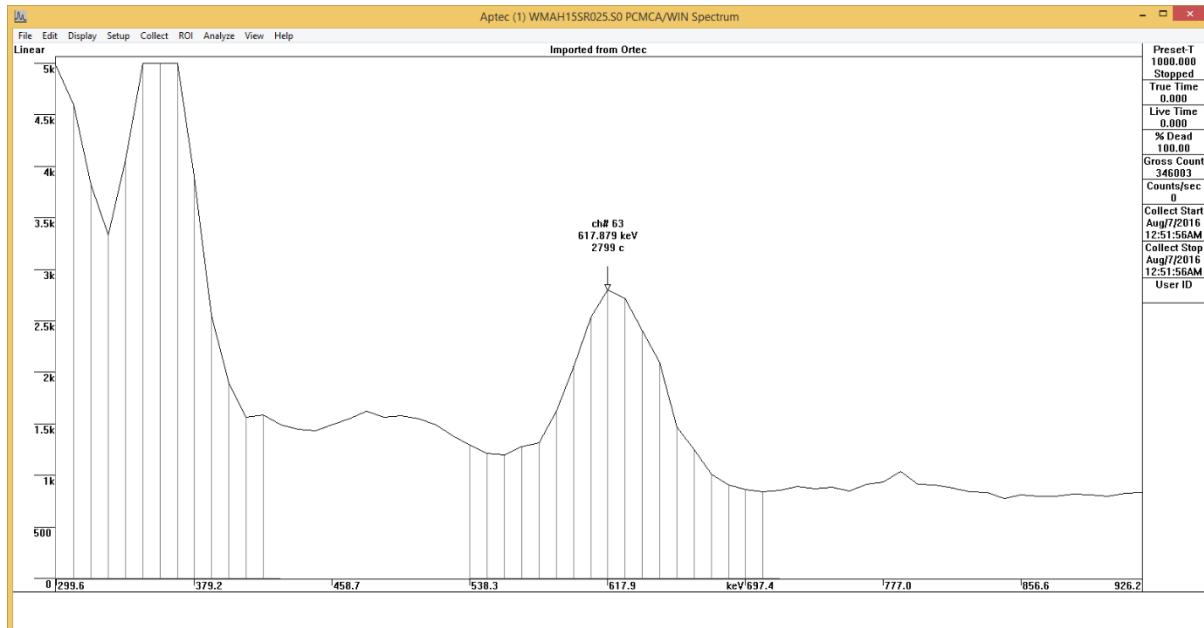
### 5.3.5. KORELACIJA AKTIVNOSTI IZMEĐU BIZMUTOVIH (Bi-214) LINIJA

Važno je napomenuti i ovu korelaciju zbog sledećih činjenica: naime, ako se posmatraju scatter grafici zavisnosti bizmutovih linija energije 609 keV i 1764 keV od Pb-214, bez obzira da pripadaju istom radioaktivnom nizu dosta se razlikuju. Zavisnost linije energije 1764 keV se "lepše" pokorava linearnej, dok tačke na grafiku sa energijom 609 keV su više rasute. Ova pojava je još uočljivija ako se uradi grafik zavisnosti linije energije 1764 keV od energije 609 keV, koji pripadaju istom elementu Bi-214. Za očekivati je da zavisnost bude slična zavisnosti linijama energije 295 keV i 352 keV kod Pb-214, međutim to nije slučaj. Grafik zavisnosti bizmutovih linija dat je na slici 5.16.

