



Univerzitet u Novom Sadu,
Prirodno-Matematički fakultet,
Departman za Fiziku



Ispitivanje sadržaja radioizotopa u uzorcima cirkonila i procena rizika

Master rad

Autor:

Molnar Robert

Mentor:

Prof. dr. Nataša Todorović

Novi Sad, 31. oktobar 2017

Ovom prilikom želim da se zahvalim svom mentoru prof. dr. Nataši Todorović na predloženoj temi, odvojenom vremenu i što je omogućila izradu ovog rada u kratkom vremenskom intervalu. Takođe se zahvaljujem svim ostalim profesorima i asistentima departmana za fiziku za usvojeno znanje. Kolegama sa godine se zahvaljujem na saradnji i na lepo provedenim studentskim danima. Veliku zahvalnost dugujem i svojoj porodici i prijateljima koji su me podržali tokom studiranja.

Sadržaj

1. Uvod	4
2. NORM materijali.....	4
2.1. Građevinski materijali.....	5
2.2. Mineralni pesak	6
2.3. Cirkon	7
3. Radioaktivni raspad	7
3.1. α zračenje	8
3.2. γ zračenje.....	9
4. Detekcija zračenja	9
4.1. Fotoefekat	9
4.2. Komptonovo rasejanje	11
4.3. Efekat stvaranja parova.....	11
5. Spektri gama zraka	12
5.1. Oblik spektralnog fona	12
5.2. Oblik vrha pune energije	13
6. Izvori i komponenti fona	14
6.1. Radioaktivno okruženje.....	15
7. Gama spektrometrija niskih aktivnosti.....	16
7.1. Geometrija izvor-detektor.....	17
7.2. Optimalizacija vremena merenja	18
7.3. Smanjivanje fona u gama spektrometriji	18
8. Poluprovodnički detektori.....	19
8.1. Germanijumski detektori.....	20
9. Granica statističkih odlučivanja u gama spektrometriji	21
9.1. Kritična granica.....	22
9.2. Gornja granica	23
9.3. Granice poverenja	23
9.4. Granica detekcije.....	23
9.5. Minimalna detektibilna aktivnost – MDA.....	23
10. Principi za zaštitu od radijacije	24
10.1. Dozvoljena efektivna doza za radnike	24
11. Eksperimentalni deo.....	25
11.1. Mehanička postavka.....	25

11.2.	Spoljašnji hazardni indeks	25
11.3.	Ekvivalentna aktivnost radijuma	25
11.4.	Doza usled spoljašnjeg izlaganja.....	26
11.5.	Doza usled unutrašnjeg izlaganja	26
11.6.	Efektivna doza	27
12.	Spektroskopski podaci.....	27
13.	Rezultati merenja	30
13.1.	H_{ex} i Ra_{eq} vrednosti.....	32
13.2.	Godišnja efektivna doza	35
14.	Zaključak.....	36
15.	Biografija.....	37
16.	Bibliografija.....	38

1. Uvod

Ispitivanje radioaktivnosti materijala koji se koriste u industriji je od velikog značaja, zbog zaštite zdravlja ljudi (kako onih koji rade sa tim materijalima, tako i zdravlja potrošača). Dozvoljena koncentracija radionuklida u uzorcima je zakonski regulisana.

U ovom radu su prikazani rezultati gamaspektrometrijskih analiza radionuklida ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K u uzorcima cirkonila, koji se koristi u keramičkoj industriji. Analizom tih rezultata, s obzirom da je cirkonil prašak, procenićemo rizike za radnike, koji svakodnevno rukuju sa tim materijalom u fabrikama.

2. NORM materijali

Materijali koji se javljaju u prirodi i koji sadrže povećane koncentracije aktivnosti radioizotopa nazivaju se "NORM" materijali (Naturally Occurring Radioactive Materials). Dugoživeći radioaktivni elementi kao što su ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K i neki od njihovih potomaka, kao što su ^{226}Ra i ^{222}Rn su primeri za NORM materijale (IAEA, 2007; EC, 1999).

Izlaganje prirodnom zračenju je odgovorno za većinu godišnje doze zračenja prosečne osobe i stoga se obično ne smatraju posebnim zdravstvenim ili sigurnosnim značajem. Međutim, određene industrije obrađuju značajne količine NORM-a, koje obično završavaju u svojim tokovima otpada, ili u slučaju rudarenja urana, kod brane za taloženje. Druge fabrike, kao što su keramička industrija, koriste materijale poput cirkonila, tako da su njihovi radnici izloženi zračenju. Tokom vremena, kao potencijalne rizike NORM-a, ove industrije sve više postaju predmet praćenja i regulacije.

Osim iskopavanja uranijuma, i sve industrije povezane sa gorivnim ciklusom poznate kao NORM uključuju:

- Industrija uglja (rudarstvo i sagorevanje)
- Naftna i gasna industrija (proizvodnja)
- Rudarstvo metala i topljenje
- Mineralni pesak (minerali retkog zemljišta, titanijum i cirkonijum).
- Industrija đubriva (fosfata)
- Građevinarstvo
- Reciklaža

2.1. Građevinski materijali

Građevinski materijali mogu sadržati povišene nivoe radionuklida, naročito ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K (EC, 1999). Pošto su ova tri radionuklida osnovni izvor radioaktivnosti, oni se koriste za određivanje indeksa koncentracije aktivnosti (ACI) usvojen širom Evrope. ^{40}K je najznačajniji u objavljenim Australijskim podacima, u rasponu do 4000 Bq/kg u prirodnom kamenu i 1600 Bq/kg u glinenim ciglama i betonu. Cigle takođe mogu sadržavati do 2200 Bq/kg ^{226}Ra .

Smernice koncentracije aktivnosti za upotrebu ostataka NORM-a u građevinskim materijalima razvijene su korišćenjem ACI pristupa i materijali su klasifikovani u tri kategorije, u zavisnosti od doze:

- doza ispod 0,5 mSv/god (neograničena upotreba),
- doza između 0,5 i 1 mSv/god (upotreba je ograničena na puteve, mostove, brane ili, uz razblaživanje, na niske stanove)
- doza iznad 1 mSv/god (zabranjena upotreba).

Ove nivoe možemo izraziti i preko ekvivalentne koncentracije aktivnosti:

- ispod 350 Bq/kg (i ispod 200 Bq/kg ^{226}Ra)
- 350 do 1350 Bq/kg (200-1000 Bq/kg ^{226}Ra)
- preko 1350 Bq/kg (1000 Bq/kg za ^{226}Ra)

Materijal	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Beton	1-250	1-190	5-1570
Cigla od gline	1-200	1-200	60-2000
Peščana cigla	6-50	10959	5-700
Prirodni kameni zidovi	1-500	1-310	1-4000
Prirodni gips	<1-70	<1-100	7-280
Cement	7-180	7-240	4-850
Keramičke pločice	30-200	20-200	160-1410

Tabela 2.1: Koncentracija aktivnosti NORM materijala u građevinskim materijalima (Bq/kg)

Granit, koji se široko koristi kao obloga na gradskim zgradama i u privatnim kućama, sadrži prosečno od 3 ppm (40 Bq/kg) ²³⁸U i 17 ppm (70 Bq/kg) ²³²Th. Merenja zračenja na granitnim površinama mogu pokazivati nivoe slične kao rude uranijuma iz rudnika. Tabela 9.2 prikazuje neke zabeležene koncentracije aktivnosti za građevinske materijale. Međutim, zabeležene su i neke ekstremne vrednosti koje su iznad ovih.

2.2. Mineralni pesak

Mineralni pesak sadrži cirkon, ilmenit i rutil, sa ksenotimom i monazitom. Rudnici ovih minerala postoje u mnogim zemljama, a proizvodnja iznosi milion tona godišnje cirkonijuma i titana. Ruda monazita - retkog zemljinog fosfata koji sadrži niz retkih zemljanih minerala (naročito cerijuma i lantana) i 5-12% (tipično oko 7%) torijuma, i ksenotima - itrijum fosfat sa tragovima urana i torijuma, pripada takođe NORM materijalima.

	Torijum		Uranijum	
	ppm	Bq/kg	ppm	Bq/kg
Teški minerali	80-800	600-6600	<10-70	<250-1700
Ilmenit	50-500	400-4100	<10-30	<250-750
Rutil	<50-350	<400-2900	<10-20	<250-500
Cirkon	150-300	1200-2500	150-300	3700-7400
Monazit	10,000-55,000	80,000-450,000	500-2500	12,000-60,000

Tabela 2.2: Radioaktivnost mineralnih soli i njihovi produkti

2.3. Cirkon

Sirov cirkon je jedan od NORM materijala. Preko 95% tržišta za cirkonijum zahteva ga u obliku cirkona (cirkonijev silikat). Ovaj mineral se javlja prirodno i iskopava se u rudnicima. Zahteva malo obrade. Koristi se uglavnom u livnicama, pri proizvodnji vatrostalnih materijala i u keramičkoj industriji. Cirkoni obično imaju aktivnosti do 10,000 Bq/kg ^{238}U i ^{232}Th . Obično se ne pokušava ukloniti radionuklid iz cirkona jer to nije ekonomično. Pošto se cirkon direktno koristi u proizvodnji vatrostalnih materijala i glazura, proizvodi će sadržati slične količine radioaktivnosti. Veće koncentracije mogu se naći u cirkonijumu (cirkonijum-oksidi), koji se proizvodi visokotemperatnom fuzijom cirkona za odvajanje silicijum dioksida. Proizvodnja metala od cirkonijuma uključuje proces hlorizacije za pretvaranje oksida u cirkonijum hlorid, koji se zatim smanjuje na metal.

Tokom rudarstva i mlevenja cirkona, potrebno je voditi računa da se nivo prašine smanji. Zatim, kada je cirkon spojen u vatrostalnim proizvodima ili u proizvodnji keramike, mora se sakupljati prašina i dim. Ovo može sadržati više isparljivih radionuklida, ^{210}Pb i ^{210}Po , a sakupljanje ovih gasova znači da cevi i filteri postaju kontaminirani. Glavno radiološko pitanje je profesionalno izlaganje ovim radionuklidima u prašini u postrojenju za preradu. Otpad proizveden tokom proizvodnje cirkona/cirkonila može sadržati značajnu količinu ^{226}Ra , što predstavlja opasnost od izlaganja gama zračenju, a otpad mora biti uskladišten u metalnim kontejnerima u posebnim skladištima. Pri gama-spektrometrijskom ispitivanju prašine iz filtera koji su korišćeni tokom proizvodnje cirkona dobijene su vrednosti do 200.000 Bq/kg ^{210}Pb i 600.000 Bq/kg ^{210}Po .

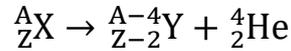
U Srbiju su uvoze produkti cirkonila najviše iz Italije i Španije.

3. Radioaktivni raspad

Radioaktivnost je spontani proces, u kojem atomsko jezgro emituje jednu ili više čestica ili gama fotona, elektromagnetne prirode. Sa emitovanjem čestice on se transformiše u drugo jezgro. Raspadom početnog jezgra (jezgro roditelja ili predak), nastaje novo jezgro, potomak, koji može da ima redni broj Z i maseni broj A različit od prvobitnog jezgra. Postoji tri vrste radioaktivnog raspada: alfa raspad, beta raspad, i gama raspad. Za ovaj rad su nam bitni alfa i gama raspad, zato su u nastavku opisani ovi oblici raspada.

