

Природно-математички факултет
Радна заједница за атмосферских посљева
НОВ

Пријемено: 28. јун 1993.			
Орг. јед.	Број	Месец	Вредност
03	9/102		

P R I R O D N O - M A T E M A T I Ć K I F A K U L T E T
I N S T I T U T Z A F I Z I K U

DIPLOMSKI RAD

PRIRODNA RADIOAKTIVNOST I EMANACIJA
RADONA
IZ CRAĐEVINSKOG MATERIJALA

Milutin Baucal

Novi Sad, 1993. god.

S A D R Ž A J:

1	Uvod	1
OPŠTI DEO		
2	Jonizujuće zračenje i radijacioni rizik	2
2	2.1 Jonizujuće zračenje i dozimetrijske jedinice	2
2	2.2 Uloga prirodnih izvora jonizujućeg zračenja u ozračivanju stanovništva	2
4	2.2.1 Kosmičko zračenje	4
5	2.2.2 Gama-zračenje prirodnih radionuklida	5
5	2.2.3 Ozračenje ingestijom	5
5	2.2.4 Ozračenje radonom i njegovim potomcima	5
7	3 Radioaktivnost građevinskih materijala	7
7	3.1 Specifična aktivnost prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima	7
10	3.2 Koeficijenti emanacije radona u građevinskim materijalima	10
12	4 Nagomilavanje radona u stambenim zgradama	12
13	4.1 Mehanizam ekshalacije radona	13
17	4.2 Nagomilavanje torona (^{220}Rn) i njegovih potomaka u vazduhu prostorija	17
18	4.3 Procena dobijene doze, uslovljene potomcima izotopa radona	18
20	5 Gama-spektrometrijsko određivanje koncentracije prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima	20
EKSPERIMENTALNI DEO		
24	6 Merna tehnika	24
24	6.1 Spektralni intenzitet vrha totalne apsorpcije	24
25	6.2 Instrumenati	25
25	7 Izbor analitičkih linija	25

8 Eksperimentalni rezultati	33
8.1 Merenje fona	33
8.2 Kalibracija efikasnosti detektora	35
8.3 Prag detekcije NaI(Tl) i Ge(Li) detektora	51
8.4 Merenje koeficijenta emanacije	53
8.5 Određivanje minimalno merljivog koeficijenta emanacije	54
8.6 Specifična aktivnost građevinskih materijala	55
9 Zaključak	62
Literatura	64

Zahvaljujem se članovima Laboratorije za nuklearnu fiziku Instituta za fiziku u Novom Sadu: dr Istvanu Bikitu, dr Jaroslavu Slivki, dr Miroslavu Veskoviću i dr Ljiljanu Čonkić, na pomoći koju su mi pružili u toku izrade ovog diplomskog rada.

1 Uvod

Istraživanja koja su vršena poslednjih godina pokazala su da najveći doprinos u dozi ozračivanja stanovništva imaju prirodni izvori jonizujućeg zračenja (60 - 90%). Pošto stanovništvo razvijenijih zemalja sveta najviše vremena provodi unutar stambenih i radnih prostorija, bitan doprinos u dozi koja potiče od prirodnih izvora jonizujućeg zračenja imaju prirodni radionuklidi koji ulaze u sastav građevinskih materijala.

Od svih prirodnih radionuklida koji se nalaze u građevinskim materijalima, najveći doprinos u dozi ozračivanja ljudi imaju radon i produkti njegovog raspada. To je i razlog zbog koga je sve veći broj istraživanja posvećen upravo toj komponenti radijacionog fona prostorija.

Ta istraživanja obuhvataju izučavanje izvora nagomilavanja radona u vazduhu prostorija, vodeći pri tom računa o regionalnim osobenostima geološke strukture teritorije na kojoj se nalaze naselja, konstrukciji zgrada, kao i o korišćenim građevinskim materijalima.

Sprečavanje prekomernog ozračivanja stanovništva, uslovljenog γ -zračenjem prirodnih radionuklida u zatvorenim prostorijama, obezbeđuje se zakonskim normiranjem efektivne specifične aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima koji se koriste u izgradnji. Ovo normiranje vrši se na osnovu proseka efektivne specifične aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima, za datu teritoriju.

Da bi takvo normiranje uopšte moglo biti sprovedeno, potrebno je izvršiti merenje specifične aktivnosti vrlo velikog broja građevinskih materijala.

Osnovni cilj ovog rada bio je razvijanje metode kratkotrajnih merenja specifične aktivnosti građevinskih materijala, koje bi omogućilo da se u relativno kratkom vremenskom periodu ovakvom merenju podvrgne veliki broj uzoraka građevinskih materijala.

2 Jonizujuće zračenje i radijacioni rizik

2.1 Jonizujuće zračenje i dozimetrijske jedinice

Ako je energija zračenja koja se prostire u obliku čestica ili kvanta elektromagnetskog polja, dovoljna da izbacuje elektrone iz atoma ili molekula, onda se radi o jonizujućem zračenju.

Interakcija zračenja i sredine kroz koju ono prolazi dovodi do promena, kako samog zračenja, tako i sredine. Ozračena sredina menja se fizički, hemijski i biološki (ako se radi o živoj materiji).

Dejstvo zračenja na čovekovo telo svodi se uglavnom na oštećenja pojedinačnih ćelija. Postoje dve grupe štetnog dejstva: jedna se odnosi direktno na ozračenu osobu (somatski efekti), a druga na potomstvo (genetski efekti). Vodeće mesto kod somatskih efekata na duži rok, zauzimaju maligne promene na različitim organima i tkivima. Za izučavanje genetskih posledica potrebni su šira populacija i duži vremenski period.

Energija radijacije je ta koja izaziva oštećenja, a količina energije deponovana u životnom tkivu predstavlja dozu. Postoje različite definicije doze, u zavisnosti od toga koliko je neko telo ozračeno, koji su njegovi delovi ozračeni i kojom vrstom zračenja. Apsorbovana doza se definiše kao energija od jednog džula predata masi od jednog kilograma tkiva. Jedinica za apsorbovanu dozu je grej (Gy). Pošto određena doza α -zračenja nanosi veća oštećenja od iste doze β ili γ zračenja, postojala je potreba za uvođenjem ekvivalentne doze zračenja. Ona vodi računa o vrsti i energiji zračenja i predstavlja apsorbovanu dozu merenu po moći različitih zračenja da izazovu oštećenja. Jedinica ekvivalentne doze je sivert (Sv) i ona se dobija množenjem apsorbovane doze relativnom biološkom efikasnošću koja za γ -zrake, elektrone i pozitrone iznosi 1, a za protone i α -čestice 10.

Neki delovi tela su osjetljiviji od drugih pa će određena ekvivalentna doza sa većom verovatnoćom izazvati tumor na plućima nego na štitnoj žlezdi, na primer. Iz tog razloga je uvedena efektivna ekvivalentna doza, koja predstavlja ekvivalentnu dozu merenu osjetljivošću različitih tkiva na oštećenja. Ona se takođe izražava u sivertima.

2.2 Uloga prirodnih izvora jonizujućeg zračenja u ozračivanju stanovništva

Najveći doprinos u ukupnoj dozi ozračenja svetskog stanovništva imaju prirodni izvori jonizujućeg zračenja (60–90%). U tabeli 1 [1] dati su glavni izvori ozračenja stanovništva i efektivne ekvivalentne doze koje ti izvori nose.

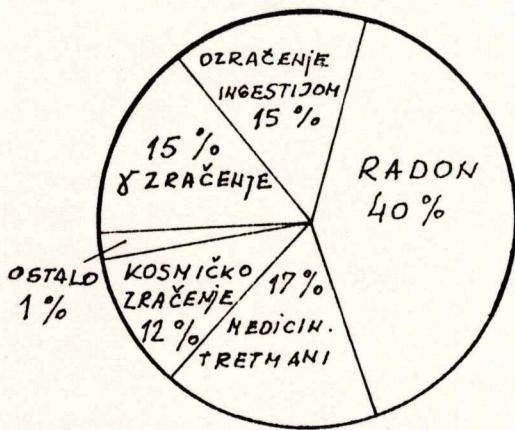
Druga po značaju grupa izvora radijacionog dejstva je ozračenje medicinskim tretmanom. Svi ostali izvori jonizujućeg zračenja imaju udeo manji od 1% (slika 1).

Tabela 1

Glavni izvori ozračenja stanovništva i efektivne ekvivalentne doze koje ti izvori nose

izvori ozračenja	SSSR [15] ($\mu\text{Sv}/\text{god}$)	Velika Britanija [16] ($\mu\text{Sv}/\text{god}$)	Srednja vred. za ceo svet [12] ($\mu\text{Sv}/\text{god}$)
Prirodni			
Kosmičko zračenje	320	300	300
γ -zračenje prirodnih radionuklida	370	400	350
Interno ozračenje ^{222}Rn , ^{220}Rn	370 1260	370 800	370 970
Ukupno od prirodnih	2320	1870	1990
Medicinski tretmani			
Rentgenodijagnostika	1650	233	1000
Radionuklidska dijagnost.	40	17	
Ukupno od medicinskih tretmana	1690	250	1000
Ispitivanje nuklearnog oružja	20	10.5	15
nuklearna energetika	0.007 - 0.1	2	0.1
Profesionalno ozrač.	-	9	4
Celokupno ozračenje	4030	2140	3010

Srednje doze za stanovništvo nekih naseljenih mesta Zemlje mogu se bitno razlikovati od navedenih. Tako doza u nekim oblastima može biti manja dva puta od srednje vrednosti, dok u drugim oblastima ona može prevazići srednju za 10 – 100 puta. Osnovni razlog za ovakve varijacije nalazi se u činjenici da stanovništvo različitih regiona dobija različite doze zračenja uslovljene udisanjem potomaka izotopa radona, koji sa najvećim procentom učestvuje u ukupnoj dozi ozračenja stanovništva.



Slika 1
Relativni doprinos raznih izvora ionizujućeg zračenja
u ozračenju stanovništva

2.2.1 Kosmičko zračenje

Zračenje visokih i vrlo visokih energija koje dospeva u zemljinu atmosferu iz kosmičkih prostora zove se primarno kosmičko zračenje. Čine ga prvenstveno jezgra atoma vodonika (protoni) i jezgra drugih lakih atoma. Pri njegovoj interakciji s jezgrima atoma koja se nalaze u atmosferi, dolazi do obrazovanja miona, piona, kaona, neutrona, protona, elektrona i fotona koji čine sekundarno kosmičko zračenje.

Doza koja se dobija od kosmičkog zračenja jako zavisi od nadmorske visine. Ona se udvostručava približno posle svaka dva kilometra. Zavisnost od geografske širine je slaba. Godišnje efektivne ekvivalentne doze se u zavisnosti od nadmorske visine kreću od približno $270 \mu\text{Sv/god}$ (na nivou mora) do oko $1000 \mu\text{Sv/god}$ (na nadmorskoj visini od 3 km). Ove vrednosti se odnose na otvoren prostor. Vrednosti doze ozračenja uslovljene kosmičkim zračenjem, u stanovima su malo niže od gore navedenih zbog ekraniranja kosmičkog zračenja na zidovima i krovovima zgrada.

2.2.2 Gama-zračenje prirodnih radionuklida

Pojava γ -zračenja prirodnih radionuklida iz zemljista vezana je za početak procesa sinteze jezgara u prirodi, odnosno za početak formiranja Kosmosa. Proces nukleosinteze se odigrao pre nekoliko milijardi godina i tom prilikom je formirano, osim poznatih stabilnih, i veliki broj nestabilnih izotopa. Od svih tako nastalih radioizotopa na Zemlji, preživeli su samo oni dugoživeći, sa periodom poluraspada većim od 500 miliona godina, kao što su: ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th .

Većina radionuklida otkrivenih na zemlji mogu se grupisati u tri prirodne radioaktivne familije ili niza. To su: *uranijum-radijumski*, *uranijum-aktinijumski* i *torijumski niz*. Postoji i četvrti – neptunijumski niz koji je stvoren veštački, putem nuklearnih reakcija. Od izotopa koji se mogu naći u prirodi, a ne pripadaju nijednom od navedenih nizova, najznačajniji je ^{40}K . On je prilično zastupljen u zemljinoj kori, te se pri gama-spektrometrijskim merenjima prirodne radijacije, uvek dobro vidi intenzivna kalijumova linija od 1461 KeV.

Nivoi zemaljske radijacije mogu se u velikoj meri razlikovati od mesta do mesta, međutim oko 95% ljudi živi u oblastima gde prosečna doza varira od 300 do 600 $\mu\text{Sv}/\text{god}$. Ipak oko 3% ljudi prima dozu koja prelazi 1 mSv/god . U proseku svetsko stanovništvo prima efektivnu ekvivalentnu dozu od oko 350 $\mu\text{Sv}/\text{god}$ od γ -zračenja prirodnih radionuklida (eksterne prirodne zemaljske radijacije).

2.2.3 Ozračenje ingestijom

Ozračenje ingestijom potiče od radioaktivnih materija koja se nalaze u hrani i vodi. Radionuklidi koji emituju β -zračenje, a učestvuju u ozračenju ingestijom, su u prvom redu ^{40}K i čestično kosmogeni radionuklidi (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na). U proseku ljudi primaju oko 180 $\mu\text{Sv}/\text{god}$. od ^{40}K koga telo apsorbuje uporedno sa neradioaktivnim kalijumom koji je od bitnog značaja za normalno funkcionisanje organizma. Radionuklidi koji emituju α -zračenje (članovi uranijumovog i torijumovog niza) uglavnom se u telo unose zajedno sa hranom (^{210}Pb , ^{210}Po). Koncentracija aktivnosti tih radionuklida u hrani zavisi od njihove koncentracije aktivnosti u zemljisu korišćenom u poljoprivredi.