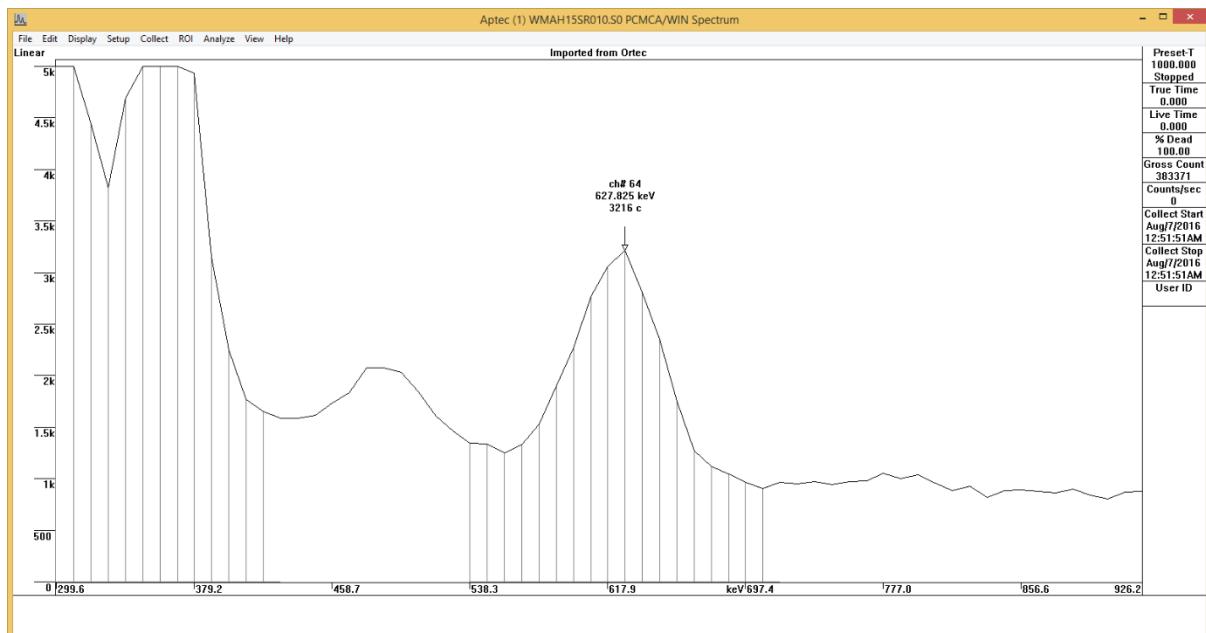


Slika 5.16. Grafik zavisnosti između linija Bi-214 609 keV i Bi-214 1764 keV

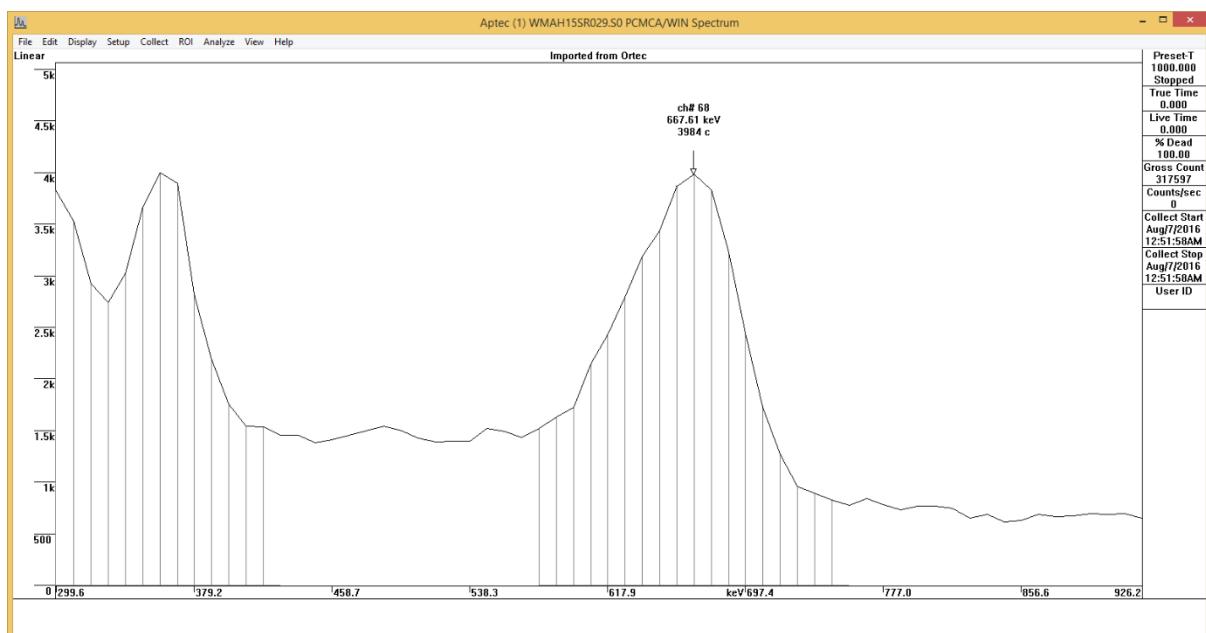
Objašnjenje ove pojave ćemo tražiti u snimljenim spektrima. Naime, u nekim spektrima maksimum pika od 609 keV je manje-više pomeren ka većim energijama, što se lepo vidi i na slikama 5.16.-5.18.



Slika 5.16. Maksimum pika je na 617 keV



Slika 5.17. Maksimum pika je pomeren na 627 keV



Slika 5.18. Maksimum pika je pomeren na 667 keV, što je praktično linija Cs-137 energije 661 keV

Opšte je poznata činjenica da je u nadzemnim nuklearnim probama koje su vršene pedesetih i početkom šezdesetih godina prošlog veka, velika količina Cs-137 dospela u životnu sredinu. Ovaj radionuklid je u velikom iznosu emitovan u atmosferu prilikom havarije nuklearne elektrane u Černobilu. S obzirom da je aktivnost Cs-137 30.17 godina, jasno je da se još uvek može naći u životnoj sredini. S obzirom da mahovine sakupljaju i zadržavaju sve elemente koji do njih stignu, postoji velika verovatnoća da se i Cs-137 zadržao u nekim uzorcima mahovina.

Nal spektrometar nema dovoljnu energetsku rezoluciju da razdvoji gama linije od 609 keV i 661 keV (kolika je energija gama zračenja kojega emituje Cs-137). To znači da će doprinos obe gama energije biti sadržan u jednom piku. Razdvajanje komponenti ova dva pika u spektrima je u ovom slučaju kompleksno i biće u ovom radu izostavljeno. U tom slučaju ćemo se zadržati samo na nekim deskriptivnim konstatacijama. Što je linija u opsegu bliskom 609 keV više pomerena ka desno to je veća koncentracija radioaktivnog Cs-137 u mahovinama, koji ima gama-liniju energije 661 keV. Može se doneti zaključak da je uzrok narušenosti linearne zavisnosti aktivnosti kod bizmutove linije energije 609 keV upravo prisustvo radioaktivnog izotopa Cs-137.