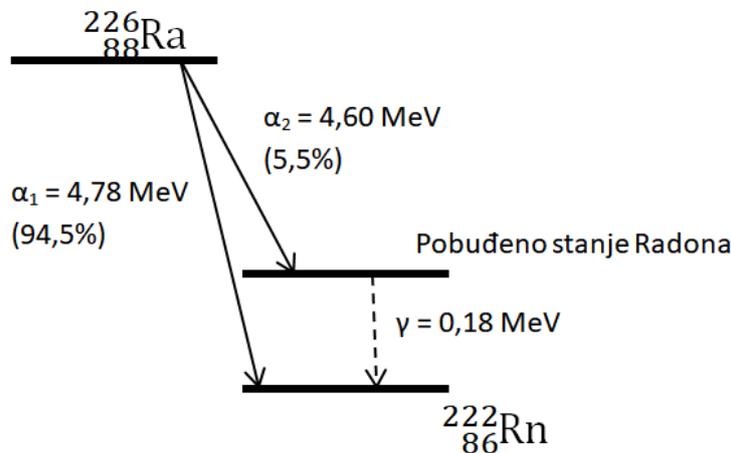
3.1.α zračenje

Pri alfa raspadu, atomsko jezgro izbacuje alfa česticu (jezgro ${}^4_2\text{He}$), i s tim on prelazi u jezgro sa masenim brojem $A-4$ i rednim brojem $Z-2$. Raspad može biti prikazan sledećom šemom:



Najznačajniji raspad se obično završavaju na samo nekoliko niskoležećih stanja. Pošto se u ovom procesu emituje samo jedna čestica, α čestice imaju diskretne energije. Alfa čestica i jezgro potomak podele svoje energije u istoj proporciji u kojima im se odnose mase. Pošto je masa α čestice značajna u poređenju sa masom jezgra, da bi se odredila energija α čestice, od energije raspada mora se oduzeti energija uzmarka jezgra. Energije α čestice su između 4 MeV i 9 MeV, iz čega je moguće izračunati, da su im brzine reda veličine $10^7 \frac{m}{s}$.

Na primer, za Ra-226, alfa raspad ima dva kanala, sa određenim verovatnoćama.



Slika 3.1: Alfa raspad radijuma

Nakon emisije jedne grupe alfa čestica, koje imaju maksimalnu moguću energiju, stvaraju se jezgra potomci u osnovnom energetsom stanju. Ako alfa čestica ne dobije celu energiju, koja joj stoji na raspolaganju, stvara se jezgro potomak u pobuđenom energetsom stanju sa koga emisijom gama zračenja prelazi na osnovno energetsom stanje.

α čestice imaju veliku moć za jonizaciju. Tokom njihove putanje, stvore $\sim 10^5$ para jona. Njihova putanja je nekoliko centimetara u vazduhu, čak i jedna hartija bi ih zaustavila. U slučaju da stižu do površine kože, spoljašnji sloj izumrlih ćelija ih potpuno zaustavlja, tako da ne dolazi do oštećenja živih ćelija. Jedino ako dolazi do udisanja ili gutanja izvora alfa zračenja, onda može doći do težih posledica.

3.2. γ zračenje

Gama zraci nastaju pri deeksitaciji pobuđenih stanja u jezgrima atoma. Pobuđivanje stanja može se ostvariti putem nuklearnih reakcija i radioaktivnim raspadom jezgra, kao što su alfa i beta raspad. Posle alfa i beta raspada dolazi do promene rednog broja jezgra. Ako se posle alfa i beta raspada ne odnese sva energija, onda jezgro ostaje u pobuđenom stanju. Za radioaktivni izvor gama zraka se obično uzima ime pretka iako gama zraci najčešće nastaju prelazom između različitih stanja u potomku. Posle izvesnog vremena, jezgro, emisijom gama fotona dolazi do osnovnog stanja koje može biti stabilno ili podložno daljem raspadu. Gama zraci imaju najveću prodornu moć, u vazduhu mogu da pređu nekoliko kilometara.

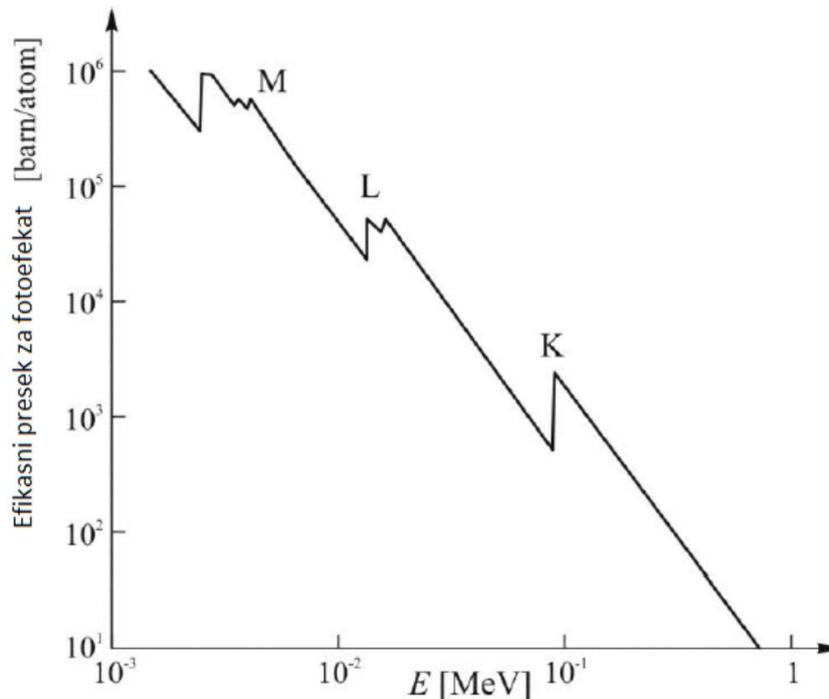
4. Detekcija zračenja

Detekcija zračenja se zasniva na interakciji fotona sa materijom. Kada prodiru kroz supstanciju, fotoni interaguju sa atomima na različite načine. To su: fotoefekat, Komptonov efekat i efekat stvaranja parova. Detekcija je posredna jer elektroni nastali u ovim interakcijama vrše daljnju jonizaciju i ekscitaciju. U detektorima fotona koriste se ovo naelektrisanje da se detektuje prolaz fotona, ili da se odredi njegova energija merenjem količine proizvedenog elektriciteta.

4.1. Fotoefekat

U procesu fotoelektrične apsorpcije foton svoju celokupnu energiju predaje vezanom elektronu atoma i ta energija se pojavljuje u vidu kinetičke energije elektrona izbačenih iz elektronskog omotača atoma. Kinetička energija izbačenih elektrona E_{kin} je jednaka razlici između energije upadnog fotona E_γ i energije veze nivoa sa kojeg je elektron izbačen E_v . Elektron se može izbaciti sa K, L, M... ljusci.

$$E_{kin} = E_\gamma - E_v$$



Slika 4.1: Zavisnost efikasnog preseka za fotoefekat od energije upadnog fotona

Fotoelektrični efekat se ne može dogoditi na slobodnom elektronu, jer se tako ne bi mogli održati istovremeno i energija i impuls.

Materijali velikog rednog broja su vrlo efikasni što se tiče apsorpcije fotona putem fotoefekta.

Da bi se dogodio fotoelektrični efekat, neophodno je da energija upadnog fotona bude jednaka ili nešto veća od energije veze elektrona u omotaču atoma. Verovatnoća za fotoefekat se smanjuje sa porastom energije gama fotona uz nekoliko oštih skokova na energijama, koje odgovaraju energijama veze orbitalnih elektrona (slika 4.1). Jaka zavisnost preseka od energije fotona je razlog zbog koga je ovaj efekat dominantan način interakcije na niskim energijama, a postaje zanemarljiv na visokim energijama.

Posle fotoefekta, u atomima se pojavljuju nepopunjena mesta u elektronskom omotaču, što će dovesti do prelaza elektrona sa viših na niže nivoe. Kao posledica ovih prelaza javlja se emisija rendgenskih zraka, karakterističnih za atome. Nastali X-zraci se apsorbuju u kristalu, a elektroni putem jonizacije gube svoju kinetičku energiju dok ne budu zahvaćeni od strane jednog atoma. Na taj način se celokupna energija detektovanog fotona ostavlja u detektoru.

4.2. Komptonovo rasejanje

Tokom Komptonovog rasejanja, samo jedan deo energije upadnog fotona predaje slobodnom ili lako vezanom elektronu, pri čemu se foton elastično rasejava. Oni između sebe raspodele energiju upadnog fotona, znači da će rasejani foton imati veću talasnu dužinu nego upadni:

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

λ – talasna dužina upadnog fotona, λ' – talasna dužina rasejanog fotona, h – plankova konstanta, m_e – masa elektrona, c – brzina svetlosti, θ – ugao rasejanja.

Energija rasejanog fotona E'_γ se može izračunati sa formulom:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \varepsilon (1 - \cos \theta)}$$

Energija koju će dobiti elektron posle rasejanja E_k :

$$E_k = E_\gamma - E'_\gamma = E_\gamma \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \varepsilon (1 - \cos \theta)}\right)$$

Gde je $\varepsilon = \frac{E_\gamma}{m c^2}$.

Ukupna energija upadnog fotona kod Komptonovog rasejanja se ne predaje tokom prve interakcije. Za visokoenergetske fotone može se desiti čitav niz Komptonovih rasejanja, gde se kod svakog smanjuje energija sekundarnog fotona, sve dok se ne završi fotoelektričnim efektom.

4.3. Efekat stvaranja parova

U slučaju, da je energija upadnog zračenja veća od energije mirovanja elektron-pozitronskog para (1,022 MeV), onda je moguće da upadni foton u detektoru kreira elektron-pozitronski par. Ovaj proces se događa u jakom električnom polju jezgra. Energija upadnog gama zraka se deli na stvaranje elektrona i pozitrona, a ostatak energije se troši na njihovu kinetičku energiju:

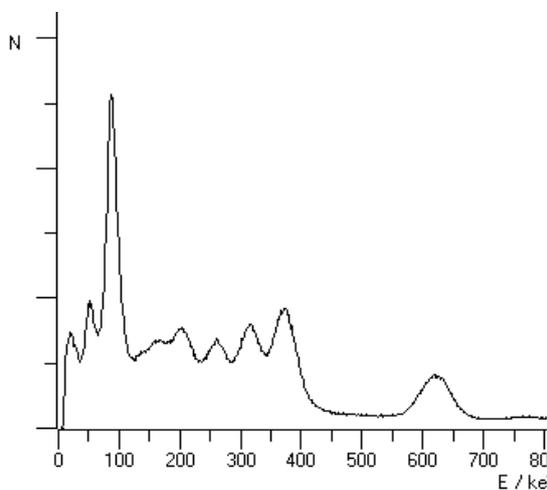
$$E_\gamma = 2mc^2 + E_{ke^-} + E_{ke^+}$$

Kada se usporeni pozitron sudari sa jednim elektronom iz detektora, oni se anihiliraju uz emisiju dva fotona jednakih energija od $m_e c^2 = 0,511$ MeV. Radi održanja impulsa, ova dva fotona se emituju u približno suprotnim pravcima pod uglom od 180° .