2.2.4 Ozračenje radonom i njegovim potomcima

Radon učestvuje sa približno 50% u prosečnoj radioaktivnoj dozi koja potiče od svih prirodnih izvora zajedno, što predstavlja oko 1 do 1.5 mSv godišnje. To je nevidljiv gas, bez ukusa i mirisa, čija je gustina sedam i po puta veća od gustine vazduha. Postoje tri izotopa radona i svaki je vezan za jedan od tri radioaktivna niza.

^{219}Rn se još zove i aktinon i potomak je ^{235}U . On je vrlo malo zastupljen u prirodi i njegov doprinos u ozračenju ljudi je neznatan.

^{220}Rn (toron) je potomak ^{232}Th i ima period poluraspada 55 sekundi. Smatra se da je on odgovoran za 10% doze koja se deponuje u ljudska pluća.

^{222}Rn je najobilniji izotop radona i on je potomak ^{238}U . Direktni predak mu je ^{226}Ra , a period poluraspada 3.8 dana.

Radon se transportuje iz dubina zemlje vazdušnim strujama podstaknutim konvek-cijama koje su uslovljene spoljnim metereološkim uslovima i temperaturnim razlikama između tla i građevina.

Koncentracija radona u atmosferi na nivou tla, varira od mesta do mesta, ali su ljudi najviše izloženi radonu u zatvorenim prostorijama. Jedan deo potiče iz spoljnog vazduha, ali mnogo veći deo stiže iz tla i zidova (emanacijom) i tu se stacionira i akumulira. Po nekim mišljenjima [17] stanovništvo industrijski razvijenih zemalja oko 80% vremena provodi unutar stambenih i radnih prostorija. Stoga je sasvim razumljivo zašto se danas velika pažnja poklanja metodama snižavanja nivoa ozračivanja ljudi u zgradama.

Radon se fiksira u plućima, ali tamo boravi samo kratko vreme, pa su mali izgledi da se u plućima dezintegriše i direktno naškodi organizmu. Međutim, produkti raspada radona su metali (bizmut, olovo, polonijum), koji lebde u vazduhu prostorije vezujući se za okolne aerosole, pa se udisanjem fiksiraju za zidove pluća. Tu se raspadaju oslobađajući energiju koja ozbiljno može da ošteti plućna tkiva.

3 Radioaktivnost građevinskih materijala

3.1 Specifična aktivnost prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima

Kada je shvaćeno da je radon najvažniji od svih izvora prirodne radijacije i pošto se pokazalo da on ljudi najviše ozračuje u zatvorenim prostorijama, krenulo se sa obimnim istraživanjem radioaktivnosti građevinskih materijala. Ta istraživanja imala su za cilj otkrivanje materijala sa povišenom specifičnom aktivnošću prirodnih radionuklida, radi ograničavanja njihove primene u građevinarstvu.

Rezultati istraživanja radioaktivnosti građevinskih materijala raznih autora dati su u tabeli 2. Ovi rezultati su dobijeni gama-spektrometrijskim merenjima uzorka, koja daju potpunu karakteristiku radioaktivnosti građevinskih materijala.

U koloni 7 ove tabele su date proračunate efektivne specifične aktivnosti prirodnih radionuklida koje karakterišu veličinu γ -fona (brzinu doze γ -zračenja) u prostorijama koji potiče od datih materijala. Efektivna specifična aktivnost prirodnih radionuklida računa se po formuli

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{t}}(\text{Ra}) + 1.31A_{\text{t}}(\text{Th}) + 0.085A_{\text{t}}(\text{K}) \quad (1)$$

Veza između brzine doze \dot{D} γ -zračenja (nGy/h) (u vazduhu od beskonačne ravni po kojoj su raspoređeni radionuklidi sa datom, efektivnom specifičnom aktivnošću) i efektivne specifične aktivnosti prirodnih radionuklida data je formulom

$$\dot{D} = 1.04A_{\text{eff}} \quad (2)$$

Iz tabele 2 se vidi da efektivna specifična aktivnost u građevinskim materijalima ima širok dijapazon vrednosti (od 16 do 4730 Bq/kg).

Radioaktivnost građevinskog kamena zavisi od planinskih minerala koji su korišćeni za njegovu proizvodnju. Najviše specifične aktivnosti prirodnih radionuklida karakteristične su za minerale vulkanskog porekla (granit, tuf, plovućac), a najniže za karbonatne minerale (mermer, krečnjak). Pesak i šljunak po pravilu imaju specifičnu aktivnost prirodnih radionuklida blisku srednjoj vrednosti za zemljište i Zemljinu koru. Specifična aktivnost prirodnih radionuklida u silikatnoj cigli je nekoliko puta niža od one u crvenoj (glinenoj) cigli, dok je za beton karakterističan prilično veliki dijapazon varijacija specifične aktivnosti uslovljen pre svega specifičnom aktivnošću punilaca.

Iz tabele 2 može se zapaziti da specifična aktivnost prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima zavisi i od mesta proizvodnje sirovine. Jedni te isti građevinski materijali, koji se dobijaju ili izrađuju u raznim zemljama mogu se značajno razlikovati po specifičnim aktivnostima. Tako je npr. specifična aktivnost prirodnih radionuklida u švedskim

Tabela 2 Specifična aktivnost prirodnih radionuklida u različitim građevinskim materijalima

zemlja	građevinski materijal	broj uzoraka	specifična aktivnost $[Bq/kg]$	A_{SF}	literatura
građevinski kamen					
Velika Britanija	granit	7	89	111	204 [2]
Mađarska	mermer	2	18	11	38 [3]
Zapadna Nemačka	škriljac	8	44	56	888 [4]
punioci betona					
Zapadna Nemačka	pesak, šljunak	50	15	18	241 [2]
Istočna Nemačka	pesak, šljunak	59	15	16	340 [5]
Velika Britanija	pesak, šljunak	10	4	7	33 [2]
beton					
SAD	beton	4	26	18	296 [14]
Švedska	laki beton sa stipsinim škriljcem (1947 - 1975)	-	1295	67	770 [2]
Švedska	laki beton sa stipsinim škriljcem (posle 1975)	-	333	28	529 1446 [2]
cigla					
Velika Britanija	silikatna cigla	13	15	4	333 [2]
Norveška	cigla	18	63	74	1136 [7]
Švedska	cigla	-	96	127	962 344 [2]
građevinski materijal od industrijskog otpada					
SAD - Illinois	pepeo	-	3145	7	1850 [8]
SAD - Montana	pepeo	-	81	18	444 143 [8]
SAD	otpad uranske industrije	-	4625	-	~ 4730 [2]
Finska	šljaka	3	102	69	196 209 [2]

građevinskim materijalima po pravilu viša od specifičnih aktivnosti analognih materijala drugih zemalja. Posebno visoka specifična aktivnost radionuklida ustanovljena je u lakom betonu sa puniocem, napravljenim od stipsnog škriljca u Švedskoj. Ovaj materijal je mnogo korišćen za gradnju zgrada, počev od 1930 god., a u tim zgradama danas živi 10% stanovnika Švedske. Zbog visoke specifične aktivnosti radionuklida u tom materijalu njegova proizvodnja je obustavljena 1976 god. [9]. Posebno su interesantni materijali napravljeni od industrijskih otpadaka. U cilju čuvanja prirodnih resursa, sprečavanja zagadživanja Zemljine površine, reka i priobalnih voda, a takođe i u cilju smanjenja troškova proizvodnje građevinskih materijala, počelo se sa korišćenjem industrijskih otpadaka u pravljenju građevinskih materijala. Međutim, u mnogim zemljama je otkrivena visoka specifična aktivnost radionuklida u pepelu, šljaci, fosfogipsu kao i u otpadu industrije uranijuma.

Eksperti komisije za atomsku energiju organizacije ekonomске saradnje i razvoja, pokušali su da bliže definišu pojam normalne i povišene specifične aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima [2]. Oni su za karakteristični (reprezentativni) nivo specifične aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima predložili vrednost:

$$A_{\text{r}}(\text{Ra}) + 1.5A_{\text{r}}(\text{Th}) + 0.1A_{\text{r}}(\text{K}) = 150 \frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \quad (3)$$

Vrednost od 150 Bq/kg je nešto veća od efektivne specifične aktivnosti za Zemljinu koru i za oko 40% veća od one za zemljište. Isti eksperti su predložili uvođenje pojma prvog i drugog povišenog nivoa specifične aktivnosti, koji bi bili za 2 i 4 puta veći od vrednosti karakterističnog nivoa. Međutim, oni nisu ukazali na to da li karakteristični nivo smatraju jednakim srednjoj specifičnoj aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskom materijalu i kakve zaštitne mere treba preuzeti pri premašivanju prvog ili drugog povišenog nivoa.

Naši zakoni propisuju maksimalno dozvoljeni nivo specifične aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima u obliku formule

$$\frac{C_{\text{Ra}}}{400} + \frac{C_{\text{Th}}}{300} + \frac{C_{\text{K}}}{5000} + \frac{C_{\text{V}}}{40} \leq 1 \quad (4)$$

koja transformisana na oblik (3) ima izgled

$$A_{\text{r}}(\text{Ra}) + 1.33A_{\text{r}}(\text{Th}) + 0.08A_{\text{r}}(\text{K}) = 400 \text{ Bq/kg} \quad (5)$$

Iz transformisanog oblika se vidi da je dozvoljeni nivo specifične aktivnosti u našem zakonodavstvu oko 2.5 puta veći od reprezentativnog nivoa koji je predložila pomenuta Komisija.

$$\eta = ?$$

3.2 Koeficijenti emanacije radona u građevinskim materijalima

Brzina ekshalacije (emanacije) radona iz građevinskih konstrukcija zavisi od proizvoda specifične aktivnosti ^{226}Ra i koeficijenta emanacije radona (efektivna specifična aktivnost ^{226}Ra), a takođe i od dužine difuzije ^{222}Rn u građevinskim konstrukcijama.

Većina istraživanja u kojima je eksperimentalno određivan koeficijent emanacije ^{222}Rn vršena su uglavnom za beton i ciglu. Iz tih istraživanja se nije mogla dobiti informacija o tome kako pojedine komponente betona ili cigle utiču na njihov koeficijent emanacije, kao i kako se koeficijent emanacije menja ako se jedna komponenta zameni drugom. Jedno istraživanje vršeno u SSSR-u [10] čiji je cilj bio otkrivanje zakonitosti koje određuju ekshalaciju radona iz građevinskih konstrukcija, obuhvatilo je komponente betona i druge građevinske materijale. Rezultati tog istraživanja dati su u tabeli 3. Radi upoređivanja u tabeli su dati i rezultati istraživanja zemljišta. Iz tabele 3 se vidi da je efektivna specifična aktivnost ^{226}Ra skoro svih istraživanih materijala niža od one za zemljište. Iz toga se može zaključiti da je tle ispod kuća veći izvor radona od samog građevinskog materijala. To naročito važi za prizemne kuće sa drvenim podom i podrumom. Iz tabele se takođe može videti da građevinski gips ima skoro 10 puta manju efektivnu specifičnu aktivnost ^{226}Ra od betona. To znači da gipsani pregradni zidovi treba da imaju mali doprinos u ukupnoj dozi radona koji je emanirao iz zidova u vazduhu prostorije.

Tabela 3 Koeficijent emanacije radona η i efektivna specifična aktivnost $A_s(\text{Ra}) \cdot \eta$ u građevinskim materijalima i zemljištu (srednje vrednosti)

materijal	broj uzoraka	A_s , [Bq/kg]	η [%]	$A_s(\text{Ra}) \cdot \eta$ [Bq/kg]
Glina	23	48	21	7.0
Zemljište	7	21	21	4.1
Građevinski rastvor	4	15	24	3.3
Teški beton	15	27	11	3
Pesak	14	9.6	20	1.9
Laki beton	5	23	9.5	1.5
Silikatna cigla	6	14	10	1.3
Crvena cigla	16	36	1.5	0.55
Cement	13	41	1.3	0.48
Građevinski gips	4	8.9	4.4	0.37
Krečnjak	4	3.7	4.6	0.18

Po vrednosti koeficijenta emanacije η , svi građevinski materijali se mogu grubo podeliti na dve grupe: na materijale koji se pri njihovoj izradi podvrgavaju visokotemperaturnoj

obradi i na one koji se ne podvrgavaju visokotemperaturnoj obradi. Materijali prve grupe (crvena cigla, pepeo, cement, šljaka) imaju koeficijent emanacije od 1 – 2%. Materijali druge grupe (silikatna cigla, šljunak, pesak) imaju oko 10 puta veći koeficijent emanacije (10 – 20%). Znači visokotemperaturna obrada materijala dovodi do snižavanja koeficijenta emanacije, a samim tim i snižavanjem efektivne specifične aktivnosti ^{226}Ra u građevinskim materijalima. Razlog je to što se pri visokotemperaturnoj obradi dešava promena mikrostrukture materijala, odnosno, dolazi do zbijanja mikročestica i zatvaranja pukotina.

Drugi parametar koji određuje brzinu ekshalacije radona je dužina difuzije radona u građevinskim konstrukcijama. Rezultati istraživanja u kojima su korištene razne metode za određivanje dužine difuzije radona, dosta se dobro slažu među sobom. Za dužinu difuzije radona u betonu dobijeno je približno 20 cm, a u cigli 15 cm.