### 5.3.6. OPŠTA STATISTIKA O OBRADI PODATAKA

U tabeli 5.3. su pokazane maksimalne i minimalne vrednosti pojedinih linija, kao i njihova srednja vrednost:

Aktivnost A[Bq/kg]	Th-232 239keV	Pb-214 295keV	Pb-214 352keV	Bi-214 609keV	K-40 1460keV	Bi-214 1764keV
max	52.308	322.048	234.647	295.6668	589.38	295.5925
min	9.0405	16.677	20.804	20.6712	164.54	26.915
Srednja vrednost	24.55053	98.58227	78.34309	101.3655	345.1298	107.6028

Tabela 5.3. Maksimalne, minimalne i srednje vrednosti aktivnosti pojedinih radionuklida

Iz tabele se jasno vidi koji elementi pripadaju istom nizu, a koji ne. Naime aktivnosti Pb-214 i Bi-214 su veoma bliske, jer oni pripadaju istom radioaktivnom nizu U-238. Kod ovih elemenata je postignuta i radioaktivna ravnoteža. Najmanju aktivnost ima Pb-212 iz niza Th-232, dok najveću K-40. Ovo se može objasniti prostom činjenicom da ja kalijum životno važan element i biljke ga usvajaju i koriste u životno značajnim procesima. Ne postoji evidencija da je za funkcionisanje biljnih tkiva neophodan uranijum. Njegovo prisustvo u mahovinama potiče od pasivnog zahvata minerala koji putem prašine dospeju do mahovina i tamo budu zadržani. Takođe je poznato da su u zemljištima u našem podneblju merene koncentracije aktivnosti U-238 uvek nešto više od merenih koncentracija aktivnosti Th-232. Sličan se trend može uočiti i merenim uzorcima mahovina, koje uglavnom pasivno zadržavaju teške elemente tipa uranijuma, torijuma i njihovih potomaka.

Da bi se dobila kvantitativna mera kvaliteta korelacije između dva radionuklida, izračunati su odnosi dobijenih vrednosti aktivnosti. U slučaju savršene linearne korelacije merenih aktivnosti neka dva radionuklida dobili bismo za sve uzorce jednu istu vrednost tog odnosa. Ukoliko bismo grafički prikazali histogram tih vrednosti, dobili bismo delta funkciju (u idealnom slučaju za beskonačan broj

uzoraka). Dakle, srednja vrednost odnosa iz svih merenja bi bio jedan broj bez ikakve standardne devijacije koja bi ukazivala na rastur dobijenih odnosa. U slučajevima gde postoji mali rastur oko centralnog linearног trenda, vrednosti odnosa ne bi bili jednaki za sve uzorce već bi bili rasuti u nekom intervalu brojnih vrednosti koje možemo karakterisati nekom standardnom devijacijom. Možemo očekivati da je standardna devijacija utoliko veća sto je rastur eksperimentalnih podataka veći. Ovo bi mogao da bude način da se kvantitativno izrazi odudranje od savršene linearne korelacije koju smo do sada samo rečima opisivali na osnovu vizuelno konstatovanog rastura eksperimentalnih tačaka.

Sledeći korak u analizi dobijenih podataka je bio da se za odabране kombinacije dobijenih vrednosti aktivnosti odrede odnosi kao i njihova srednja vrednost. Iz proste deskriptivne statistike koja sadrži srednju vrednost odnosa, minimalnu i maksimalnu vrednost kao i standardnu devijaciju raspodele dobijenih vrednosti može orientaciono zaključiti do koje su mere posmatrane aktivnosti u dobroj korelaciji. U Tabeli 5.4 date su srednje vrednosti dobijenih odnosa, njihovih minimalnih i maksimalnih vrednosti kao i standardne devijacije dobijenih odnosa za nekoliko odabranih gama linija.

Odnosi aktivnosti	Maksimalna vrednost	Minimalna vrednost	Srednja vrednost	Standardna devijacija	Relativna standardna devijacija
239keV i 295keV	6.9206	1.3218	3.7633	1.2213	0.3231
239keV i 352keV	5.0424	1.4782	3.0567	0.8003	0.2607
239keV i 609keV	9.5283	1.4840	4.0478	1.2876	0.3181
239keV i 1460keV	33.7357	4.3617	15.4246	4.5991	0.2982
239keV i 1764keV	6.8581	2.2315	4.2054	1.0880	0.2587
295keV i 352keV	1.2475	0.7286	0.8356	0.0973	0.1164
295keV i 609keV	3.5920	0.6451	1.1356	0.4068	0.3582
295keV i 1460keV	18.2879	0.8421	4.8704	3.0531	0.6269
295keV i 1764keV	1.8076	0.7702	1.1565	0.1817	0.1571
352keV i 609keV	4.3624	0.8637	1.3488	0.4098	0.3038
352keV i 1460keV	14.6600	1.1359	5.5568	2.6411	0.4753
352keV i 1764keV	1.6606	0.9053	1.3837	0.1394	0.1008
609keV i 1460keV	14.7542	0.9638	4.2473	2.0664	0.4865
609keV 1764keV	1.8475	0.3397	1.0793	0.2273	0.2106
1460keV i 1764keV	1.2956	0.0882	0.3057	0.1525	0.4990

Tabela 5.4. Maksimalne, minimalne, srednje vrednosti i standardne devijacije dobijenih odnosa za linije iz spektra

Kao što se i moglo očekivati, odnosi između aktivnosti dobijeni iz dve gama linije Pb-214 od 295 keV i 352 keV imaju ubedljivo najmanju standardnu devijaciju. Iz grafika 5.2 se moglo uočiti da su dobijene vrednosti aktivnosti upotreboom ove dve linije jako dobro korelirane i da u ovom slučaju tačke veoma malo odstupaju od linearog trenda i imaju ubedljivo najmanji rastur. Sličan se zaključak može izvesti i za slučaj kada se porede aktivnosti dobijene iz dve linije Pb-214 i gama linije od 1764 keV koja pripada Bi-214. Ovde se i na slikama 5.4 i 5.6 može uočiti veoma dobra korelacija.