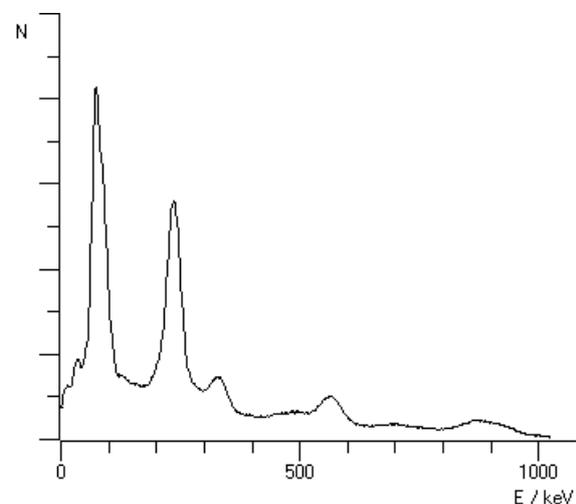
Kao i kod Komptonovog efekata, energija originalnog fotona se ne deponjuje na mestu prve interakcije. Svaki od fotona od 511 keV nosi svoju energiju na neko drugo mesto, gde će dalje interagovati Komptonovim rasejanjem ili fotoefektom.

5. Spektri gama zraka

Gama spektar radioaktivnog izvora teoretski ima diskretan karakter. Zbog statističke prirode linija u spektru nije oštra, već ima karakterističan oblik Gausove krive i naziva se pik totalne apsorpcije. Pik nastaje kada upadni gama kvant svu svoju energiju ostavi u detektoru. U nekim slučajevima on čini samo mali deo ukupnog odbroja, ali upravo ovaj pik nam daje korisnu informaciju. Iz položaja pika se može odrediti koji radionuklid je prisutan, a na osnovu površine pika (odbroja signala pod vrhom) se određuje aktivnost radionuklida. Ostatak predstavlja spektralni kontinuum, koji je nepoželjan, ali ga ne možemo izbeći.



Slika 5.1: Gama spektar Ra-226



Slika 5.2: Gama spektar Th-232

5.1. Oblik spektralnog fona

Podaci u oblasti vrha se opisuju sa dve analitičke funkcije: jedna predstavlja spektralni fon (kontinualni deo spektra) a druga predstavlja vrh (Slivka, 2000). Fon je praktično spektar dobijen bez ispitivanog izvora. Kada razmotrimo gama zrake neke određene energije u

spektru, logično je definisati fon kao spektar koji bi se dobio kada bi bilo prisutno svo zračenje osim gama zraka date energije.

Za opisivanje fona tipa stepenastog skoka, kao što je ispod vrha na slici 4.1 od 300 keV do 500 keV, koristi se čitav niz analitičkih funkcija. Najčešće se takve funkcije sastoje iz dve komponente. Prva je neki polinom niskog reda za opisivanje doprinosa od fotona viših energija i koja predstavlja osnovu za ceo region ispod vrha, a druga komponenta opisuje skokoviti porast na niskoenergetskoj strani spektra. Izrazi za prvu komponentu variraju od konstante do polinoma trećeg reda. Linearna funkcija aproksimira kontinuum dovoljno dobro, osim ako se u posmatranom delu ne nalazi komptonska ivica. Za drugu komponentu je najjednostavnije koristiti prostu stepenastu funkciju sa prekidom na mestu centroide vrha.

5.2. Oblik vrha pune energije

U idealnom slučaju vrh pune energije bi se analitički mogao predstaviti Gausovom funkcijom:

$$f(x) = Y \cdot e^{-\frac{(x-X)^2}{2\sigma^2}}$$

gde je Y – amplituda, X – centroida a σ – poluširina na visini Y/\sqrt{e} . U praksi, vrh ima produžetak, rep na strani niže energije a moguće i na strani više energije, naročito kod velikih brzina brojanja. Zato se oblik vrha često mora opisivati složenim funkcijama. Broj parametara koji figuriše u analitičkom obliku takvih funkcija se kreće čak i do 9 u slučaju gausijana sa dva eksponencijalno opadajuća repa sa obe strane.

Površina vrha se može uzeti da je integral odgovarajućeg dela analitičke funkcije. Neto površina pika N dobija se tako, što se od ukupne površine A oduzme iznos površine ispod analitičke funkcije B , koja opisuje fon: $N=A-B$

Kada se odredi odbroj pod vrhom (neto površina pika) N , tada se dobijeni rezultat daje sa odgovarajućom granicom poverenja: $N \pm k\sigma$, što znači da je rezultat između određene greške od $N - k\sigma$ do $N + k\sigma$. Najčešće se uzima da je $k=1$, što daje standardnu devijaciju sa nivoom poverenja od 68,3%.

6. Izvori i komponenti fona

Osnovni izvori fona gama detektora su:

- Radioaktivna kontaminacija
- kosmički zraci
- električne smetnje

Brzina brojanja fona može da se razloži na komponente, koji potiču od:

- **Eksterne radioaktivnosti**, od materijala izvan glavne zaštite, jer svi građevinski materijali sadrže primordijalnu radioaktivnost. Ova komponenta se smanjuje do beznačajne vrednosti sa zaštitom od 10 cm olova ili 20 cm gvožđa.
- **Kontaminacije gama emitera zaštite i materijalima unutar nje**. Olovo je najvažniji zaštitni materijal zbog svog velikog rednog broja, velike gustine i povoljnih mehaničkih osobina. Mana novoproducenog olova je što on skoro uvek sadrži znatne količine radioaktivne ^{210}Pb . Ovaj izotop se raspada sa poluživotom od 22 godine, i nakon 200 godina od njega ostane svega oko 0,2% od početne aktivnosti. Zbog toga, u niskofonske sisteme postavlja se unutrašnji sloj od starog olova, koji se reciklira iz brodskih olupina ili sa starih krovova. Trenutna koncentracija ^{210}Pb u starom olovu zavisi od vremena koja je prošla od proizvodnje i od početne koncentracije. Kvalitet olova se može odrediti jedino merenjem.

Nekoliko niskofonskih sistema, među koje pripada i onaj u DFNS, ima zaštitu od starog gvožđa, livenog pre 1952.. Gvožđe i čelik proizvedeni posle 1952. mogu sadržati značajne količine antropogenih radionuklida, naročito ^{60}Co .

- **Radona koji difunduje u šupljine zaštite i njegovih potomaka**. Bez dodatne zaštite koncentracija radona će biti slična u niskofonskim sistemima onoj u laboratoriji. Prosečna koncentracija radona u zatvorenim prostorijama je 50-100 Bq/m³, što je desetak puta veća nego na otvorenom vazduhu. U slučaju da je ventilacija u laboratoriji loša, može biti čak 1000 Bq/m³.
- **Fon od sekundarnih fotona i elektrona**, proizvedenih mionima i protonima u materijalu zaštite. Praktično sav spektar fona koji ostane u zaštićenom delu detektora potiče od sekundarnog kosmičkog zračenja.
- **Neutronska komponenta** se najviše vidi u spektrima fona niskofonskih sistema sa germanijumskim detektorima pri malim debljinama prekrivenog sloja. Spektri imaju

dva vrha, koji su prošireni usled uzmaka, a nastaju neutronsom aktivacijom germanijuma u samom detektoru.

- **Fon od miona** iz kosmičkih zraka. Fon niskofonskih gama spektrometrijskih sistema potiče uglavnom od sekundarnog zračenja proizvedenog mionima iz kosmičkih zraka. Pokrivni sloj značajno smanjuje njihov fluks, pa je stoga vrlo značajan parametar. Pokrivni sloj najviše dolazi do izražaja u laboratorijama duboko pod zemljom.

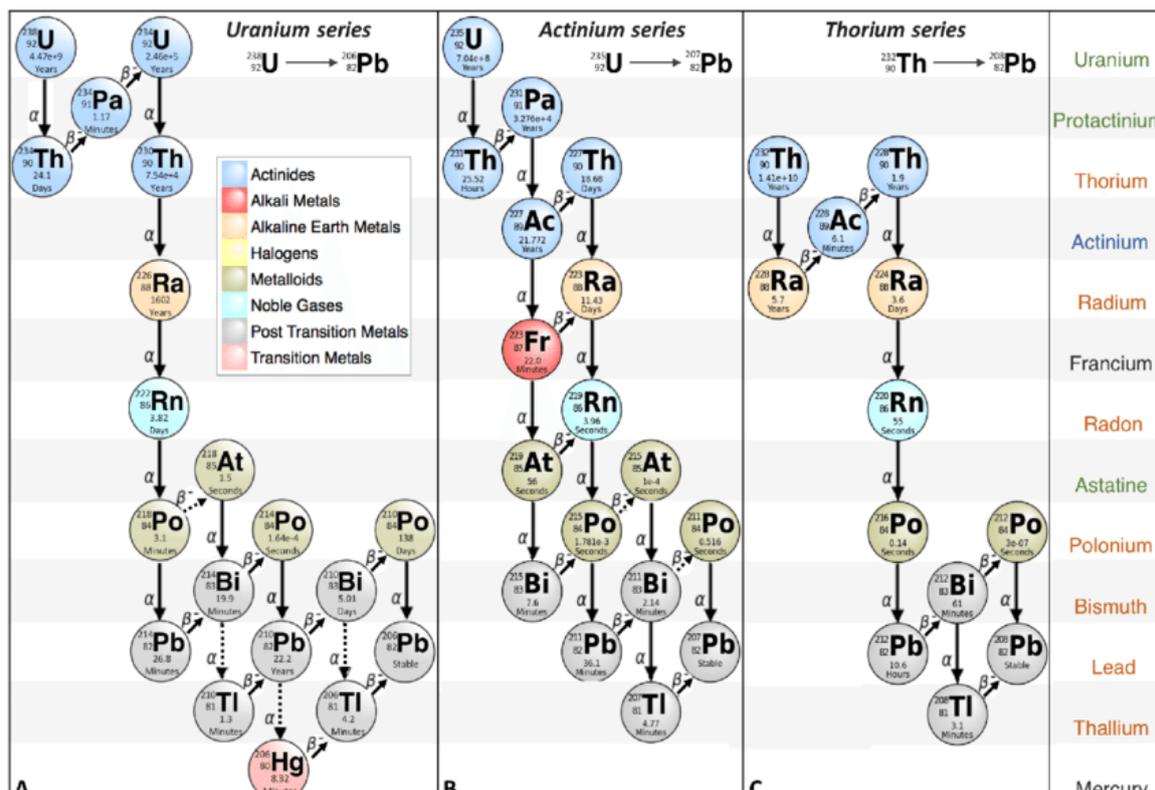
6.1. Radioaktivno okruženje

Prema poreklu, radionuklidi se dele na 3 kategorije:

- Primarni radionuklidi – su stvoreni nukleosintezom u vreme kada i sva supstanca solarnog sistema. Imaju poluživot uporediv sa starošću Zemlje, 4.5 milijardi godina, ili duži. Ovde spadaju i kratkoživeći izotopi iz tri radioaktivna niza, koja počinju dugoživećim ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U .
- Kosmogeni radionuklidi – proizvedeni delovanjem kosmičkih zraka na zemaljsku i vanzemaljsku supstancu. Najvažniji su ^3H i ^{14}C , koji se stalno proizvode kosmičkim zracima u stratosferi.
- Antropogeni radionuklidi – veštački radionuklidi proizvode se u nuklearnim reaktorima, nuklearnim bombama i akceleratorima. To su produkti fisije, i transuranski elementi.

Kosmogeni i antropogeni radionuklidi se jednim imenom zovu još i sekundarni radionuklidi.