4 Nagomilavanje radona u stambenim zgradama

Rešenje [11] diferencijalne jednačine koja opisuje procese stupanja radona u vazduh prostorije usled njegove ekshalacije iz zidova i podova, radioaktivnog raspada i njegovog prodiranja u prostoriju zajedno sa atmosferskim vazduhom, ima oblik:

$$A_0(t) = \left[\frac{\sum_i q_i S_i}{V(\lambda_0 + \lambda_\nu)} + \frac{A_0^a \lambda_\nu}{\lambda_0 + \lambda_\nu} \right] \{1 - \exp[-(\lambda_0 + \lambda_\nu)t]\} + A_0(0) \cdot \exp[-(\lambda_0 + \lambda_\nu)t] \quad (6)$$

Ovo važi za slučaj da se mešanje radona sa vazduhom prostorije dešava trenutno. U jednačini (6) je q_i - brzina ekshalacije radona iz zida, poda i tavanice, koji imaju površinu S_i , $[Bq/m^2 \cdot s]$; V - zapremina prostorije $[m^3]$; λ_0 - konstanta raspada radona $[s^{-1}]$; λ_ν - frekvencija promene vazduha u prostoriji $[s^{-1}]$; A_0^a - zapreminska aktivnost radona u prostoriji pri $t = 0, [Bq/m^3]$; A_0^a - zapreminska aktivnost radona u atmosferskom vazduhu $[Bq/m^3]$. Ravnotežna zapreminska aktivnost radona u vazduhu prostorije data je izrazom:

$$A_0 = \frac{\sum_i q_i S_i}{V(\lambda_0 + \lambda_\nu)} + \frac{A_0^a \lambda_\nu}{\lambda_0 + \lambda_\nu} \quad (7)$$

Ako je brzina ekshalacije radona za sve zidove, podove i tavanice jednaka, onda je:

$$A_0 = \frac{qS}{V(\lambda_0 + \lambda_\nu)} + \frac{A_0^a \lambda_\nu}{\lambda_0 + \lambda_\nu} \quad (8)$$

gde je S - ukupna površina zidova, podova i tavanica $[m^2]$.

Frekvencija promene vazduha u prostorijama menja se u zavisnosti od konstrukcije prostorija i meteoroloških uslova. Pri jednoj promeni vazduha u prostoriji, koja se odigra za jedan sat $\lambda_\nu = 2.78 \cdot 10^{-4} s^{-1}$. To je vrednost koja premašuje konstantu raspada ^{222}Rn za više od 100 puta. U tom slučaju $\lambda_0 + \lambda_\nu \approx \lambda_\nu$ pa izraz (8) dobija oblik:

$$A_0 = \frac{qS}{V \lambda_\nu} + A_0^a \quad (9)$$

Iz formule (9) vidi se da je zapreminska aktivnost ^{222}Rn u vazduhu prostorije uvek veća od one u atmosferskom vazduhu. Takođe se vidi da je razlika tih zapreminskih aktivnosti upravo proporcionalna brzini ekshalacije radona iz zidova, poda i tavanice, a obrnuto proporcionalna frekvenciji promene vazduha. Kroz faktor S/V se vidi i zavisnost zapreminske aktivnosti radona od razmera i oblika prostorije.

$$\gamma = \frac{P A_{\max}}{A_s' P}$$

4.1 Mehanizam ekshalacije radona

Proces ekshalacije radona može se podeliti na dve etape: emanacija radona kroz ultrašnje pore materijala i difuzija atoma radona na tim porama posle čega on izlazi iz materijala.

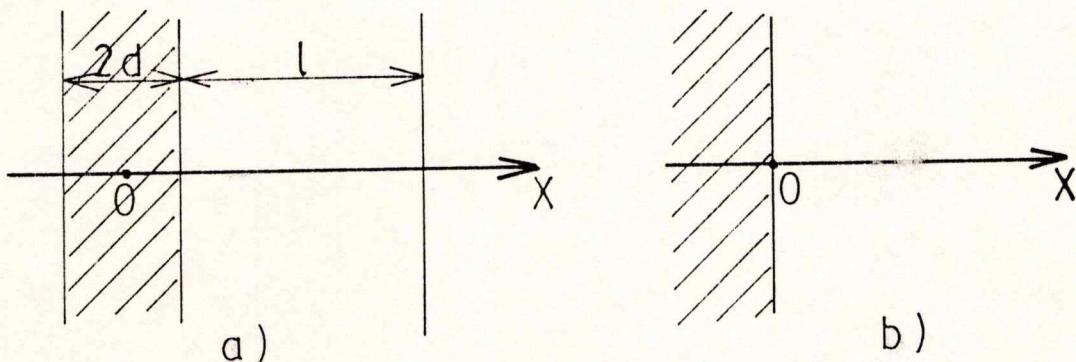
Prilikom razmatranja ekshalacije radona iz zidova prostorije može se smatrati da se difuzioni prenos radona ostvaruje samo u pravcu, normalnom na površinu zida (po koordinati x). Komponente pravca difuzije radona koje su paralelne površini zida, međusobno se poništavaju.

Jednačina difuzije radona u poroznoj sredini ima oblik:

$$\frac{\partial A_0}{\partial t} = \lambda_0 A_{\max} - \lambda_0 A_0 + \frac{b}{p} \frac{\partial^2 A_0}{\partial x^2} \quad (10)$$

gde su $A_{\max} = A_s(Ra) \cdot \eta \rho / p$ – maksimalno moguća zapreminska aktivnost u vazduhu koji se nalazi u porama materijala [Bq/m^3], $A_s(Ra)$ – specifična aktivnost radijuma u materijalu [Bq/kg], ρ – gustina materijala [kg/m^3], η – koeficijent emanacije, p – poroznost materijala, λ_0 – konstanta raspada radona [s^{-1}], a b – koeficijent difuzije [m^2/s].

Da bi rešili jednačinu (10) uzmimo za koordinatni početak tačku koja se nalazi na sredini zida (sl. 2a), a zbog simetrije zadatka protok radona u koordinatnom početku biće jednak nuli.



Sl. 2

a) sloj konačne debljine

b) beskonačan poluprostor

To daje prvi granični uslov:

$$b \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (11)$$

Drugi granični uslov proizilazi iz ravnoteže aktivnosti radona u vazduhu koji se nalazi u zidu. Pri tome se smatra, da se difuzija radona iz zidova debljine $2d$ dešava na ograničenom opsegu spoljne sredine (dubine l). Osim toga u spoljašnjem vazduhu se dešava trenutno mešanje radona, pa je u tom slučaju drugi granični uslov oblika:

$$-b \frac{\partial A_0}{\partial x} |_{x=d} - l \lambda_0 A_0 |_{x=d} = l \frac{\partial A_0}{\partial t} |_{x=d} \quad (12)$$

Smatraćemo da je proces difuzije počeo dovoljno davno, tako da zapreminska aktivnost radona za bilo koje x ne zavisi od vremena, tj.

$$\frac{\partial A_0}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

✓ Resenje stacionarne jednačine difuzije radona pri graničnim uslovima (11) i (12) ima oblik [12]:

$$A_0(x) = A_{\max} \left[1 - \frac{ch(x/l_0)}{sh(d/l_0)} \right] \quad (14)$$

Zapreminska aktivnost radona u spoljašnjem vazduhu je data izrazom:

$$A_0(x) |_{x=d} = A_0 = A_{\max} \left[\frac{1}{1 + \alpha\beta / th\beta} \right] \quad (15)$$

a brzina ekshalacije radona:

$$-b \frac{\partial A_0(x)}{\partial x} |_{x=d} = q = q_{\max} \alpha \left[\frac{1}{1 + \alpha\beta / th\beta} \right] \quad (16)$$

gde su $q_{\max} = A_s(Ra)\mu\varrho\lambda_0 d$ – maksimalno moguća brzina ekshalacije, koja odgovara slučaju izlaska iz materijala svih atoma radona koji su bili u unutrašnjim porama, $\alpha = \frac{l}{dp}$ – odnos razmraza spoljašnje sredine u kojoj se nalazi vazduh i onih na polovini debljine zida, $\beta = \frac{d}{l_0}$ – odnos polovine debljine zida i dužine difuzije radona, a $l_0 = \sqrt{b/p\lambda_0}$ – dužina difuzije radona u poroznom materijalu.

Rešenje jednačine (10) za ploču konačne debljine razlikuje se od rešenja za beskonačni poluprostor, koji opisuje ekshalaciju radona iz zemljišta (sl. 2b). Za ovaj slučaj granični uslovi su:

$$A_0 |_{x=0} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial A_0}{\partial x} |_{x \rightarrow \infty} = 0 \quad (17)$$

U tom slučaju rešenje jednačine (10) dobija oblik:

$$A_0(x) = A_{\max} [1 - \exp(-x/l_0)] \quad ; \quad q = A_s(Ra)\eta\varrho l_0 \lambda_0 \quad (18)$$

Do ovog rešenja se može doći kako direktnim rešavanjem jednačine (10) pri graničnim uslovima (17), tako i iz rešenja (15) i (16) pri graničnim uslovima $d \rightarrow \infty$ i $l \rightarrow \infty$.

Analizirajući izraze (15) i (16) možemo uočiti da ako dužina difuzije radona kroz spoljnu sredinu - l , znatno premašuje ukupnu debljinu materijala - $2d$, onda $\alpha \rightarrow \infty$ pa imamo:

$$q|_{\alpha \rightarrow \infty} \longrightarrow q_{\max} \frac{\operatorname{th}\beta}{\beta} ; \quad A_0|_{\alpha \rightarrow \infty} \longrightarrow 0 \quad (19)$$

a to je slučaj koji odgovara difuziji radona u jako ventiliranoj prostoriji. Brzina ekshalacije radona teži maksimalno mogućoj, a zapreminska aktivnost radona u spoljnoj sredini je vrlo mala zbog velikog razblaženja.

Ako međutim $\alpha \rightarrow 0$ onda se dobija da:

$$q|_{\alpha \rightarrow 0} \longrightarrow 0 ; \quad A_0|_{\alpha \rightarrow 0} \longrightarrow A_{\max} \quad (20)$$

tj. zapreminska aktivnost radona u spoljnoj sredini dostiže vrednost zapreminske aktivnosti radona u porama materijala, a nagomilavanje radona u prostoriji prestaje.

Ako radon difunduje u vazduh hermetički zatvorene prostorije zapremine V , sa ukupnom površinom zidova, poda i tavanice - S i ako su zidovi, pod i tavanica načinjeni od istog materijala debljine $2d$, biće:

$$\alpha = V/(Sdp) \quad (21)$$

Ako se difuzija radona dešava u prostoriji koja se ventilira onda je:

$$\alpha = V \frac{(\lambda_0 + \lambda_\nu)}{(Sdp\lambda_0)} \quad (22)$$

Ovaj izraz se lako može dobiti iz formula (15) i (16) i prvog sabirka u formuli (8). Za prostorije standarnih dimenzija pri uobičajenim uslovima ventilacije, vrednost α za ^{222}Rn varira u granicama od nekoliko stotina do nekoliko hiljada jedinica. Vrednost $(\operatorname{th}\beta)/\beta$ za bilo koje β je manja od jedan. Iz tog razloga se jedinica u imenocima formula (15) i (16) može zanemariti. Ako se sve ovo uzme u obzir dobijaju se izrazi oblika:

$$A_0 = A, (Ra) \eta \varrho d \frac{S}{V} \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + \lambda_\nu} \frac{\operatorname{th}\beta}{\beta} + \frac{\lambda_\nu}{\lambda_0 + \lambda_\nu} A_0^a \quad (23)$$

$$q = A, (Ra) \eta \varrho d \lambda_0 \frac{\operatorname{th}\beta}{\beta} \quad (24)$$

Iz dobijenih formula se može proceniti zapreminska aktivnost ^{222}Rn u prostoriji, kao i brzina njegove ekshalacije na osnovu podataka o karakteristikama građevinskog materijala

(specifična aktivnost radijuma, koeficijent emanacije, dužina difuzije, gustina i poroznost), prostorije (zapremina, površina zidova, poda i tavanice i njihova debljina) i frekvencije promene vazduha.

Zapreminska aktivnost i brzina ekshalacije radona zavise od dužine difuzije radona u građevinskom materijalu preko parametra $(th\beta/\beta)$. Za ^{222}Rn dužina difuzije u građevinskim konstrukcijama iznosi oko 20 cm. Za uobičajene debljine zidova (od 10 do 50 cm) vrednost $(th\beta/\beta)$ je u granicama od 0.68 do 0.98. U tom slučaju osnovni parametar građevinskih materijala koji određuje brzinu ekshalacije radona i njegovu zapreminsku aktivnost u vazduhu prostorije je proizvod specifične aktivnosti ^{226}Ra i koeficijenta emanacije, tj. $A_{\nu}(\text{Ra}) \cdot \eta$. Za ^{220}Rn (toron) $\beta \gg 1.5$ ($l_0 \approx 0.26\text{cm}$), pa je brzina njegove ekshalacije i zapreminska aktivnost proporcionalna dužini difuzije.

Formula za određivanje zapremske aktivnosti radona u vazduhu prostorije (23), izvedena je pod predpostavkom da je frekvencija promene vazduha konstantna. Međutim, kao što je rečeno, frekvencija promene vazduha u prostoriji se menja sa vremenom zavisno od meteoroloških uslova i režima provetrvanja. Ukoliko se uzme da je zapreminska aktivnost radona obrnuto proporcionalna frekvenciji promene vazduha, onda pri variranju frekvencije promene vazduha srednja vrednost zapremske aktivnosti radona neće biti jednakazapreminskoj aktivnosti računatoj po formuli (23), u kojoj je korišćena srednja vrednost frekvencije promene vazduha.