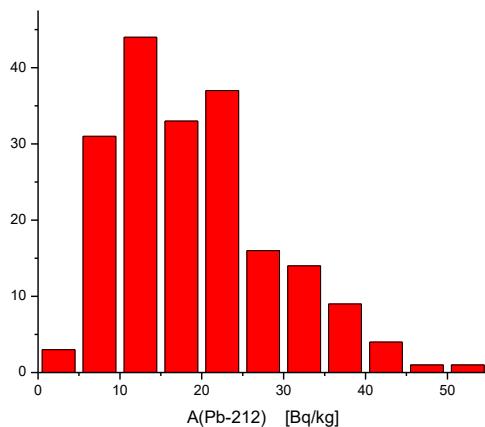
Nešto lošija korelacija sa malo većom vrednošću standardne devijacije se može očekivati kada se prate odnosi aktivnosti dobijeni pomoću dva radionuklida iz različitih nizova. Može se videti da je standardna devijacija oko srednje vrednosti odnosa dobijenog iz aktivnosti izračunatih poređenjem gama linije od 239 keV i ostalih gama linija koje pripadaju nizu U-238 nešto veće nego standardne devijacije linija iz uranovog niza.

Ono što se u ovako posmatranoj statistici ne uklapa je bitno veća standardna devijacija za odnose aktivnosti koji se dobijaju kada se upotrebi bilo koja linija iz niza U-238 i gama linija od 609 keV. Iz tabele 5.4 se može videti da se u ovim slučajevima dobija znatno veći rastur dobijenih vrednosti odnosa nego za slučaj kada poredimo samo dve linije Pb-214. Ova razlika se jedino može objasniti prisustvom Cs-137 čije se gama zračenje veoma teško može razdovjiti merenjem Nal detektorom.

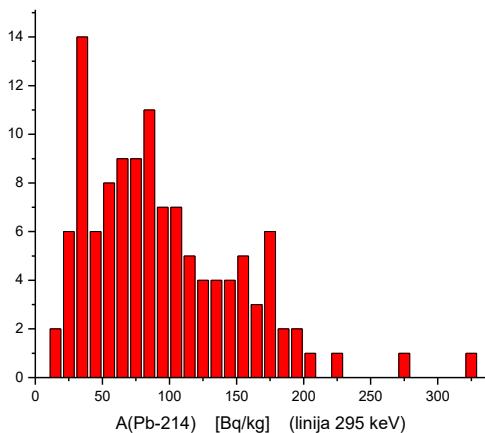
I konačno, iz tabele 5.4 se može videti da je najveća standardna devijacija, tj. najveći rastur eksperimentalnih podataka zabeležen kada se posmatraju korelacije merenih aktivnosti K-40 i ostalih radionuklida. Dobra korelacija između radionuklida iz uranovog i torijumovog niza ukazuje na sličnu geološku prošlost ova dva radionuklida u mineralima od kojih je zemljište nastalo erozijom. Kalijum ne mora nužno da bude u istim mineralnim strukturama kao i uranijum i torijum, tako da se može očekivati da u zemljištu ova dva elementa nisu tako dobro korelirana. Ta se lošija korelacija uočava i u mahovinama koje prihvataju zrnca prašine, rastvaraju ih i ugrađuju u svoju strukturu.

Takođe je veoma zanimljivo pogledati i kako su raspoređene vrednosti aktivnosti pojedinih radionuklida dobijeni na osnovu veličine pojedinih gama linija.

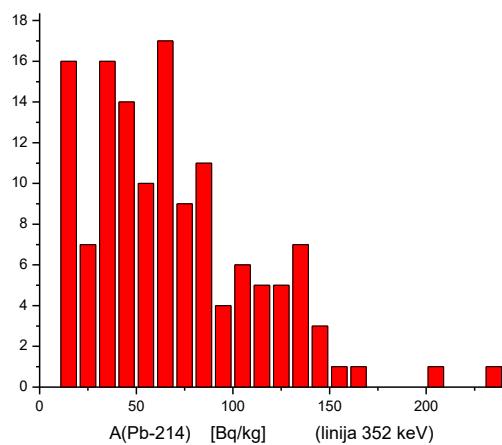
Na slikama 5.19. – 5.24. su prikazani histogrami broja aktivnosti po određenim intervalima:



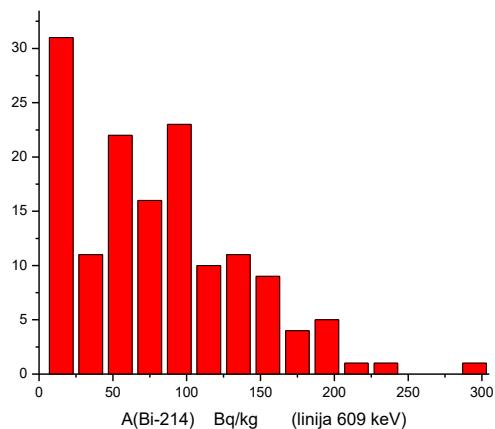
Slika 5.19. Histogram broja aktivnosti Pb-212 po određenim intervalima