Izvor fona može biti eksterna ili interna radioaktivnost. Eksterna radioaktivnost potiče od K, Th, i U u materijalima laboratorije. Interna radioaktivnost potiče od radionuklida u zaštiti koja opkoljava detektor i od materijala zaštite, uključujući i sam detektor.



Slika 6.1: Radioaktivni nizovi uranijuma i torijuma

7. Gama spektrometrija niskih aktivnosti

Gama spektrometrijsko merenje niskih aktivnosti se koristi od kontrole sadražaja radioizotopa prehrambenih proizvoda pa do proučavanja fundamentalnih procesa u nuklearnoj fizici i astrofizici. U ovoj tehnici koriste se različiti detektori i sistemi, ali u gama spektroskopiji niskih aktivnosti najvažniji su poluprovodnički germanijumski detektori i scintilacioni NaI(Tl) detektori. Za povećanje osetljivosti ovih detektora, uvode se neke mere za smanjivanje brzine brojanja fona:

- detektor se opkoljava debelom spoljašnjom zaštitom od olova ili gvožđa
- dodaje se unutrašnji sloj vrlo čistog materijala, kao što je staro olovo, čisto od kontaminacije sa ^{210}Pb ili elektrolitički rafinirani bakar
- može se dodati i unutrašnji sloj parafina da bi se termalizovali i apsorbovali neutroni proizvedeni u spoljašnjem zaštitnom sloju protonima iz kosmičkog zraka
- često se osnovni detektor za uzorke opkoljava sistemom antikosmičkih brojača za potiskivanje fonskog doprinosa od kosmičkih miona i protona.

Najčešće korišćen sistem u gama spektrometriji niskih aktivnosti je Ge spektrometar, čija prednost su mogućnost ispitivanja uzoraka veće mase, reda 1 kg, za koje najčešće nije potrebna velika priprema, zahvaljujući velikoj prodornoj moći fotona. Njihova visoka rezolucija efektivno smanjuje fon, daje sigurnu identifikaciju gama zraka i tako omogućava istovremeno određivanje koncentracije aktivnosti pojedinačnih radionuklida u njihovoj smeši.

7.1. Geometrija izvor-detektor

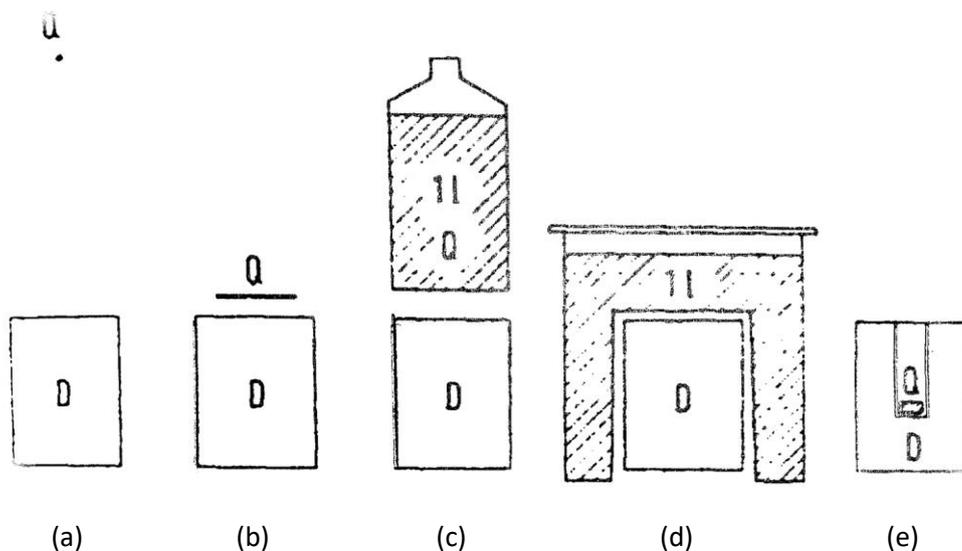
Prilikom gamaspektrometrijskih merenja važan parametar je geometrija izvor-detektor, odnosno kakva je geometrija izvora i kakav će uzajamni položaj izvora i detektora biti optimalan za cilj postavljen u toj seriji merenja. Neki primeri geometrijskih postavki prikazani su na slici 7.1

Niskofonske aktivnosti uzoraka koje se određuju primenom niskofonske gama spektrometrije uslovljavaju postavljanje uz sam detektor. Prednost malog rastojanje izvor-detektor su:

- veća brzina brojanja za datu aktivnost izvora
- manji uticaj pozadinskog zračenja okoline
- kraće vreme merenja za zahtevani odbroj u vrhovima
- veći odbroj u vrhovima za dato vreme merenja
- mogućnost uzimanje manje količine uzorka i time smanjenje korekcije na atenuaciju
- smanjenje atenuacije fotona u vazduhu, što je od značaja samo za niskoenergetske fotone

Na većim rastojanjima izvora od detektora prednosti su:

- manje korekcije na koincidentno sumiranje
- manje korekcije za nasumično sumiranje za datu aktivnost izvora
- tačnija procena atenuacije fotona u rasprostranjenim izvorima
- manja osetljivost efikasnosti detekcije na male promene oblika izvora i njegovog položaja



Slika 7.1: Najčešće korišćene geometrije merenja (D – detektor, Q – izvor):

- (a) tačkasti izvor na nekom rastojanju od detektora; (b) izvor u obliku diska na kapi detektora; (c) boca sa radioaktivnim rastvorom na kapi detektora; (d) radioaktivni rastvor u Marinelijevoj peharu; (e) izvor unutar detektora oblika jame.

7.2. Optimalizacija vremena merenja

Kada se meri jačina slabih radioaktivnih izvora, prisutna je nezanemarljiva brzina brojanja fona. Preciznost brzine brojanja se može proizvoljno povećati produžavajući vreme merenja. Kada je poluživot izvora istog reda veličine kao vreme merenja, može se definisati neko optimalno vreme merenja. Sa produžavanjem vremena merenja u ovom slučaju, dolazi do postepene degradacije već prikupljene informacije o neto brzini brojanja zbog dodavanja odbroja fona odbroju sada već oslabljenog izvora. U praksi se optimalno vreme merenje često procenjuje intuitivno.

7.3. Smanjivanje fona u gama spektrometriji

Fon niskofonskih gama spektrometrijskih sistema potiče uglavnom od sekundarnog zračenja proizvedenog mionima iz kosmičkih zraka. Za smanjenje njihovog fluksa značajan je pokrivni sloj. Najbolje rešenje, da se laboratorija izgradi ispod zemlje, ali većina površinskih laboratorija ima samo pokrivni sloj koji im daje zgrada. Najjednostavniji način smanjenja eksternog gama zračenja je prekrivanje cele površine laboratorije slojem olova debljine 10 cm, ili gvožđa debljine 20 cm. Eksterno gama zračenje se može smanjiti i postavljanjem detektora a štiti sa dovoljno debelim zidovima. Zaštita od olova se može praviti od

kombinovane vrste olova, tako da spoljašnja polovina može biti bilo kakvo olovo, a unutrašnja da bude niskoaktivno olovo.

Koncentracija radona u laboratoriji se smanjuje dobrom ventilacijom i premazivanjem odgovarajućim bojama ili presvlačenjem odgovarajućim materijalima poda, zidova i tavanice laboratorije.

Prethodno pomenute metode spadaju u pasivnu zaštitu, međutim moguće je da se vrši i aktivna zaštita. U tom slučaju smanjivanje fona se pristiže opkoljavanjem glavnog detektora sistemom zaštitnih detektora. Čestica koja spolja upadne u sistem detektuje i glavni i zaštitni detektor, dok česticu iz uzorka detektuje samo glavni detektor. Glavni i zaštitni detektor su vezani antikoincidentno, pa se signal od spoljašnje upadne čestice ne registruje.

8. Poluprovodnički detektori

Rad poluprovodničkih detektora se bazira na interakciji zračenja sa kristalom poluprovodnika. Poluprovodnici ispunjavaju dva neophodna uslova. Sa jedne strane zračenje ima mogućnost lakog razdvajanja naelektrisanja putem izbacivanja elektrona iz atoma. A sa druge strane, električno polje u koje se jedan takav materijal postavi ne pokreće nikakvo drugo naelektrisanje osim onog koje je zračenje stvorilo.

Detekcija zračenja kod ovog tipa detektora je zasnovana na efektu jonizacije. Poluprovodnici su materijali koji se po svojim provodničkim osobinama nalaze između provodnika i izolatora. Ovu klasu materijala čine elementi IV grupe periodnog sistema elemenata, a najznačajniji od njih su silicijum i germanijum. Zračenje se detektuje tako što se pomoću električnog polja prikupljaju naelektrisanja koja nastaju nakon njegove interakcije sa materijalom detektora. Energija koja je potrebna da se stvori jedan par elektron-šupljina je oko šest puta manja nego u gasnim detektorima. Upravo zbog te osobine je rad nekih poluprovodničkih detektora moguće samo na niskim temperaturama. Hlađenje se vrši tečnim azotom na 77 K pre početka merenja. U proizvodnji poluprovodničkih detektora se aktivno radi na pronalaženju materijala od kojih bi napravljeni detektori mogli raditi na sobnim temperaturama. Veliki redni broj i gustina osetljive zapremine poluprovodničkih elemenata daju veliku zaustavnu moć i povećavaju efikasnost detekcije.

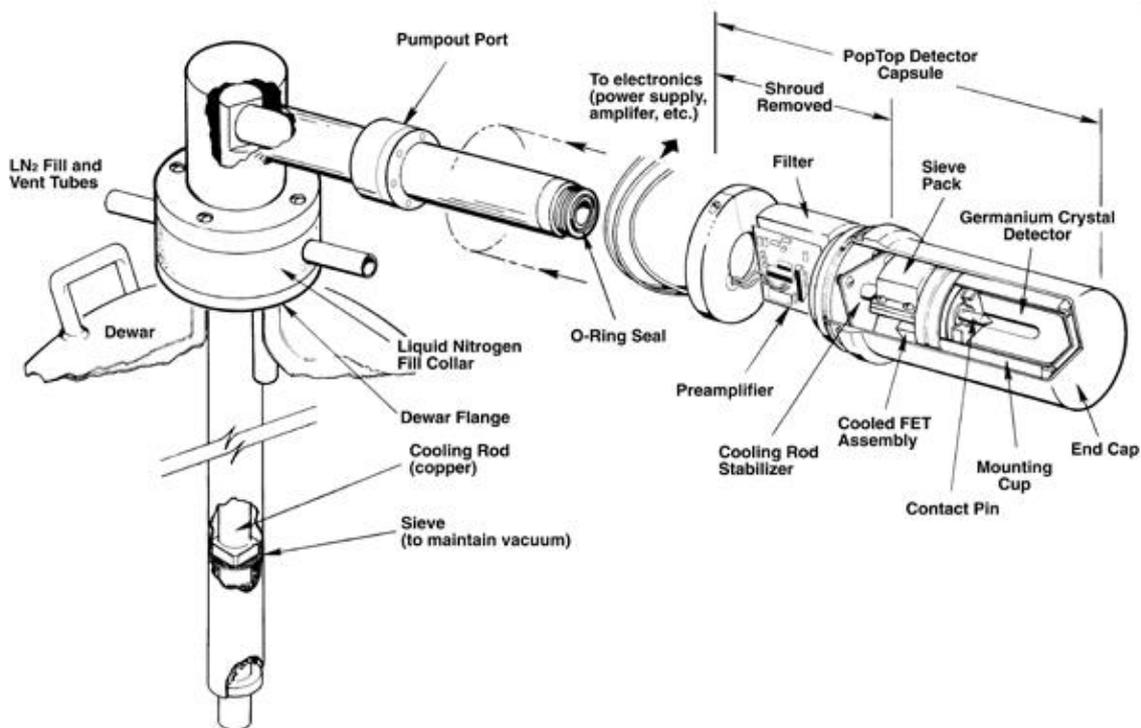
Tipičan poluprovodnički detektorski sistem se sastoji od detektora, izvora visokog napona, predpojačivača, analogno-digitalnog pretvarača i višekanalnog analizatora.