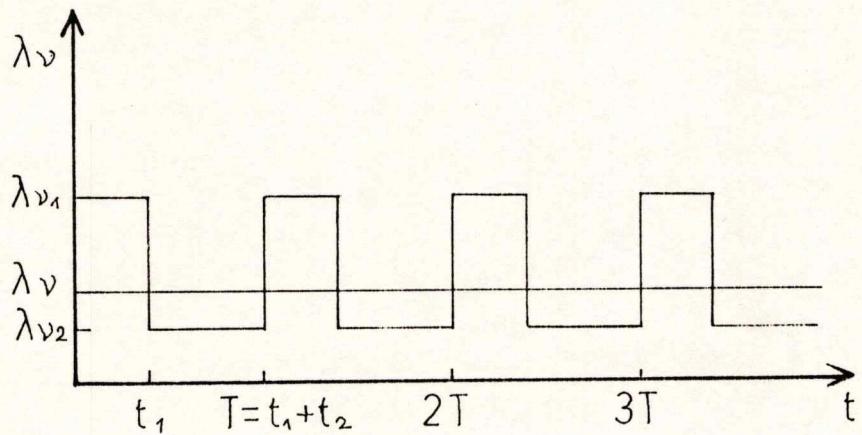
Popravka u formuli (23) na nepostojanost frekvencije promene vazduha zavisi od toga u kojoj meri će se ta veličina menjati. Da bi procenili vrednost popravke, treba izračunati srednju vrednost zapremske aktivnosti radona za sledeći režim ventilacije [1]. Smatraćemo da se u toku vremena t_1 u prostoriji održava konstantna promena vazduha frekvencije λ_{ν_1} (sl. 3), zatim se frekvencija promene vazduha skokovito menja do vrednosti λ_{ν_2} i ostaje konstantna u toku vremena t_2 . Ovaj režim ventilacije se ponavlja sa periodom $T = t_1 + t_2$.

Ako predpostavimo da je srednja vrednost frekvencije promene vazduha $\bar{\lambda}_{\nu} = 1\text{h}^{-1}$ onda ćemo imati:

$$t_1 = \frac{1 - \lambda_{\nu_2}}{\lambda_{\nu_1} - \lambda_{\nu_2}} T \quad ; \quad t_2 = \frac{\lambda_{\nu_1} - 1}{\lambda_{\nu_1} - \lambda_{\nu_2}} T \quad (25)$$

Srednja vrednost zapremske aktivnosti radona (\bar{A}_0) pri takvom režimu ventilacije, može se naći integracijom jednačine (6).

Popravku formule (23) predstavlja odnos zapremskih aktivnosti radona pri nepostojanoj (\bar{A}_0) i postojanoj (A_{01}) promeni vazduha, jednakoj $\lambda_{\nu} = 1\text{h}^{-1}$. Pri tom se mora uzeti u obzir nepostojanost promene vazduha pri računanju srednje zapremske aktivnosti radona po formuli (15).



Slika 3
Zavisnost frekvencije promene vazduha od vremena

4.2 Nagomilavanje torona (^{220}Rn) i njegovih potomaka u vazduhu prostorija

Nagomilavanje torona i produkata njegovog raspada u vazduhu stambenih prostorija pokrava se, u principu, istim zakonitostima kojima podležu i odgovarajući procesi za ^{222}Rn . Međutim, konstante raspada tih izotopa i njihovih potomaka se razlikuju, pa je tako konstanta raspada torona ($\lambda_0 = 45.12\text{h}^{-1}$) znatno veća od one za radon ($\lambda_0 = 7.555 \cdot 10^{-3}\text{h}^{-1}$). Iz tog razloga se u imeniocu izraza (7) i (8) može zanemariti veličina λ_ν u poređenju sa λ_0 i to u slučaju da promena vazduha u prostoriji nije preterano velika. Formula (8) tada dobija oblik:

$$A_0 = \frac{qS}{V\lambda_0} + \frac{\lambda_\nu}{\lambda_0} A_0^a \quad (26)$$

Pokazalo se da zapreminska aktivnost torona praktično ne zavisi od frekvencije promene vazduha. Uticaj drugog člana u (26) je takođe mali, jer je odnos λ_ν/λ_0 pri jednoj promeni vazduha, jednak 0.022.

Iz formule (16) se vidi da je dužina difuzije torona 77.3 puta manja od one za radon. To je razlog zbog čega ekshalacija torona iz zemljišta, koje se nalazi ispod zgrade, nema

bitniji doprinos u zapreminskoj aktivnosti torona u vazduhu prostorije. Za vreme difuzije torona kroz pukotine u podu on se praktično u potpunosti raspada.

Brzina ekshalacije torona data je formulom

$$q = A_{\text{r}}(\text{Th})\eta\varrho\lambda_0(l_0)_{T_n} \quad (27)$$

gde je $A_{\text{r}}(\text{Th})$ – specifična aktivnost ^{228}Th u građevinskom materijalu, a $(l_0)_{T_n}$ – dužina difuzije torona.

Formule (26) i (27) važe samo u slučaju kada se ekshalacija torona iz zidova određuje procesom difuzije. Jak veter može dovesti do isterivanja torona iz zidova, što je ekvivalentno povećanju dužine difuzije i uslovjava povećanje brzine ekshalacije i zapreminske aktivnosti torona u vazduhu prostorije. Za ^{222}Rn taj efekat je beznačajan, pošto je brzina ekshalacije radona obično bliska maksimalno mogućoj.

4.3 Procena dobijene doze uslovljene potomcima izotopa radona

Proračuni zapreminske aktivnosti ^{222}Rn u vazduhu prostorija, koji su bili izvedeni na osnovu formule (23) davali su srednju vrednost od $4.92[\text{Bq}/\text{m}^3]$ [1]. Računanjem popravke formule (23) na nepostojanost promene vazduha u prostoriji, zapreminska aktivnost ^{222}Rn iznosi $7.4\text{Bq}/\text{m}^3$. Ako se tome doda i srednja zapreminska aktivnost ^{222}Rn u atmosferskom vazduhu koja iznosi $6\text{Bq}/\text{m}^3$ [13], dobija se konačna vrednost zapreminske aktivnosti ^{222}Rn u vazduhu stambenih prostorija od $13.4\text{Bq}/\text{m}^3$. To je znatno manja vrednost od srednje vrednosti merene u raznim zemljama ($45\text{Bq}/\text{m}^3$). Razlog ovog neslaganja je neuračunata ekshalacija ^{222}Rn iz zemljista ispod zgrade, koja ima glavni doprinos u zapreminskoj aktivnosti radona u vazduhu prostorija. Relativni doprinosi radona koji se nalazi u atmosferskom vazduhu, ekshaliranog radona iz zidova i zemljista su $13, 17$ i 70% respektivno.

Međunarodna komisija za radioološku zaštitu je za procenu efektivnih ekvivalentnih doza uslovljenih potomcima izotopa ^{220}Rn i ^{222}Rn koristila tri situacije (tabela 4).

Tabela 4 Efektivna ekvivalentna doza koja potiče od potomaka raspada izotopa radona pri različitim uslovima

Broj situacija	zapreminska aktivnost potomaka radona $A_0 [\text{Bq}/\text{m}^3]$				efektivna ekvivalentna doza $[\mu\text{Sv}/\text{god}]$		
	^{222}Rn		^{220}Rn		^{222}Rn	^{220}Rn	UKUPNO
	prostorija	atmosfera	prostorija	atmosfera			
1.	2.7	4.2	0	0.2	267	8	275
2.	6.0	4.2	0.8	0.2	521	239	760
3.	20.2	4.2	0.8	0.2	1614	239	1853

U prvoj situaciji ^{222}Rn i ^{220}Rn ne ulaze u vazduh prostorije iz građevinskih konstrukcija i zemljišta, druga – podrazumeva da izotopi radona ulaze u vazduh prostorije samo ekshalacijom iz građevinskih konstrukcija (gornji spratovi višespratnica), treća – izotopi radona ekshaliraju, kako iz građevinskih konstrukcija, tako i iz zemljišta ispod zgrade.

Iz tabele 4 se vidi da je doza koja se dobije samo od ekshalacije izotopa radona iz građevinskih konstrukcija jednaka $485 \mu\text{Sv/god}$. Doza dobijena zbog ekshalacije radona iz zemljišta pod zgradom iznosi $1093 \mu\text{Sv/god}$. Ovi proračuni pokazuju da su potomci radona koji se nalaze u vazduhu stambenih prostorija glavni izvor ozračenja stanovništva.

Treba reći da je ozračenju od potomaka izotopa radona najviše izloženo plućno tkivo ljudi (pulmonalni i traheobronhijalni deo). Nagomilavanje potomaka radona u vazduhu stambenih prostorija može izazvati oko 10% primećenih slučajeva raka pluća pri srednjim vrednostima zapreminskih aktivnosti [14].

5 Gama - spektrometrijsko određivanje koncentracije prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima

Radionuklidi u prirodi se raspadaju α - ili β - raspadom, koje najčešće prati i emisija γ -kvantata. Identifikacija radionuklida je moguća merenjem spektara α ili γ -zračenja, koji imaju diskretne energije, dok je identifikacija radionuklida preko kontinuiranog spektra β -zračenja praktično nemoguća. Pošto je domet α -zračenja u materijalima veoma mali, neophodno bi bilo izraditi vrlo tanke izvore (uzorke) da bi degradacija energije α -zračenja u njima bila zanemarljiva.

Sem nekoliko retkih čistih β -emitera (${}^3\text{H}$, ${}^{90}\text{Sr}$) svi radionuklidi emituju γ -zračenje, pa je γ -spektrometrija najrasprostranjenija metoda, za određivanje koncentracije prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima.

Kvalitetna γ -spektrometrija se zbog složenosti spektra, visoke energije i relativno male ionizacione sposobnosti gama zraka, može izvesti samo sa dva tipa detektora:

- Neorganskim scintilacionim NaI(Tl)
- poluprovodničkim Ge(Li) i HPGe detektorima

Za scintilacione detektore je karakteristična velika efikasnost i slaba rezolucija. Poluprovodnički detektori imaju znatno veću rezoluciju (i do 100 puta), ali i znatno manju efikasnost od scintilacionih (sl. 5.1)

Osnovne karakteristike kristalnog germanijuma i scintilacionog spektrometra sa NaI(Tl) koje su relevantne za gama-spektrometriju, navedeni su u tabelama 5.1 i 5.2.

Tabela 5.1 Osnovne karakteristike kristalnog germanijuma

gustina	5330 kgm^{-3}
energijski procep	0.73 eV
energija po paru nosilaca	2.95 eV
redni broj Z za Ge	32

Tabela 5.2 Osnovne karakteristike scintilacionog NaI(Tl) detektora

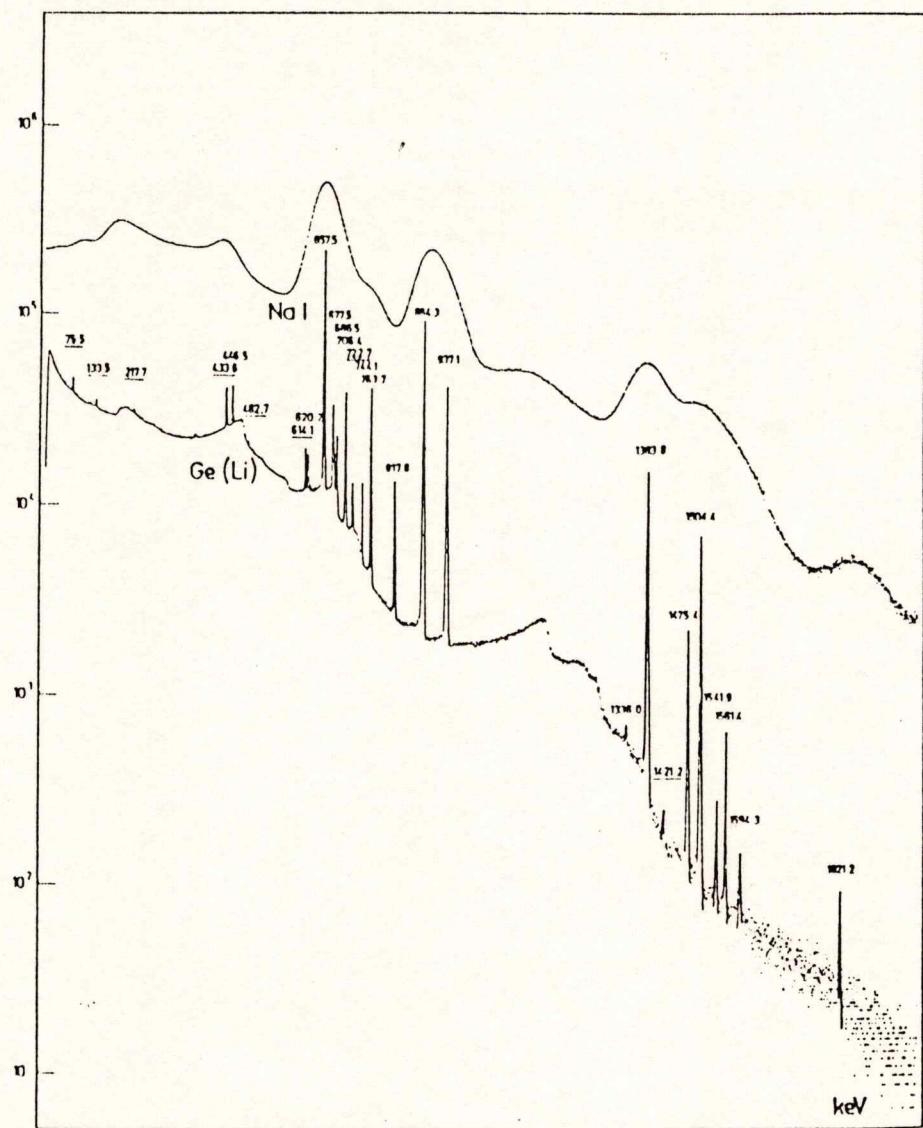
gustina NaI	3670 kgm ⁻³
redni broj Z za molekul NaI	50
energija po jednom emitovanom elektronu sa fotokatode	3.4 KeV

Iz tabele 5.1 i 5.2 se vidi da je srednji Z za molekul NaI jednak 50, a za Ge je 32, pa je verovatnoća za apsorpciju gama-zraka u NaI veća, iako je gustina NaI manja od gustine Ge. Sa druge strane niska energija koja je potrebna za produkciju para elektron-šupljina (2.95 eV) uslovjava znatno veću rezoluciju Ge(Li) detektora.

