



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Radioaktivnost veštačkog đubriva

- diplomski rad -

Mentor:
Prof. dr Nataša Todorović

Kandidat:
Igor Marić 31/12

Novi Sad, 2017

PREDGOVOR

Diplomski rad je urađen pod mentorstvom dr Nataše Todorović, redovnog profesora na Prirodno-matematičkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu. Eksperimentalni deo rada urađen je u Laboratoriji za nuklearnu fiziku Departmana za fiziku, Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu.

Zahvaljujem se prof. Nataši Todorović za veliku pomoć i korisne savete tokom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se porodici i prijateljima za veliku podršku i pomoć u toku studiranja.

Igor Marić

SADRŽAJ

1. UVOD	6
2. GAMA ZRACI	7
2.1. Osobine i poreklo	7
2.2. Interakcija gama zračenja sa materijalnom sredinom	7
2.2.1. Fotoelektrični efekat	7
2.2.2. Komptonovo rasejanje	9
2.2.3. Stvaranje parova	10
2.2.4. Atenuacija fotona	12
2.2.5. Ostali procesi	13
3. GAMA SPEKTROMetriJA	14
3.1. Izvori γ zraka	14
3.1.1. Tipovi izvora	14
3.1.2. Geometrija izvor-detektor	14
3.2. Sprektri γ zraka	15
3.3. Spektralni fon	15
3.3.1. Komponente fona	15
3.4. Analiza spektara	20
4. DETEKTORI ZRAČENJA	26
4.1. Osnovne karakteristike detektora	27
4.1.1. Efikasnost detektora	27
4.1.2. Osetljivost detektora	27
4.1.3. Energetska rezolucija detektora	28
4.1.4. Vremenska rezolucija i mrtvo vreme	28
4.1.5. Efikasna zapremina	29
4.1.6. Masena ili električna rezolucija	29
4.2. Poluprovodnički detektori	29
4.2.1. Ge spektrometri	33
4.2.2. Niskofonski Ge spektrometri	34
4.2.2.1. Pasivna zaštita Ge spektrometara	35
4.2.2.1.1. Niskofonski γ spektrometri sa zaštitom od Pb	35
4.2.2.1.2. Niskofonski γ spektrometri sa zaštitom od Fe	35

4.2.2.2. Aktivna zaštita Ge spektrometara.....	36
5. VEŠTAČKA ĐUBRIVA	38
5.1. Rana istorija proizvodnje veštačkih đubriva	38
5.2. Fosfatni resursi	38
5.3. Proizvodnja i rezerve fosfata.....	39
5.4. Obrada i produkti	39
5.5. Opšta zaštita od radijacije	40
5.6. Radionuklidi u zemljištu	41
5.7. Transfer faktor radionuklida iz zemljišta u biljke	42
6. PROCENA RADIJACIONOG RIZIKA.....	44
6.1. Zakonska regulativa	44
6.2. Radioaktivnost prikupljenih uzoraka	45
6.2.1. Metoda merenja.....	45
6.2.2. Rezultati i diskusija	46
7. ZAKLJUČAK.....	52
8. LITERATURA	53
9. BIOGRAFIJA	55

1. UVOD

Korišćenje veštačkih đubriva u poljoprivredi doprinosi povećanju izloženosti ljudi jonizujućem zračenju. Zaposleni koji rukuju veštačkim đubrvima su direktno izloženi radijaciji, dok je stanovništvo zračenju izloženo posredno. Rizik za stanovništvo predstavljaju radionuklidi koje biljka usvaja iz veštačkim đubrivima obogaćenog zemljišta. Apsorbovani radionuklidi iz biljke završavaju u hrani biljnog porekla, takođe i u mesu životinja hranjenih prerađevinama pomenutih biljaka.

Analiza koncentracije radionuklida i distribucije u veštačkim đubrima bitna je jer sadrži korisne informacije za praćenje kontaminacije životne sredine radionuklidima. Podaci o radijaciji prirodnih radionuklida značajni su za procenu radijacionog rizika i izloženosti stanovništva.

Ispitivanje sadržaja radionuklida u 37 uzoraka veštačkog đubriva uvezenog u Republiku Srbiju izvršeno je metodom gama spektrometrije. Gama spektrometrija je veoma pogodna metoda za određivanje sadržaja radionuklida, brza je i omogućuje određivanje koncentracije svih prisutnih radionuklida tokom jednog merenja.

Tema ovog diplomskog rada je ispitivanje radioaktivnosti veštačkih đubriva.

Određene su:

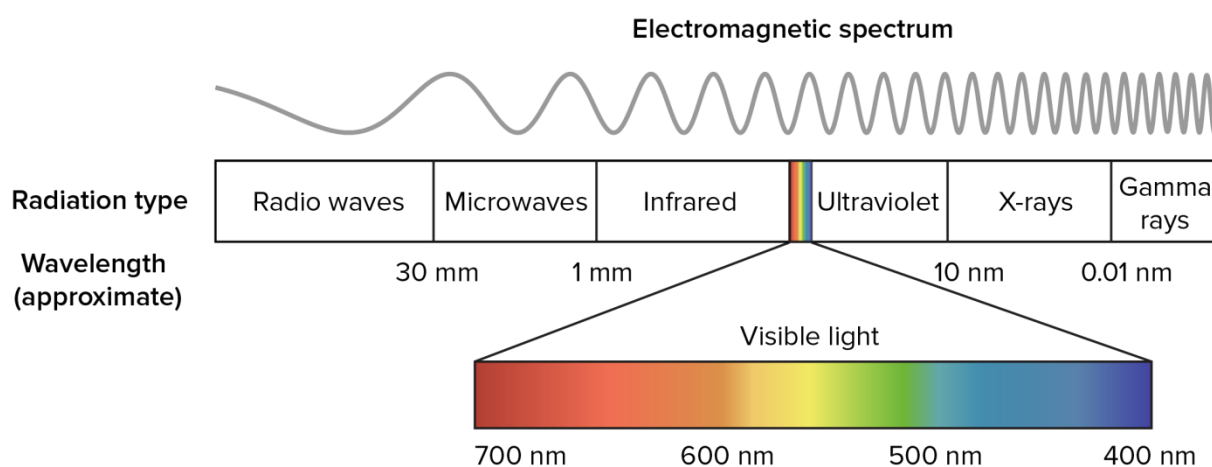
- koncentracije aktivnosti radionuklida: ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{238}U u svih 37 uzoraka veštačkog đubriva i poređenje sa zakonom propisanim graničnim vrednostima,
- vrednosti ekvivalentne aktivnosti radijuma, spoljnog indeksa, gama indeksa i apsorbovane doze i izvršeno je poređenje sa graničnim vrednostima.

2. GAMA ZRACI

2.1. Osobine i poreklo

Gama zraci predstavljaju elektromagnetne talase koji nastaju pri deekscitaciji pobuđenih stanja u jezgrima atoma [1]. Gama zračenje se sastoji od fotona najmanjih talasnih dužina (odnosno najvećih energija), zbog čega gama zraci imaju veliku prodornu moć pri prolasku kroz materiju. Gama zrake je otkrio francuski hemičar i fizičar Pol Urlih Vilar (franc. Paul Ulrich Villard) 1900. godine pri ispitivanju radijacije emitovane iz radijuma.

Spektar elektromagnetnih zraka prikazan je na slici 1.



Slika 1. Spekat elektromagnetnih talasa

2.2. Interakcija gama zračenja sa materijalnom sredinom

Najvažniji procesi koji se dešavaju pri prolasku gama zračenja kroz materiju su:

- Fotoelektrični efekat,
- Komptonovo rasejanje,
- Proizvodnja parova.

Navedeni mehanizmi su od ključnog značaja za detekciju zračenja i gama spektrometriju. U ovim procesima se stvaraju parovi jon-elektron, ili elektron-šupljina, pomoću kojih se vrši detekcija fotona i određivanje energije fotona.

2.2.1. Fotoelektrični efekat

Pri interakciji fotona sa vezanim elektronom, celokupna energija fotona se apsorbuje. Elektron kome je prenet energija fotona E_γ , napušta atom sa energijom E_e [1]:

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad (1)$$

gde E_b predstavlja energiju veze elektrona.

Energija upadnog fotona se izračunava kao [1]:

$$E_\gamma = h\nu \quad (2)$$

gde je: $h = 6,62 \times 10^{-34}$ Js – Plankova konstanta,
 ν – frekvencija fotona.

U formuli (2) zanemaren je mali deo energije koji prima atom zbog uzmaka. Odigravanje fotoefekta na slobodnom elektronu je nemoguće jer zakon održanja energije i impulsa ne bi mogli istovremeno biti ispunjeni.

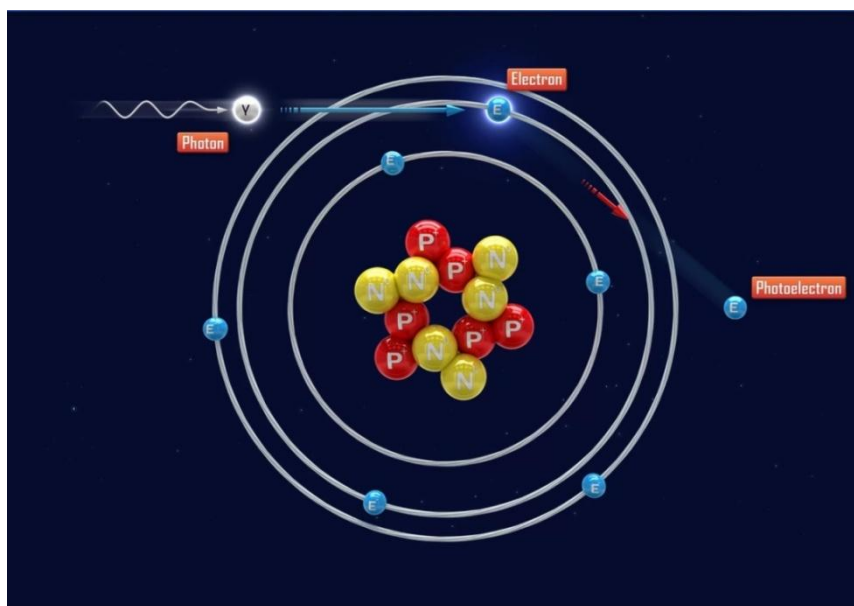
Izbačeni elektron će biti usporen u materijalnoj sredini, dok će njegova energija biti apsorbovana. S obzirom na to da izbačeni elektron za sobom ostavlja šuplinu u ljusci atoma, doći će do deekscitacije atoma emisijom X zraka ili Ožeevih elektrona. Ukoliko se ceo proces dešava u materijalu većeg rednog broja, X zraci će takođe biti apsorbovani.

Vrednost preseka za odigravanje fotoelektričnog efekta se može izraziti kao zavisnost od atomskog broja materijala Z i energije fotona E_γ kao [1]:

$$\sigma_{pe} = \text{const} \cdot Z^{4.5} \cdot E_\gamma^{-3}. \quad (3)$$

Izražena zavisnost od atomskog broja pokazuje da su materijali velikog rednog broja veoma efikasni pri apsorpciji fotona. Jaka zavisnost efikasnog preseka od energije fotona je razlog zbog koga je fotorelektrični efekat dominantan način interakcije pri niskim energijama, dok se na visokim energijama može zanemariti [1].

Na slici 2. dat je šematski prikaz fotoelektričnog efekta.



Slika 2. Fotoelektrični efekat - šematski prikaz

2.2.2. Komptonovo rasejanje

Komptonovo rasejanje predstavlja interakciju gama zraka sa materijom pri čemu se samo deo energije fotona apsorbira od strane elektrona, a ostatak energije se javlja kao sekundarni foton (slika 3.). Ovaj efekat je iniciran fotonima visoke energije. Komptonovo rasejanje se može odigrati i na slobodnom i na vezanom elektrону (čija energija veze je mnogo niža od energije upadnog fotona).

Primenom zakona održanja naelektrisanja i impulsa, moguće je dobiti relaciju za energiju rasejanog fotona [1]:

$$E_{rf} = \frac{E_{uf}}{1 + \frac{E_{uf}}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

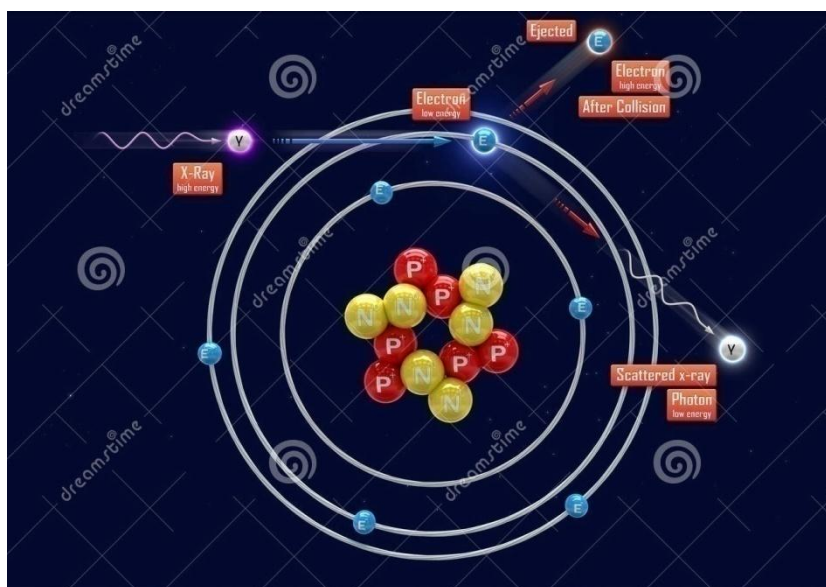
gde je: E_{rf} – energija rasejanog fotona,

E_{uf} – energija upadnog fotona,

m_e – masa elektrona,

θ – ugao između pravca kretanja upadnog i rasejanog fotona,

c – brzina svetlosti.



Slika 3. Komptonovo rasejanje - šematski prikaz

Energije rasejanog fotona i elektrona su povezane sa uglovima pod kojima su izbačeni. Ukoliko se sa E_e obeleži energija izbačenog elektrona i $\varepsilon = E_e/(m_0c^2)$, pri čemu je m_0c^2 energija mase mirovanja elektrona (iznosi 511 keV), energija sekundarnog elektrona je [1]:

$$E_{rf} = E_{uf} [1 + \varepsilon (1 - \cos \theta)], \quad (5)$$

dok je energija rasejanog elektrona [1]:

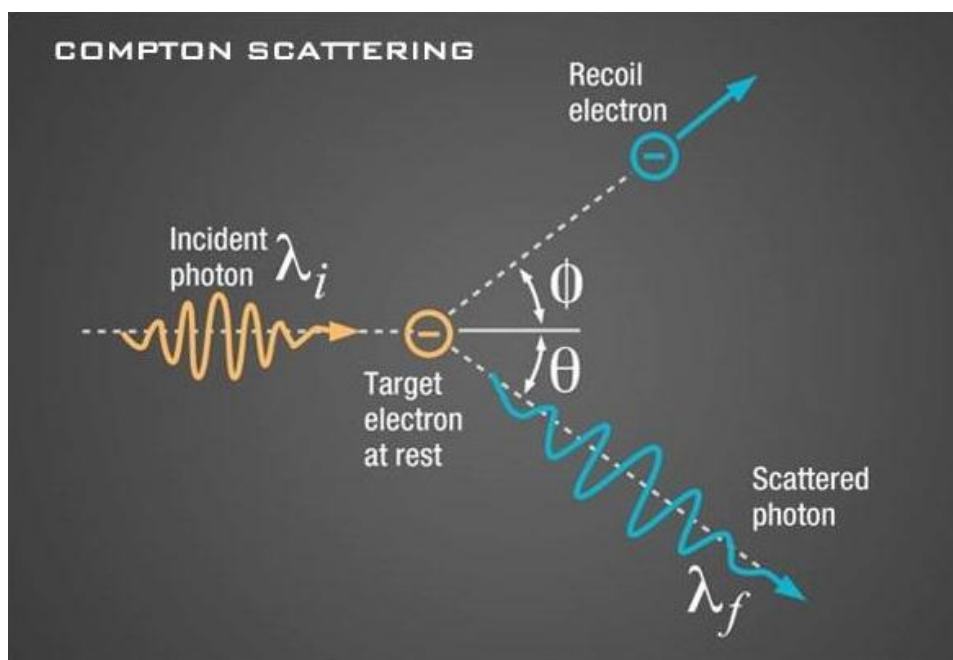
$$E_e = E_{uf} \left[1 - \frac{1}{1 + \varepsilon (1 - \cos \theta)} \right]. \quad (6)$$

Uglovi su povezani preko relacije [1]:

$$\tan\varphi = \frac{1}{1+\varepsilon \tan\frac{\theta}{2}}, \quad (7)$$

pri čemu je sa φ obeležen ugao između upadnog fotona i rasejanog elektrona, a sa θ ugao između upadnog fotona i rasejanog fotona [1].

Šematski prikaz Komptonovog rasejanja dat je na slici 3.



Slika 4. Komptonovo rasejanje - šematski prikaz

S obzirom na to da je jedan od produkata ovog procesa rasejani foton, ukupna energija upadnog fotona se ne deponuje na mestu prve interakcije. Za visokoenergijske fotone, energija oko 1 MeV, može nastati čitav niz Komptonovih rasejanja, pri čemu se kod svakog rasejanja smanjuje energija sekundarnog fotona. Lanac događaja će se odvijati sve dok se poslednji sekundarni foton ne apsorbira fotoelektričnim efektom [1].

Verovatnoća rasejanja fotona za neki ugao θ može se izraziti pomoću formule Klajna-Nišine [1]:

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1+\varepsilon(1-\cos\theta)]^2} \left(1 + \cos^2\theta + \frac{\varepsilon^2(1-\cos\theta)}{1+\varepsilon(1-\cos\theta)} \right), \quad (8)$$

pri čemu je sa r_e obeležen klasični radijus elektrona.

2.2.3. Stvaranje parova

Stvaranje parova je efekat koji se javlja za gama zrake energija iznad nekoliko MeV. U Kulonovom polju jezgra energija fotona se pretvara u par elektron-pozitron. Uslov da bi se odigralo stvaranje parova je da energija upadnog fotona bude znatno veća od dvostruke

energije koja odgovara masi elektrona u mirovanju ($2m_e c^2 = 1022 \text{ keV}$). Višak energije se raspoređuje između elektrona i pozitrona u vidu kinetičke energije ovih čestica [1].

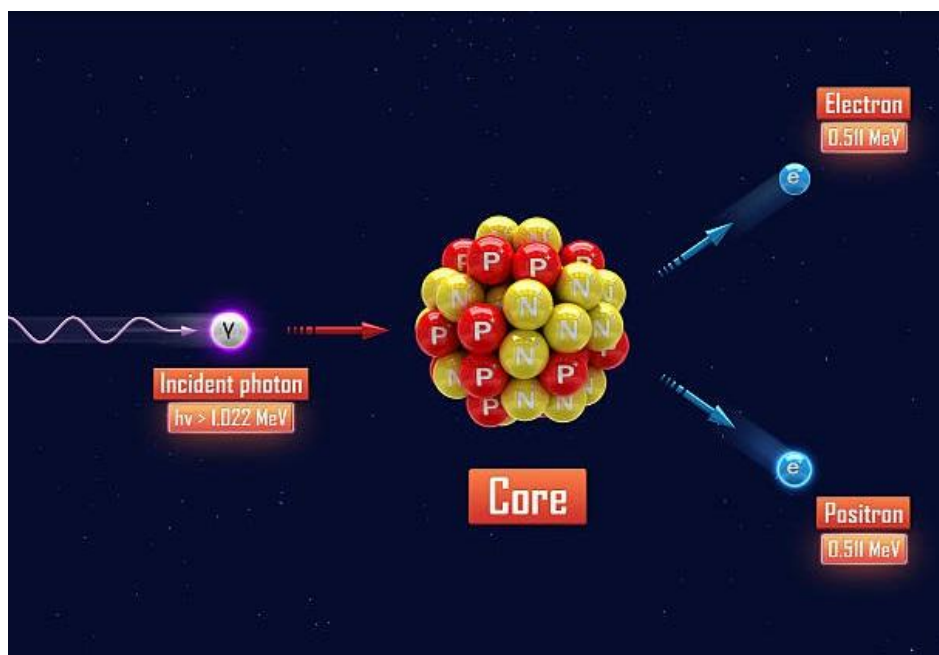
Relacija preseka za stvaranje parova [1]:

$$d\sigma = 4Z^2 r_e^2 \alpha \frac{dE_+}{(h\nu)^3} \left[(E_+^2 + E_-^2) \left(\frac{\Phi_1(\xi)}{4} - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right) + \frac{2}{3} E_+ E_- \left(\frac{\Phi_2(\xi)}{4} - \frac{1}{3} \ln Z - f(Z) \right) \right] \quad (9)$$

gde je: Z – atomski broj elementa,
 r_e – poluprečnik elektrona,
 E_+ - energija pozitrona,
 E_- - energija elektrona,
 Φ_1 i Φ_2 – funkcije ekraniranja
 $\alpha = 1/137$,
 $f(Z)$ – Kulonova korekcija.