8.1. Germanijumski detektori

Germanijumski detektori bazirani su na korišćenju kristala germanijuma. Germanijumski detektori se mnogo više koristi za detekciju gama zračenja jer je redni broj germanijuma znatno veći nego kod silicijuma ($Z_{\text{Si}} = 14$, $Z_{\text{Ge}} = 32$), tako da je i efikasni presek za fotoefekat kod germanijumskih detektora 60 puta veći u odnosu na silicijumske.

Prvi germanijumski detektori su bili Ge(Li) detektori, međutim ovi detektori se moraju držati ohlađeni i kad nisu u upotrebi. Današnji detektori su HPGe (High purity Germanijum) izgrađuju se od ultra čistog germanijuma, i ne moraju se konstantno držati na niskim temperaturama, već samo u toku merenja. Moderni HPGe detektori su svoju glavnu primenu našli u gama spektrometriji. Oni omogućavaju merenja sa visokom energetsom rezolucijom u opsegu od nekoliko keV-a do desetak MeV-a.

Glavne karakteristike spektra fona niskofonskih germanijumskih sistema u površinskim laboratorijama su širok mionski pik na oko 45 MeV; kontinuum od fotona i elektrona, koji su sekundarno i tercijalno zračenje miona i protona i koji se proteže od najmanjih do najvećih visina impulsa; anihilacioni vrh na 511 keV i gama vrhovi proizvedeni neutronima u raznim materijalima. U spektrima dobrih niskofonskih sistema vrhovi od primarnih i antropogenih radionuklida su slabi ili sasvim odsutni.



Slika 8.1: Šema HPGe detektora sa sistemom za hlađenje

9. Granica statističkih odlučivanja u gama spektrometriji

Postoje mnoge primene gama spektrometrije, kao što je npr. procena radioaktivnih primesa u uzorku, gde je veoma važno definisati granicu detekcije za ispitivano zračenje. Ona će zavistiti od veličine i sastava uzorka, energije zračenja, rastojanje uzorka do detektora, efikasnost detektora, brzina brojanja fona, raspoloživo vreme merenja (Slivka, 2000). Neki od statistički određeni nivoi su sledeći:

- Kritična granica L_c
- Gornja granica L_u
- Granica detekcije L_d
- Granica određivanja L_q
- Minimalna detektibilna aktivnost MDA

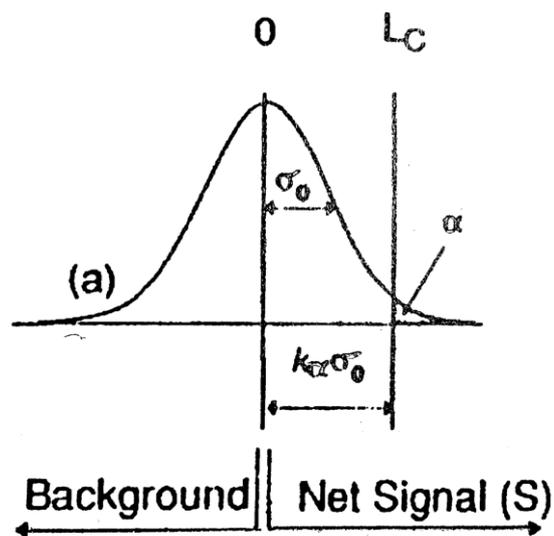
Ove granice, sa izuzetkom MDA, izračunavaju kao od broj, a ne kao aktivnost.

9.1. Kritična granica

Određuje da li je neto odbroj značajan. Važno je odrediti statističku značajnost izmerene površine pika. Pri odlučivanju da li je neka izmerena vrednost neke veličine bliska nuli, stvarno nula ili predstavlja istinski pozitivan odbroj mora se postaviti nivo, koji se zove kritična granica L_c , iznad koga možemo biti uvereni, do određenog stepena, da je neto odbroj valjan. Odbroj A postoji ako je veći od nekog broja standardnih devijacija raspodele odbroja, tj. odbroj je statistički značajan ako je $A > k_\alpha \sigma_0$, a ako je $A \leq k_\alpha \sigma_0$, odbroj nije značajan. Koeficijent k_α se bira tako da obezbedi unapred određeni stepen poverenja. Npr. ako smatramo da je odbroj prihvatljiv ukoliko se nalazi baš na kritičnoj granici, tada procenjujemo da ima 5% verovatnoće da je odbroj postojao, i pišemo da je $\alpha = 0.05$. Iz statističkih tabela za jednostranu verovatnoću normalne raspodele nalazimo $k_\alpha = 1,645$. Dakle,

$$L_c = 1.645\sigma_0 \quad (\text{granica poverenja } 95\%)$$

Znači ako je neto odbroj veći od L_c , onda možemo reći da je detektovana aktivnost i možemo s pravom navesti vrednost sa odgovarajućom nesigurnošću.



Slika 9.1: Definicija kritične granice. Ordinata predstavlja verovatnoću pojavljivanja konkretnog odbroja

9.2. Gornja granica

Ako je neto odbroj N jednak ili manji od kritične granice, tada se aktivnost mora zabeležiti kao neadekvatna, i navodi se gornja granica, tj. neki nivo od koga je aktivnost manja. Možemo definisati gornju granicu kao

$$L_u = N + k_\alpha \sigma_u^2$$

gde je σ_u^2 nesigurnost konkretne izmerene vrednosti, a k_α je opet jednostrani interval poverenja.

9.3. Granice poverenja

Ako se odredi neki broj N koji je veći od L_c , tada se rezultat navodi kao vrednost sa granicom poverenja predstavljenom sa k standardnih devijacija N

$$N \pm k\sigma_N$$

Najčešće se koristi jednostruka standardna devijacija sa nivoom poverenja od 68,3%.

9.4. Granica detekcije

Odgovara na pitanje „ako treba da izmerimo aktivnost uzorka, kolika bi morala biti brzina brojanja, za detekciju sa, recimo 95% sigurnošću“. Ako se dogodi da je aktivnost uzorka baš L_c , tada bismo mogli da budemo sigurni (95%) da je došlo do detekcije samo u 50% slučajeva, zato što bi odbroji bili raspoređeni simetrično ko L_c . Granica detekcije L_d mora biti nešto iznad L_c .

9.5. Minimalna detektibilna aktivnost – MDA

Prihvatljiva opšta definicija glasi: ako su nam date okolnosti pod kojim je izmeren neki spektar, minimalna detektibilna aktivnost (MDA) je minimalni iznos koncentracije aktivnosti radionuklida koji bi se mogao odrediti. Problem sa takvom definicijom je da tada ta granica nije granica odbroja, nego granica aktivnosti.

Najbolje je, da se MDA u principu dovede u vezu sa gornjom granicom odbroja i da se izračunava samo kada vrh nije prisutan (Slivka, 2000).

10. Principi za zaštitu od radijacije

Svrha kontrole radioaktivnosti građevinskog materijala je ograničiti izloženost radijaciji zbog mogućeg postojanja materijala sa povećanim ili povišenim nivoima prirodnog radionuklida. Doze kojima je izloženo stanovništvo treba zadržati na najnižem nivou koji možemo razumno postići..

Kontrole radioaktivnosti građevinskog materijala mogu se zasnivati na sledećim radiološkim kriterijumima i principima:

- Dozni kriterijum za kontrolu – Kontrole treba da budu zasnovane na kriterijumu doze koji se utvrđuje uzimajući u obzir ukupne nacionalne okolnosti. U okviru Evropske unije, za zaštitu od zračenja stanovništva treba uzimati u obzir godišnje doze veće od 1 mSv. Veće doze treba prihvatiti samo u nekim veoma izuzetnim slučajevima, kada se materijali koriste lokalno. U Evropskoj uniji se preporučuje da kontrole treba da budu zasnovane na godišnjoj dozi u opsegu 0.3 mSv - 1 mSv.
- Izuzetak - Građevinski materijali treba da budu izuzeti od svih ograničenja koja se tiču njihove radioaktivnosti, ako gama radijacija koja potiče iz njih ne povećava godišnju efektivnu dozu više od 0,3 mSv.

10.1. Dozvoljena efektivna doza za radnike

Akcioni nivoi u pogledu efektivne doze za radnike na radnim mestima prirodnim izvorima zračenja (NORM materijalima) su 1 mSv godišnje (UNSCEAR, 2000). Radne aktivnosti sa odgovarajućom dozom manje od 1 mSv godišnje su isključene iz daljeg istraživanja.

Radne aktivnosti sa odgovarajućom efektivnom dozom preko 1 mSv godišnje ali manje od 6mSv i karakterišu se kao nadgledana područja. Prikladne mere se mogu preduzeti kako bi se smanjila doza, uzimajući u obzir efikasnosti i troškove takvih mera.

Radne aktivnosti sa efektivnom dozom koja prelazi 6 mSv godišnje ali manje od 20 mSv godišnje, karakterišu se kao kontrolisana područja.

11. Eksperimentalni deo

U ovom radu su pokazani rezultati merenja koncentracije ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K u nekim materijalima (cirkon, cirkosil, cirkosil 5, cirkosil 300M, cirkobit, cirkobit MO, cirkobit MO/S, cirkobit FU50), koji se koriste u keramičkoj industriji u Srbiji. Izračunati su spoljašnji hazardni indeks H_{ex} , ekvivalentna vrednosti radijum Ra_{eq} , i godišnja efektivna doza E . Na kraju su upoređene dobijene vrednosti sa preporučenim vrednostima godišnje efektivne doze za radnike u keramičkoj industriji u Srbiji.

Merenja su izvršena u Laboratoriji za gama spektroskopiju, Katerde za nuklearnu fiziku, u okviru Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu.

11.1. Mehanička postavka

Prikupljeni uzorci bili su upakovani u plastične kontejnere (prečnika 6,70 cm i visine 6,20 cm). Mase uzorka upakovanih u standardnu laboratorijsku geometriju su bili do 300 g. Fonski spektar je prikupljan u toku 80 000 s. Korišćen je n-tip HPGe detektor relativne efikasnosti 22.3% i aktivne zapremine 119 cm³. Proizvođač detektora je CANBERRA. Ovaj spektrometar je zatvoreni koaksijalni tip sa konfiguracijom kriostata sa U stilom. Detektor se nalazi u olovnoj zaštiti debljine 14 cm. Pasivni štit je unutrašnja obloga od kalaja i bakra kako bi se absorbovali rendgenske zraci sa K nivoa u energetskom dometu od 75-85 keV.