U Ge(Li) detektoru driftovan je litijum za kompenzaciju nosilaca nanelektrisanja u osnovnom materijalu. Ovaj detektor se posle fabrikacije mora trajno držati na niskoj temperaturi (temperatura tečnog azota od 77 K) da bi se sprečilo redriftovanje Li.

Kada se govori o gama-spektrometrijskom određivanju koncentracije prirodnih radio nuklida u građevinskim materijalima u slučaju kada je potrebno izmeriti veliki broj uzorka za kratko vreme (desetak uzorka dnevno), onda treba reći da su za izvršavanje tog zadatka pogodniji NaI(Tl) detektori. Minimalno merljiva specifična aktivnost prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima zavisi od veličine detektora, mase istraživanog uzorka i geometrije merenja, a poznato je da NaI(Tl) detektori gotovo nemaju ograničenja kada su u pitanju njihove dimenzije što nije slučaj sa Ge(Li) detektorima. Prednost Ge(Li) detektora u odnosu na NaI(Tl) je u tome, što osim određivanja specifične aktivnosti nekih radionuklida uranijumovog i torijumovog niza, on može detektovati i eventualno narušavanje ravnoteže u tim nizovima. Međutim moguće narušavanje ravnoteže između ²³⁸U i ²²⁶Ra (u uranijumovom nizu) nema suštinskog značaja za određivanje specifične aktivnosti ²²⁶Ra zbog toga, što je doprinos radijumovih predhodnika u jačini doze γ - zračenja (proračunat u uslovima ravnoteže produkata raspada uranijumovog niza) vrlo mali (oko 1%). Zato pomeranje ravnoteže između uranijuma i radijuma (čak i nekoliko puta) ne menja bitno, stvorenu jačinu doze γ - zračenja. Što se tiče narušavanja radioaktivne ravnoteže u torijumovom nizu, ono se praktično ne primećuje u prirodnim materijalima, već može nastati kao rezultat hemijske prerade materijala. Zbog toga bi pri istraživanju takvih uzorka (npr. fosfogipsa) trebalo koristiti Ge(Li) spektrometre. Kada se govori o prirodnim materijalima, onda se može reći da specifične aktivnosti ²³²Th (²²⁸Th), ²²⁶Ra i ⁴⁰K u potpunosti karakterišu radioaktivnost tih materijala.

Pošto pomeranje radioaktivne ravnoteže u uranijumovom i torijumovom nizu praktično nema značaja pri određivanju specifičnih aktivnosti ²²⁶Ra i ²³²Th, u uzorcima građevinskih materijala, onda se radioaktivnost građevinskih materijala može istraživati sa zadovoljavajućom tačnošću - NaI(Tl) detektorima.



Sl. 5.1 Komparativni spektar snimljen neorganskim scintilacionim NaI(Tl), odnosno poluprovodničkim Ge(Li) detektorom

Postoje dva tipa NaI(Tl) detektora:

- sa kompaktnim kristalom cilindričnog oblika
 - sa kristalom oblika jame

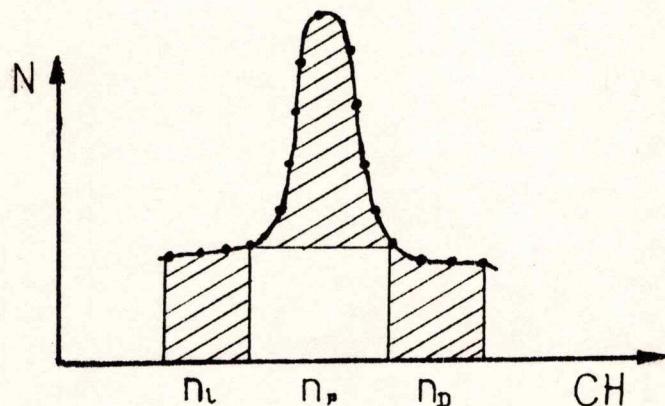
Kada se koriste NaI(Tl) detektori sa kompaktnim kristalom, mereni uzorak se stavlja ili u cilindrični sud koji se postavlja neposredno na telo kristala ili u sud koji obuhvata kristal (geometrija Marinelli). Kod NaI(Tl) detektora koji imaju kristal oblika jame, uzorak se stavlja u sud koji ispunjava celu zapreminu jame. Pri merenju specifične aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima, neophodna osetljivost se može postići sa oba tipa detektora. Osetljivost NaI(Tl) detektora oblika jame je nekoliko puta veća od one za NaI(Tl) detektor sa kompaktnim kristalom pri jednakoj masi uzorka. Razlog tome je bolja geometrijska efikasnost NaI(Tl) detektora oblika jame. Ipak, da bi ovaj tip detektora imao dovoljnu osetljivost, mora imati jamu velike zapremine (nekoliko stotina kubnih centimetara), koja može da primi uzorak zadovoljavajuće mase. Osnovna prednost NaI(Tl) detektora oblika jame je mogućnost određivanja sadržaja prirodnih radionuklida u uzorcima male mase sa zadovoljavajućom tačnošću.

6 Merna tehnika

6.1 Određivanje spektralnog intenziteta

Većina radionuklida se raspada uz emisiju karakterističnog γ -zračenja, što znači da se na osnovu energije γ -zračenja može identifikovati vrsta radionuklida. Sa druge strane, spektralni intenzitet γ -zračenja je proporcionalan količini (aktivnosti) radionuklida u datom uzorku.

Da bi se odredio spektralni intenzitet I neke linije (vrha totalne apsorpcije) mora se prvo odrediti njen položaj u spektru, a to je moguće učiniti direktnim očitavanjem rednog broja kanala nad kojim se nalazi njena centroidea. Moguće je vršiti i direktno očitavanje energije na kojoj se nalazi vrh totalne apsorpcije (VTA), ali tek posle izvršene energijske kalibracije koja podrazumeva snimanje spektra standardnih izvora sa tačno poznatim energijama njihovih intenzivnih linija. Vrh totalne apsorpcije je superioniran na kontinuum koji potiče od Komptonovog rasejanja, te da bi se odredio broj impulsa pod identifikovanim VTA, potrebno je od ukupnog odbroja pod VTA oduzeti odbroj kontinuma za isti broj kanala. Odbroj kontinuma pod VTA se približno izračunava nalaženjem srednje vrednosti fona nad n_L kanala levo i n_D kanala desno od njega i svođenjem na n_P kanala nad kojima leži pik (sl. 6.1.1).



Sl. 6.1.1

Kriterijum koji govori o tome koji domen spektra pripada VTA, a gde počinje kontinuum je sledeći: kada se od VTA "spuštamo" nalevo i nadesno u jednom trenutku ćemo doći u područje gde su sadržaji kanala unutar statističke grške međusobno jednaki. Na tom mestu prestaje linija (VTA), a počinje kontinuum.

Odbroj pod vrhom totalne apsorpcije se računa po formuli:

$$N = P - \left(\frac{L + D}{n_L + n_D} \right) n_P \quad (28)$$

gde je:

P - ukupan odbroj pod VTA

$\left(\frac{L+D}{n_L+n_D} \right)$ - srednja vrednost fona

L - odbroj nad n_L kanala levo od VTA

D - odbroj nad n_D kanala desno od VTA

n_L i n_D - broj kanala iz kojih se računa fon (levo i desno od VTA)

n_P - broj kanala iz kojih se računa VTA

Kada se izraz (28) podeli sa vremenom merenja spektra (t), dobija se formula za izračunavanje spektralnog intenziteta linije, koja ima oblik:

$$I = \frac{1}{t} \left[P - \left(\frac{L + D}{n_L + n_D} \right) n_P \right] \quad (29)$$

Ako se sa leve i desne strane VTA markira isti broj kanala tj. $n_L = n_D = n$ onda formula (29) prelazi u:

$$I = \frac{1}{t} \left[P - (L + D) \frac{n_P}{2n} \right] \quad (30)$$

greška spektralnog intenziteta se u tom slučaju računa po formuli:

$$\Delta I = \frac{1}{t} \sqrt{P + (L + D) \frac{n_P^2}{4n^2}} \quad (31)$$

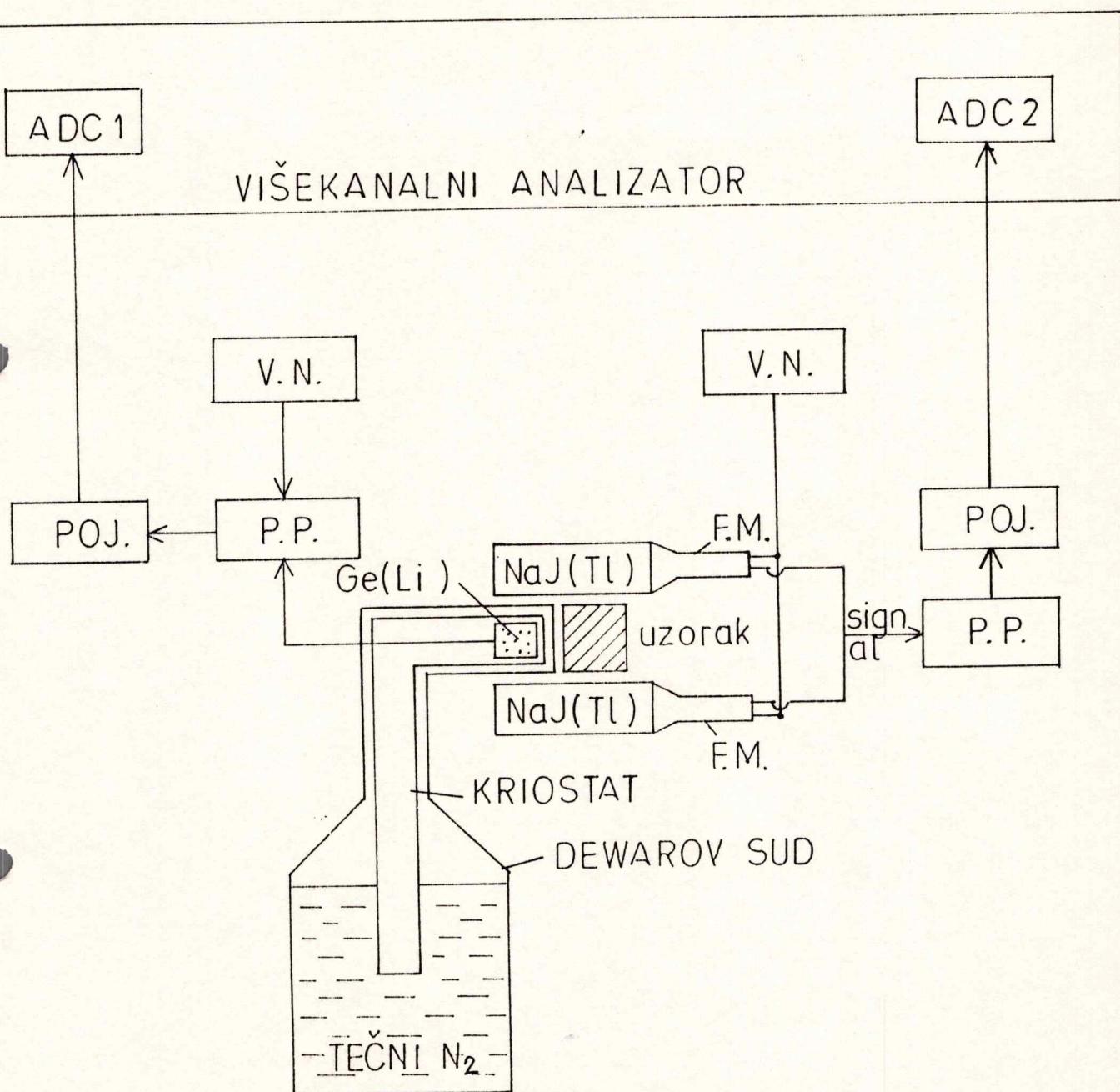
6.2 Instrumenti

γ -spektrometrijska merenja su izvođena pomoću "Closed (And Coaxial)" Ge(Li) detektora "Canberra" i NaI(Tl) detektora oblika jame.