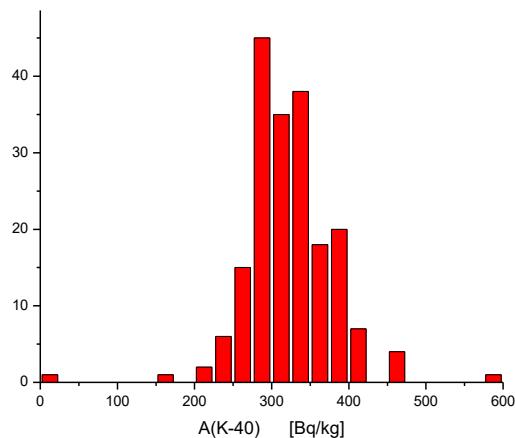
Slika 5.20. Histogram broja aktivnosti Pb-214 (linija 295 keV) po određenim intervalima



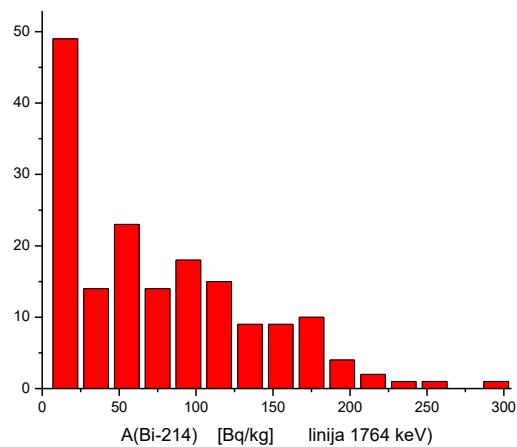
Slika 5.21. Histogram broja aktivnosti Pb-214 (linija 352 keV) po određenim intervalima



Slika 5.22. Histogram broja aktivnosti Bi-214 (linija 609 keV) po određenim intervalima



Slika 5.23. Histogram broja aktivnosti K-40 po određenim intervalima



Slika 5.24. Histogram broja aktivnosti Bi-214 (linija 1764 keV) po određenim intervalima

Na osnovu histograma može se doneti zaključak da raspodela po aktivnostima K-40 ima izrazitu normalnu raspodelu, a radionuklidi U-238 niza, Pb-214 i Bi-214 lognormalnu raspodelu aktivnosti. Dobijene vrednosti aktivnosti Th-232 ima distribuciju između normalne i log-normalne. Između ove dve distribucije je suštinski značajna razlika. Normalna distribucija se obično dobija u statističkom rasturu neke fizičke veličine pod uslovom da se ta veličina dobija pod dejstvom sume veliko broja parametara od kojih svaki ima svoju statističku neodređenost. Ukoliko se vrednost neke fizičke veličine dobija iz proizvoda većeg broja nasumično rasturenih parametara, kao rezultat će se pojaviti log-normalna raspodela. Na verovatnoću nalaženja uranijuma u nekom zemljишtu utiče veliki broj faktora uglavnom geološke prirode koji još uključuju i efekte erozije. Ti će faktori u konačnom ishodu prilikom merenja velikog broja uzoraka zemljишta dati log-normalnu distribuciju. Takva se distribucija uočava i u uzorcima mahovina pošto oni uranijum pasivno prihvataju i zadržavaju u svojim tkivima. No kalijum je životno važan element i njegovo usvajanje od strane mahovina ide po potpuno drugim mehanizmima. Vidimo da je distribucija merenih vrednosti K-40 veoma pravilna normalna raspodela. Distribucija merenih vrednosti torijuma je nešto između normalne i log-normalne. To bi moglo biti posledica log-normalne verovatnoće nalaženja torijuma u uzorcima zemljишta ali i izraženog afiniteta mahovina za usvajanje ovog elementa. Postoje primeri da alge kao i morski plankton iskazuje afinitet za usvajanjem torijuma, tako da nije isključeno da i mahovine poseduju slična svojstva.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je izvršena analiza 197 gama spektara dobijenih merenjem uzorka mahovina u Nal detektoru oblika jame. Postoji velika potreba za brzim merenjima koja se mogu izvesti na ovom detektoru sa zadovoljavajućom statistikom pošto je i efikasnost detekcije kod ovog spektroskopskog sistema višestruko veća od efikasnosti standardnih Nal detektora. No u spektroskopiji Nal detektorima postoji i jedan mali problem. Naime energetska rezolucija ovog detektora ne dozvoljava razdvajanje gama linija bliskih energija. Jedan od najvažnijih zadataka ovog rada je da se proveri na velikom broju uzorka koliko se kvalitetno mogu odrediti aktivnosti nekih radionuklida putem dekonvolucije intenziteta gama linija dobijenih iz kompleksnih delova spektra koji su nastali preklapanjem vuše gama linija. Spektri su analizirani pomoću softvera za obradu spektara Aptek koji je relativno jednostavan. Jedan od načina provere koliko se validne vrednosti mogu dobiti analizom Nal spektara je i praćenjem međusobnih korelacija dobijenih vrednosti aktivnosti raznih radionuklida koje se dobijaju iz odabranih gama linija. Najbolji test kvaliteta procedure obrade spektara se može dobiti ako se upotrebe dve gama linije istog radionuklida Pb-214 koje se nalaze u spektralnoj strukturi jednog tripleta. Dobijene vrednosti su veoma ohrabrujuće pošto je dobijena veoma dobra korelacija između aktivnosti sračunatih upotrebotom gama linija Pb-214 od 295 keV i 352 keV.

videntno je da se i upotrebom jednostavnog softvera kao što je Aptek mogu na adekvatan način razdvojiti gama linije u spektru koje se usled slabe energetske rezolucije očigledno preklapaju.