11.2. Spoljašnji hazardni indeks

Da bi se procenila doza eksternog gama zračenja iz sirovina, spoljašnji hazardni indeks H_{ex} je izračunat prema sledećoj formuli (Todorovic, 2017):

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \leq 1$$

Pošto u našim rezultatima nismo dobili značajne vrednosti za ^{40}K , tog člana smo zanemarili.

11.3. Ekvivalentna aktivnost radijuma

Da bi se uporedila specifična aktivnost materijala koji sadrže različite količine ^{226}Ra , ^{232}Th i u opštem slučaju ^{40}K , koristi se ekvivalentna aktivnost radijuma Ra_{ek} koja je definisana sledećim izrazom (Todorovic, 2017):

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43A_{Th} + 0,077A_K$$

gde su A_{Ra} , A_{Th} i A_K koncentracije aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th , i ^{40}K respektivno, sa jedinicama Bq/kg. Maksimalna preporučena vrednost ekvivalentne aktivnosti radijuma je 370 Bq/kg.

11.4. Doza usled spoljašnjeg izlaganja

Za izračunavanje doze koja se primi usled spoljašnjeg izlaganja, koristimo jačinu ambijentalno ekvivalentnu dozu $H^*(10)$, izmereno kontaktno sa cirkonilom. Ambijentalna ekvivalentna doza je uvedena da bi se odgovorilo na pitanje koliko je ozračen čovek koji se nalazi u polju jonizujućeg zračenja u kome je zračenje izmereno. Ako doza u vazduhu potiče od slabo prodornog beta i alfa zračenja, ozračenost čoveka se svodi na ozračenost kože i očnog sočiva. Ako doza u vazduhu potiče od prodornog gama zračenja, postoji raspodela ekvivalentne doze po dubini. Jedinica ambijentalne doze je Sv.

Kada smo odredili srednju vrednost za ambijentalnu ekvivalentnu dozu, možemo izračunati dozu usled spoljašnjeg izlaganja korišćenjem formule:

$$E_{ext} = f \cdot H^*(10) \cdot t_w$$

f je konverzioni faktor ambijentalne doze u efektivnu dozu (za odrasle osobe $f = 0,6$)

$H^*(10)$ je ambijentalna doza

t_w godišnje provedeno vreme na radnom mestu u satima

11.5. Doza usled unutrašnjeg izlaganja

Rukovanje cirkonom može proizvesti prašinu u vazduhu, što dovodi do mogućnosti inhalacije cirkonskih proizvoda radnika uključenih u takve operacije. Kada se inhaliraju radioaktivni aerosoli, delovi respiratornog sistema zrače sa zračenjem iz dva izvora. Sa jedne strane iz radionuklida koji se nalaze u plućima, a sa druge strane od inhaliranog materijala, koja je već apsorbovan u tkivima. Ustanovljeno je da nakon udisanja radioaktivnih aerosola, doze koje primaju različiti regioni tela, će se razlikovati u velikoj meri, zavisno od raspodele veličine inhaliranog materijala. Da bi se odredila doza bilo kog organa, tkiva ili celog tela, neophodno je odrediti količinu inhaliranog ili progutanog radioaktivnog materijala. Za izračunavanje godišnje doze (mSv), godišnji unos (u Bq) se pomnoži odgovarajućim faktorom konverzije doze. Prvi korak u proceni unutrašnje doze je izračunavanje aritmetičke sredine koncentracije alfa-emitera za svaku identifikovanu kategoriju rada, tokom određenog vremenskog perioda

praćenja. Korišćenjem aritmetičke srednje vrednosti se zatim procenjuje unutrašnje doze kao (Todorovic, 2017):

$$E_{inh} = \sum_i [AM_i \cdot HW_i \cdot BR] \cdot DCF_i$$

AM_i označava aritmetičku srednju vrednost ukupne koncentracije alfa emitera (prvenstveno od ^{226}Ra i ^{232}Th i njihovih potomaka) za i -tu radnu kategoriju (Bq/m^3),

HW_i označava koliko sati se radnik bavi sa poslom i

BR je pretpostavljena stopa disanja zaposlenog ($1.2 \text{ m}^3/\text{h}$)

DCF_i je dozni konverzacioni faktor za inhalaciju ($\text{mSv}/\text{Bq}_\alpha$)

11.6. Efektivna doza

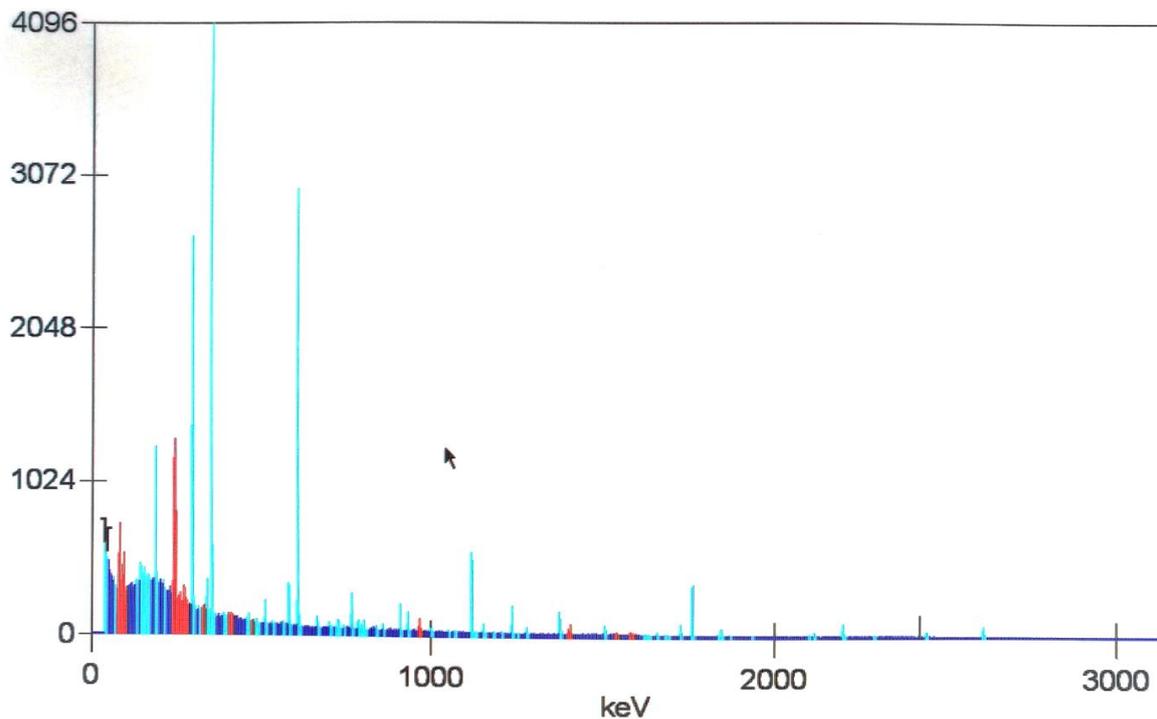
Efektivna doza je zbir ekvivalentnih doza (ekvivalentna doza korelira apsorbovanu dozu sa biološkim efektima date vrste zračenja) u kritičnim organima i tkivama korigovanih tkivnim težinskim faktorima koji su mera njihove radioosetljivosti. Jedinica je Sv, ali se obično koriste manji redovi veličine, mSv.

Ako smo izračunali doze usled spoljašnjeg i unutrašnjeg izlaganja, možemo odrediti ukupnu efektivnu dozu, koju prime radnici koji svakodnevno rukuju sa cirkonilom, prvenstveno u keramičkim industrijama:

$$E = E_{ext} + E_{inh}$$

12. Spektroskopski podaci

Za analizu gama linija koje se pojavljuju u spektru korišćen je programski paket „Genije2000“. Na slici 12.1 je prikazan jedan tipičan snimljen spektar za cirkonil.



Slika 12.1: Gama spektar cirkonila

Na niskim energijama se uočava pojava šuma, ali praktično je zanemarljiv u odnosu na intenzitet pikova. Analiza se vrši identifikacijom pikova, i određivanjem njihovog intenziteta. U praksi je sve to softverski rešeno. Dovoljno je jednom odraditi energetska kalibraciju, i zatim kod svakog pojedinačnog merenja prekontrolisati kalibraciju, uvećavajući delove spektra i pomeravši prozor na željeni deo spektra. Najjednostavnije je prekontrolisati liniju na 511 keV-a i liniju od ^{40}K na 14608 keV (ukoliko postoji). Dozvoljena su odstupanja do 0,5 keV.

Prilikom obrade spektra je potrebno učitati proceduru za dati detektor, i obavezno je popuniti podatke za svaki uzorak (slika 12.2)

Slika 12.2: Formular za ispitivane uzorke

Karakteristični pikovi koji se vide na spektru (slika 12.1) i na odnosu kojih su urađene analize su navedeni u tabeli 12.1. U obrađenim spektrima nismo našli pikove od ^{40}K .

Energija (keV)	Izotop	Radioaktivni niz	Izotop kome se pripisuje aktivnost
238,6	^{212}Pb	^{232}Th	^{232}Th
295,1	^{214}Pb	^{238}U	^{226}Ra
338,3	^{228}Ac	^{232}Th	^{232}Th
351,9	^{214}Pb	^{238}U	^{226}Ra
609,3	^{214}Bi	^{238}U	^{226}Ra
969,0	^{228}Ac	^{232}Th	^{232}Th
1120,3	^{214}Bi	^{238}U	^{226}Ra
2614,5	^{208}Tl	^{232}Th	^{232}Th

Tabela 12.1: Karakteristični pikovi u spektru cirkonila

13. Rezultati merenja

U tabeli su prikazani rezultati gama spektrometrijskih merenja 43 uzoraka cirkonila uvežene u Srbiju iz različitih zemalja.

Br.	Koncentracija aktivnosti (Bq/kg)			
	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
	Italija			
1	< 18	2330 ± 60	280 ± 12	< 150
2	< 23	3030 ± 50	382 ± 27	< 250
3	< 21	2950 ± 70	350 ± 30	< 230
4	< 22	2350 ± 40	445 ± 13	< 200
5	<17	2450 ± 100	248 ± 21	< 180
6	< 16	1960 ± 120	380 ± 40	< 100
7	< 24	3220 ± 50	470 ± 40	< 240
8	< 21	2860 ± 190	310 ± 30	< 230
9	< 15	1930 ± 50	276 ± 15	< 70
10	< 19	3600 ± 500	560 ± 40	< 190
11	< 40	3250 ± 200	490 ± 30	< 400
12	< 25	3700 ± 500	530 ± 60	< 250
13	< 20	2670 ± 110	409 ± 17	< 200
14	< 20	2760 ± 130	330 ± 26	< 180
15	< 24	3890 ± 130	430 ± 30	< 220
16	< 10	2120 ± 180	371 ± 17	< 56
17	< 24	2440 ± 50	320 ± 30	< 230
18	< 40	3800 ± 300	580 ± 30	< 170
19	< 24	3498 ± 60	594 ± 30	< 130
20	< 10	3600 ± 600	660 ± 40	< 260
21	< 15	3770 ± 80	550 ± 40	< 160
22	< 25	3040 ± 80	370 ± 30	< 300
23	< 25	3220 ± 90	390 ± 30	< 260
24	< 25	2870 ± 50	440 ± 30	< 260
25	< 17	1690 ± 40	310 ± 22	< 190
26	< 16	2000 ± 40	220 ± 21	< 170