Poluprovodnički Ge(Li) detektor ima osjetljivu zapreminu oko 80 cm^3 , nominalnu efikasnost 15%, a moć razlaganja FWHM (Full Weight Half Maksimum) - 2.6 KeV na 1332 KeV. Ovaj detektor se mora permanentno održavati na temperaturi tečnog azota (77 K) i to tako što se postavlja u vakuum kriostat preko koga se ostvaruje kontakt sa rezervoarom tečnog azota.

Scintilacioni NaI(Tl) detektor je oblika jame i dimenzija 9×9 inča sa aksijalnom rupom od 3 inča i 6 fotomultiplikatora. Moć razlaganja ovog detektora je 8% na liniji Cs(662 KeV). Efikasnost NaI(Tl) detektora na vrhu totalne apsorpcije je oko 30% (na 1332 KeV) i pri dimenzijama uzorka cilindričnog oblika $h=6.1 \text{ cm}$ i $2r = 7\text{cm}$.

Merenja koja su vršena simultano Ge(Li) i NaI(Tl) detektorima sprovedena su pomoću aparature prikazane na slici 6.2.1.



Sl. 6.2.1 Shema sistema za gama-spektrometriju

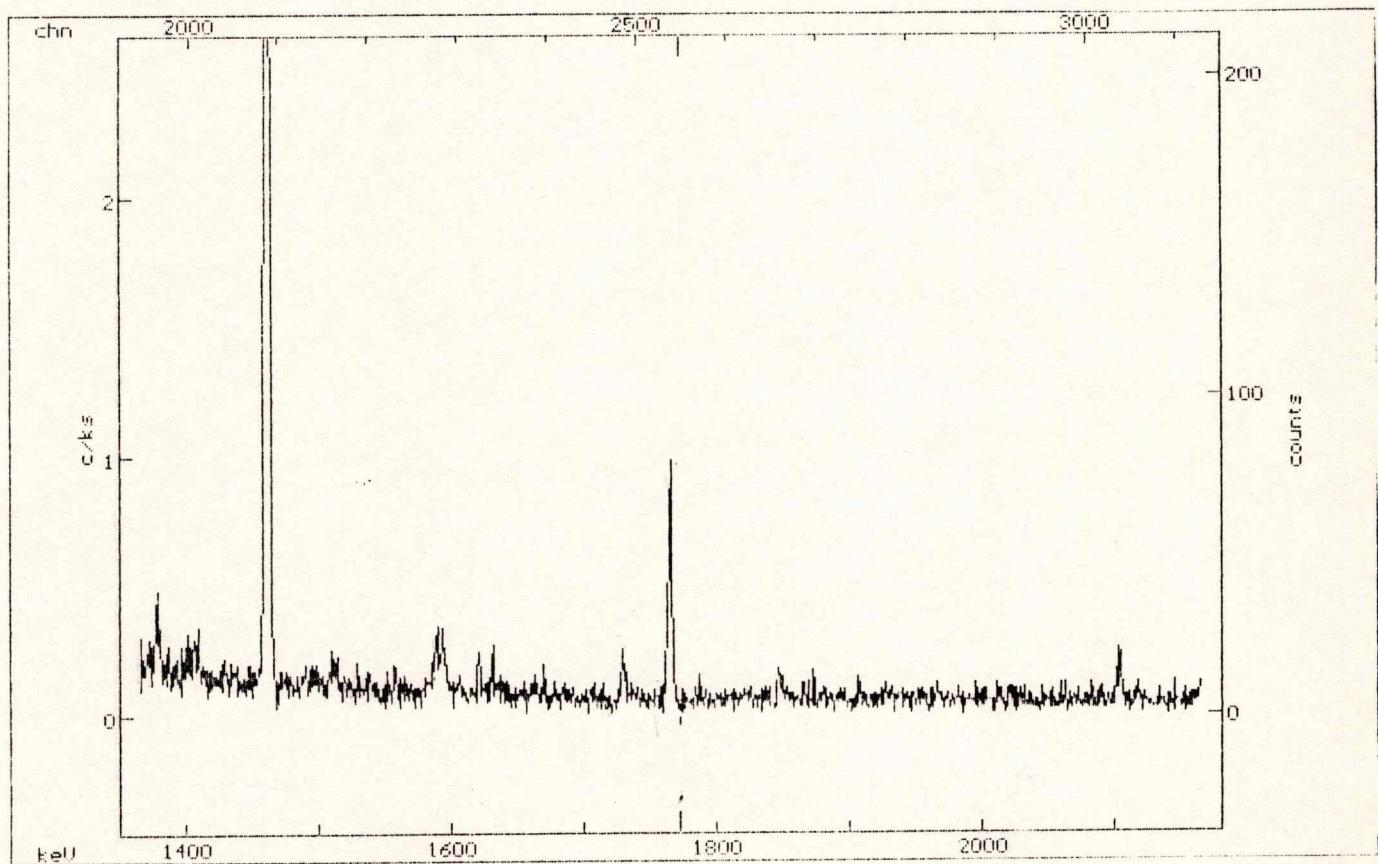
Meranja koja su izvođena samo NaI(Tl) detektorom (kratkotrajna snimanja uzoraka građevinskih materijala) sprovedena su prema istoj šemi, stim što je pri tom deo aparature koja je povezana sa Ge(Li) detektorom bio isključen.

Detektori su bili smešteni u niskofonsku komoru koja ih je štitila od zračenja iz okoline. Zidovi komore su izrađeni od brodskog čeličnog lima, livenog pre II svetskog rata, pa stoga pouzdano nisu kontaminirani dugoživućim fisionim proizvodima. Debljina zidova komore je 25 cm, a njena korisna zapremina 1 m^3 . Integralni fon u komori u energijskom opsegu od 30 KeV - 2 MeV je manji od 1 impulsa/s za navedeni Ge(Li) detektor.

7 Izbor analitičkih linija

Imajući u vidu loše razlaganje NaI(Tl) detektora, trebalo je naći energetski dovoljno razmaknute spektralne linije pomoću kojih bi se mogao odrediti sadržaj ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th u uzorku. Obzirom da ^{40}K ima samo jednu spektralnu liniju koja ga karakteriše (1461 KeV), a koja je vrlo intenzivna u spektrima uzoraka građevinskih materijala, nije bilo dileme oko izbora analitičke linije za ^{40}K .

Za određivanje sadržaja ^{226}Ra u uzorcima korišćena je linija od 1764 Kev zbog toga što se ona najbolje vidi u spektru NaI(Tl) detektora, tj. ona je najbolje energetski odvojena od ostalih intenzivnih linija (linija ^{40}K i ^{232}Th). Potvda ovoga je spektar snimljen Ge(Li) detektorom u okolini energije 1764 KeV (sl. 7.1) iz koga se vidi da oko te linije nema

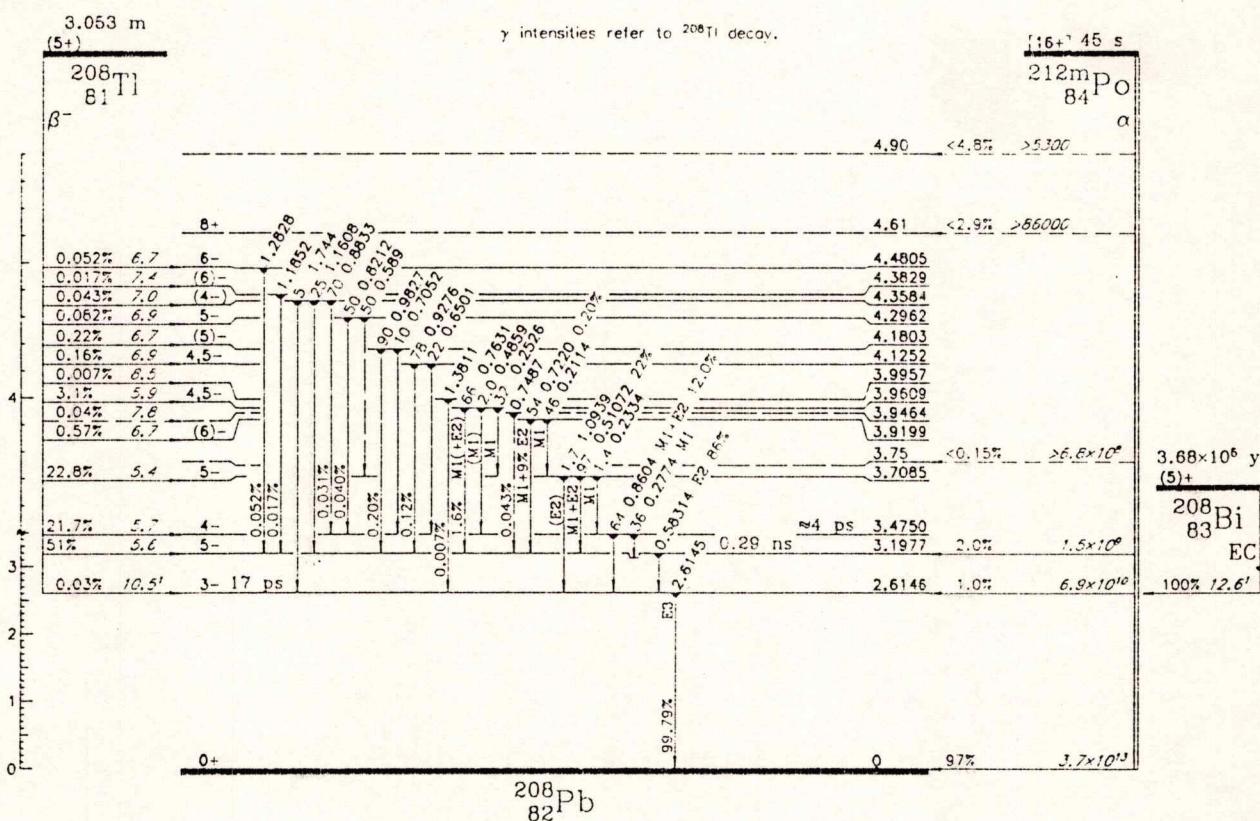


Sl. 7.1 Spektar zemljišta KR3 snimljen Ge(Li) detektorom

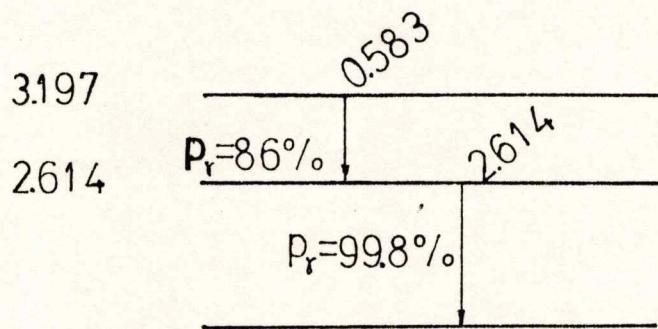
nikakvih drugih linija koje bi predstavljale smetnju pri određivanju spektralnog intenziteta na NaI(Tl) detektoru. Za određivanje sadržaja ^{232}Th u uzorcima, korišćena je linija na

energiji 3197 KeV koja je takođe "čista" jer preko 2614 KeV nema linija koje bi poticale od raspada u prirodnim radioaktivnim nizovima.

Iz šeme raspada ^{208}Tl (sl. 7.2.a) vidi se da je linija na energiji 3197 KeV ustvari suming energija dva istovremeno emitovana γ -zraka koji su detektovani kao jedan. Energija takvog "suming" impulsa odgovara zbiru energija istovremeno detektovanih fotona. U ovom slučaju govorimo o pravim koincidencijama. U torijumovom nizu su za ^{208}Tl dve najintenzivnije linije uključene u kaskadu koja uslovjava koincidenciju (sl. 7.2.b). To su linije na energijama od 583 KeV ($p_\gamma = 86\%$) i 2614 KeV ($p_\gamma = 99.8\%$).