Na osnovu dobijenih vrednosti aktivnosti radionuklida iz nizova U-238 i Th-232 su posmatrane korelacije između izračunatih aktivnosti nekolicine radionuklida koji pripadaju ovim nizovima. U svim slučajevima je dobijena očigledna linearna zavisnost aktivnosti posmatranih radionuklida iz dva prirodna niza. S obzirom da je jedini način da uranijum i torijum dospeju do mahovina suva depozicija prašine, jasno je da će i koncentracije radionuklida iz ova dva niza u mahovinama zavisiti od strukture zemljišta. Evidentno je da se uranijum i torijum nalaze u nekom konstantnom odnosu u zemljištima što se preslikava i na mahovine. Ovde je primećena još jedna zanimljiva tendencija. Naime ekstrapolacijom je uočeno da se može očekivati neka mala aktivnost torijuma u mahovinama čak i kada u njima nema uranijuma. Ovakva pojava je primećena i marinskim algama i planktonima i ukazuje da ovi primitivni organizmi iz nekog razloga imaju afinitet prema torijumu i zadržavaju ga u tkivima.

Dobijene korelacije su pokazale da je aktivnost izračunata iz gama linije od 609 keV koja pripada Bi-214 najviše odstupaju od neke linearne zavisnosti koja se pokazuje kao pravilo kada se porede aktivnosti raznih radionuklida. Ovaj pojačan rastur eksperimentalno dobijenih vrednosti se jedino može pripisati uticaju Cs-137. Energija koju emituje ovaj radionuklid je 661 keV i prostim softverom za obradu spektara kao što je Aptek veoma je teško iz jednog gama pika razdvojiti doprinos gama zračenja ova dva izotopa. Evidentno je da se u mahovinama još uvek nalazi Cs-137 koji je raspršen u velikoj količini u nadzemnim probama nuklearnog oružja još pedesetih i šezdesetih godina prošlog veka, kao i prilikom havarije na nuklearnoj centrali u Černobilu.

Slična je tendencija primećena i sa K-40 i ostalim radionuklidima. Posmatranjem korelacija između merenih vrednosti aktivnosti K-40 i ostalih radionuklida uočeno je da se K-40 nalazi u mahovinama čak i kada u njima nema ni uranijuma ni torijuma. Nešto ovako se moglo očekivati pošto je kalijum životno važan element koji učestvuje u vitalnim životnim procesima biljke.

Kada su ustanovljene frekvencije pojavljivanja određenih vrednosti aktivnosti radionuklida u mahovinama ustanovljeno je da su radionuklidi uz uranovog niza raspoređeni po log – normalnoj distribuciji karakterističnoj za geološko ponašanje velikog broja elemenata. No merene vrednosti K-40 su raspoređene po standardnoj normalnoj distribuciji. Zanimljivo je primetiti da su merene aktivnosti torijuma distribuirane po raspodeli koja se nalazi između normalne i log – normalne. Očigledno je da se životno važan kalijum u uzorcima biljaka nalazi u veoma dobro definisanoj normalnoj raspodeli, dok je torijum raspoređen nešto između uranijuma koji se pasivno zahvata bez ikakve fiziološke uloge i kalijuma koji neophodan za život.