Španija				
27	< 26	2540 ± 50	384 ± 15	< 240
28	< 20	3040 ± 260	431 ± 22	< 190
29	< 24	3500 ± 1300	580 ± 160	< 230
30	< 23	2800 ± 60	350 ± 30	< 190
31	< 25	3350 ± 30	463 ± 19	70±40
32	< 23	3530 ± 140	460 ± 40	< 210
33	< 25	3950 ± 90	450 ± 40	< 200
34	< 25	4050 ± 230	280 ± 30	< 200
Češka				
35	< 18	2150 ± 140	368 ± 20	< 180
36	< 19	3200 ± 1000	500 ± 30	< 180
37	< 22	2720 ± 80	300 ± 30	< 200
Holandija				
38	< 14	2120 ± 40	264 ± 14	< 150
39	< 22	3210 ± 230	459 ± 21	< 200
Slovenija				
40	< 9	1430 ± 70	187 ± 11	< 100
Nemačka				
41	< 25	4000 ± 130	700 ± 80	< 250
E.U.				
42	< 25	3200 ± 40	410 ± 30	< 260
SAD				
43	< 20	2600 ± 100	330 ± 30	< 190

Tabela 12.2: Rezultati merenja gama spektrometrijskih merenja cirkonila uvezeno iz različitih zemalja porekla

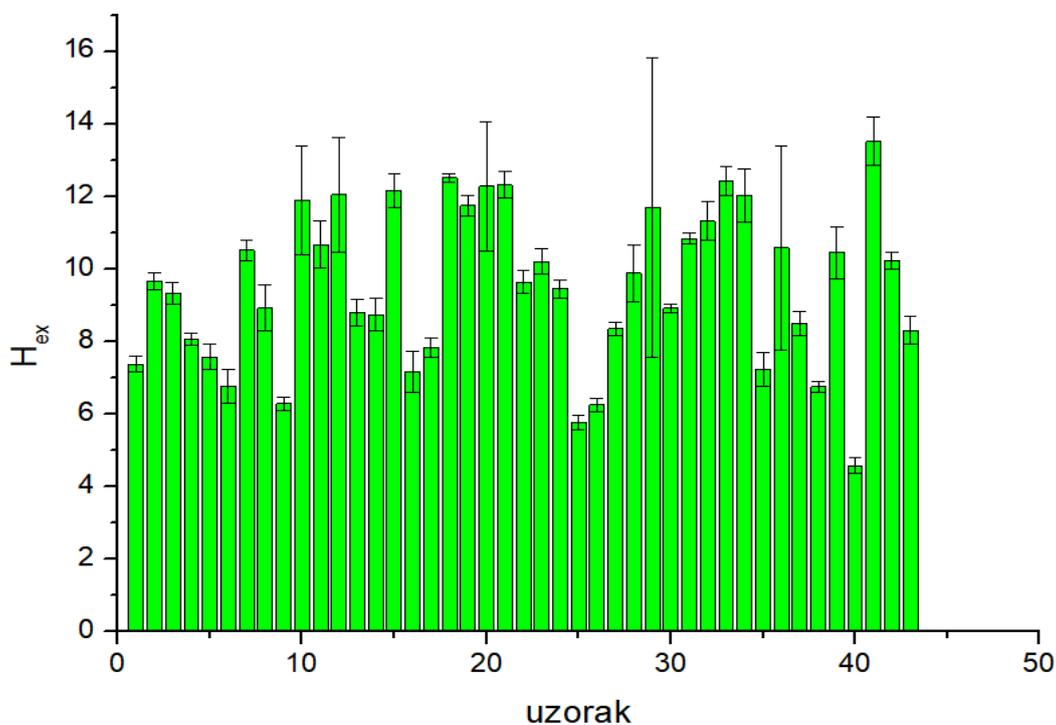
Količina ^{137}Cs i ^{40}K su zanemarljivi u ispitivanim uzorcima. Najniža vrednost ^{226}Ra je 1430(70) Bq/kg izmerena u uzorku br. 40 iz Slovenije, a najviša vrednost je 4050(230) Bq/kg u uzorku br. 34 iz Španije. Iz ^{232}Th najniža vrednost je 187(11) Bq/kg izmerena u uzorku br. 40 iz Slovenije, a najviša vrednost je 700(80) u br. 41 iz Nemačke. ^{40}K je detektovano samo u jednom uzorku (br. 31) i to 70(40) Bq/kg iz Španije. U tabelu 12.3 je prikazano za neke zemlje porekla najniža, najviša i srednja vrednost aktivnosti ^{226}Ra i ^{232}Th .

Zemlja porekla	količina uzoraka		²²⁶ Ra	²³² Th
Italija	26	Min.	1690 ± 40	310 ± 22
		Max.	3890 ± 130	430 ± 30
		Sred.	2885 ± 149	411 ± 29
Španija	8	Min.	2540 ± 50	384 ± 15
		Max.	4050 ± 230	280 ± 30
		Sred.	3345 ± 270	425 ± 45
Češka	3	Min.	2150 ± 140	368 ± 20
		Max.	3200 ± 1000	500 ± 30
		Sred.	2690 ± 407	389 ± 27
Holandija	2	Min.	2120 ± 40	264 ± 14
		Max.	3210 ± 230	459 ± 21
		Sred.	2665 ± 135	361 ± 18

Tabela 12.3: Upoređene ekstremne i srednje vrednosti gama spektrometrijskih merenja cirkonila uvezeno iz različitih zemalja

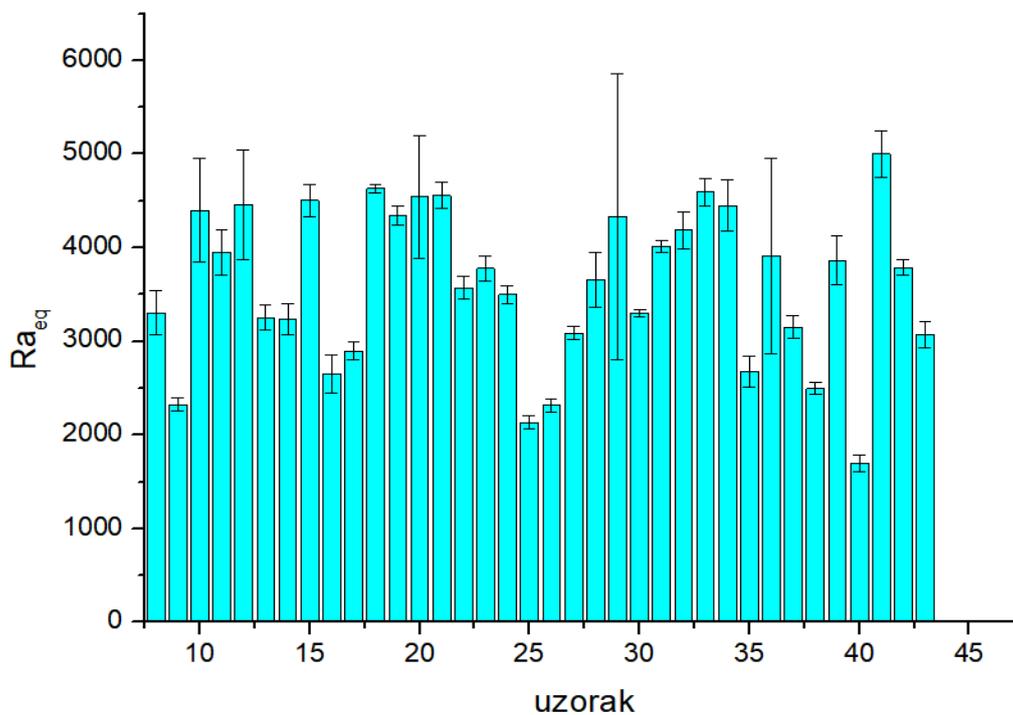
13.1. H_{ex} i Ra_{eq} vrednosti

Izračunate vrednosti za spoljašnji hazardni indeks su prikazane na histogramu 12.1. Vrednosti se nalaze u opsegu od 4,59(23) (uzorak br. 40 – Slovenija) do 13,51(66) (uzorak br.41 – Nemačka)



Histogram 12.1: Spoljašnji hazardni index

Rezultati za ekvivalentnu aktivnosti radijuma se nalaze u intervalu od 1697(86) (uzorak br. 40 – Slovenija) do 5001(244). (uzorak br. 41 – Nemačka). Izračunate vrednosti su prikazane na histogramu 12.2.



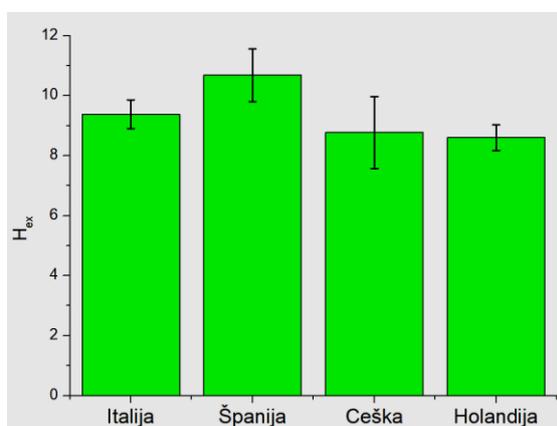
Histogram 12.2: Ekvivalentna aktivnost radijuma

Možemo ustanoviti, da vrednosti H_{ex} i Ra_{eq} znatno variraju kod različitih uzoraka. Možemo još primetiti da su u svim uzorcima cirkona vrednosti za spoljašnji hazardni indeks i za ekvivalentnu aktivnost radijuma višestruko premašile preporučene vrednosti, koji su 1 za H_{ex} i 370 Bq/kg za Ra_{eq} .

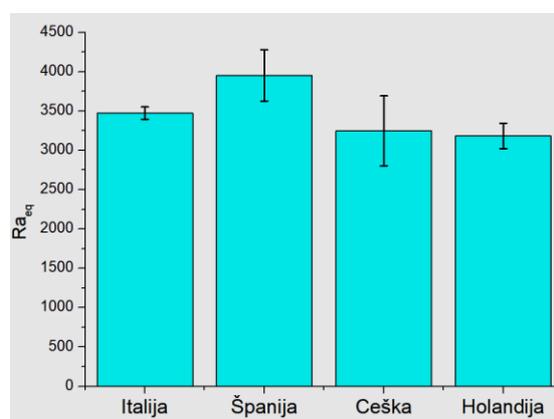
Možemo uporediti vrednosti za spoljašnje hazardne indekse i ekvivalentne aktivnosti radijuma u uzorcima cirkonila iz različitih zemalja porekla. Ekstremne i srednje vrednosti su date u tabeli 12.4 i na histogramima 12.3 i 12.4.

Zemlja porekla	količina uzoraka		H_{ex}	Ra_{eq}
Italija	26	Min.	$5,76 \pm 0,19$	2133 ± 71
		Max.	$12,51 \pm 0,93$	4629 ± 343
		Sred.	$9,38 \pm 0,48$	3473 ± 79
Španija	8	Min.	$8,35 \pm 0,19$	3089 ± 71
		Max.	$12,41 \pm 0,40$	4594 ± 147
		Sred.	$10,68 \pm 0,88$	3952 ± 326
Češka	3	Min.	$7,23 \pm 0,46$	2676 ± 169
		Max.	$10,58 \pm 2,82$	3915 ± 1043
		Sred.	$8,77 \pm 1,20$	3247 ± 445
Holandija	2	Min.	$6,75 \pm 0,16$	2498 ± 60
		Max.	$10,45 \pm 0,70$	3866 ± 260
		Sred.	$8,60 \pm 0,43$	3182 ± 160

Tabela 12.4: Upoređene ekstremne i srednje vrednosti za izračunat spoljašnji hazardni indeks i ekvivalentnu aktivnost radijuma



Histogram 12.3: Srednje vrednosti za spoljašnje hazardne indekse kod uzoraka iz različitih zemalja porekla



Histogram 12.4: Srednje vrednosti za ekvivalentne aktivnosti radijuma kod uzorka iz različitih zemalja porekla

Možemo videti, da su prosečne vrednosti H_{ex} i Ra_{eq} za uzorake cirkonila iz Španije nešto veće nego za ostale zemalja porekla, ali vidimo da se srednje vrednosti iz raznih država skoro poklapaju, nalaze se unutar granica greške.