Sl. 7.2.a Shema raspada ^{208}Tl



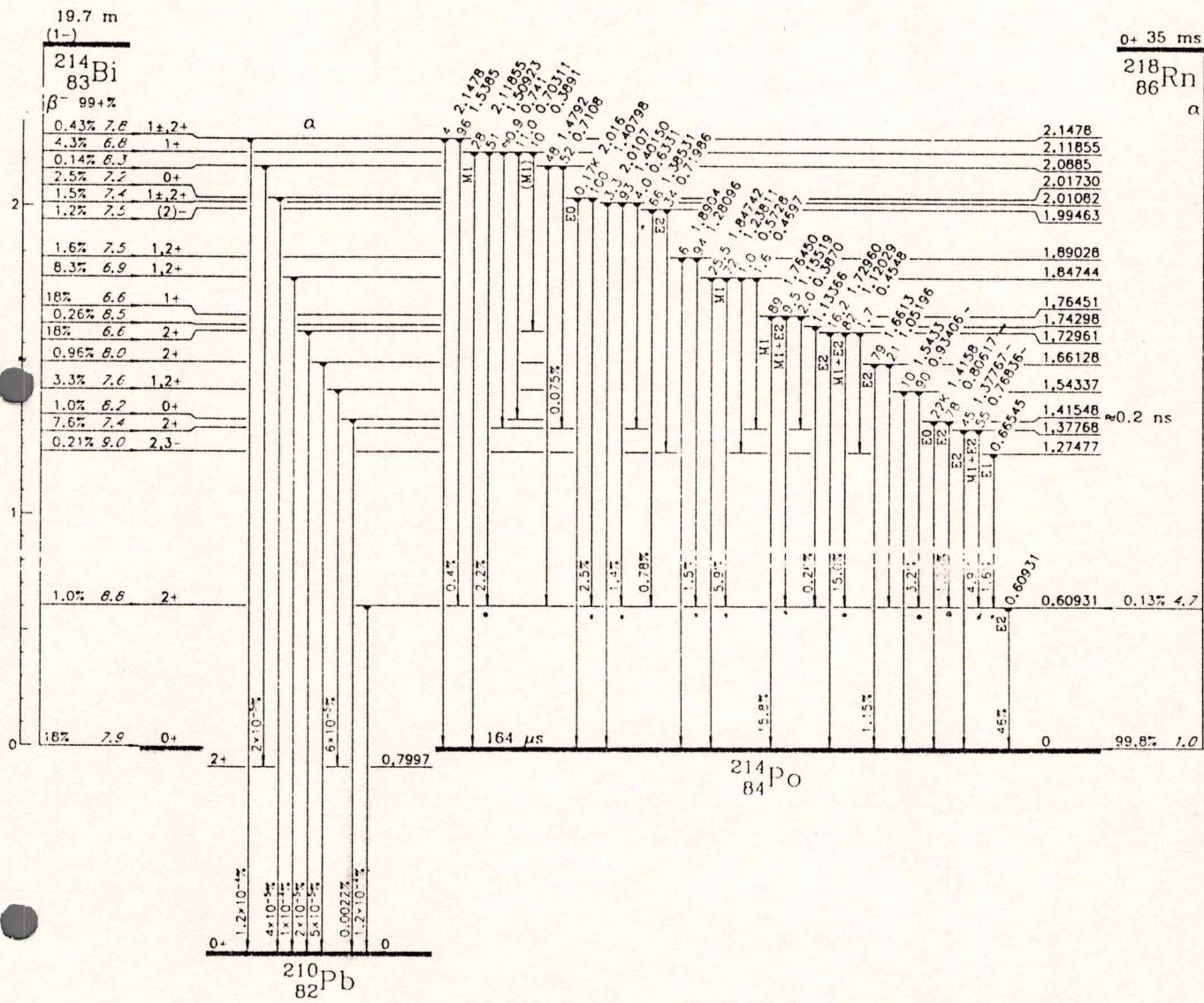
Sl. 7.2.b Kaskada dve najintenzivnije linije koje se javljaju pri raspadu ^{208}Tl

Suming linija energije od 3197 Kev može se koristiti za određivanje sadržaja ^{232}Th u uzorcima, samo kada se merenja vrše velikim detektorima koji obuhvataju izvor, pa samim tim imaju veliku verovatnoću detektovanja dva istovremeno emitovana γ -zraka (583 KeV i 2614 KeV). Detektor koji je korišćen za merenje u ovom radu (NaI(Tl)) imao je sve gore navedene osobine.

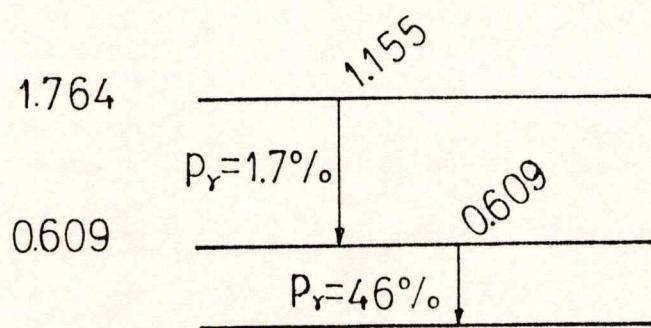
Linija korišćena za određivanje sadržaja ^{226}Ra koja potiče iz raspada ^{214}Bi (sl. 7.3.a) takođe podleže suming efektu. Prelaz pobuđenog jezgra ^{214}Bi u osnovno stanje može se vršiti kako direktnim prelazom sa nivoa od 1764 KeV ($p_\gamma = 15.8\%$) na osnovno stanje, tako i kaskadom preko nivoa od 609 KeV (sl. 7.3.b), tj.

$$609 \text{ KeV} (p_\gamma = 46\%) + 1155 \text{ KeV} (p_\gamma = 1.7\%) = 1764 \text{ KeV}$$

Celokupni izbor linija je verifikovan i testiran kod kalibracije detektora na efikasnost (poglavlje 8.2).



Sl. 7.3.a Shema raspada ^{214}Bi



Sl. 7.3.b Kaskada dve najintenzivnije linije koje se javljaju pri raspadu ^{214}Bi

8 Eksperimentalni rezultati

8.1 Merenje fona

Merenja fona sprovedena su kako NaI(Tl) tako i Ge(Li) detektorom. Mereni su odbroji u piku (P) i levo (L) i desno (D) od njega (kontinuum). Spektralni intenzitet vrha totalne apsorpcije (I) računat je po formuli (30.), a njegova greška po formuli (31). Energije na kojima je računat spektralni intenzitet su:

- 1461 KeV - ^{40}K
- 1764 KeV - ^{226}Ra
- 2614 KeV - ^{232}Th (korišćena samo pri merenju Ge(Li) detektorom)
- 3197 KeV - suming linija ^{232}Th (korišćena smo pri merenju NaI(Tl) detektorom)

Pri markiranju kanala uzeto je $n_L = n_D$. Dobijeni rezultati dati su u tabelama 1 a, b, c i 2 a, b, c.

Vrednost spektralnog intenziteta fona I_{FSR} iz tabele 1c korišćena je pri obradi rezultata dobijenih za uzorke K3, K6, KR5, FOS, dok su vrednosti spektralnog intenziteta fona iz tabele 2.c korišćeni pri obradi rezultata dobijenih za uzorke SIP, OPK (korišćen - F4) i uzorke BFC1, BFC2,..., BFC10 (korišćen - F5).

Fon je meren 3-4 dana.

Tabela 1a Rezultati merenja odbroja koji daje fon na NaI(Tl) detektoru

broj merenja	vreme merenja [ks]	1461 KeV - ^{40}K			1764 KeV - ^{226}Ra		
		P	L	D	P	L	D
F1	346.851	972096	33563	22498	358582	22498	10590
F2	327.726	909904	30808	20548	331503	20548	9761
F3	404.186	1121735	37896	25228	408333	25228	12077

broj merenja	vreme merenja [ks]	3197 KeV - ^{232}Th		
		P	L	D
F1	346.851	93279	5517	4588
F2	327.726	85559	4931	3949
F3	404.186	105393	6065	4823

Tabela 1b Broj kanala pod pikom i kontinuumom

1461 KeV - ^{40}K			1764 KeV - ^{226}Ra			3197 KeV - ^{232}Th		
n _P	n _L	n _D	n _P	n _L	n _D	n _P	n _L	n _D
382	20	20	425	20	20	340	20	20

Tabela 1c Spektralni intenzitet fona za NaI(Tl) detektor

broj merenja	vreme merenja [ks]	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
		I _F (ks) ⁻¹	I _F (ks) ⁻¹	I _F (ks) ⁻¹
F1	346.851	1259 \pm 7.1	20 \pm 5.8	21 \pm 2.6
F2	327.726	1280 \pm 7.2	29 \pm 5.9	31 \pm 2.6
F3	404.186	1284 \pm 7.2	30 \pm 5.3	32 \pm 2.3
F _{sr}		1274 \pm 4.1	26 \pm 3.3	28 \pm 1.4

Srednja vrednost spektralnog intenziteta fona u tabeli 1c računata je po formuli:

$$I_{FSR} = \frac{I_{F1} + I_{F2} + I_{F3}}{3} \quad (32)$$

a greška za I_{FSR} računata je po formuli:

$$\Delta I_{FSR} = \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta I_{F1})^2 + (\Delta I_{F2})^2 + (\Delta I_{F3})^2} \quad (33)$$

Tabela 2a Rezultati merenja odbroja koji daje fon na NaI(Tl) i Ge(Li) detektoru

broj merenja	vreme merenja [ks]	1461 KeV - ^{40}K			1764 KeV - ^{226}Ra		
		P	L	D	P	L	D
F4(Ge)	255.113	1086	93	86	255	57	53
F4(NaI)	254.890	758338	25047	14685	210920	14685	8373
F5(Ge)	243.525	1009	103	67	228	62	60
F5(NaI)	243.416	720457	23931	14200	200463	14200	8161

broj merenja	vreme merenja [ks]	2614 KeV - ^{232}Th			3197 KeV - ^{232}Th		
		P	L	D	P	L	D
F4(Ge)	255.113	305	45	50	-	-	-
F4(NaI)	254.890	-	-	-	74176	8031	6209
F5(Ge)	243.525	286	46	40	-	-	-
F5(NaI)	243.416	-	-	-	70871	7619	5968

Tabela 2b Broj kanala pod pikom i kontinuumom za NaI(Tl) i Ge(Li) detektor

DETTEKTOR	1461 KeV - ^{40}K			1764 KeV - ^{226}Ra			2614 KeV - ^{232}Th			3197 KeV - ^{232}Th		
	n _P	n _L	n _D	n _P	n _L	n _D	n _P	n _L	n _D	n _P	n _L	n _D
Ge(Li)	14	7	7	18	8	8	21	10	11	-	-	-
NaI((Tl))	210	10	10	155	10	10	-	-	-	186	20	20

Tabela 2c Spektralni intenzitet fona za NaI(Tl) i Ge(Li) detektor

broj merenja	vreme merenja [ks]	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra
		, $I_F(\text{ks})^{-1}$	$I_F(\text{ks})^{-1}$
F4(Ge)	255.113	3.6 ± 0.1	0.5 ± 0.1
F4(NaI)	254.890	1338 ± 9	126 ± 5
F5(Ge)	243.525	3.5 ± 0.1	0.4 ± 0.1
F5(NaI)	243.416	1315 ± 9	112 ± 5

broj merenja	vreme merenja [ks]	2614 KeV - ^{232}Th	3197 KeV - ^{232}Th
		$I_F(\text{ks})^{-1}$	$I_F(\text{ks})^{-1}$
F4(Ge)	255.113	0.8 ± 0.1	-
F4(NaI)	254.890	-	31 ± 2
F5(Ge)	243.525	0.8 ± 0.1	-
F5(NaI)	243.416	-	32 ± 3

Vršena su i kratkotrajna merenja fona ($t=4$ ks) na NaI(Tl) detektoru, a rezultati tih merenja dati su u poglavljiju 8.6. Takvo merenje fona moguće je sprovesti samo na NaI(Tl) detektoru, zbog njegove velike efikasnosti. Ovako kratkim merenjima lakše je kontrolisati varijacije fona koje se dešavaju usled emanacije ^{222}Rn . Princip je takav, da se fon meri pre i posle merenja uzorka (sva tri merenja traju 4 ks), pa se na taj način varijacija fona svodi na minimum.

Treba reći da je u cilju kontrolisanja varijacije fona vršeno simultano merenje sa dva NaI(Tl) detektora (anulus i plug). Pri tome je anulus trebao da meri odbroj uzorka, a plug odbroj fona. Takvo simultano merenje je bilo moguće zato što je plug bio ograđen olovnom pločom od uzorka i anulusa pa je merio samo odbroj fona. Ovakvo merenje ipak nije dalo željene rezultate, zbog velike grške koja se javlja na plug-u, usled njegovih malih dimenzija, a samim tim i male efikasnosti.

8.2 Kalibracija efikasnosti detektora

Kalibracija efikasnosti detektora se u principu izvodi snimanjem spektara kalibracionog ili referentnog izvora poznate aktivnosti.

U ovom radu su za kalibraciju efikasnosti detektora korišćena dva vrlo aktivna uzorka jalovine uzete sa područja rudnika uranijuma Kalna (K3 i K6), uzorak zemljišta iz okoline Kragujevca (KR5), standardni uzorak fosfata (FOS), kao i 11 uzoraka građevinskih materijala.

Snimanjem spektara ovih uzoraka, trebalo je utvrditi da li je zavisnost spektralnog intenziteta uzorka od njegove specifične aktivnosti, linearna. Iz formule za specifičnu aktivnost:

$$A_s = \frac{I}{\epsilon p_\gamma m} \quad (34)$$

gde je:

I - spektralni intenzitet

ϵ - efikasnost detektora

p_γ - apsolutna verovatnoća γ -prelaza

m - masa uzorka

te se dobija pomenuta zavisnost:

$$\frac{I}{m} = \epsilon p_\gamma A_s \quad (35)$$

ϵp_γ - predstavlja ovde koeficijent pravca i može se odrediti iz nagiba prave, tj. kao:

$$\epsilon p_\gamma' = \frac{I/m}{A_s} \quad (36)$$

Da bi se ϵp_γ moglo odrediti, potrebno je imati podatke za specifičnu aktivnost uzorka, a oni se dobijaju snimanjem spektara Ge(Li) detektorom, čija je efikasnost na izabranim karakterističnim spektralnim linijama (1461 KeV, 1764 KeV i 2614 KeV) poznata. Određivanjem spektralnog intenziteta I istim detektorom, na osnovu formule (34) može se izračunati specifična aktivnost uzorka. U brojocu formule (36) figuriše spektralni intenzitet uzorka (određen na NaI(Tl) detektoru) podeljen masom uzorka.

U tabelama 3 a, b i c prikazani su rezultati dobijeni merenjem NaI(Tl) detektorom, svih gore nabrojanih uzoraka.