Izražena je efikasnost zavisnost preseka za stvaranje parova od kvadrata atomskog broja Z .

Na slici 4. dat je šematski prikaz proizvodnje parova elektron-pozitron.



Slika 5. Proizvodnja parova - šematski prikaz

Elektron i pozitron se nakon kreacije usporavaju u okolnom materijalu. Elektron će vršiti jonizaciju materije i na taj način gubiti energiju. Pozitron će svoju energiju gubiti u materijalu, a kada svu energiju izgubi, doći će do anihilacije sa nekim elektronom, što će kao rezultat imati stvaranje para fotona energije 511 keV, koji će se razići pod uglom od 180° . Fotoni nastali na ovaj način će dalje stupati u interakciju sa materijom Komptonovim rasejanjem, a na kraju će celokupna energija fotona biti apsorbovana od strane materije, odnosno doći će do fotoelektričnog efekta.

2.2.4. Atenuacija fotona

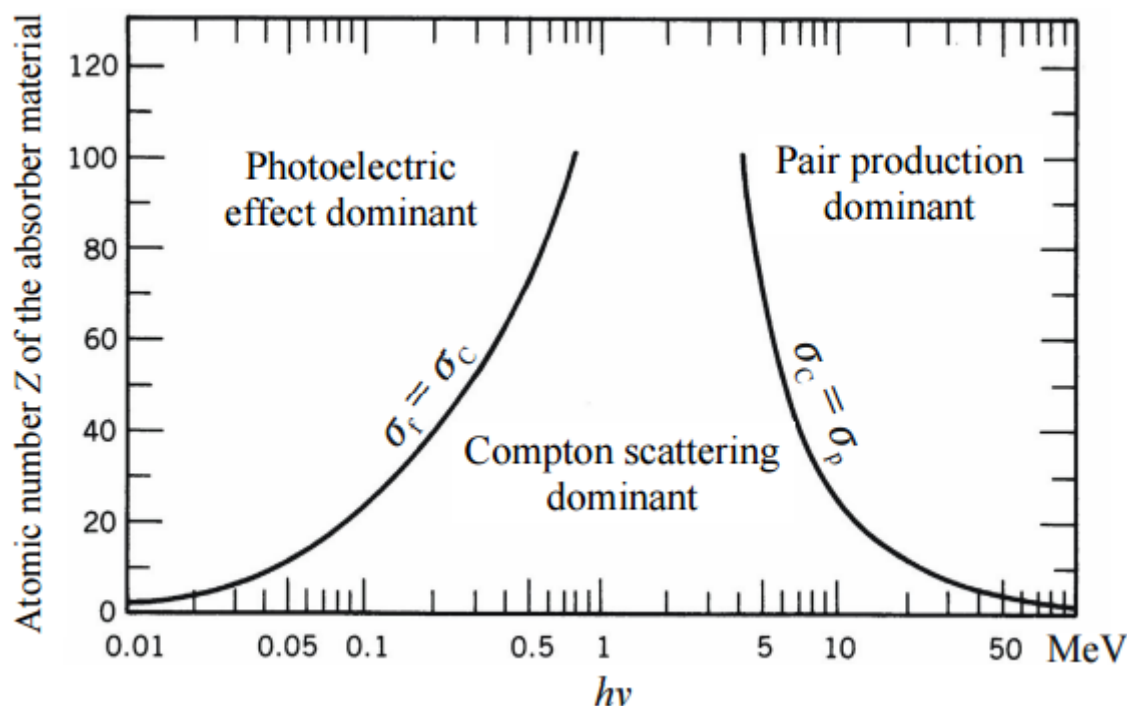
Kada snop monoenergetskih fotona upada na tanak sloj materijala, određen broj fotona i elektrona različite energije će izlaziti iz sloja. U gama spektrometriji od posebnog interesa je deo fotona koji su prodrli kroz material bez interakcije, te sačuvali prvobitnu energiju i pravac. [1] Fizička veličina koja se koristi pri opisivanju ovog događaja je atenuacioni koeficijent μ . Ukupni atenuacioni koeficijent μ je zbir tri linearna atenuaciona koeficijenta [1]:

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_C + \mu_p \quad (10)$$

gde je: μ_{pe} - linearni atenuacioni koeficijent za fotoelektrični efekat,
 μ_C - linearni atenuacioni koeficijent za Komptonovo rasejanje,
 μ_p - linearni atenuacioni koeficijent za stvaranje parova.

Broj propuštenih fotona N kroz sloj debljine t normalno na površinu, moguće je dobiti preko upadnog intenziteta snopa N_0 [1]:

$$N = N_0 e^{-\mu t}. \quad (11)$$



Slika 6. Oblasti preovlađivanja efekata interakcije gama zraka sa materijom

Na slici je prikazano koji efekat od do sada navedena tri preovlađuje u kojoj oblasti. Levom linijom je označena oblast u kojoj su koeficijenti za fotoelektrični efekat i Komptonovo rasejanje jednaki, a desna linija označava oblast gde su jednaki koeficijenti za Komptonovo rasejanje i stvaranje parova [1].

2.2.5. Ostali procesi

Pored navedenih procesa interakcije fotona sa materijom postoje i drugi, manje verovatni procesi. Rejljevo rasejanje na vezanom naelektrisanju i Tompsonovo rasejanje na slobodnom elektronu su procesi u kojima dolazi do promene pravca fotona bez gubitka energije.

Efikasni presek za Tompsonovo rasejanje dobijen je iz formule Klajna-Nišine [1]:

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} r_e^2. \quad (12)$$

Budući da se energija u ova dva procesa ne razmenjuje sa materijom, atomi nisu ekscitovani, niti jonizovani, a menja se samo prvobitni pravac zraka, rasejanje se naziva koherentno.

Postoje slučajevi interakcije fotona sa jezgrom putem rezonantnog nuklearnog rasejanja, pri čemu se energija fotona prenosi na jezgro, te ono dolazi u pobudjeno stanje. Pobudjeno stanje jezgro napušta emisijom jednog, ili više gama zraka, dok je ukupna emitovana energija jednaka energiji upadnog fotona umanjenoj za energiju veze jezgra. Ovakvo rasejanje se naziva Delbrukovo [1].

3. GAMA SPEKTROMETRIJA

Gama spektrometrija je veoma pogodna fizička metoda za ispitivanje sadržaja radionuklida, jednostavna je, brza i omogućuje određivanje koncentracije svih izvora zračenja u toku jednog merenja [2].

3.1. Izvori γ zraka

Pojmom “izvor” definisan je material koji sadrži atome koji emituju nuklearno i atomsko zračenje. Pored samih atoma emitera, pod ovim pojmom podrazumevaju se i nosači radioizotopa i materijali matriksa [1].

3.1.1. Tipovi izvora

Postoje dve glavne grupe izvora:

- **Radioaktivni izvori** – sadrže radioaktivne atome;
- **Izvori pobuđeni spoljašnjim zračenjem** – sadrže atome materijala koji nakon dejstva čestica ili fotona emituju γ zrake.

U odnosu na dimenzije, radioaktivni izvori se dele na tačkaste, površinske i prostorne. Precizno govoreći, svi izvori su prostorni, mada se mnogi mogu tretirati kao tačkasti ili površinski [1].

3.1.2. Geometrija izvor-detektor

Veoma je bitna geometrija izvora i međusobni položaj izvora i detektora koji će se koristiti tokom merenja. Neke od stavki na koje je potrebno obratiti pažnju pri odabiru geometrije izvor-detektor su:

- rastojanje izvor-detektor,
- montaža izvora,
- specijalne geometrije izvor-detektor,
- apsorberi,
- kolimatori.

Debljina izvora vrši značajan uticaj na dobijeni spektar. Povećanjem debljine, povećava se učestalost Komptonovog rasejanja što dovodi do smanjenja intenziteta registrovanih pikova. Budući da je veća atenuacija fotona sa nižom, nego fotona sa višom energijom, Komptonov efekat se češće odigrava na nižim energijama. Do atenuacije može doći i u materijalu između izvora i detektora. Oblik izvora i detektora i njihov međusobni položaj utiču na količinu materijala kroz koju zračenje prolazi. Prema tome, geometrija izvor-detektor, kao i

koncentracija i visina na kojoj je postavljen detektor predstavljaju bitne faktore koji utiču na dobijeni spektr [2].

3.2. Sprektri γ zraka

Cilj γ -spektrometrijskog merenja je određivanje energije i broja fotona emitovanih iz izvora, što se može iskoristiti za identifikaciju radionuklida prisutnih u izvoru i određivanje aktivnosti pojedinih činilaca [1].

Tri efekta na kojima se zasniva spektroskopija i detekcija zračenja uz pomoć poluprovodničkih detektora su:

- fotoelektrični efekat,
- Komptonovo rasejanje i
- stvaranje parova.

U osnovi, spektr fotona radioaktivnog izvora se sastoji od diskretnih linija izrazito male širine. Linija u finalnom sprekttru neće biti oštra, nego će imati specifičan oblik Gausove krive, nazvan vrh totalne apsorpcije (linija fotovrha). Pik totalne apsorpcije nastaje usled predaje cele energije fotona detektoru i izvor je korisnih informacija u γ -spektrometriji. Ostatak predstavlja kontinualni deo spektra koji se javlja kao neizbežna smetnja [1].

3.3. Spektralni fon

Fonski spektr je dobijen bez ispitivanog izvora, odnosno to je spektr zračenja koje potiče od okoline (u odsustvu izvora). Ovako definisan fon se naziva "fon okoline". Ukoliko se posmatraju γ zraci određene energije, fon se može definisati kao spektr koji se dobija kada bi bilo prisutno svo zračenje osim gama zraka date energije. Opšte prihvaćeno je da se pod pojmom "fon" podrazumeva sve što ne pripada spektralnoj liniji [1].

3.3.1. Komponente fona

Izvori fona γ detektora su:

- a) zračenje koje potiče iz okoline u kojoj se nalazi detektor (prirodna i veštačka radioaktivnost),
- b) eksterna radioaktivnost kao posledica sadržaja radioaktivnih izvora unutar građevinskih materijala,
- c) kontaminacija zaštite i materijala unutar nje γ emiterima,
- d) radon i njegovi potomci koji difunduju u šupljine zaštite,
- e) kosmičko zračenje [1].

Prirodna radioaktivnost se javlja iz tri radioaktivna niza koji počinju sa ^{232}Th , ^{238}U i ^{235}U . Pored ovih nizova, bitan je element ^{40}K , koji takođe značajno doprinosi prirodnoj radioaktivnosti.

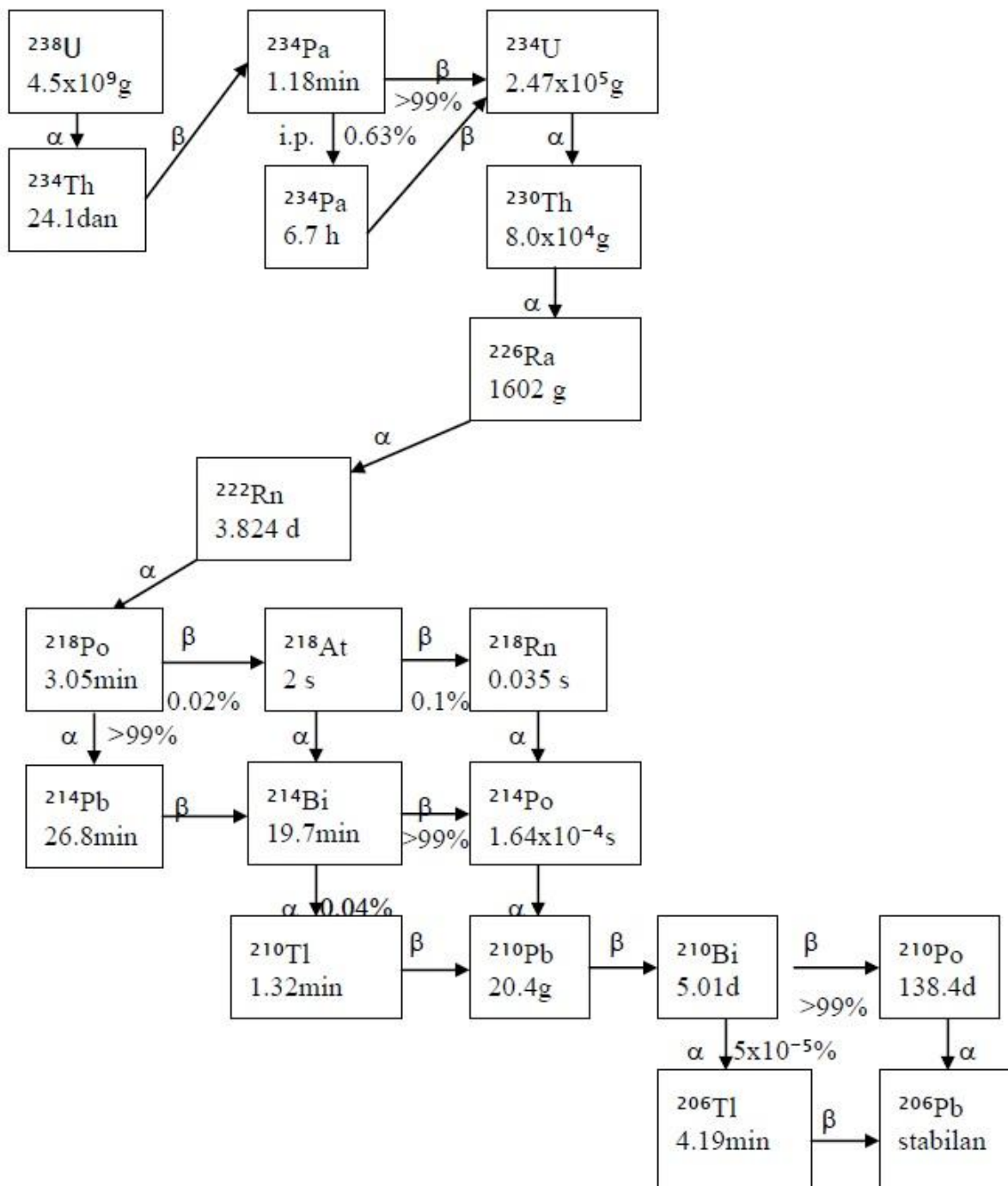
Uranijumov niz počinje sa ^{238}U , čiji je period poluraspada $T_{1/2} = 4,468 \times 10^9$ godina. Nakon niza alfa i beta-raspada, dobija se stabilni izotop ^{206}Pb . Prikaz uranijumovog niza dat je na slici 7.

Aktinijumov niz počinje izotopom ^{235}U , čiji je period poluraspada $T_{1/2} = 7,038 \times 10^8$ godina. Ime ovog niza potiče od toga što se ^{235}U nekada nazivao aktin-uran. Uranijumu ^{235}U je prethodio ^{239}Pu , koji se do danas raspao i ne postoji u prirodi. Niz se završava stabilnim izotopom ^{207}Pb . Prikaz aktinijumovog niza dat je na slici 8.

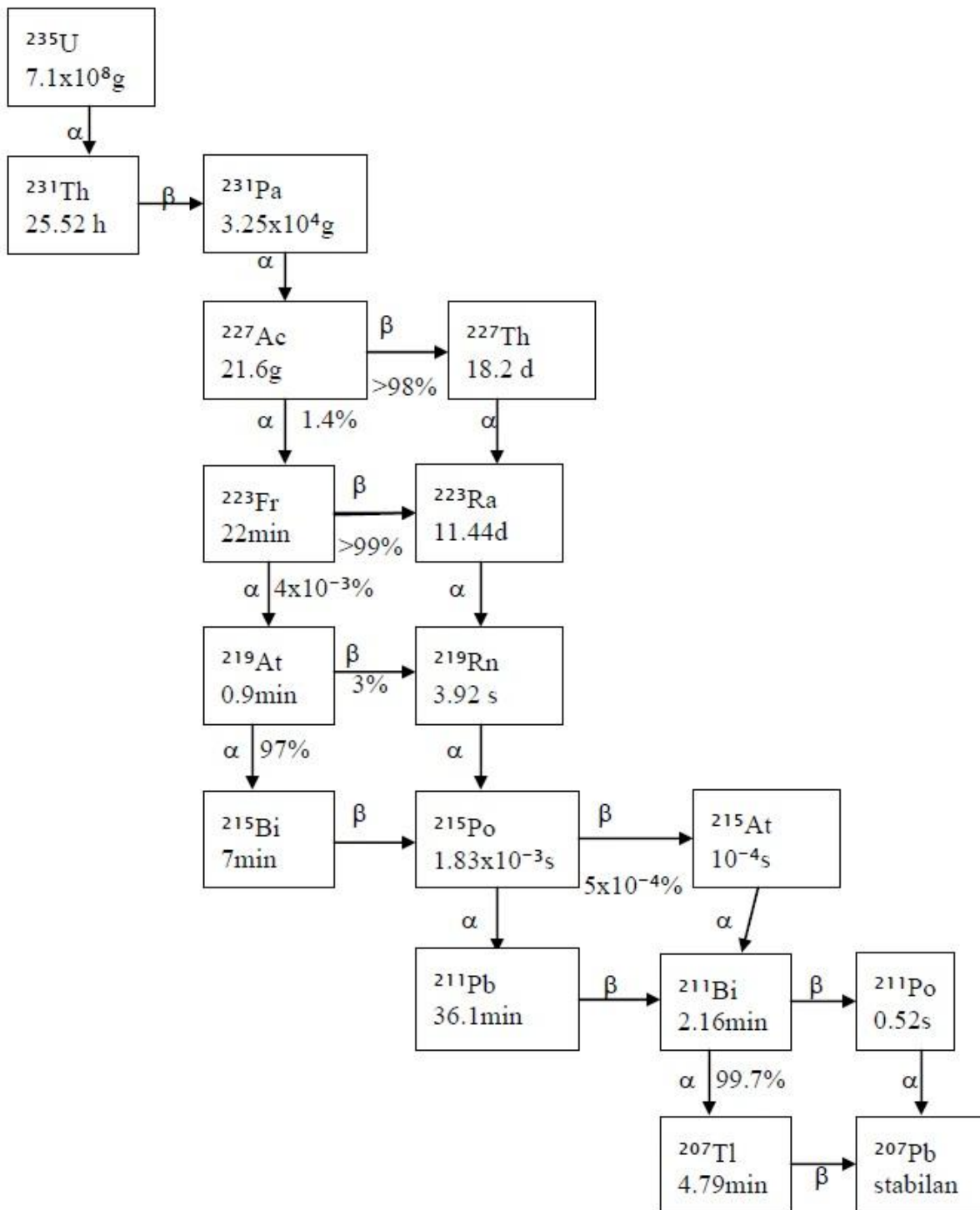
Torijumov niz započinje sa ^{232}Th , čiji je period poluraspada $T_{1/2} = 1,405 \times 10^{10}$ godina. Torijumov niz se završava stabilnim izotopom ^{208}Pb . Nekada, ovaj niz je počinjao ^{252}Cf , međutim, svi članovi niza koji prethode torijumu su se do danas raspali i ne postoje u prirodi. Prikaz torijumovog niza dat je na slici 9 [3].