13.2. Godišnja efektivna doza

Kao što je napisano, efektivnu dozu dobijemo sabiranjem doza usled spoljašnjeg i unutrašnjeg izlaganja.

Za izračunavanje doze usled spoljašnjeg izlaganja, potrebno nam je odrediti ambijentalnu ekvivalentnu dozu.

Ambijentalne ekvivalentne doze smo dobili iz dozimetrijskih izveštaja, koje su urađeni u fabrikama gde se koristi cirkonil. Koristili smo izveštaje iz

- „Polet keramika d.o.o.“ Novi Bečej: $H^*(10) = 1,9 \mu\text{Sv/h}$
- „Zorka Keramika d.o.o.“ Šabac: $H^*(10) = 1,4 \mu\text{Sv/h}$
- D.P. „IBA“ industrija brusnih alata, Ada: $H^*(10) = 1,6 \mu\text{Sv/h}$

Srednja vrednost ambijentalne ekvivalentne doze u direktnom kontaktu sa cirkonilom, sa 10% merne nesigurnosti detektora iznosi $H^*(10) = 1,6(2) \mu\text{Sv/h}$.

Konverzioni faktor ambijentalne doze u efektivnu dozu za starije od 12 godine: $f = 0,6$

Godišnje provedeno vreme na radnom mestu u satima: $t_w = 800 \text{ h}$

Ako uvrstimo ove podatke u formulu, dobijemo da je doza usled spoljašnjeg izlaganja:

$$E_{ext} = 0,784(96)\text{mSv/god}$$

Za izračunavanje unutrašnje doze, procenjuju se sledeće vrednosti:

U slučaju da prihvatimo preporučenu vrednost veličine radioaktivne čestice od $5 \mu\text{m}$, za aritmetičku srednju vrednost ukupne koncentracije alfa emitera dobijemo:

$$AM = 0,069 \text{ Bq/m}^3$$

Godišnje provedeno vreme na radnom mestu u satima: $HW = 800 \text{ h}$

Pretpostavljena zapremina udisaja vazduha u jedinici vremena zaposlenog: $BR = 1.2 \text{ m}^3/\text{h}$

Dozni konverzioni faktor za inhalaciju čestice veličine od $5 \mu\text{m}$: $DCF = 0,0021 \text{ mSv/Bq}$

Ako uvrstimo ove podatke u formulu, dobijemo da je doza usled unutrašnjeg izlaganja:

$$E_{inh} = 0,139 \text{ mSv/god}$$

Sada već možemo izračunati godišnju efektivnu dozu koju prime radnici koji rukuju sa cirkonilom, i dobijemo da je to:

$$E = 0,923(96)\text{mSv/god}$$

Efektivna doza povećana doza koju prime radnici prelazi preporučenu vrednost od strane Evropske Komisije (EC,1999), a koja iznosi 0.3 mSv/god.

14. Zaključak

U ovom radu su prikazani rezultati merenja koncentracije ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K u nekim materijalima (cirkon, cirkosil, cirkosil 5, cirkosil 300M, cirkobit, cirkobit MO, cirkobit MO/S, cirkobit FU50), koji se koriste u keramičkoj industriji u Srbiji. Izračunati su spoljašnji hazardni indeks H_{ex} , ekvivalentne vrednosti radijuma Ra_{eq} , i godišnja efektivna doza E . Na kraju su upoređene dobijene vrednosti sa preporučenim vrednostima godišnje efektivne doze za radnike u keramičkoj industriji u Srbiji.

Vrednosti za external hazardni indeks uzoraka cirkona uvezeni u Srbiju su raspoređene od 4,59(23) do 13,51(66), a za radon ekvivalentnu aktivnost su raspoređeni od 1697(86) do 5001(244).

Glavni radiološki problem sa korišćenjem cirkonila je unutrašnja izloženost alfa zračenju zbog inhalacije radioaktivnih čestica i spoljašnja izlaganja. Za izbegavanje unutrašnje kontaminacije sa alfa česticama koje potiču od cirkonila je dovoljno ispoštovati pravila industrijske higijene, i koristiti maske. Za radnike koji rukuju sa jedinjenjima cirkonila u keramičkoj industriji su potrebni specifičniji propisi. Izračunali smo da doza usled unutrašnjeg izlaganja kod radnika iznosi do 0,139 mSv godišnje, a doza usled spoljašnjeg izlaganja teoretski može da dostigne 0,784(96)mSv godišnje, ako računamo 800 h radnog vremena tokom godine. Na kraju smo dobili da je godišnja efektivna doza koju prime radnici u keramičkim industrijama sa 800 h radnog vremena 0,923(96) mSv.

Merenja potvrđuju da bi se izlaganje zračenju i pripisani rizik moglo smanjiti pažljivim odabirom sirovina koji se koriste u keramičkoj industriji, i sa redovno korišćenjem zaštitne maske.

15. Biografija

Molnar Robert je rođen 27. septembra 1990. godine u Bečeju, Srbija. Pohađao je osnovnu školu Zdravko Gložanski u Bečeju. Gimnaziju opšteg smera je završio u Bečeju. Po završetku srednje škole 2009. godine upisao je studije fizike, smer medicinska fizika, na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, gde je diplomirao 2015. godine, i iste godine je upisao master studije.

16. Bibliografija

1. J. Slivka, I. Bikit, M. Vesković, Lj. Čonkić, Gama spektroskopija (specijalne metode iprimene), Novi Sad, Prirodno-matematički fakultet, 2000
2. Nataša Todorović, Dušan Mrđa, Jan Hansman, Slavko Todorović, Jovana Nikolov and Miodrag Krmar - Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Novi Sad, Serbia - Radiological Impacts Assessment For Workers In Ceramic Industry In Serbia
3. Mladen Vukčević Institut za nuklearne nauke »Vinča«, Beograd - Dozimetrijske veličine i polja zračenja u dijagnostičkoj radiologiji
4. International atomic energy agency vienna, 2003 - Extent Of Environmental Contamination By Naturally Occurring Radioactive Material (Norm) And Technological Options For Mitigation
5. EC (European Commission). Radiation protection 112. Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection (1999)
6. IAEA, International Atomic Energy Agency Vienna, 2007 - Radiation Protection And Norm Residue Management In The Zircon And Zirconia Industries - Safety Reports Series no. 51
7. N. Todorovic, I. Bikit, M. Krmar, D. Mrdja, J. Hansman, J. Nikolov, S. Forkapic , M. Veskovic, K. Bikit, I. Jakonic - Natural radioactivity in raw materials used in building industry in Serbia
8. J.H. Selby - The industrial uses of zircon and zirconia, and the radiological consequences of these uses
9. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes - Sources And Effects Of Ionizing Radiation
10. Nataša Todorović, Istvan Bikit, Miodrag Krmar, Dušan Mrđa, Jan Hansman, Jovana Nikolov, Slavko Todorović, Sofija Forkapić, Nikola Jovančević, Kristina Bikit, Ljiljana Janković Mandić - Assessment Of Radiological Significance Of Building Materials And Residues
11. Karin Wichterey Federal Office for Radiation Protection, Germany – Radiation protection in NORM industries

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

<i>Redni broj:</i>	
RBR	
<i>Identifikacioni broj:</i>	
IBR	
<i>Tip dokumentacije:</i>	Monografska dokumentacija
TD	
<i>Tip zapisa:</i>	Tekstualni štampani materijal
TZ	
<i>Vrsta rada:</i>	Master rad
VR	
<i>Autor:</i>	Molnar Robert
AU	
<i>Mentor:</i>	Prof. dr Nataša Todorović
MN	
<i>Naslov rada:</i>	Ispitivanje sadržaja radioizotopa u uzorcima cirkonila i procena rizika
NR	
<i>Jezik publikacije:</i>	srpski (latinica)
JP	
<i>Jezik izvoda:</i>	srpski/engleski
JI	
<i>Zemlja publikovanja:</i>	Srbija
ZP	
<i>Uže geografsko područje:</i>	Vojvodina
UGP	
<i>Godina:</i>	2017
GO	
<i>Izdavač:</i>	Autorski reprint
IZ	
<i>Mesto i adresa:</i>	Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
MA	
<i>Fizički opis rada:</i>	
FO	
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO	
<i>Naučna disciplina:</i>	Medicinska fizika
ND	
<i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Gama spektroskopija, Godišnja efektivna doza
PO	
UDK	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
ČU	
<i>Važna napomena:</i>	nema
VN	
<i>Izvod:</i>	U ovom radu su prikazane rezultate merenja koncentracije ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K u nekim materijalima (cirkon, cirkosil, cirkosil 5, cirkosil 300M, cirkobit, cirkobit MO, cirkobit MO/S, cirkobit FU50), koji se koriste u keramičkoj industriji u Srbiji. Izračunati su external hazard index H_{ex} , radijum ekvivalentne vrednosti Ra_{eq} , i godišnja efektivna doza E . Na kraju su upoređene dobijene vrednosti sa preporučenim vrednostima godišnje efektivne doze za radnike u keramičkoj industriji u Srbiji
IZ	

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Prof. dr Olivera Klisurić

član:

Prof. dr. Nataša Todorović

član:

Prof. dr. Miodrag Krmar

član:

dr. Lazar Gavanski

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS
KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:
ANO

Identification number:
INO

Document type:
DT Monograph publication

Type of record:
TR Textual printed material

Content code:
CC Final paper

Author:
AU Molnar Robert

Mentor/comentor:
MN

Title:
TI Radioisotope content assessment in zirconil samples and radiological impact

Language of text:
LT Serbian (Latin)

Language of abstract:
LA English

Country of publication:
CP Serbia

CP

Locality of publication:
LP Vojvodina

Publication year:
PY 2017

Publisher:
PU Author's reprint

Publication place:
PP Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

Physical description:
PD

Scientific field:
SF Physics

Scientific discipline:
SD Medical physics

Subject/ Key words:
SKW Gamma spectroscopy, Annual effective dose

UC

Holding data:
HD Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4

Note:
N none

Abstract:
AB Results of the gamma spectrometry measurements of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K concentrations in some materials (zircon, zirkosil, , zirkosil 5, zirkosil 300M, zirkobit, zirkobit MO, zirkobit MO/S, zirkobit FU50) using in ceramic industries in Serbia are presented. The external hazard index, H_{ext} values, radium equivalent activity, Ra_{eq} and annual effective doses E were derived for all measured materials and compared with the recommended values to assess the external radiation hazards to workers who worked in ceramic industries in Serbia

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Prof. dr Olivera Klisurić

Member:

Prof. dr. Nataša Todorović

Member:

Prof. dr. Miodrag Krmar

Member:

dr. Lazar Gavanski