WM133	5960	0.0045	26.82	6408	0.017	108.936	12279	0.007	85.953	6965	0.0132	91.938	4784	0.076	363.584	7146	0.0175	125.055
WM136	4620	0.0045	20.79	5818	0.017	98.906	11070	0.007	77.49	9227	0.0132	121.7964	4422	0.076	336.072	6307	0.0175	110.3725
WM137	4923	0.0045	22.1535	4040	0.017	68.68	8150	0.007	57.05	7100	0.0132	93.72	4681	0.076	355.756	4032	0.0175	70.56
WM138	5104	0.0045	22.968	2898	0.017	49.266	6019	0.007	42.133	4336	0.0132	57.2352	5177	0.076	393.452	3702	0.0175	64.785
WM140	5504	0.0045	24.768	6857	0.017	116.569	12796	0.007	89.572	6903	0.0132	91.1196	5018	0.076	381.368	7371	0.0175	128.9925
WM141	5782	0.0045	26.019	5150	0.017	87.55	9972	0.007	69.804	6283	0.0132	82.9356	4301	0.076	326.876	4822	0.0175	84.385
WM142	6202	0.0045	27.909	6644	0.017	112.948	12790	0.007	89.53	9195	0.0132	121.374	3247	0.076	246.772	6976	0.0175	122.08
WM143	4870	0.0045	21.915	3061	0.017	52.037	5804	0.007	40.628	4021	0.0132	53.0772	4398	0.076	334.248	3683	0.0175	64.4525
WM145	5375	0.0045	24.1875	3739	0.017	63.563	7736	0.007	54.152	4602	0.0132	60.7464	2952	0.076	224.352	5024	0.0175	87.92
WM146	6592	0.0045	29.664	9079	0.017	154.343	16579	0.007	116.053	11290	0.0132	149.028	5004	0.076	380.304	9083	0.0175	158.9525
WM147	7005	0.0045	31.5225	7955	0.017	135.235	14661	0.007	102.627	11334	0.0132	149.6088	4685	0.076	356.06	8156	0.0175	142.73
WM149	5836	0.0045	26.262	5496	0.017	93.432	10701	0.007	74.907	6474	0.0132	85.4568	4558	0.076	346.408	6270	0.0175	109.725
WM150	6878	0.0045	30.951	8420	0.017	143.14	15732	0.007	110.124	9897	0.0132	130.6404	5515	0.076	419.14	9001	0.0175	157.5175
WM151	8982	0.0045	40.419	10188	0.017	173.196	19321	0.007	135.247	10953	0.0132	144.5796	5082	0.076	386.232	10930	0.0175	191.275
WM154	5755	0.0045	25.8975	9905	0.017	168.385	17831	0.007	124.817	11532	0.0132	152.2224	5218	0.076	396.568	10149	0.0175	177.6075
WM155	6707	0.0045	30.1815	9650	0.017	164.05	18035	0.007	126.245	10206	0.0132	134.7192	5241	0.076	398.316	9786	0.0175	171.255
WM156	8383	0.0045	37.7235	12089	0.017	205.513	22472	0.007	157.304	15272	0.0132	201.5904	6063	0.076	460.788	13000	0.0175	227.5
WM159	6893	0.0045	31.0185	8804	0.017	149.668	16612	0.007	116.284	10085	0.0132	133.122	5013	0.076	380.988	10167	0.0175	177.9225
WM160	7924	0.0045	35.658	6661	0.017	113.237	12761	0.007	89.327	6739	0.0132	88.9548	4825	0.076	366.7	7395	0.0175	129.4125
WM162	5787	0.0045	26.0415	4825	0.017	82.025	8893	0.007	62.251	5912	0.0132	78.0384	3744	0.076	284.544	5210	0.0175	91.175
WM167	4864	0.0045	21.888	2067	0.017	35.139	4664	0.007	32.648	3026	0.0132	39.9432	4307	0.076	327.332	2791	0.0175	48.8425
WM168	4898	0.0045	22.041	2879	0.017	48.943	6297	0.007	44.079	3938	0.0132	51.9186	3921	0.076	297.996	3448	0.0175	60.34
WM169	6861	0.0045	30.8745	3300	0.017	56.1	7086	0.007	49.602	3471	0.0132	45.8172	4898	0.076	372.248	3974	0.0175	69.545
WM171	4961	0.0045	22.3245	3786	0.017	64.362	7860	0.007	55.02	4844	0.0132	63.9408	4296	0.076	326.496	4323	0.0175	75.6525
WM172	3992	0.0045	17.964	3815	0.017	64.855	7741	0.007	54.187	5417	0.0132	71.5044	4302	0.076	326.952	4526	0.0175	79.205
WM174	4428	0.0045	19.926	4388	0.017	74.596	8429	0.007	59.003	4715	0.0132	62.238	4070	0.076	309.32	3500	0.0175	61.25
WM176	5067	0.0045	22.8015	6088	0.017	103.496	12001	0.007	84.007	6921	0.0132	91.3572	4381	0.076	332.956	6518	0.0175	114.065
WM177	5357	0.0045	24.1065	4690	0.017	79.73	9331	0.007	65.317	6764	0.0132	89.2848	4522	0.076	343.672	5302	0.0175	92.785
WM186	2655	0.0045	11.9475	1783	0.017	30.311	4414	0.007	30.898	2104	0.0132	27.7728	3879	0.076	294.804	2932	0.0175	51.31
WM189	7187	0.0045	32.3415	8311	0.017	141.287	15075	0.007	105.525	6905	0.0132	91.146	4993	0.076	379.468	8598	0.0175	150.465
WM190	2215	0.0045	9.9675	1212	0.017	20.604	3197	0.007	22.379	2739	0.0132	36.1548	3827	0.076	290.852	1717	0.0175	30.0475
WM191	2867	0.0045	12.9015	1728	0.017	29.376	4498	0.007	31.486	2884	0.0132	38.0688	3601	0.076	273.676	1890	0.0175	33.075
WM193	5088	0.0045	22.896	5467	0.017	92.939	10744	0.007	75.208	6857	0.0132	90.5124	4366	0.076	331.816	5504	0.0175	96.32
WM194	4795	0.0045	21.5775	5219	0.017	88.723	9991	0.007	69.937	6857	0.0132	90.5124	4579	0.076	348.004	5640	0.0175	98.7
WM196	5575	0.0045	25.0875	5290	0.017	89.93	9650	0.007	67.55	6066	0.0132	80.0712	4671	0.076	354.996	5795	0.0175	101.4125