Osim prirodne radiaktivnosti, fon iz okoline potiče i od radioizotopa stvorenih veštačkim putem. Veštačka radioaktivnost potiče od testiranja nuklearnog oružja, havarija na nuklearnim elektranama, a oslobađa se i prilikom redovnog održavanja nuklearnih postrojenja.

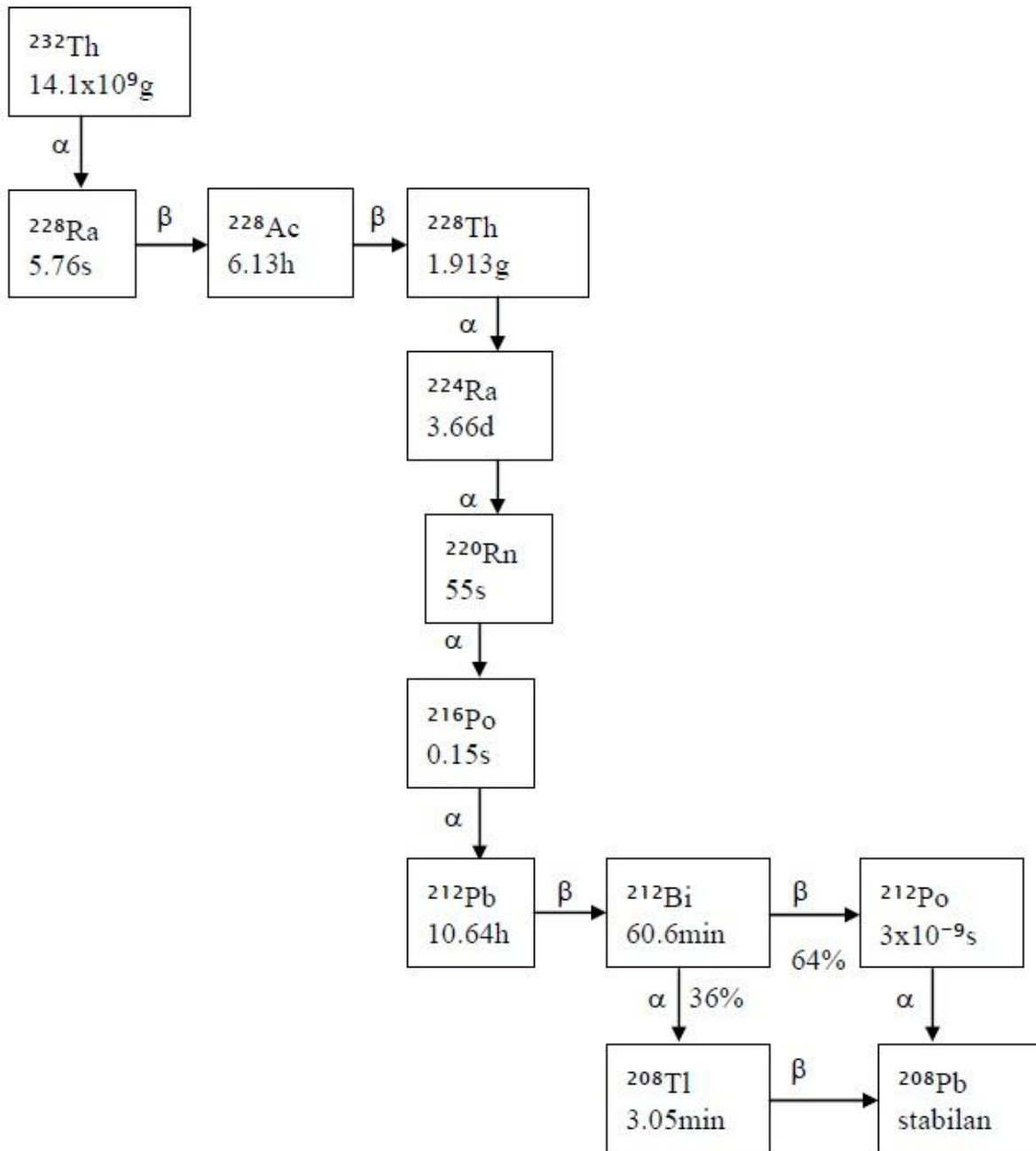
Kako bi se smanjio fon, od velike je važnosti odabir materijala od kojih će biti napravljena zaštita oko detektora. U cilju određivanja koncentracije potencijalnih radionuklida u materijalu primenjuje se gama spektrometrija, masena spektrometrija ili neutronska aktivaciona analiza. Radionuklidi koji se uglavnom mogu naći su ^{40}K , ^{232}Th i ^{238}U [2].



Slika 7. Uranijumov niz



Slika 8. Aktinijumov niz



Slika 9. Torijumov niz

Najvažniji materijal za izadu zaštite je olovo (Pb) zbog velike gustine, velikog rednog broja i povoljnih mehaničkih osobina. Tek proizveden Pb sadrži velike količine ²¹⁰Pb, što predstavlja nedostatak.

Na rezultate ispitivanja može da utiče i prisustvo radioaktivnog gasa radona. Radon se prenosi vazдушnim i vodenim putem. Posедуje izotope u sva tri prirodna radioaktivna niza (²²²Rn, ²¹¹Rn i ²¹⁰Rn), te je potrebno posebnu pažnju obratiti na njega [1]. Na koncentraciju radona u prostojii utiču vrsta građevinskog materijala, koncentracija radona u vodi, sastav tla na kome se nalazi građevina, meteorološki uslovi, kao i ventilacija prostorije [2].

Nadmorska visina laboratorije u kojoj je smešten spektrometerski sistem, karakteristike svih pafonskih slojeva iznad zaštite detektora, kao i dimenzije zaštite i vrsta materijala od kojeg je zaštita izrađena utiču na efekat kosmičkih zraka [4]. Čestice kosmičkog zračenja koje vrše najveći uticaj na fon su mioni i neutroni. Uticaj elektrona, protona i fotona se može zanemariti.

Kod ekstremno niskih brzina brojanja, neutroni iz prirodnih fisijih i (α,n) reakcija postaju značajni [4].

3.4. Analiza spektara

Pored vizuelnog metoda nalaženja vrhova koji se još uvek smatra najboljim načinom, ističu se automatske rutine, koje su važne pri analizi spektara sa velikim brojem pikova, ili pri analizi velikog broja spektara. Osetljivost svake metode se može podesiti tako da pronađe manji ili veći broj vrhova u posmatranom spektru. Ukoliko je metod podešen tako da pronalazi veliki broj malih pikova, dogodiće se to da će pronalaziti pored realnih, i više lažnih vrhova, koji zapravo predstavljaju statističke fluktuacije, ili druge strukture u kontinuumu. Interaktivni računarski programi imaju mogućnost obrade rezultata automatskog lociranja pikova izbacivanjem lažnih i dodavanjem propuštenih pravih vrhova na osnovu grafičke prezentacije spektra na ekranu [1].

Određivanje brzine emisije fotona iz izvora je jedan od glavnih ciljeva analize γ spektara. Prvo je potrebno da se odredi odbroj pod vrhom pune energije. Za određivanje odboja u upotrebi su metode koje se kreću od jednostavnog sabiranja odbroja u nekoliko kanala, do kompleksnih prilagođavanja nelinearnom metodom najmanjih kvadrata [1]. Jednostavnije metode se mogu uspešno iskoristiti za pojedinačne ili potpuno razdvojene vrhove u spektru. Ono što značajno utiče na kvalitet ispitivanja je izabrani metod, jer je površina vrha definisana metodom koji se koristi pri njenom izračunavanju.

Pored jednostavnijih metoda za određivanje površine pikova postoje i metode određivanja površine:

- prilagođavanjem analitičkih funkcija i
- analizom višestrukih vrhova [1].

Pri određivanju energije pikova, bitno je izvršiti energijsku kalibraciju. Svrha energijske kalibracije je dobijanje veze među pozicijama pikova u spektru i odgovarajućim energijama γ zraka.

Kalibracija se uglavnom radi pre prvog merenja. Vršiti se merenjem spektra koji potiče od radioaktivnog izvora koji emituje zračenje sa poznatim energijama (kalibracioni izvori) i povezivanjem izmerene pozicije vrhova sa odgovarajućim energijama. Kalibracioni izvori mogu se sastojati od jednog ili više radionuklida, sa jednom ili više energija γ zraka. Komercijalni setovi za kalibraciju obično sadrže tačkasto pakovane smeše radionuklida, ili

posebne izvore sa pojedinačnim radionuklidima. Bez obzira na odabir izvora, bitno je osigurati da kalibracione energije zahvataju čitav interval u kojem se koristi spektrometar [1].

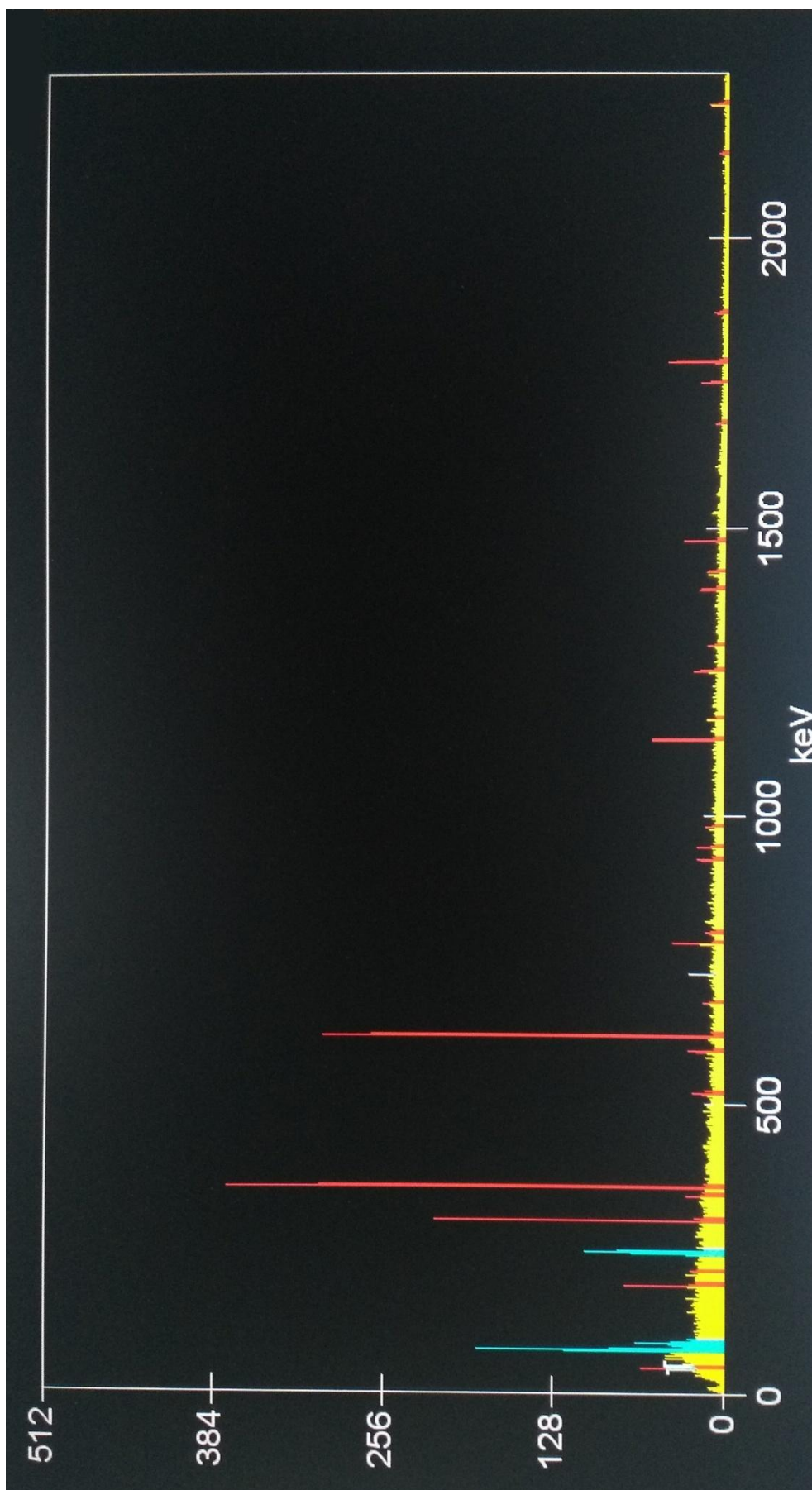
Kada se meri jačina slabih radioaktivnih izvora, tj. izvora kod kojih postoji brzina brojanja fona koja se ne može zanemariti, a njihov poluživot je duži od bilo kog razumno dugog vremena merenja, postoji mogućnost proizvoljnog povećanja preciznosti brzine brojanja, produžavajući vreme merenja. U brojnim primenama, kao što su fotoaktivacija, aktivaciona analiza, angularne distribucije, kada poluživot izvora i vreme merenja mogu biti jednakog reda veličine, postoji mogućnost definisanja nekog optimalnog vremena merenja. Ukoliko se ovako definisano vreme pretera, doći će do postepene degradacije prikupljene informacije o brzini brojanja zbog odbroja fona koji se dodaje odbroju već oslabljenog izvora [1].

Porebno je, pored vremena merenja, odrediti optimalnu visinu izvora oblika cilindra, čiji je poluprečnik fiksiran i uzet da bude jednak poluprečniku kape detektora.

Korišćenje izvora dužine veće od optimalne vrednosti pri merenju može dati bolju statističku tačnost zbog porasta brzine brojanja sa masom izvora. Istraživanja pokazuju da smanjenje dužine izvora za 50% ispod optimalne vrednosti ima kao posledicu gubitak brzine brojanja od 30%. Povećanjem dužine izvora 50% iznad optimalne vrednosti dobija se samo 6% veća brzina brojanja [1].

U eskperimentu rađenom za potrebe ovog rada nije se vršila ručna obrada i analiza spektara. Odbroj pod spektralnim linijama koje su karakteristične za određene radionuklide, kao i koncentracija aktivnosti radionuklida, određuje se obradom podataka u registrovanim spektrima na računaru, pomoću programa „Genie 2000”. Ovom metodom dobijaju se listinzi za svaki uzorak, sa kojih se vrši očitavanje koncentracije aktivnosti radionuklida. Na ovaj način dobijeni su podaci za 37 uzoraka veštačkih đubriva, na osnovu kojih je vršena dalja analiza.

Na slici 10., kao primer dat je dobijeni spektar za uzorak pod nazivom “ELIXIR”. Listing koji odgovara spektru pomenutog uzorka prikazan je na slici 11.



Slika 10. Dobijeni spektar za uzorak "ELIXIR"

9/6/2017 10:59:19 AM C:\GENIE2K\REPFFILES\SkratiGenije2s.exe (ver. 7/4/2014 11:52:46 AM) by J. Slivka:

RESUME OF CANBERRA GENIE2K SAMPLE REPORT

***** GAMMA SPECTRUM ANALYSIS *****

Filename: C:\GENIE2K\CAMFILES\2017M,L,W,B\2017 SPKTRI\BELIXIR7A7B.CNF

Report Generated On : 9/6/2017 10:59:09 AM

Sample Title : ELIXIR

Spectrum Description :

Sample Identification : BELIXIR7A7B

Sample Type : 7A+7B

Sample Geometry : 2

Peak Locate Threshold : 4.00

Peak Locate Range (in channels) : 20 - 16384

Peak Area Range (in channels) : 20 - 16384

Identification Energy Tolerance : 2.000 keV

Sample Size : 2.433E-001 kg

Sample Taken On :

Acquisition Started : 3/2/2017 12:57:26 PM

Live Time : 2433.7 seconds

Real Time : 2440.0 seconds

Dead Time : 0.26 %

Energy Calibration Used Done On : 2/3/2017

Efficiency Calibration Used Done On : 7/14/2010

Efficiency ID :

Background File : C:\GENIE2K\CAMFILES\pektri\2015M,L,W,B\2015BACK

No	Nuclide	NIDConf	MDA (Bq/kg)	activity(1s) (Bq/kg)	activity+-2s OR MDA (Bq/kg)
1	Be-7	0.000	42	0.00(4)E+03	<0.04E+03
2	K-40	0.995	41	490(28)	(0.49+-0.06)E+03
3	Co-60	0.000	5.0	0(5)	<5
4	CS-137	0.000	5.6	0(6)	<6
5	TL-208	1.000	10	30(6)	30+-11
6	PB-210	0.000	0.22E+03	0.00(22)E+03	<0.22E+03
7	BI-212	0.000	52	0.00(5)E+03	<0.05E+03
8	PB-212	0.994	4.9	36.3(25)	36+-5
9	BI-214	0.691	12	527(15)	(0.53+-0.03)E+03
10	PB-214	1.000	16	513(14)	513+-29
11	AC-228	0.921	17	46(7)	46+-13
12	TH-234	0.000	69	0.00(7)E+03	<0.07E+03
13	U-235	0.995	7.3	38(4)	38+-8
14	AM-241	0.000	14	0(13)	<14

Formula	activity(1sC) (Bq/kg)	cspdf	activity+-2sC (Bq/kg)
Ra226S-WMeanC(RA-226, PB-214, BI-214, PB-210)=	518(18)	2.95	(0.52+-0.04)E+03
Th232S-WMeanC(AC-228, RA-224, PB-212, BI-212)=	37.5(26)	1.26	37+-5
U235S-WMeanC(U-235, TH-227, BI-211)=	38(4)	-1.00	38+-8
U238S-WMeanC(TH-234, PA-234M, RA-226, PB-214, BI-214, PB-210)=	0.51(5)E+03	20.56	(0.51+-0.10)E+03
U238(234)-WMeanC(TH-234, PA-234M)=	0.00(7)E+03	-1.00	<0.14E+03
natural=Be7+K40+U235+Th232+U238=	1.07(7)E+03		(1.07+-0.14)E+03
artificial=	0(15)		<0.03E+03
total=natural+artificial=	1.07(7)E+03		(1.07+-0.14)E+03
buildint=K40/3000+Ra226/300+Th232/200=	2.08(6)		2.08+-0.13
buildext=K40/5000+Ra226/400+Th232/300=	1.52(5)		1.52+-0.09
buildfund=K40/8000+Ra226/700+Th232/500=	0.877(27)		0.88+-0.05
buildnodel=K40/50000+Ra226/4000+Th232/3000+artificial/10000=	0.152(5)		0.152+-0.010

UNIDENTIFIED PEAKS (1s<10%):

Energy (keV)	cps	cps1s%
72.49	3.9295E-001	4.08
74.78	6.3274E-001	3.06
85.14	2.0376E-001	5.89
241.63	4.1070E-001	3.59
1735.15	6.5332E-002	9.54
1771.17	2.5475E-001	4.89

Slika 11. Listing sa podacima za uzorak "ELIXIR"

U tabeli 1., prikazana je identifikacija pikova iz spektra na slici 10.

E_{γ} [keV]	Radionuklid
85	^{228}Th
185.5	^{226}Ra
241.5	^{214}Pb (potomak ^{226}Ra)
295.2	^{214}Pb (potomak ^{226}Ra)
352	^{214}Pb (potomak ^{226}Ra)
583.3	^{208}Tl (potomak ^{228}Th)
609.2	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
665.6	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
767.8	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
785.6	^{212}Bi (potomak ^{228}Th)
932.9	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
1118.3	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
1236.6	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
1280.3	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
1376.8	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
1407.9	^{214}Bi (potomak ^{226}Ra)
1461.4	^{40}K

Tabela 1. Identifikacija radionuklida u spektru uzorka "ELIXIR"


Primer listinga podataka ispitivanog uzorka, zavedenog pod brojem: 05-GM-62621/11, sa mišljenjem o mogućnosti korišćenja ispitivanog uzorka u izradi veštačkog đubriva dat je na slici 12.



Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno-matematički fakultet
Departman za fiziku
Katedra za nuklearnu fiziku

**Laboratorija za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i
doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja**

21000 Novi Sad, Trg D.Obradovića 4
TEL:021 455 318
FAX:021 459 367
Žiro račun: 840-1711666-19



Broj: 05-GM-62621/11 Datum: 21.02.2011.

REZULTATI GAMA-SPEKTROMETRIJSKE SUPERANALIZE

Podnosilac zahteva:	GRANIČNA FITOSANITARNA INSPEKCIJA, SUBOTICA ŽELEZNIČKA STANICA SUBOTICA, BROJ 321-02-56-36-36/2011-05
Datum uzorkovanja:	15.02.2011.
Uzorak:	MAP (monoamonijum fosfat) 12:52 (sirovina)
Prevozno sredstvo :	7 vagona prema specifikaciji
Količina:	325250 kg
Poreklo:	UKRAJINA
Uvoznik:	PROFESSIONEL MAX D.O.O., Valjevska 22, SOMBOR

Na osnovu rezultata nisko-fonske gama-spektrometrijske superanalize standardnom metodom ASTM E181-98/03 određena je koncentracija aktivnosti radionuklida u uzorku:

radionuklid	koncentracija aktivnosti [Bq/kg]
¹³⁷ Cs	< 1.4
²²⁶ Ra	15±4
²³² Th	6±1
⁴⁰ K	43±4
²³⁸ U	1056±22

MIŠLJENJE:
Uzorak sadrži **povećanu** koncentraciju aktivnosti radijuma i urana.
Na osnovu Pravilnika o granicama radioaktivne kontaminacije životne sredine i o sprovođenju dekontaminacije ("Sl. List SRJ" 9/99), predmetni materijal se **MOŽE KORISTITI SAMO KAO** komponenta za izradu veštačkog đubriva.

Slika 12. Listing uzorka 05-GM-62621/11

4. DETEKTORI ZRAČENJA

Detektori zračenja predstavljaju uređaje koji služe za registrovanje jonizujućeg ili neutronske zračenja, kao i za merenje bitnih osobina zračenja. Najjednostavniji detektori daju informaciju da li je neki prostor izložen zračenju ili ne. Malo komplikovaniji detektori imaju mogućnost merenja jedne ili više osobina zračenja. Fizičke veličine kojima se zračenje kvantitativno i kvalitativno opisuje su intenzitet zračenja, njegov tip, energija, ukoliko se o česticama radi, meri se i brzina, masa, naelektrisanje, srednji život, spin, magnetni momenat.

Detektor je zapravo objekat u kom se dešava interakcija zračenja sa materijom. Detektor pretvara merenu ulaznu veličinu u električni signal, koji je uglavnom male snage, te je potrebna priprema elektronskih pojačavača za obradu signala. Elektronski pojačavači se koriste za dobijanje standardnog signala koji je pogodan za dalju obradu. Materijal pogodan za dobijanje merljivog signala može biti običan gas, poluprovodnik, pothlađena vodena para, scintilator, pregrejana tečnost, filmska emulzija, itd. Osetljiva zapremina detektora može biti od nekoliko kubnih milimetara (fotoemulzija), preko Gajger-Milerovih brojača čija osetljiva zapremina iznosi nekoliko desetina kubnih centimetara, pa sve do aktivne zapremine detektora koji se koristi u Super-Kamiokande eksperimentu koja iznosi 50000 tona vode [5].

Jedna od podela detektora je na integralne i diferencijalne detektore.

- **Integralni detektori** služe za merenje ukupnog efekta koje zračenje ostavlja prolaskom kroz sredinu. Često se koriste kao dozimetri, odnosno uređaji koji mere energiju koju zračenje preda materijalu.
- **Diferencijalni detektori** registruju pojedinačne čestice zračenja. Mogućnost ovih detektora je brojanje čestica koje dođu do detektora. Složeniji detektori imaju mogućnost određivanja energije detektovane čestice.

Podela detektora u zavisnosti od informacije koju nude, vrši se na električne i optičke.

- **Električni detektori** proizvode kratkotrajni naponski električni signal koji nastaje kao posledica interakcije zračenja sa osetljivom zapreminom detektora. Električni signal potiče kako od naelektrisanja koje se stvara prolaskom zračenja kroz detektor, tako i od transformacije svetlosne energije koja se emituje usled Čerenkovljevog efekta ili scintilacija. Električni detektori služe za određivanje broja električnih signala koji nastaju usled registrovanja pojedinih čestica, njihovog tipa, energije, naelektrisanja, brzine, mase itd.
- **Optički detektori** prikazuju putanju kojom se kretala čestica upadnog zračenja, a takođe i putanju sekundarnih čestica, nastalih interakcijom materijalne sredine sa upadnim česticama, koje su dobile dovoljnu energiju da vrše jonizaciju. Pored ovoga, optičkim detektorima je moguće odrediti pravac kretanja čestica, interakcije u koje je stupala, geometrijske uslove pod kojima su se ove interakcije odvijale [5].

4.1. Osnovne karakteristike detektora

U osnovne karakteristike detektora spadaju:

- efikasnost,
- energetska rezolucija,
- vremenska rezolucija,
- efikasna zapremina,
- osetljivost,
- masena ili električna rezolucija.

Kvalitet se detektoru pripisuje u zavisnosti od toga u kolikoj meri poseduje prethodno nabrojane karakteristike [5].

4.1.1. Efikasnost detektora

Efikasnost detektora je fizička veličina koja pokazuje verovatnoću detektovanja nuklearne čestice koja prolazi kroz detektor, odnosno to je broj registrovanih događaja u odnosu na ukupan broj događaja. U detekciji zračenja razmatraju se dve vrste efikasnosti: apsolutna efikasnost i spopstvena efikasnost detektora.

Apsolutna ili totalna efikasnost predstavlja odnos broja registrovanih događaja i ukupnog broja događaja [2]:

$$\epsilon_{\text{tot}} = \frac{N_R}{N_U} \quad (13)$$

gde je: ϵ_{tot} – apsolutna efikasnost,
 N_R – broj registrovanih događaja,
 N_U – broj ukupnih događaja.

Spostvena efikasnost predstavlja odnos registrovanih događaja sa brojem događaja koji su realno pogodili detektor [2]:

$$\epsilon_{\text{int}} = \frac{\text{broj registrovanih događaja}}{\text{broj događaja koji pogađa detektor}} \quad (14)$$

gde je: ϵ_{int} – sopstvena efikasnost detektora.

4.1.2. Osetljivost detektora

Osetljivost detektora je sposobnost detektora da registruje niske intenzitete zračenja. Detektori su dizajnirani da budu osetljivi na određenu vrstu zračenja u određenom energetskom području. Osetljivost detektora zavisi od:

- efikasnog preseka za jonizujuće zračenje unutar detektora

- mase detektora,
- inherentnog detektorskog šuma,
- zaštitnog materijala koji okružuje osetljivu zapreminu detektora [2].

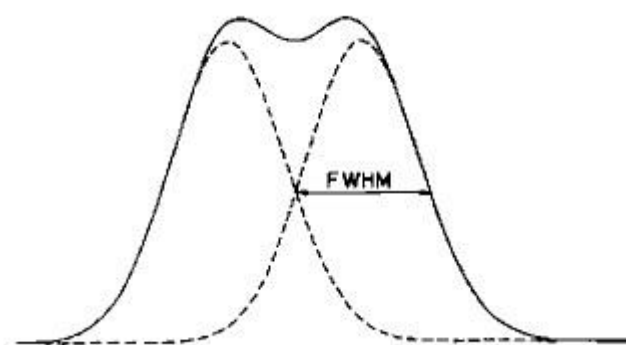
4.1.3. Energetska rezolucija detektora

Energetska rezolucija detektora je sposobnost da razlikuje dve čestice bliskih energija. U idealnom slučaju, svaka energija bi bila predstavljena jednim pikom delta funkcije, ali u realnosti svaki pik ima oblik Gausove raspodele sa konačnom širinom. Rezolucija se uglavnom navodi u odnosu na poluširinu maksimuma i dve energije koje upadaju u ovaj interval se smatraju nerazloživim. Relativna rezolucija R na energiji E izračunava se kao [2]:

$$R = \frac{\Delta E}{E} \quad (15)$$

gde je: ΔE – poluširina maksimuma.

U većini slučajeva, rezolucija se izražava u procentima. Germanijumski detektor ima rezoluciju reda 0.1%.



Slika 13. Definisane energetske rezolucije

4.1.4. Vremenska rezolucija i mrtvo vreme

Vremenska rezolucija je vreme koje je potrebno da protekne kako bi detektor nakon registrovanja jedne čestice mogao da detektuje narednu česticu i registruje je kao nezavisan događaj. Proticanje izvesnog vremena pre nego što je detektor u stanju da, nakon detekcije jedne čestice, registruje sledeću česticu je neizbežno.

Vreme za koje detektor nije u stanju da detektuje česticu se naziva mrtvo vreme. Cilj je da mrtvo vreme bude što kraće. Nakon mrtvog vremena detektor određeni vremenski period može da detektuje događaje samo sa smanjenom efikasnošću. Ovo vreme se naziva vreme oporavka. Tek nakon isticanja vremena oporavka detektor je u stanju da radi sa normalnom osetljivošću. Mrtvo vreme je vreme koje je potrebno detektoru da obradi neki događaj i uglavnom je povezano sa dužinom trajanja strujnom signalu [2].

4.1.5. Efikasna zapremina

Efikasna zapremina predstavlja zapreminu prostora koji može da proizvede neki signal, ili pokaže trag kojim su se kretale čestice tokom interakcije sa materijom.

4.1.6. Masena ili električna rezolucija

Masena, odnosno električna rezolucija predstavlja sposobnost razlikovanja bliskih masa, odnosno naelektrisanja.

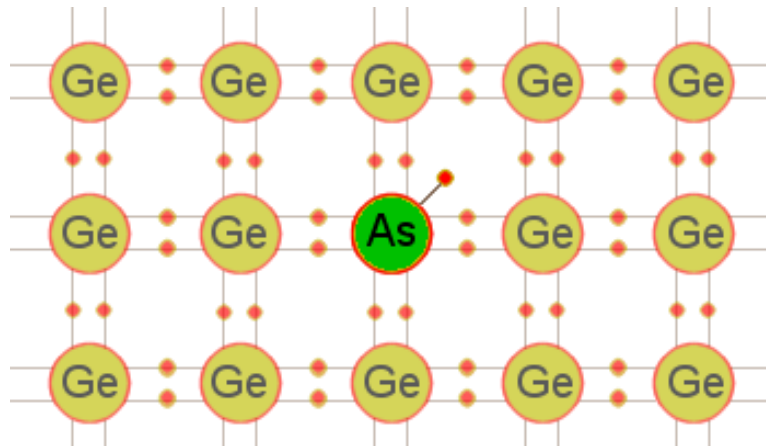
4.2. Poluprovodnički detektori

Prvi uslov da bi neki čvrsti materijal bio korišćen u ulozi aktivne zapremine detektora koja će imati mogućnost stvaranja i prikupljanja naelektrisanja je da se naelektrisanja mogu lako razdvojiti, pod uticajem zračenja, udaljavanjem od atoma. Drugi uslov je da električno polje u koje se postavi materijal ne pokreće ni jedno naelektrisanje osim onog koje je zračenje stvorilo. U provodnicima se jednostavno mogu osloboditi elektroni iz metalne veze, te oni ispunjavaju prvi uslov. Drugi uslov zadovoljavaju izolatori, jer su u njima elektroni čvrsto vezani i teško se pokreću pod dejstvom električnog polja. Materijali koji istovremeno mogu posedovati osobine provodnika i izolatora su poluprovodnici.

Prvi poluprovodnički detektori su počeli da se koriste krajem šezdesetih godina dvadesetog veka. Pored toga što je efikasnost detekcije poluprovodničkih detektora izrazito viša nego kog gasnih brojača, glavna prednost se ogleda u njihovoj veoma visokoj energijskoj rezoluciji.

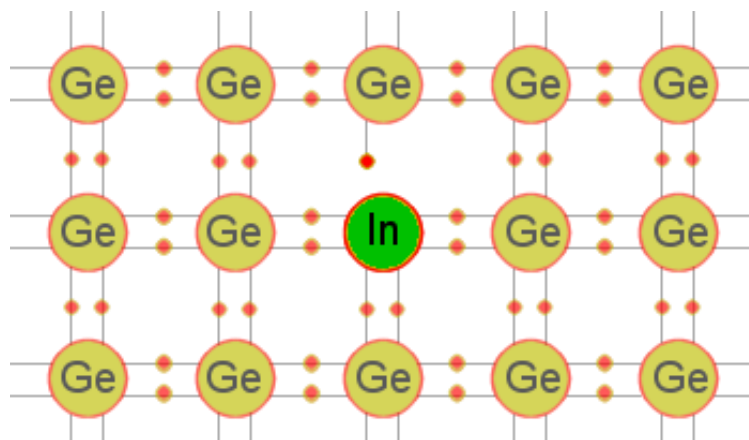
Poluprovodnici su materijali koji se po provodnim karakteristikama nalaze između provodnika i izolatora. Na primer, Ge i Si, koji se na sobnoj temperaturi nalaze u čvrstom stanju, u vidu čvrstih kristala, slabo provode struju. Ovi elementi su četvorovalentni, te im u kristalnoj rešetki sva četiri valentna elektrona grade kovalentne veze sa susednim atomima. Jedan elektron na svakih 10^9 može da napusti vezu i da nastavi slobodno da se kreće između atoma na sobnoj temperaturi. Pod uticajem električnog polja, slobodni elektroni se mogu usmeravati, te se na ovaj način ostvaruje provodnost. Napuštanjem veze, elektron za sobom ostavlja prazno mesto, nazvano šupljina. Upraznjeno mesto može da popuni neki drugi elektron, ostavljajući šupljinu na mestu sa kog je prešao. Novu šupljinu popunjava naredni elektron. Na ovaj način dolazi do pomeranja šupljine, odnosno pozitivnog naelektrisanja, u smeru suprotnom od smera kretanja elektrona [5].

Provodna dejstva poluprovodnika se značajno mogu poboljšati dodavanjem primesa. Ukoliko se u kristalnu rešetku koju čine atomi Ge (ili Si) doda petovalentni atom As (ili P), dobija se **poluprovodnik n-tipa**. U kovalentne veze u kristalnoj rešetki (prikazanoj na slici ispod) su uključena četiri valentna elektrona primeše, dok je peti elektron ne učestvuje u vezama. Peti elektron u kristalu Ge postaje slobodan dovođenjem energije od 0.01 eV, za razliku od energije potrebne da elektron napusti kovalentnu vezu u čistom kristalu Ge koja iznosi 1 eV.



Slika 14. - Šematski prikaz rasporeda kovalentnih veza u slučaju kada se u poluprovodnik Ge unesu atomi primese As

Pored poluprovodnika n-tipa postoji i **poluprovodnik p-tipa**. Ovaj tip poluprovodnika se dobija dodavanjem trovalentnog atoma primese (npr. In) u kristalnu rešetku. Jedna od četiri kovalentne veze ostaje nepopunjena. Elektroni koji se nalaze u okolini lako se mogu premeštati kako bi ovu šupljinu popunili, iako im je energija mnogo manja od energije potrebne za prelazak u provodni nivo. Kao i kod poluprovodnika p-tipa, u poluprovodnicima n-tipa je dovoljno da elektron poseduje energiju od 0.01 eV kako bi popunio šupljinu. Dolazi do prostornog kretanja naelektrisanja, odnosno provođenja struje bez predaje energije elektronu potrebne za dolazak u provodni nivo.

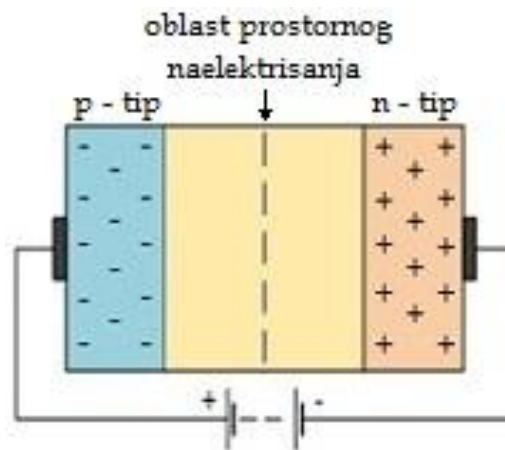


Slika 15. – Šematski prikaz rasporeda kovalentnih veza u slučaju kada se u poluprovodnik Ge unesu atomi primese In

Spajanjem p i n poluprovodnika, doći će do difundovanja elektrona iz n-tipa u p-tip poluprovodnika kako bi popunili postojeće šupljine. Nakon nekog vremena, stvara se višak pozitivnog naelektrisanja u n-tipu poluprovodnika, a višak negativnog naelektrisanja u poluprovodniku p-tipa u oblasti blizu spoja. Ovo će trajati sve do trenutka kada se stvori električno polje dovoljnog potencijala da spreči dalju raspodelu naelektrisanja. Potencijal stvoren na ovaj način se naziva kontaktni potencijal. Deo poluprovodnika oko spoja u kome se dešavaju difuzioni procesi se naziva oblast prostornog naelektrisanja. Prolaskom zračenja kroz oblast prostornog naelektrisanja, dolazilo bi do jonizacije i stvarali bi se nosioci naelektrisanja koje bi difuzijom stvoreno električno polje usmeravalo na suprotne strane.

Kako bi se ovo naelektrisanje pokupilo dovoljno bi bilo postaviti elektrode na krajeve ovog spoja.

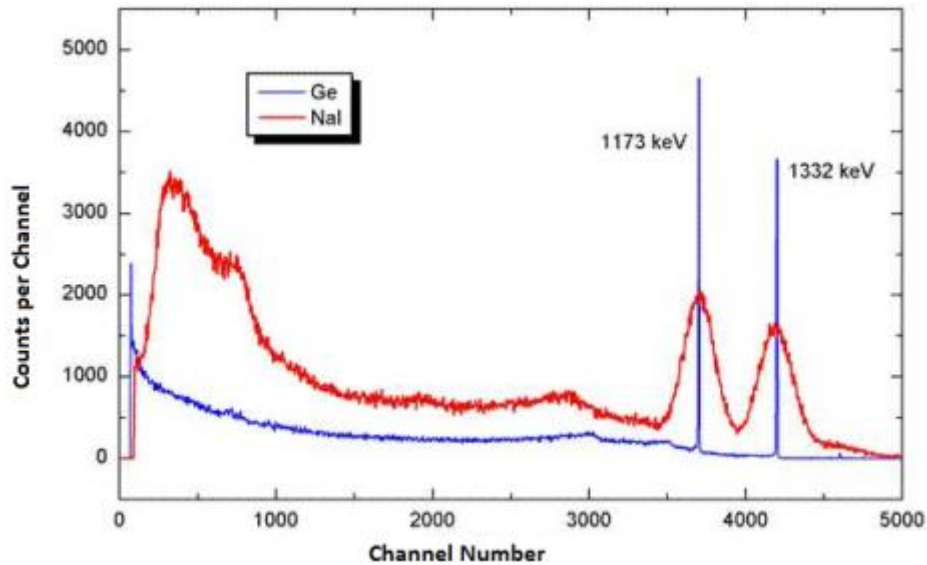
Dovođenjem napona na krajeve p-n spoja, odnosno povezivanjem poluprovodnika p-tipa na negativni, a poluprovodnika n-tipa na pozitivni potencijal, kao što je prikazano na slici 16., dobila bi se inverzno polarisana dioda sa znatno pojačanom oblašću prostornog naelektrisanja. Električno polje je, u odnosu na slučaj kada p-n provodnik nije povezan na izvor napona, mnogo jače. Elektroni i šupljine, nastale prolaskom zračenja kroz oblast prostornog naelektrisanja, se mogu mnogo efikasnije pokupiti električnim poljem. Sakupljeno naelektrisanje potom stvara električni signal na nekom otporniku.



Slika 16. Poluprovodnički detektor kao inverzno polarizovani p-n spoj

Ono što poluprovodnike čini znatno efikasnijim od gasnih brojača jeste gustina poluprovodničkih materijala koja je nekoliko redova veličine veća od gustine gasova gasnih brojača. Efikasnost poluprovodničkih detektora može dostići vrednost i od 100% za čestice niskih energija. Silicijumski detektori sa litijumom kao primesom se koriste za detektovanje rendgenskog i gama zračenja niskih energija. Gama račenje viših energija se meri detektorima izrađenim od germanijuma [5].

Energija potrebna za stvaranje jednog jonskog para u poluprovodniku je mnogo niža od energije potrebne za stvaranje jonskog para u gasu ili scintilatoru. Ova razlika ima za posledicu to da će količina naelektrisanja stvorena prolaskom čestice kroz poluprovodnik biti mnogo veća od količine koju bi ova čestica stvorila u gasnom detektoru. Količina naelektrisanja koju čestica zračenja stvori potpunim zaustavljanjem u aktivnoj zapremini detektora direktno je proporcionalna njenoj energiji. Greška pri merenju energija čestica posledica je, uglavnom, fluktuacija količine naelektrisanja koju detektor skupi tokom merenja. Što je veća količina prikupljenog naelektrisanja, doprinos ovakvih fluktuacija je manji. Budući da je količina naelektrisanja koju čestica zračenja stvara u poluprovodničkom detektoru znatno veća od količine naelektrisanja koje se stvori u gasnom detektoru, greške pri merenju energije čestice poluprovodničkim detektorom će biti mnogo niže.



Slika 17. Izgled spektara gama zračenja merenih poluprovodničkim (Ge) i scintilacionim (NaI) detektorom

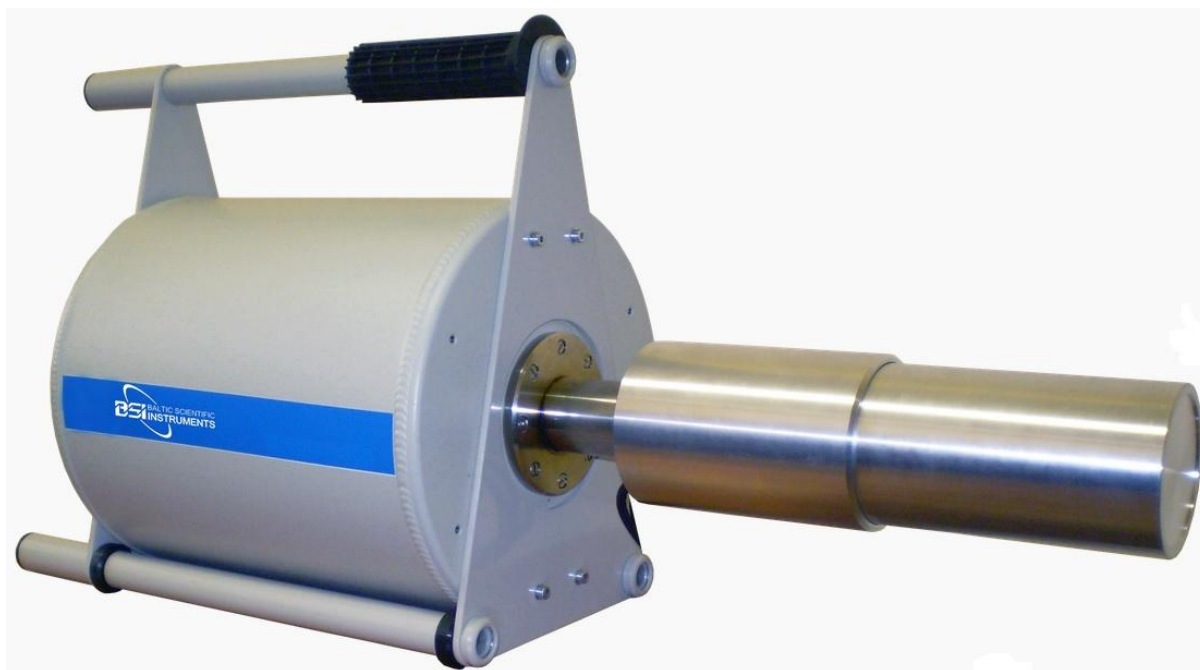
Na slici 17. plavom linijom prikazan je spektar dobijen poluprovodničkim detektorom, dok je crvenom linijom obeležen spektar snimljen scintilacionim detektorom. Glavna razlika između ovih spektara je širina pika, koja je u slučaju poluprovodničkog detektora mnogo manja od širine pika dobijenog pomoću scintilacionog detektora. Zaključuje se da poluprovodnički detektor ima značajno veću sposobnost razdvajanja veoma bliskih energija upadnih čestica u dva pika nego scintilacioni (NaI) detektor [5].

4.2.1. Ge spektrometri

Prednost germanijumskih detektora su veliki uzorci, mase reda 1 kg, za koje uglavnom, zahvaljujući velikoj prodornoj moći fotona, nije potrebna velika priprema. Fon je značajno smanjen njihovom visokom rezolucijom koja daje sigurnu indentifikaciju γ zraka, omogućavajući simultano određivanje koncentracije aktivnosti pojedinačnih radionuklida u smeši. Mala ukupna efikasnost, koja iznosi samo nekoliko procenata, predstavlja glavni nedostatak u odnosu na druge vrste detektora.

Za stvaranje para elektron-šupljina nije potrebna visoka energija, što dovodi do toga da se na sobnoj temperaturi pojavljuje visok šum niskih naponskih signala koji potiču od naelektrisanja stvorenog i bez prisustva zračenja. Kako bi se otklonio ovaj šum, potrebno je poluprovodnički kristal hladiti do temperature tečnog azota.

Danas su u uporebi u γ spektrometriji najzastupljeniji HPGe (High Purity Germanium) detektori. HPGe detektori su napravljeni od kristala koji sadrže jedan atom primese na 10^{10} atoma germanijuma u kubnom centimetru. Prednost ovih detektora je to što se ne moraju konstantno održavati na niskim temperaturama, nego samo tokom merenja. HPGe detektori pružaju mogućnost merenja visoke energetske rezolucije u opsegu od nekoliko keV do 10 MeV.



Slika 18. Prenosivi HPGe detektor

Tipovi HPGe detektora podeljeni prema energetsom opsegu u kom funkcionišu su:

- Koaksijalni detektori – detektori sa najširim energetsom opsegom. Koriste se za detekciju čestica energija od 3 keV do preko 10 MeV. Obično su cilindri sa n-krajem na spoljašnjoj površini, dok se p-kraj nalazi u sredini duž ose. Otporni su na štetu koju mogu da načine brzi neutroni. Bitna prednost ovih detektora je

mogućnost detektovanja fotona duž glavne ose cilindra, kao i preko cele bočne površine, te je verovatnoća interakcije značajno povećana.

- Polu-planarni detektori – koriste se u opsegu od 5 keV do nekoliko stotina keV. Oblik ovih detektora je cilindričan, pri čemu je širina veća od dužine. Do detekcije fotona dolazi samo na jednoj površini. U energetsom opsegu u kom se koriste imaju izraženu i značajno veću rezoluciju od koaksijalnih detektora. U svom radnom opsegu su nezamenljivi i zbog odličnog tajminga.
- Detektori X-zraka – koriste se za merenje energija od 500 eV do preko 60 keV. Bez obzira na male dimenzije, ovi detektori poseduju najbolju energetska rezoluciju među poluprovodničkim detektorima [2].

4.2.2. Niskofonski Ge spektrometri

Merenje niskih aktivnosti se koristi u razne svrhe, od kontrole kontaminacije prehrambenih proizvoda, do proučavanja fundamentalnih procesa u fizici i astrofizici. Najvažniji detektori za ovu tehniku su upravo poluprovodnički Ge spektrometri.

Fon Ge detektora koji se koriste u površinskim i plitko ukopanim laboratorijama prouzrokovan je kosmičkim zračenjem, odnosno njegovim primarnim česticama i sekundarnim zračenjem izazvanim od strane ovih čestica u štiti i materijalima unutar njega.

Glavne karakteristike spektara fona niskofonskih Ge sistema u laboratorijama na površini su:

- širok vrh od miona, na oko 45 MeV u Ge diodama zapremine 200 cm^3 ,
- kontinuum proizveden fotonima i elektronima, koji su sekundarno ili tercijarno zračenje miona i protona, koji se proteže od najmanjih do najvećih visina impulsa,
- anihilacioni vrh na 511 keV,
- γ vrhovi proizvedeni neutronima preko niza procesa u raznim materijalima.

Vrhovi prvobitnih i antropogenih radionuklida u spektrima dobrih niskofonskih sistema su sasvim slabi, ili potpuno odsutni [1].

Stepen radiočistoće detektorske konstrukcije je od velike važnosti. Njegova dostignuta vrednost je bitna za unapređenje merenja. Kako bi se postigla osetljivost od mBq/kg ili niže, bitan je pažljiv odabir materijala za komponente detektora.

Unapređenja detekcije su moguća u koracima izrade sledećeg osetljivijeg spektrometarskog sistema od materijala odabranih uz pomoć prethodnog spektrometarskog sistema [4].

4.2.2.1. Pasivna zaštita Ge spektrometara

4.2.2.1.1. Niskofonski γ spektrometri sa zaštitom od Pb

Delovi sistema ovih spektrometara su izrađeni od potpuno neaktivnih materijala. Kriostat, držač i kapa detektora su od bakra (Cu) klase OFHC. Detektor je zaštićen slojem od 15 cm Pb, pri čemu je spoljašnjih 10 cm od ^{210}Pb aktivnosti 17 Bq/kg, a unutrašnjih 5 cm je staro olovo, smanjene aktivnosti od oko 1 Bq/kg. Pretpojačavač se nalazi izvan sistema zaštite [1]. Ukoliko se Cu cilindar postavi kao unutrašnji sloj Pb zaštite, poboljšaće se eliminacija Pb-X linija. Upotreba Cu kao unutrašnje zaštite dovodi do rasta kontinuuma niskoenergetskog dela spektra. Problem može biti rešen upotrebom sloja Sn. X fluorescentno zračenje sloja Sn se učinkovito otklanja slojem Cu debljine 0.5 mm. Postradonske spektralne linije, koje su posledica varijacije koncentracije radona u vazduhu, uspešno su otklonjene kontinuiranim ubacivanjem gasovitog N_2 u unutrašnjost zaštite [4].

4.2.2.1.2. Niskofonski γ spektrometri sa zaštitom od Fe

Gvožđe liveno pre II svetskog rata izabrano je kao najpogodniji zaštitni materijal. Razlog biranja baš ovog gvožđa je taj što ne sadrži fisione produkte iz nuklearnih eksplozija, što je bitno pri merenju γ zračenja niskih aktivnosti. Kako bi zaštitna komora mogla da primi različite detektore bez dodatne adaptacije, detektor zajedno sa Dewar-ovim sudom se smešta u komoru. Potrebno je bilo izraditi komoru velike korisne zapremine kako bi ovakav pristup bio moguć. Nedostaci ovog rešenja je trebalo da se eliminišu u drugoj fazi izradnje komore dodatkom aktivne koincidentne zaštite, ili sloja čistog izolacionog materijala oko samog kristala. Komora je smeštena u zgradu instituta za fiziku daleko od svih izvora zračenja, u prostoriju u kojoj nije rađeno sa radionuklidima.

Lim Fe debljine od oko 1 cm čini zid komore. Komora je u obliku kocke sa bočim pomičnim vratima. Debljina zidova komore je 25 cm, a korisna zapremina iznosi 1 m^3 . Na pomičnim vratima se nalaze kružna vrata za postavljanje uzoraka za merenje. Komora je uzdignuta sa betonskog postolja na visinu od 0.5 m radi smanjenja uticaja zračenja podloge. Na zidovima komore se nalaze otvori za dolivanje tečnog azota, za vođenje električnih kablova do detektora i dva otvora za prinudnu ventilaciju.

Merenja su izvršena pomoću Ge(Li) spektrometra sa koaksijalnim kristalom. Osetljiva zapremina detektora je oko 80 cm^3 , efikasnost 14.5%, a moć razlaganja ispod 2 keV. Signali iz detektora su preko pretpojačavača Canberra vođeni u višekanalni analizator Nuclear Data 2400 sa 4096 kanala [1].

Primenom cilindra od Pb smeštenog oko kristala Ge(Li) spektrometra došlo se do zaključka da Pb cilindar redukuje intenzitete linija iz U niza za više od 4 puta, a intenziteti iz niza Th ostaju maltene nepromenjeni [1].

Korišćenjem detektora sa pasivnom zaštitom moguća su kvalitetna rutinska merenja radiaktivnosti u prirodnim uzorcima. Glavna prednost pasivne zaštite je to što omogućuje dalje usavršavanje i dodatno smanjenje fona. Upotrebom veštačke ventilacije za otklanjanje radona i opremanjem detektora antikoincidentnom zaštitom ili okruživanjem unutrašnjim

izolacionim slojem, postiže se mogućnost merenja znatno niže radioaktivnosti. S obzirom na to da se u komoru mogu istovremeno smestiti i dva poluprovodnička detektora, postoji mogućnost i koincidentne detekcije retkih procesa.

4.2.2.2. Aktivna zaštita Ge spektrometara

Aktivno smanjenje fona, odnosno odbacivanje neželjenih impulsa, postiže se primenom koincidentnih/antikoincidentnih tehnika. U zavisnosti od namene, izdvajaju se tri vrste germanijumskih spektrometarskih sistema sa aktivnom zaštitom:

- a) sistem koji uklanja fotone degradiranih energija nastale Komptonovim rasejanjem,
- b) sistem koji služi za uklanjanje impulsa koji su posledica interakcije visokoenergijskog kosmičkog zračenja,
- c) par-spektrometar za potiskivanje komptonskog kontinuuma, fotopika i “single escape” pika gama zraka visoke energije ($E_\gamma > 2000 \text{ keV}$) [4].

Ge detektor je opkoljen drugim, zaštitnim detektorom. Najčešće se u ovu svrhu koristi NaI(Tl) detektor, a ukoliko je prostor ograničen BGO detektor, ili kombinacija ova dva. Scintilacioni kristali se ovde koriste u ulozi zaštite od produkata Komptonovog rasejanja, čije se zaustavljanje obezbeđuje dovoljno debelim scintilatorom. Zaštitni scintilacioni detektor uglavnom je oblika cevi sa debelim zidovima u koju je sa jedne strane uvučen Ge detektor [3].

Foton rasejan Komptonovim rasejanjem, sa sada nižom energijom interaguje sa zaštitnim detektorom. Signal proizveden od strane ovog fotona u detektoru se može iskoristiti za zaustavljanje obrade komplementarnog signala iz Ge detektora zatvaranjem ulazne kapije višekanalnog analizatora. Broj događaja u komptonskoj raspodeli germanijumskog spektra se, pomoću ove tehnike, može znatno smanjiti, poboljšavajući odnos broja vrha pune energije prema ukupnom odbroju spektra. Ovi spektrometri se nalaze u širokoj upotrebi u nuklearnoj fizici i radioanalitičkoj hemiji.

Nedostaci antikomptonskih sistema se ogledaju u ograničenoj veličini uzorka i kompleksnoj elektronici.

U cilju smanjenja kosmičkog fona u niskofonskim sistemima, u sve većoj upotrebi su spoljasnji zaštitni detektori velike površine. Zaštitni detektori u potpunosti okružuju pasivnu zaštitu, međutim najučinkovitiju redukciju kosmičkog zračenja daje detektor postavljen sa gornje strane, te se koriste i sistemi sa samo jednim ovakvim detektorom.

Radi postizanja nižih granica detekcije, vrši se kombinacija HPGe detektora visoke rezolucije sa viskokoefikasnim NaI(Tl) detektorom [3].

Ukoliko je potrebna analiza gama zraka visoke energije ($E_\gamma > 2000 \text{ keV}$), kao što je gama zračenje generisano u interakciji neutrona sa metom, smanjenje komptonskog kontinuuma i drugog neželjenog fonskog zračenja uspešno se postiže korišćenjem par-spektrometara. Pored toga, doći će do potiskivanja foto pika i “single escape” pika (pik jednostrukog izbegavanja),

dok jedini koristan izvor informacija postaje “double escape” pik (pik dvostrukog izbegavanja) [6].

5. VEŠTAČKA ĐUBRIVA

5.1. Rana istorija proizvodnje veštačkih đubriva

Proizvodnja fosfatnih đubriva je oduvek bila jedna od glavnih aktivnosti fosfatne industrije i predstavlja najveći deo svetke proizvodnje fosfata uopšte. Upotreba razblažene sumporne kiseline je predstavljena u Bohemiji 1831. godine u cilju pretvaranja biogenog fosfata, u obliku kostiju i kopolita, u formu rastvorljivu u vodi. Produkt je nazvan superfosfat. 1840. godine, Justus fon Libih (nem. Justus von Liebig) je pred Britansko naučno udruženje izneo ulogu minerala u rastu biljaka i postavio temelj savremene agrikulturne nauke. Bio je prvi koji je pokazao da nerastvorljivi fosfati, kao što su kosti, mogu osloboditi fosfor u formi koju će biljka lakše i brže apsorbovati ukoliko se tretiraju sumpornom kiselinom. Ovo je stimulisalo Džona Beneta Lovsa (eng. John Bennett Lawes) da sumpornom kiselinom tretira kopolite i testira dobijeni fosfat kao hranu za biljke. 1842. godine, Lovs je patentirao ovu ideju, što mu je dalo dozvolu za prvu komercijalnu proizvodnju superfosfata. Nakon 20 godina, Ujedinjeno kraljevstvo Velike Britanije je proizvodilo 150 000 tona superfosfata godišnje.

Vremenom, izvori fosfata, pod velikom potražnjom, su se drastično istrošili. Otkrivena su velika sedimentna nalazišta fosfata, nazvana fosforiti, u Južnoj Karolini, u Sjedinjenim Američkim Državama. Kopanje je započeto 1867. godine. Nakon nekoliko godina Južna Karolina je postala glavni izvoznik fosfata na svetu [7].

5.2. Fosfatni resursi

Fosfatna nalazišta sadže kalcijum i fosfor u obliku trikalcijum fosfata $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ i dele se na pet glavnih kategorija:

1. Sedimentna morska nalazišta
2. Magmatska nalazišta
3. Metamorfna nalazišta
4. Biogena nalazišta, uglavnom nakupljanja ptičijeg i đubriva slepih miševa
5. Izvori nastali atmosferskim dejstvom na stenje

Sedimentna morska nalazišta važe za najveća nalazišta fosfata u svetskoj industriji. Ova izvorišta potiču od sedimentacije ribljih kostiju i kostiju morskih sisara. S obzirom da su životinjskog porekla, uglavnom sadrže nečistoće zbog prisustva ne-fosfatnih komponenti životinjskih ostataka. U magmatskim nalazištima se nalazi manje nečistoća nego u morskim nalazištima i uglavnom ne sadrže organski materijal.

Mineralogija fosforom bogatih stena je složena i postoji više od 200 fosfatnih minerala. Glavna mineralna grupa je apatitna grupa kalcijum fosfata obeležena formulom $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \pm \text{CO}_3, \pm \text{OH})_6(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_2$ [7].