## 8. LITERATURA

- [1] M. Krmar , D. Radnović and M. V. Frontasyeva, *Moss Biomonitoring Technique Used to Study the Spatial and Temporal Atmospheric Deposition of Heavy Metals and Airborne Radionuclides*, In D.T. Mihailovic Ed., Essays of Fundamental and Applied Environmental Topics, Nova Publishers Inc., pp. 159-192, ISBN: 978-1-61942-522-4. (2012)
- [2] Jan Hansman, *Projektovanje izgradnje i testiranje 9"x9" NaI(Tl) spektrometra oblika jame*, doktorska disertacija, Departman za fiziku, Novi Sad (2015)
- [3] Agota Kosoruš, *KOINCIDENTNO SUMIRANJE  $\gamma$ -FOTONA U NaI(Tl) DETEKTORU OBLIKA JAME*, diplomski rad, Departman za fiziku, Novi Sad (2014)
- [4] Krmar, Miodrag, *Uvod u Nuklearnu Fiziku*, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-Matematicki Fakultet, Departman za Fiziku, Novi Sad (2013)
- [5] Maria Aladić, *Optimizacija geometrije voluminoznih uzoraka u gama-spektroskopiji NaI detektorom oblika jame*, diplomski rad, Departman za fiziku, Novi Sad (2015)
- [6] M. Krmar, D. Radnović, M. Mesaroš, J. Hansman, Ž. Medić, *SPATIAL DISTRIBUTION OF SOME RADIONUCLIDES MEASURED IN MOSSES COLLECTED OVER LARGE AREA*, ICP VEGETATION, 29<sup>th</sup> Task Force Meeting, February 29 – March 4, 2016, Dubna, Russia
- [7] *Praktikum za eksperimentalne vežbe iz nuklearne fizike, Skripta, Departman za fiziku, PMF, Novi Sad*

## 9. BIOGRAFIJA

Peter Farago je rođen 29. maja 1980 godine u Vrbasu. Osnovnu školu je pohađao u Feketiću. Gimnaziju opšteg smera je završio u Bačkoj Topoli. Po završetku srednje škole upisao je studije fizike na Departmanu za fiziku Prirodno-Matematičkog fakulteta u Novom Sadu.

UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:*

Monografska dokumentacija

**TD**

*Tip zapisa:*

Tekstualni štampani materijal

**TZ**

*Vrsta rada:*

Diplomski rad

**VR**

*Autor:*

Peter Farago

**AU**

*Mentor:*

Prof. dr Miodrag Krmar

**MN**

*Naslov rada:*

Merenje korelacije aktivnosti prirodnih radionuklida u biomonitorima

**NR**

*Jezik publikacije:*

srpski (latinica)

**JP**

*Jezik izvoda:*

srpski/engleski

**JI**

*Zemlja publikovanja:*

Srbija

**ZP**

*Uže geografsko područje:*

Vojvodina

**UGP**

*Godina:*

2016

**GO**

*Izdavač:*

Autorski reprint

**IZ**

*Mesto i adresa:* Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**MA**

*Fizički opis rada:*

**FO**

*Naučna oblast:* Fizika

**NO**

*Naučna disciplina:* Nuklearna fizika

*ND*

*Predmetna odrednica/ ključne reči:* gama spektroskopija, NaI(Tl) detektor oblika jame, biomonitori, aktivnost

**PO**

**UDK**

*Čuva se:* Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

**ČU**

*Važna napomena:* nema

**VN**

*Izvod:*

U ovom diplomskom radu je izvršena analiza 197 gama spektara dobijenih merenjem uzoraka mahovina u NaI detektoru oblika jame. Analiza je urađena za 6 gama linija. Rezultati dobijeni obradom spektara su upoređeni i prikazani grafički i tabelarno. Cilj ovog rada je bio da se praćenjem korelacije izmerenih aktivnosti prirodnih radionuklida u velikom broju uzoraka biomonitora ispitaju mogućnosti NaI detektora oblika jame. Dodatni cilj ovoga rada je bio i da se na osnovu dobijenih korelacija izvedu neki zaključci o svojstvima mahovima kao medijuma za ispitivanje ponašanja i prostorne distribucije prirodnih radionuklida na jednoj velkoj površini.

*Datum prihvatanja teme od NN veća:*

**DP**

*Datum odbrane:*

**DO**

*Članovi komisije:*

**KO**

*Predsednik:* Prof. dr. Srđan Rakić

*član:* Dr Jan Hansman

*član:* Prof dr. Miodrag Krmar

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:* Monograph publication

**DT**

*Type of record:* Textual printed material

**TR**

*Content code:* Final paper

**CC**

*Author:* Peter Farago

**AU**

*Mentor/comentor:*

**MN**

*Title:* Correlations of activities of natural radionuclides measured in biomonitor

**TI**

*Language of text:* Serbian (Latin)

**LT**

*Language of abstract:* English

**LA**

*Country of publication:* Serbia

**CP**

*Locality of publication:* Vojvodina

**LP**

*Publication year:* 2016

**PY**

*Publisher:* Author's reprint

**PU**

*Publication place:*

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**PP**

Physical description:

PD

*Scientific field:*

Physics

**SF**

*Scientific discipline:*

Nuclear physics

**SD**

*Subject/Key words:*

Gamma spectroscopy, well type NaI(Tl) detector, biomonitor, activity

**SKW****UC**

*Holding data:*

Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

**HD**

*Note:*

none

**N**

*Abstract:*

**AB**

The analysis of 197 gamma spectra of natural mosses, obtained using well type NaI detector was performed in this graduate thesis. Six gamma lines were analyzed and obtained results are compared and presented in the form of tables and graphs. The objective of this project was to check possibilities of well type NaI detector by following of correlation of measured activities of natural radionuclides. Additional goal of this project was to extract some conclusions concerning properties of mosses as medium for study of spatial distributions natural radionuclides over some large area on the base of obtained correlations.

*Accepted by the Scientific Board:*

**ASB**

*Defended on:*

**DE**

*Thesis defend board:*

**DB**

*President:*

Prof. dr. Srđan Rakić

*Member:*

Dr. Jan Hansman

*Member:*

Prof dr. Miodrag Krmar