5.3. Proizvodnja i rezerve fosfata

Procenjeno je da nalazišta fosfata u svetu teže ukupno 163 milijarde tona. Većina ovih nalazišta su sedimentnog porekla, dok magmatska nalazišta čine oko 4% ukupnog izvora fosfata. Fosfatni materijali su karakterisani njihovim sadržajem P_2O_5 . Fosfatne rude uglavnom sadrže od 4% do 40% P_2O_5 . Male količine teških metala koje su potencijalno štetne po ljudski organizam, mogu se naći u ovim rudama. Kako bi se fosfatno nalazište smatralo pogodnim, fosfatne mineralne komponente rude moraju sadržati P_2O_5 iznad određene minimalne vrednosti. U početku, fosfatna stena morala je da sadrži minimalno 27-30% P_2O_5 . Promene u načinu proizvodnje danas dozvoljavaju upotrebu ruda koje sadrže minimalno 23% P_2O_5 , a u nekim slučajevima i manje.

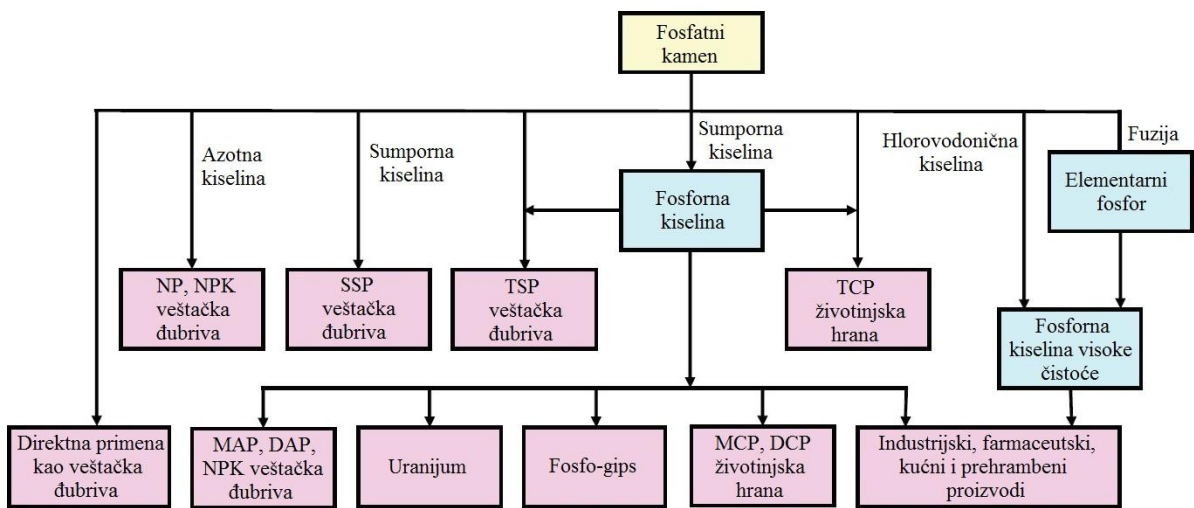
5.4. Obrada i produkti

Fosfatna ruda se pretvara u komercijalne proizvode kroz tri glavna koraka:

1. Nakon iskopavanja, fosfatna ruda je obogaćena za proizvodnju koncentrata nazvanog fosfatni kamen
2. Oko 85% fosfatnog kamena proizvedenog u koraku (1.) je pretvoreno u međuprodukt ili finalni produkt upotrebom kiseline. Mala količina je direktno pretvorena u elementarni fosfor. Procenjeno je da se 71% fosfatnog kamena pretvara u fosforu kiselinu, 24% direktno u đubrivo, dok se ostalih 5% direktno pretvara u druge proizvode. Godišnja proizvodnja P_2O_5 u obliku fosforne kiseline je veća od 30 miliona tona.
3. Većina fosforne kiseline (između 75% i 90%) proizvedene u koraku (2.) se šalje na dalju obradu kako bi se pretvorila u đubrivo. Đubriva proizvedena od fosforne kiseline čine 55-60% ukupne proizvodnje fosfatnog kamena. Od preostalih 10-25% fosforne kiseline proizvedene u koraku (2.) polovina se pretvara u suplemente za životinjsku hranu, a polovina u druge proizvode.

Šematski prikaz procesa i proizvoda u fosfatnoj industriji prikazan je na slici 19. Oko 80% ukupne količine P_2O_5 koja potiče iz kopanih ruda se koristi za izradu veštačkih đubriva, dok se oko 7% koristi za suplemente životinjskoj hrani. Ostatak odlazi u razne proizvode korišćene u ishrani, industriji pića, farmaciji, održavanju domaćinstva. Deo produkata nalazi primenu u izradi industrijskih proizvoda kao što su cement, papir, koža, staklo, keramika, guma, elektronske komponente itd.

S obzirom na to da se deo produkata troši u ljudskoj uporebi kao što su hrana, piće i farmaceutske proizvodi, veoma je bitno da je sadržaj teških metala ispod minimalne propisane vrednosti [7].



Slika 19. Šematski prikaz procesa i proizvoda u fosfatnoj industriji

(NP: azot-fosfor; NPK: azot-fosfor-kalijum; SSP: pojedinačni superfosfat; TCP: trikalcijum fosfat; TSP: trostruki superfosfat; MAP: monoamonijum fosfat; DAP: diamonijum fosfat; MCP: monokalcijum fosfat; DCP: dikalcijum fosfat)

5.5. Opšta zaštita od radijacije

Upotreba robe koja sadrži radionuklide prirodnog porekla, kao što su veštačka đubriva, dopune za zemljište i građevinski materijali, zahteva strogu kontrolu zračenja. Ukoliko je koncentracija aktivnosti mase potomka u torijumovom, ili uranijumovom lancu veća od 1 Bq/kg i ukoliko je koncentracija aktivnosti ^{40}K veća od 10 Bq/kg, primenjuju se mere zaštite od izloženosti zračenju. Stoga, kao rezultat ovako postavljenih granica, primena zaštite od zračenja je od velike važnosti u fosfatnoj industriji.

Posebne radiološke mere na radnom mestu, kao što su kontrola vremena boravka ili čak zaštita na radnom mestu mogu biti primenjene kako bi se smanjila izloženost zračenju. U slučaju materijala koji vrlo malo doprinose dozi zračenja, čak i na dodir, dovoljno ih je skladištiti u prostorije u kojima se uglavnom ne boravi. Ukoliko se radi o materijalima sa velikom koncentracijom aktivnosti, mesta na kojima se nalaze potrebno je obezbediti fizičkim barijerama i znakovima upozorenja.

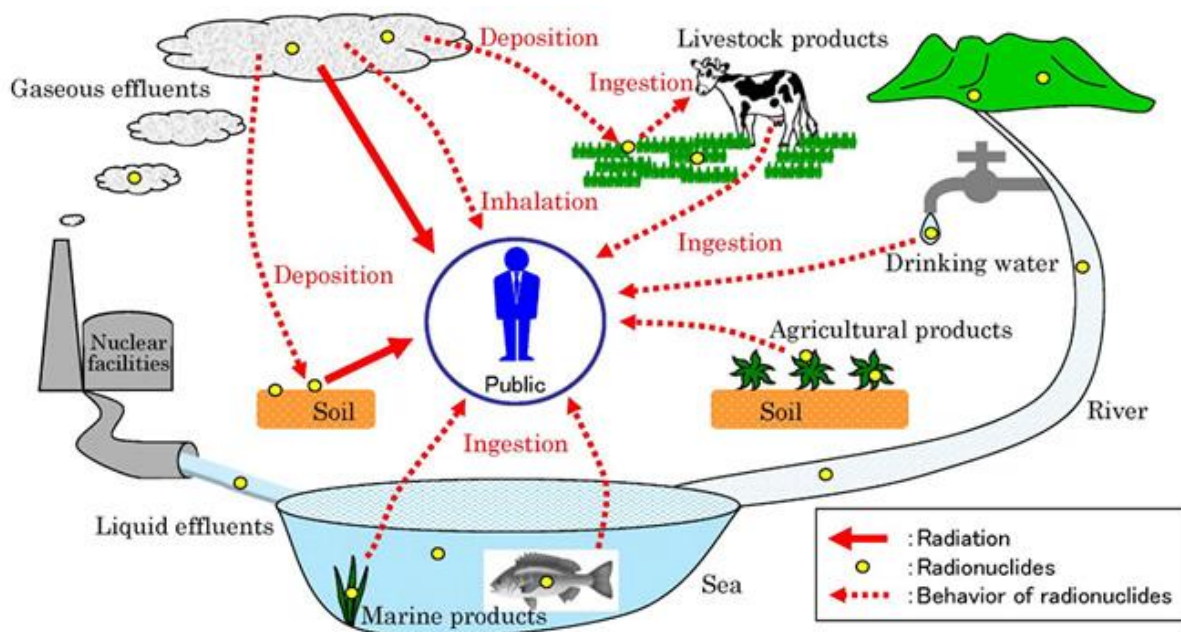
Izloženost prašini iz vazduha se takođe kontroliše na mnogim radnim mestima kroz opštu regulativu o zdravlju i sigurnosti na radu (OHS). Kontrola kvaliteta vazduha u svrhu snižavanja koncentracije prašine može doprineti smanjenju količine radona i torona. Stoga, stepen do kog su mere OHS-a učinkovite u smanjivanju izloženosti radijaciji je ono što regulativno telo treba da ustanovi pre nego što odluči da uvede dodatne mere kontrole. Na nekim radnim mestima potrebno je primeniti dodatne mere zaštite, pri čemu se naposljetku primenjuje oprema za zaštitu respiratornog sistema.

Svesnost i obuka radnika su od posebne važnosti za primenu pravila o zaštiti od radijacije. Radne navike pojedinih zaposlenih lica u mnogome mogu doprineti povećanoj izloženosti zračenju i značajno smanjiti efekat bilo kakve zaštite. Pored navedenog, potrebni su i

povremeni pregledi načina održavanja opreme kako bi se utvrdilo ima li propusta koji bi mogli pogoršati zaštitu od zračenja [7].

5.6. Radionuklidi u zemljištu

Tek tokom poslednjeg veka su upoznati mehanizmi interakcije jonizujućeg zračenja sa materijom. Jonizujuće zračenje predstavlja potencijalni uzrok kancerogenih oboljenja i genetskih oštećenja koja se manifestuju mnogo godina nakon izlaganja zračenju. Iz ovog razloga proizašla je potreba za zaštitom od jonizujućeg zračenja u okviru opšte zaštite životne sredine. Putevi kontaminacije radionuklidima su brojni, od kojih su najzastupljeniji prikazani na slici 20.



Slika 20. Putevi kontaminacije radionuklida

Fizička veličina koja opisuje štetno dejstvo jonizujućeg zračenja je ekvivalentna doza. Jedinica ekvivalentne doze se naziva sivert (Sv). Jedan Sv predstavlja količinu zračenja koja uzrokuje radijacioni rizik od oko 4000 stohastičkih na 1 000 000 ozračenih ljudi. Kancerogena oboljenja su uzrok smrti oko 1600 od 1 000 00 ljudi godišnje. Ukoliko bi se smatralo da su sva ova oboljenja posledica dejstva zračenja, mogla bi se smatrati stohastičkom posledicom godišnje doze zračenja od 0.4 Sv. Savremeni čovek je godišnje izložen dozi zračenja od oko 3 mSv. Pored kosmičkog zračenja i medicinske primene zračenja u dijagnostici, sav ostatak doze zračenja potiče od radioaktivnog raspada atomskih jezgara na Zemlji. Radionuklidi u prirodi su uzrok godišnjeg ozračivanja od oko 2 mSv [1].

Nepravilno praćenje povećanog radijacionog rizika od čovekovih aktivnosti, među kojima se nalazi i primena mineralnih đubriva, može imati značajne zdravstvene, kao i ekonomske posledice. Pored radionuklida dospelih upotrebom veštačkih đubriva, u zemljištu Vojvodine se nalazi fisioni produkt ^{137}Cs koji je posledica akcidenta u Černobilu 1986. godine. Zbog navedenih razloga, praćenje i kontrola migracije izvora jonizujućeg zračenja u prirodi ima

izrazitu bitnost u primeni modernih tehnologija. Metod ovih istraživanja je neposredno merenje koncentracije aktivnosti određenog radionuklida u Bq/kg, a zatim određivanje ekvivalentne doze iz ovog podatka.

Donji prag štetnog dejstva jonizujućeg zračenja nije ustanovljen te je potrebno pratiti i registrovati i najmanje promene aktivnosti radionuklida u prirodi. U svrhu određivanja ovakvih promena koje se mogu detektovati samo izuzetno osetljivim instrumentima, koristi se γ spektrometrija sa poluprovodničkim detektorima. Kao što je ranije rečeno, ovi detektori pružaju mogućnost istovremene identifikacije i kvantitativnog određivanja γ zračenja.

5.7. Transfer faktor radionuklida iz zemljišta u biljke

Korišćenje fosfatnih đubriva dovodi do kontaminacije zemljišta uranijumom ^{238}U i torijumom ^{232}Th koje potom postaje trajan rezervoar radionuklida. Preko lanca ishrane zemljište – biljke – životinje – čovek, dolazi do ozračivanja stanovništva. Radionuklidi bivaju fiksirani u glini i u organskoj materiji, a akumulacijom formiran površinski sloj produkata degradacije biljaka, nazvan “mat horizon”, i površinsko korenje predstavljaju sloj koji sprečava vertikalnu migraciju radionuklida. Iako su radionuklidi u zemljištu čvrsto vezani, biljka može da ih apsorbuje preko korenovog sistema. Pored toga, radionuklidi se mogu deponovati na lišću i drugim delovima biljke iz vazduha (folijalna depozicija) [8].

Fizička veličina koja predstavlja odnos koncentracije aktivnosti radionuklida u biljci i koncentracije aktivnosti u zemljištu, pri čemu se podrazumevaju vrednosti dobijene za sušene uzorke zemljišta i biljaka, naziva se transfer faktor (F_v) [9]:

$$F_v = \frac{\text{aktivnost radionuklida u suvoj biljci [Bq]}}{\text{aktivnost radionuklida u suvom zemljištu [Bq]}} \quad (16)$$

Na transfer faktor iz zemljišta u biljke utiču: oblik nataložene padavine ili otpada, vreme proteklo od zagađenja, fizičko-hemijske karakteristike radionuklida, karakteristika zemljišta, tip biljne kulture i način obrade zemljišta [9].

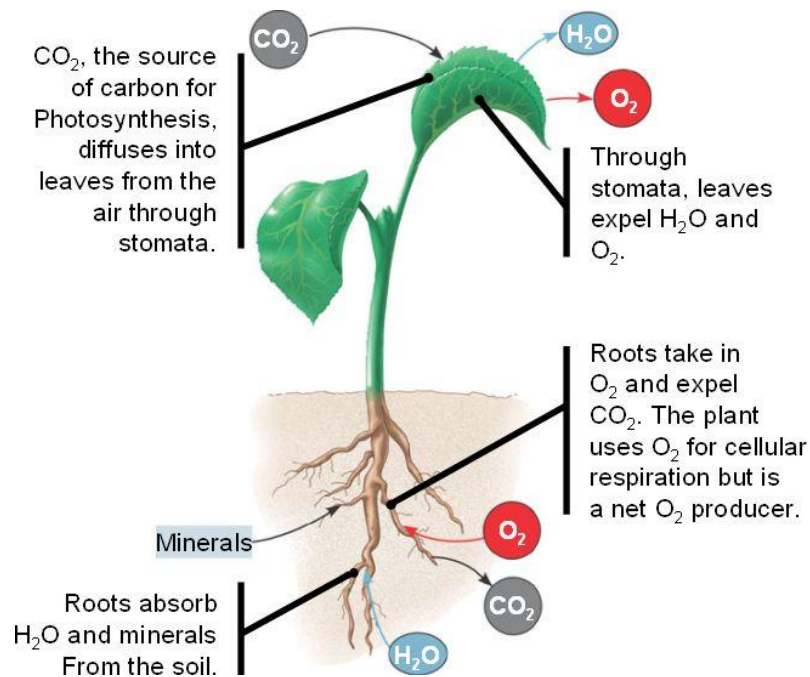
Razlike među transfer faktorima za različite vrste zemljišta mogu varirati i do dva reda veličine. Karakteristike zemljišta koje utiču na vrednosti transfer faktora su: mineraloški i granulometrijski sastav zemljišta, mehanički sastav, sadržaj radionuklida u zemljištu, organski sastav zemljišta, hidrološki uslovi u zemljištu, pH i plodnost zemljišta.

Biološke karakteristike različitih biljnih vrsta mogu uticati na razlike transfer faktora. Intenzitet usvajanja zavisi od: metabolitičkih biohemijskih mehanizama usvajanja radionuklida od strane biljaka, mehanizama detoksikacije, osobina korenovog sistema (njegove građe, životne aktivnosti i dr.), procesa apsorpcije, desorpcije i zamene na površini zemljišnih čestica, vrste radionuklida i drugih ekoloških i unutrašnjih činilaca koji utiču na usvajanje jona od strane biljaka [10].

Uticaj na transfer faktor takođe imaju: trajanje vegetativnog perioda i karakter distribucije korenog sistema u zemljištu. Koreni sistemi različitih biljaka različito prikupljaju sadržaj

zemlje (usled čega i radionuklide), te dolazi do variranja među ispitivanim vrstama i za faktor 100 [11]

Mesto akumulacije radionuklida je prevashodno u lišću i stablu, a mnogo manje radionuklida se nakuplja u plodu [11]. Biljke u najvećoj meri vrše akumulaciju radionuklida koji im služe kao elementi neophodni za normalno odvijanje životnih funkcija. Način na koji biljke usvajaju hranljive materije iz zemljišta prikazan je na slici 21.



Slika 21. Apsorpcija hranjivih materija iz zemljišta

Nakupljanje radionuklida u krmnom bilju predstavlja dodatni rizik za povećanje koncentracije radionuklida u hrani životinjskog porekla [2].

Tehnologije uzgajanja biljnih kultura menjaju svojstvo zemljišta ili dovode do preraspodele radionuklida u zoni korena, što dovodi do promene u akumulaciji radionuklida u biljkama.

Smanjenje sadržaja radionuklida u poljoprivrednim kulturama tokom određenog vremenskog perioda predstavlja čest fenomen. Uzrok tome su razni procesi, među kojima i vezivanje za minerale zemljišta, usvajanje radionuklida od strane mikroorganizama i migracija u zoni korena. Kao rezultat, količina radionuklida koji se mogu naći u lancu ishrane je smanjena [11].

Kako bi se podstakla proizvodnja hrane sa niskim sadržajem radionuklida, potrebna je procena maksimalne koncentracije aktivnosti u biljnim kulturama koje bi se uzgajale na datom zemljištu. Ovo se vrši merenjem koncentracije aktivnosti zemljišta i korišćenjem transfer faktora iz zemljišta u biljke [2].

6. PROCENA RADIJACIONOG RIZIKA

6.1. Zakonska regulativa

Granične vrednosti koncentracije aktivnosti radionuklida u veštačkim đubrivima date su u dokumentu “PRAVILNIK O GRANICAMA SADRŽAJA RADIONUKLIDA U VODI ZA PIĆE, ŽIVOTNIM NAMIRNICAMA, STOČNOJ HRANI, LEKOVIMA, PREDMETIMA OPŠTE UPOTREBE, GRAĐEVINSKOM MATERIJALU I DRUGOJ ROBI KOJA SE STAVLJA U PROMET (Sl. glasnik RS, br. 86-2011 i 97-2013) “, Agencije za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije.

Član 11a

Granica sadržaja prirodnih radionuklida u mineralnim fosfatnim đubrivima iznosi:

1) za uranijum (^{238}U):

- 1600 Bq/kg, i to za mineralna đubriva koja sadrže makrohranljivi element fosfor, a koja se kao takva stavljaju u promet i primenjuju,

- 3200 Bq/kg, i to za sirovine za proizvodnju mineralnih đubriva koja sadrže makrohranljivi element fosfor;

2) za radijum (^{226}Ra): 1000 Bq/kg, i to za mineralna đubriva koja sadrže makrohranljivi element fosfor, a koja se kao takva stavljaju u promet i primenjuju, kao i za sirovine za njihovu proizvodnju;

3) za kalijum (^{40}K): 27000 Bq/kg, i to za mineralna đubriva koja sadrže makrohranljive elemente kalijum i/ili fosfor, a koja se kao takva stavljaju u promet i primenjuju, kao i za sirovine za njihovu proizvodnju.

6.2. Radioaktivnost prikupljenih uzoraka

U cilju praćenja izloženosti jonizujućem zračenju lica zaposlenih u poljoprivredi koja rukuju veštačkim đubrivima, uvedene su određene fizičke veličine.

Ekvivalentna aktivnost radijuma Ra_{eq} predstavlja indeks korišćen da se pokažu specifične aktivnosti ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K jednom veličinom [13]:

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1.43C_{Th} + 0.077C_K \quad (17)$$

gde je: C_{Ra} – koncentracija aktivnosti radijuma,

C_{Th} – koncentracija aktivnosti torijuma,

C_K – koncentracija aktivnosti kalijuma.

Eksterni indeks H_{ex} definisan je kao [13]:

$$H_{ex} = (C_{Ra}/370) + (C_{Th}/259) + (C_K/4810) \leq 1 \quad (18)$$

Gama indeks I_γ korišćen kako bi se procenili nivoi opasnosti od γ zračenja povezani sa prirodnim radionuklidima u specifičnim materijalima definisan je kao [13]:

$$I_\gamma = (C_{Ra}/150) + (C_{Th}/100) + (C_K/1500). \quad (19)$$

Ukupna apsorbovana doza D izračunava se formulom [13]:

$$D = 0.429C_U + 0.666C_{Th} + 0.042C_K \quad (20)$$

gde je: C_U – koncentracija aktivnosti uranijuma.

Kako bi se procenila godišnja efektivna doza, u obzir treba uzeti faktor konverzije iz apsorbovane doze u vazduhu u efektivnu dozu i spoljašnji faktor popunjenosti [13]:

$$\text{Godišnja efektivna doza } \left[\frac{\text{mSv}}{\text{y}} \right] = \text{Apsorbovana doza } \left[\frac{\text{nGy}}{\text{h}} \right] \cdot 8760[\text{h}] \cdot 0.2 \cdot 0.7 \left[\frac{\text{Sv}}{\text{Gy}} \right]. \quad (21)$$

6.2.1. Metoda merenja

Analizirano je 37 uzoraka veštačkih đubriva uvezenih u Srbiju. Sadržaj prirodnih radionuklida (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K i ^{238}U) u svakom od uzoraka meren je u Laboratoriji za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze jonizujućeg i nejonizujućeg zračenja na katedri za nuklearnu fiziku na Prirodno-matematičkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu.

Ispitivanje koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K i ^{238}U) vršeno je niskofonskom gamaspektrometrijskom analizom standardnom metodom IAEA TRS 295 i standardnom metodom ASTM E181-98/03.

6.2.2. Rezultati i diskusija

U tabeli 2. date su koncentracije aktivnosti radionuklida u 37 uzoraka različitih vrsta veštačkih đubriva izražene u [Bq/kg].

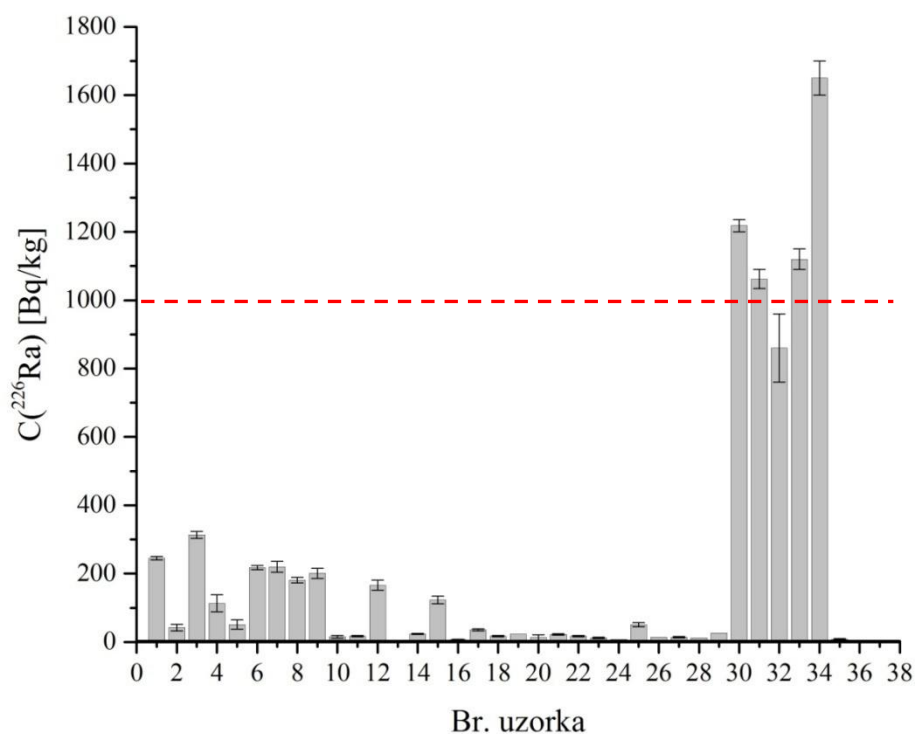
Redni broj	Koncentracija aktivnosti radionuklida [Bq/kg]						
	Šifra	Uzorak	Zemlja porekla	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	²³⁸ U
1.	05-GM-77593/13	NPK	Italija	245 ± 5	17.9 ± 1.6	1750 ± 30	1340 ± 30
2.	05-GM-50515/09	NPK	Hrvatska	42 ± 10	12 ± 2	57 ± 19	2850 ± 210
3.	05-GM-77944/13	NPK	Austrija	313 ± 10	20 ± 3	120 ± 50	1100 ± 70
4.	B73998B	NPK	/	113 ± 25	16 ± 3	5090 ± 290	680 ± 6
5.	L73998A	NP	/	51 ± 14	9.1 ± 2.1	250 ± 60	530 ± 7
6.	05-GM-82487/14	NCF	Austrija	218 ± 6	15 ± 2	340 ± 30	201 ± 25
7.	05-GM-82797/14	NCF	Austrija	220 ± 16	20 ± 4	190 ± 50	140 ± 60
8.	05-GM-86829/15	NCF	Austrija	181 ± 8	< 10	107 ± 25	132 ± 23
9.	05-GM-87210/15	NCF	Austrija	201 ± 15	19 ± 4	< 80	/
10.	05-GM-62621/11	MAP	Ukrajina	15 ± 4	6 ± 1	43 ± 4	1056 ± 22
11.	05-GM-62965/11	MAP	Ukrajina	17 ± 2	3.2 ± 0.6	45 ± 4	726 ± 28
12.	05-GM-70747/12	MAP	Maroko	166 ± 15	< 15	< 120	2640 ± 110
13.	05-GM-85829/15	MAP	Belgija	< 5	< 6	< 40	< 80
14.	05-GM-47298/09	DAP	Bugarska	23.5 ± 1.8	2.6 ± 0.6	14 ± 4	1590 ± 70
15.	05-GM-64132/11	DAP	Turska	123 ± 11	10.3 ± 1.3	< 40	1660 ± 70
16.	05-GM-83508/14	MCP	Bugarska	6.6 ± 1.2	4.7 ± 1.2	27 ± 9	1700 ± 130
17.	05-GM-77388/13	MCP	Tunis	35 ± 3	65 ± 5	109 ± 24	680 ± 40
18.	05-GM-79074/13	MCP	Mađarska	17 ± 2	32 ± 3	51 ± 19	640 ± 50
19.	05-GM-79096/13	MCP	Mađarska	< 24	50 ± 24	< 100	680 ± 90
20.	05-GM-79097/13	MCP	Mađarska	13 ± 8	41 ± 23	< 80	710 ± 80
21.	05-GM-81715/14	MCP	Litvanija	22 ± 2	7 ± 2	< 120	< 80
22.	05-GM-69352/12	DCP	Bugarska	17 ± 2	7 ± 2	< 40	890 ± 50
23.	05-GM-84132/15	MKP	Mađarska	12 ± 2	< 10	9200 ± 500	< 100
24.	05-GM-86193/15	MKP	/	< 8	< 7	8600 ± 130	/
25.	05-GM-76403/13	MKP	Izrael	51 ± 6	< 19	12400 ± 30	/
26.	05-GM-80060/14	MKP	Kina	< 15	< 12	9500 ± 400	< 150
27.	05-GM-79496/14	MKP	Izrael	14 ± 2	< 12	10900 ± 400	< 100
28.	05-GM-79881/14	MKP	Belgija	< 13	< 11	9290 ± 270	< 150
29.	05-GM-70941-A/12	MKP	Belgija	< 27	< 26	14200 ± 500	/
30.	05-GM-71051/12	SF	Egipat	1218 ± 18	< 11	< 50	778 ± 29
31.	05-GM-71163/12	SF	Egipat	1062 ± 28	< 18	< 100	778 ± 29
32.	05-GM-84563/15	SF	Egipat	860 ± 100	< 13	< 80	630 ± 40
33.	05-GM-72693/12	SF	Alžir	1120 ± 30	< 20	< 140	760 ± 50
34.	05-GM-72288/12	SF	Senegal	1650 ± 50	55 ± 6	< 120	1160 ± 60
35.	05-GM-70767/12	FP	/	8 ± 2	180 ± 5	30 ± 6	2280 ± 50
36.	05-GM-82381/14	FP	Poljska	2 ± 2	2 ± 2	45 ± 20	/
37.	05-GM-85586/14	FP	Austrija	< 5	< 5	260 ± 20	/

Tabela 2. Koncentracija aktivnosti radionuklida u veštačkim đubrivima

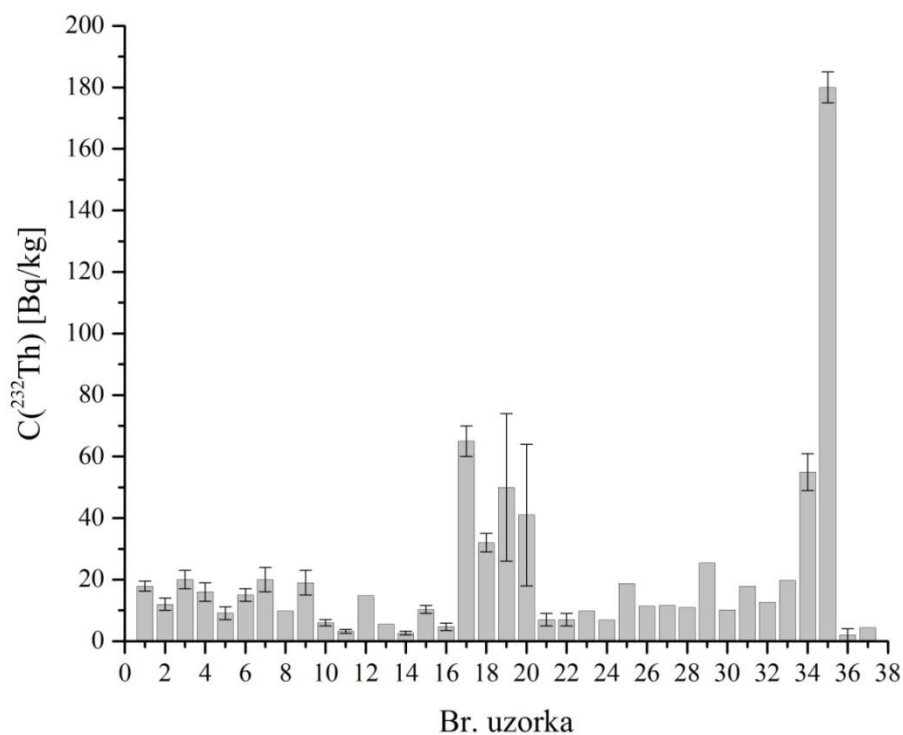
*U tabeli 1. korišćene su skraćenice za vrste veštačkih đubriva: NPK: azot-fosfor-kalijum; NP: azot-fosfor, NCF: neorgansko čvrsto fosforno đubrivo; MAP: monoamonijum fosfat; DAP: diamonijm fosfat; MCP: monokalcijum fosfat; DCP: dikalcijum fosfat; MKP: monokalijum fosfat; SF: Sirovi fosfat, FP: fosfatni proizvod.

Prema podacima iz tabele 1., na graficima 1., 2., 3. i 4. date su koncentracije aktivnosti ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K i ²³⁸U, respektivno, pri čemu su crvenom isprekidanom linijom prikazane granične vrednosti propisane "Pravilnikom o granicama sadržaja radionuklida u vodi za piće,

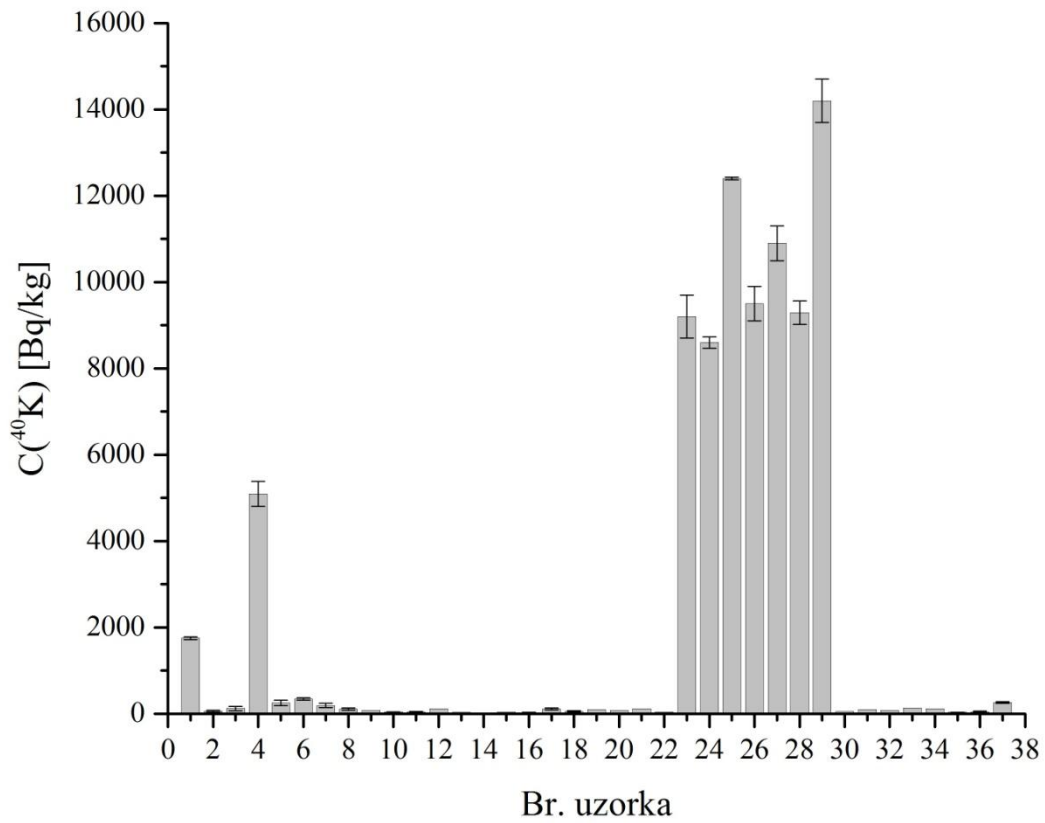
životnim namirnicama, stočnoj hrani, lekovima, predmetima opšte upotrebe, građevinskom materijalu i drugom robi koja se stavlja u promet (Sl. glasnik RS, br. 86-2011 i 97-2013)“, član 11a, Agencije za zaštitu od jonizujućih zračenja i nuklearnu sigurnost Srbije.



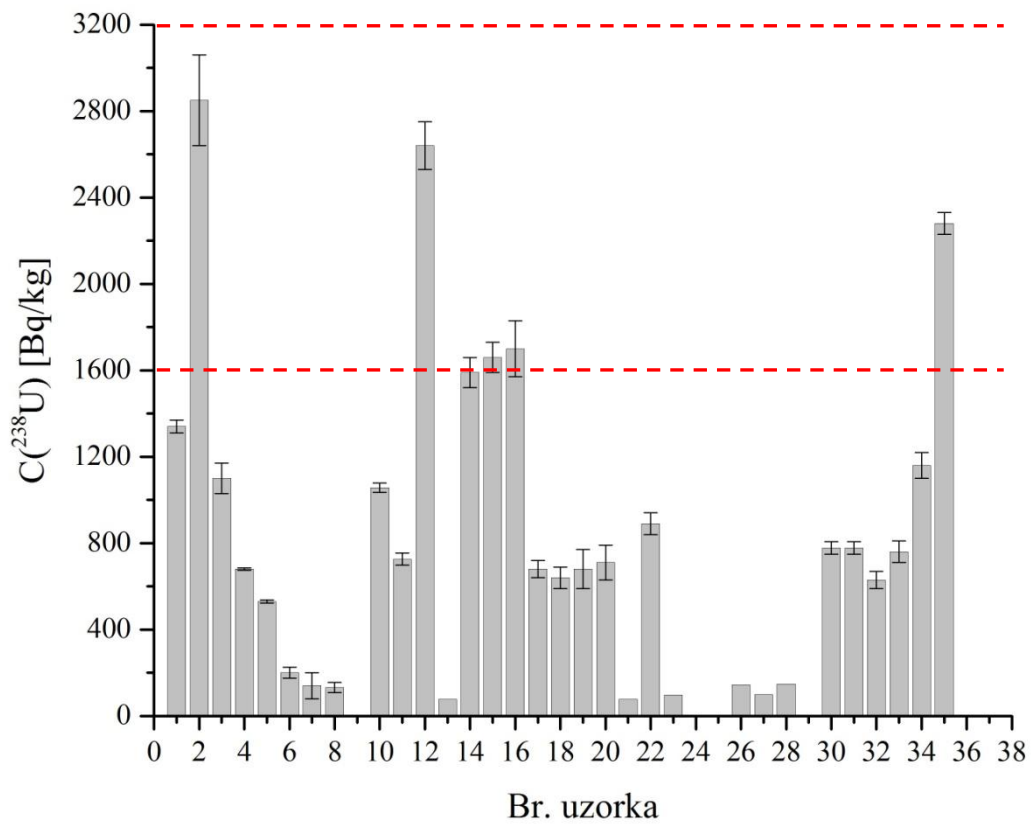
Grafik 1. Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra



Grafik 2. Koncentracija aktivnosti ^{232}Th

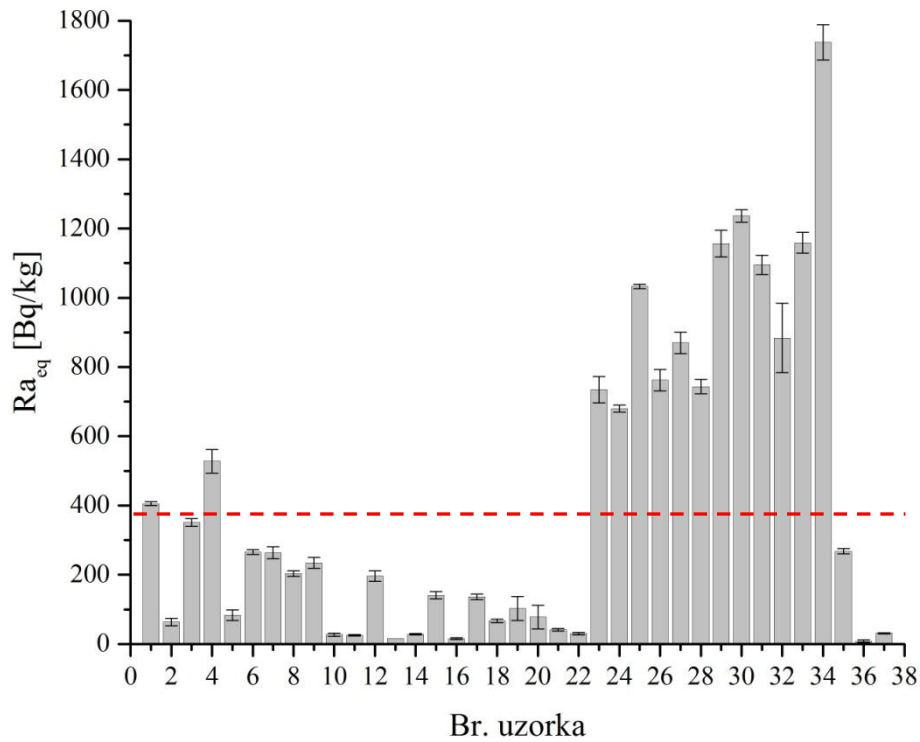


Grafik 3. Koncentracija aktivnosti ^{40}K

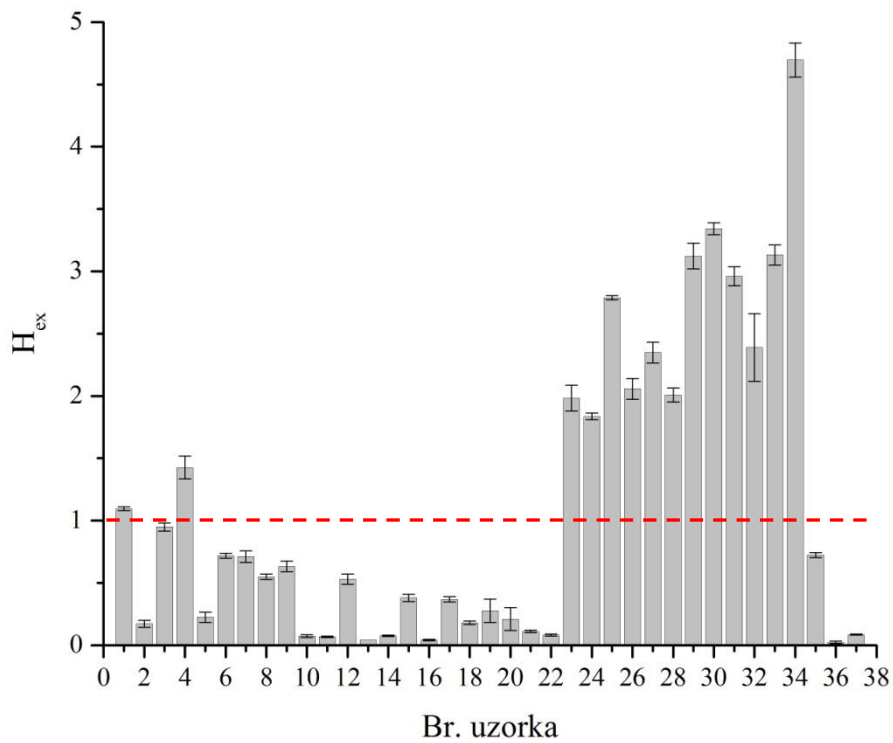


Grafik 4. Koncentracija aktivnosti ^{238}U

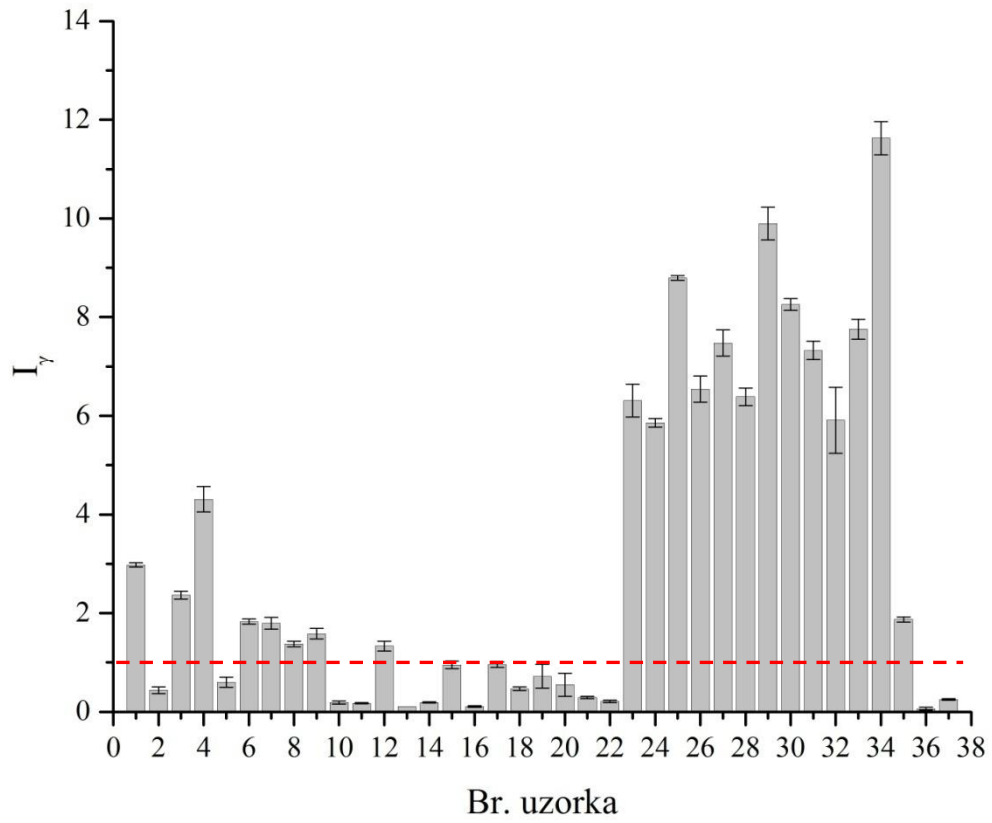
Prema podacima iz tabele 1., na graficima 5., 6., 7. i 8. prikazane su vrednosti ekvivalentnih aktivnosti radijuma Ra_{eq} , eksternog indeksa H_{ex} , gama indeksa I_γ i apsorbovanih doza D , respektivno.



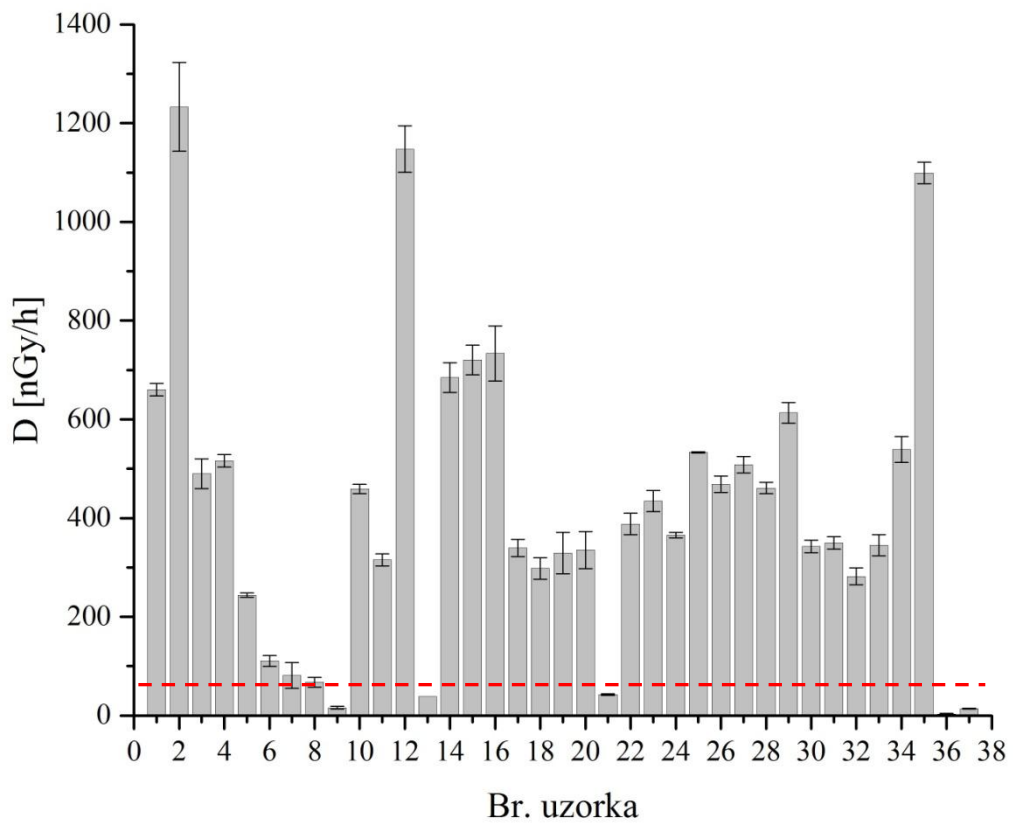
Grafik 5. Ekvivalentna aktivnost radijuma Ra_{eq}



Grafik 6. Eksterni indeks H_{ex}



Grafik 7. Gama indeks I_γ



Grafik 8. Apsorbovana doza D

Srednje vrednosti, greške i opseg koncentracije aktivnosti radionuklida u uzorcima veštačkih đubriva prikazane su u tabeli 3.

Radionuklid	C_{av} [Bq/kg]	σ_{av} [Bq/kg]	Opseg C [Bq/kg]
^{40}K	2262.1	78.22	14 - 14200
^{226}Ra	406.08	10.84	2 - 1650
^{232}Th	21.2	2.66	2 - 180
^{238}U	754.7	38.62	0 - 2850

Tabela 3.

Srednje vrednosti, greške, minimalne i maksimalne vrednosti ekvivalentnih aktivnosti radijuma Ra_{eq} , eksternog indeksa H_{ex} , gama indeksa I_γ i apsorbovanih doza D u uzorcima prikupljenih veštačkih đubriva prikazane su u tabeli 4.

Parametar hazarda od zračenja	Srednja vrednost	σ_{av}	Opseg
Ra_{eq} [Bq/kg]	424.3	18	8.32 - 1737.6
I_γ	3.18	0.13	0.06 - 11.6
H_{ex}	1.15	0.05	0.02 - 4.7
D [nGy/h]	421.9	19.8	3.22 - 1233.04

Tabela 4.

U uzorcima veštačkih đubriva, prema tabeli 3., koncentracija aktivnosti ^{40}K u opsegu je od 14 (4) do 14200 (500) Bq/kg, što ne prelazi zakonom propisanu graničnu vrednost. Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra ima najmanju vrednost od 2 (2) Bq/kg, a najveću od 1650 (50) Bq/kg, što prelazi zakonom propisanu graničnu vrednost. Najmanja koncentracija aktivnosti ^{232}Th iznosi 2 (2) Bq/kg, dok najveća iznosi 180 (5) Bq/kg. Koncentracija aktivnosti ^{238}U nalazi se u opsegu od 0 do 2850 (210) Bq/kg, što prelazi zakonom propisanu graničnu vrednost od 1600 Bq/kg, za mineralna đubriva koja sadrže makrohranjivi element fosfor, a koja se kao takva stavljaju u promet i primenjuju.

Dobijeni rezultati izloženi u tabeli 4. pokazuju da su prosečne vrednosti parametara hazarda od radijacije, izračunate prema formulama iz odeljka 5.2., za većinu uzoraka veštačkih đubriva iznad prihvatljivih 370 Bq/kg za ekvivalentnu aktivnost radijuma Ra_{eq} , 1 za gama indeks I_γ , 1 za eksterni indeks H_{ex} i 59 nGy/h za apsorbovanu dozu D.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitano je 37 uzoraka veštačkog đubriva koji se uvoze u Republiku Srbiju iz brojnih zemalja. Određivanje sadržaja radionuklida u uzorcima veštačkih đubriva izvršeno je gama spektrometrijom.

Gama spektrometrija je eksperimentalna metoda koja omogućava detektovanje fotona emitovanih iz radioaktivnih izvora, čija se prisutnost i koncentracija aktivnosti u veštačkim đubrivima ispitivala.

Radionuklidi detektovani niskofonskom gama spektrometrijom u veštačkim đubrivima su ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{238}U . Prirodni i veštački izvori radijacije uzrok su izloženosti zračenju svih ljudskih bića. Nivo koncentracije aktivnosti u veštačkim đubrivima pruža korisne informacije za praćenje kontaminacije životne sredine. Procesi kao što su kopanje i prevoz fosfatnih ruda, proizvodnja i upotreba veštačkih đubriva doprinose povećanoj izloženosti radnika, stanovništva i životne sredine ovim radionuklidima. Pored praćenja kontaminacije životne sredine, podaci o prirodnoj radijaciji su bitni za uvođenje pravila i regulaciju zaštite od zračenja.

Analiza uzoraka veštačkih đubriva pokazuje da koncentracija aktivnosti ^{40}K ne prelazi zakonom propisanu graničnu vrednost.

Koncentracija aktivnosti ^{226}Ra prelazi zakonom propisanu graničnu vrednost od 1000 Bq/kg.

Koncentracija aktivnosti ^{232}Th kreće se u opsegu od 2 (2) do 180 (5) Bq/kg.

^{238}U prisutan u ispitivanim uzorcima veštačkih đubriva prelazi zakonom propisanu graničnu vrednost od 1600 Bq/kg, za mineralna đubriva koja sadrže makrohranljivi element fosfor, a koja se kao takva stavljaju u promet i primenjuju.

Pored navedenih prirodnih radionuklida, u svim uzorcima detektovan je radionuklid veštačkog porekla ^{137}Cs , koji se nalazi samo u tragovima.

Ispitivanja pokazuju da su vrednosti parametara hazarda od radijacije, fizičkih veličina uvedenih u cilju praćenja izloženosti jonizujućem zračenju lica zaposlenih u poljoprivredi koja rukuju veštačkim đubrivima, za većinu uzoraka iznad graničnih vrednosti. Prosečne vrednosti pomenutih fizičkih veličina u većini uzoraka veštačkih đubriva prelaze prihvatljivih 370 Bq/kg za ekvivalentnu aktivnost radijuma Ra_{eq} , 1 za gama indeks I_γ , 1 za eksterni indeks H_{ex} i 59 nGy/h za apsorbovanu dozu D.

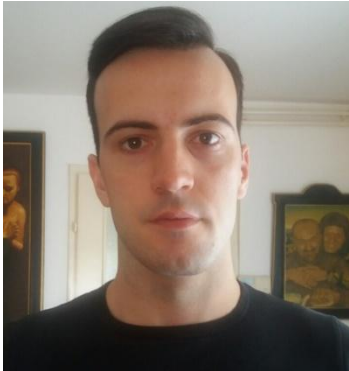
Na osnovu dobijenih rezultata, kao i poznavanja sadržaja radionuklida u poljoprivrednom zemljištu, mogu se proceniti maksimalne koncentracije aktivnosti u biljnim kulturama koje bi se uzgajale na datom zemljištu.

8. LITERATURA

- [1] J. Slivka, I. Bikit, M. Vesković, Lj. Čonkić, *Gama spektrometrija, specijalne metode i primene*, Univerzitetski udžbenik, Novi Sad, 2000.
- [2] V. Nikolić, *Radioaktivnost zemljišta Vojvodine*, Diplomski rad, PMF Novi Sad, 2011.
- [3] J. Hansman, *Istraživanje kvaliteta gamaspektrometrijskih merenja*, Master rad, PMF Novi Sad, 2011.
- [4] D. Mrđa, *Analiza metoda redukcije fona germanijumskih spektrometara*, Doktorska disertacija, PMF Novi Sad, 2007.
- [5] M. Krmar, *Uvod u nuklearnu fiziku*, Novi Sad, 2013.
- [6] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley and Sons, New York, 1989.
- [7] *Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry*, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Report Series No.78, Vienna, 2013.
- [8] J. Nikolić, D. Todorović, M. Janković, M. Radenković, J. Joksić, *Zemlja-biljka transfer faktor u okolini termoelektrana*, Institut Vinča
- [9] Prof. dr I. Bikit, prof. dr J. Slivka, prof. dr M. Vesković, prof. dr M. Krmar, prof. dr N. Todorović, prof. dr D. Mrđa, mr S. Forkapić, J. Nikolov, J. Hansman, K. Bikit, *Praćenje radioaktivnosti zemljišta na teritoriji grada Novog Sada tokom 2012. godine*, Novi Sad, 2012.
- [10] D. Grubišić, D. Stevanović, M. Stojanović, V. Vuletić, G. Pantelić, *Uticaj dugogodišnjeg đubrenja na radioaktivnost zemljišta*, Beograd
- [11] *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY-TRS-DRAFT document, 2009.
- [12] H. Vandenhove, G. Olyslaegers, N. Sanzharova, O. Shubina, E. Reed, Z. Shang, H. Velasco, *Proposal for new best estimates of soil-to-plant transfer factor of U, Th, Ra, Pb and Po*, Journal of Environmental Radioactivity, 2009.
- [13] N. Todorović, I. Bikit, M. Vesković, D. Mrđa, S. Forkapić, J. Hansman, J. Nikolov, K. Bitik, et al., *Radioactivity in fertilizers and radiological impact*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2015.

- [14] <https://www.livescience.com>
- [15] <https://www.khanacademy.org>
- [16] <http://www.istockphoto.com>
- [17] <https://www.dreamstime.com>
- [18] <http://learnabouttravelmaps.info>

9. BIOGRAFIJA



Igor Marić je rođen 24. oktobra 1993. godine u Novom Sadu. Osnovnu školu „Dušan Radović“ i Medicinsku školu „7. april“ završio je u Novom Sadu. Po završetku srednje škole, Prirodno-matematički fakultet na Univerzitetu u Novom Sadu (Departman za fiziku, obrazovni profil Medicinski fizičar) upisao je 2012. godine.

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:

Igor Marić, br. dos. 31/12

AU

Mentor:

Prof. dr Nataša Todorović, redovni proesor PMF-a u Novom Sadu

MN

Naslov rada:

Radioaktivnost veštačkog đubriva

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2017

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada:

(7/52/21/4/8)

FO

<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
NO <i>Naučna disciplina:</i>	Nuklearna fizika
ND <i>Predmetna odrednica/ ključne reči:</i>	Radioaktivnost, radionuklidi, veštačka đubriva, gama spektrometrija
PO <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 prikazani su rezultati gama spektrometrije 37 uzoraka veštačkih đubriva uvezenih u Republiku Srbiju, u cilju utvrđivanja da li koncentracija aktivnosti radionuklida prelazi zakonom propisane vrednosti. Takođe, vršeno je izračunavanje ekvivalentne aktivnosti radijuma, eksternog indeksa, gama indeksa i apsorbovane doze. Data je diskusija eksperimentalno dobijenih vrednosti.
IZ	
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	
DP <i>Datum odbrane:</i>	22.9.2017.
DO <i>Članovi komisije:</i>	
KO <i>Predsednik:</i>	Prof. dr Maja Stojanović, PMF, Novi Sad
<i>član:</i>	Prof. dr Nataša Todorović, PMF, Novi Sad
<i>član:</i>	Prof. dr Jovana Nikolov, PMF, Novi Sad

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: Igor Marić, 31/12

AU

Mentor/comentor: Nataša Todorović, PhD, professor, FCM, Novi Sad

MN

Title: Radioactivity of Fertilizers

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2017

PY

Publisher: Author's reprint

PU

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

PP

Physical description: (7/52/21/4/8)
PD

Scientific field: Physics

SF
Scientific discipline: Nuclear Physics

SD
Subject/ Key words: Radioactivity, radionuclides, fertilizers, Gamma spectrometry

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

HD
Note: None

N
Abstract: The gamma spectrometry results in this paper are 37 samples of fertilizers imported into the Republic of Serbia, with efforts to conclude if the activity concentration of radionuclides exceeds legally allowed amounts. A calculation of radium equivalent activity, external hazard index, representative level index and absorbed dose is also measured. A discussion is presented based on acquired values.

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB
Defended on: 22.9.2017.

DE
Thesis defend board:

DB
President: Maja Stojanović, PhD, professor, FCM, Novi Sad

Member: Nataša Todorović, PhD, professor, FCM, Novi Sad

Member: Jovana Nikolov, PhD, professor, FCM, Novi Sad