Tabela 3a Rezultati merenja odbroja koji daju uzorci zemljišta građevinskih materijala na NaI(Tl) detektoru

UZORCI	vreme merenja [ks]	1461 KeV - ^{40}K			1764 KeV - ^{226}Ra			3197 KeV - ^{232}Th		
		P	L	D	P	L	D	P	L	D
K3	82.377	3003355	117769	89744	2530879	89744	34556	114914	53333	3786
K6	104.897	3910708	168003	124694	3753316	124694	90293	102473	5318	3223
KR5	80.105	733608	18791	14298	228750	14298	5099	64400	3038	2087
FOS	80.767	-	-	-	3925231	122980	50264	35390	2476	1338
OPK	84.721	893905	19340	11365	170150	11365	5173	59511	5401	3649
SIP	60.387	210707	6442	3821	55557	3821	2094	19394	2050	1563
BFC1	82.207	440709	14375	9948	165154	9948	4687	37404	3647	2599
BFC2	151.205	685633	23714	16157	274834	16157	8115	59969	6105	4354
BFC3	86.556	447594	15248	11111	173814	11111	4862	38912	3966	2879
BFC4	56.302	227061	6839	4126	59888	4126	2224	20162	2130	1581
BFC5	64.224	349164	11828	8377	135363	8327	3719	29007	3030	2138
BFC6	77.413	402962	11024	7037	105344	7037	3421	32626	3298	2450
BFC8	86.670	518673	12578	6984	101372	6984	3617	34574	3435	2535
BFC9	158.614	573771	17806	10847	154719	10847	5699	52818	5545	4151
BFC10	78.938	452337	12752	8376	121203	8376	3792	36447	3795	2540

Tabela 3b Spektralni intenzitet uzoraka (oduzet fon)

broj merenja	masa uzorkaa [kg]	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
		$I_F(\text{ks})^{-1}$	$I_F(\text{ks})^{-1}$	$I_F(\text{ks})^{-1}$
K3	0.2952	11123 \pm 58	14660 \pm 49	428 \pm 11
K6	0.2693	9355 \pm 54	13974 \pm 51	258 \pm 9
KR5	0.3054	3934 \pm 25	252 \pm 20	234 \pm 9
FOS	0.3220	-	25778 \pm 61	-
OPK	0.3256	5407 \pm 26	369 \pm 14	175 \pm 6
SIP	0.2747	366 \pm 21	35 \pm 12	12 \pm 6
BFC1	0.3033	939 \pm 23	518 \pm 13	70 \pm 6
BFC2	0.3347	451 \pm 18	462 \pm 10	43 \pm 4
BFC3	0.3308	659 \pm 23	466 \pm 13	50 \pm 6
BFC4	0.2630	673 \pm 23	78 \pm 13	20 \pm 6
BFC5	0.3397	818 \pm 27	536 \pm 15	46 \pm 6
BFC6	0.2269	1441 \pm 22	202 \pm 12	45 \pm 6
BFC8	0.3516	2300 \pm 21	110 \pm 11	47 \pm 5
BFC9	0.3647	406 \pm 15	55 \pm 8	17 \pm 4
BFC10	0.2819	1605 \pm 23	292 \pm 13	57 \pm 6

Tabela 3c Spektralni intenzitet podeljen masom

UZORAK	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
	$I/m[(\text{ks})^{-1}\text{kg}^{-1}]$	$I/m[(\text{ks})^{-1}\text{kg}^{-1}]$	$I/m[(\text{ks})^{-1}\text{kg}^{-1}]$
K3	37680 \pm 196	49661 \pm 166	1450 \pm 37
K6	34738 \pm 201	51890 \pm 189	958 \pm 41
KR5	12881 \pm 82	825 \pm 65	766 \pm 29
FOS	-	80056 \pm 189	-
OPK	16606 \pm 80	1133 \pm 42	538 \pm 20
SIP	1332 \pm 77	126 \pm 43	43 \pm 21
BFC1	3096 \pm 77	1708 \pm 44	231 \pm 19
BFC2	1348 \pm 52	1380 \pm 30	130 \pm 13
BFC3	1992 \pm 69	1409 \pm 40	152 \pm 17
BFC4	2559 \pm 88	297 \pm 49	76 \pm 23
BFC5	2408 \pm 78	1578 \pm 45	135 \pm 19
BFC6	6351 \pm 97	890 \pm 54	197 \pm 25
BFC8	6542 \pm 60	313 \pm 32	134 \pm 15
BFC9	1113 \pm 42	152 \pm 23	47 \pm 11
BFC10	5694 \pm 82	1037 \pm 45	202 \pm 21

Spektralni intenzitet I računat je po formuli (30), a njegova greška po formuli (31), dok je greška za I/m računata po formuli:

$$\Delta \left(\frac{I}{m} \right) = \frac{\Delta I}{m} \quad (37)$$

Uzorci u tabeli imaju sledeće pune nazive:

- K3 i K6 - uzorci jalovine sa područja rudnika uranijuma Kalna
- KR5 - uzorak zemljišta (okolina Kragujevca)
- FOS - standardni uzorak fosfata (Maroko)
- OPK - opeka - puna (Petrovaradin)
- SIP - siporeks (Tuzla)
- BFC1 - rotacioni klinker
- BFC2 - fosfor-gips (Subotica)
- BFC3 - portland cement (a)
- BFC4 - krečnjak (Srednje Brdo)
- BFC5 - portland cement (b)
- BFC6 - laporc filijala
- BFC8 - dunavski pesak
- BFC9 - pritna izgoretina
- BFC10 - ugalj (Vrška Čuka)

Specifična aktivnost ovih uzoraka, kao što je već rečeno, određivana je snimanjem Ge(Li) detektorom, a rezultati tih merenja dati su u tabelama 4 a, b za uzorce građevinskih materijala, a u tabeli 5 date su aktivnosti za uzorce K3, K6, KR5 i FOS koje su ranije bile izračunate, na osnovu merenja Ge(Li) detektorom.

U tabeli 6 date su vrednosti za efikasnost Ge(Li) detektora na izabranim karakterističnim spektralnim linijama, kao i vrednosti absolutne verovatnoće γ -prelaza, na istim energijama. Iz svih tih podataka računata je specifična aktivnost datih uzoraka po formuli (34), a rezultati tog računa dati su u tabeli 7.

Tabela 4a Rezultati merenja odbroja koji daju uzorci građevinskih materijala na Ge(Li) detektoru

UZORCI	vreme merenja [ks]	1461 KeV - ^{40}K			1764 KeV - ^{226}Ra			2614 KeV - ^{232}Th		
		P	L	D	P	L	D	P	L	D
OPK	84.837	5246	110	85	455	41	44	731	22	23
SIP	60.448	463	27	19	97	15	16	104	12	13
BFC1	80.266	1212	75	62	417	44	32	309	12	15
BFC2	151.301	1223	101	80	791	52	58	423	30	41
BFC3	86.612	1033	83	64	565	42	29	399	16	12
BFC4	56.336	584	32	25	97	10	17	127	7	8
BFC5	64.274	798	50	44	408	23	33	278	18	10
BFC6	77.463	1598	58	38	265	35	18	271	9	13
BFC8	86.732	2641	54	42	209	40	41	254	16	12
BFC9	158.705	1222	82	71	298	57	39	312	36	25
BFC10	78.993	1825	61	59	309	39	27	342	19	5

Tabela 4b Spektralni intenzitet datih uzoraka (oduzet fon)

UZORAK	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	2614 KeV - ^{232}Th
	$I_F(\text{ks})^{-1}$	$I_F(\text{ks})^{-1}$	$I_F(\text{ks})^{-1}$
OPK	55.9 ± 0.9	3.7 ± 0.3	7.3 ± 0.3
SIP	3.3 ± 0.4	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.2
BFC1	9.6 ± 0.5	3.7 ± 0.3	2.6 ± 0.2
BFC2	3.4 ± 0.3	4.0 ± 0.2	1.5 ± 0.2
BFC3	6.8 ± 0.4	5.2 ± 0.3	3.5 ± 0.3
BFC4	5.9 ± 0.5	0.8 ± 0.2	1.2 ± 0.2
BFC5	7.5 ± 0.5	5.0 ± 0.4	3.1 ± 0.3
BFC6	15.9 ± 0.6	2.3 ± 0.3	2.4 ± 0.2
BFC8	25.9 ± 0.6	1.0 ± 0.2	1.8 ± 0.2
BFC9	3.3 ± 0.3	0.8 ± 0.2	0.8 ± 0.2
BFC10	18.1 ± 0.6	2.6 ± 0.3	3.2 ± 0.3

Tabela 5 Aktivnosti uzoraka zemljišta i fosfata izražene u Bq

UZORAK	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	2614 KeV - ^{232}Th
	A [Bq]	A [Bq]	A [Bq]
K3	348 \pm 18	289 \pm 8	38 \pm 2
K6	256 \pm 13	363 \pm 8	26 \pm 2
KR5	162 \pm 8	13.4 \pm 0.3	21 \pm 1
FOS	-	486 \pm 23	-

Tabela 6 Efikasnost Ge(Li) detektora i absolutne verovatnoće gama-prelaza na energijama izabranih karakterističnih spektralnih linija

	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	2614 KeV - ^{232}Th
$\epsilon(\cdot 10^{-3})$	2.38 \pm 0.12	2.07 \pm 0.11	1.41 \pm 0.07
p_γ	0.106	0.159	0.358

Tabela 7 Specifične aktivnosti uzoraka zemljišta, fosfata i građevinskih materijala

broj merenja	masa uzorka [kg]	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
		A_s [Bq/kg]	A_s [Bq/kg]	A_s [Bq/kg]
K3	0.2952	1179 \pm 61	979 \pm 27	128 \pm 7
K6	0.2693	951 \pm 48	1348 \pm 30	96 \pm 7
KR5	0.3054	530 \pm 26	44 \pm 1	67 \pm 3
FOS	0.3220	-	1509 \pm 71	-
OPK	0.3256	680 \pm 36	35 \pm 3	44 \pm 3
SIP	0.2747	48 \pm 6	5 \pm 2	4 \pm 1
BFC1	0.3033	126 \pm 9	37 \pm 3	17 \pm 2
BFC2	0.3347	41 \pm 4	37 \pm 3	9 \pm 1
BFC3	0.3308	81 \pm 7	48 \pm 4	21 \pm 2
BFC4	0.2630	89 \pm 8	9 \pm 3	9 \pm 2
BFC5	0.3397	88 \pm 7	45 \pm 4	18 \pm 2
BFC6	0.2269	278 \pm 17	31 \pm 4	21 \pm 2
BFC8	0.3516	292 \pm 16	9 \pm 2	10 \pm 1
BFC9	0.3647	36 \pm 4	7 \pm 1	4 \pm 1
BFC10	0.2819	255 \pm 15	28 \pm 3	23 \pm 2

Greška za specifičnu aktivnost uzoraka građevinskih materijala računata je po formuli:

$$\Delta A_s = A_s \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}\right)^2} \quad (38)$$

a za uzorce K3, K6, KR5 i FOS po formuli:

$$\Delta A_s = \frac{\Delta A}{m} \quad (39)$$

Merenja čiji su rezultati prikazani u gornjim tabelama vršena su simultano Ge(Li) i NaI(Tl) detektorom prema shemi aparature prikazanoj na sl. 6.2.1 i to u trajanju od oko jednog dana ($\approx 86\text{ks}$).

Pomoću podataka datih u tabeli 3c, za spektralni intenzitet podeljen masom, kao i onih iz tabele 7, za specifičnu aktivnost uzoraka, mogu se nacrtati tri kalibraciona grafika (za svaku od izabranih karakterističnih spektralnih linija). Na ordinatu se nanose vrednosti za I/m u $\text{s}^{-1}\text{kg}^{-1}$ koje su dobijene merenjem NaI(Tl) detektorom, a na apscisi se nanose specifične aktivnosti u Bq/kg koje su dobijene merenjem na Ge(Li) detektoru (sl. 8.2.1 ; 8.2.2 i 8.2.3).

Prava se kroz dobijene tačke povlači pošto se izračuna srednje otežana vrednost koeficijenta pravca ϵp_γ po formuli:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i R_i}{\sum_{i=1}^n W_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{(\Delta R_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(\Delta R_i)^2}} \quad (40)$$

gde su:

$$\bar{R} = (\epsilon p_\gamma)$$

$$R_i = (\epsilon p_\gamma)_i$$

$$W_i = \frac{1}{(\Delta(\epsilon p_\gamma)_i)^2}$$

Konačan rezultat se piše u obliku:

$$R = \bar{R} \pm \sqrt{\sigma^2} \quad (41)$$

gde je:

$$\sigma^2 = \frac{1}{\Sigma \left(\frac{1}{(\Delta R_i)^2} \right)}$$

Radi provere homogenosti korišćenih podataka koristi se χ^2 test. Funkcija χ^2 definije se kao:

Konstrukcija

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(R_i - \bar{R})^2}{(\Delta R_i)^2} \quad (42)$$

gde je \bar{R} srednja vrednost za R .

Ukoliko je:

$$\chi_*^2 = \frac{\chi^2}{n-1} > 1$$

onda je hipoteza o homogenosti korišćenih podataka sporna pa se greška otežane srednje vrednosti $\sqrt{\sigma^2}$ množi sa $\sqrt{\chi_*^2}$ te konačan rezultat u tom slučaju ima oblik:

$$R = \bar{R} \pm \sqrt{\sigma^2} \sqrt{\chi_*^2} \quad (43)$$

Podaci pomoću kojih su određene vrednosti ϵp_γ za sve tri karakteristične spektralne linije (${}^{40}\text{K}$, ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{232}\text{Th}$) dati su u tabelama 8, 9, 10.

Greška za R je računata po formuli:

$$\Delta R_i = R_i \sqrt{\left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2} \quad (44)$$

Iz tabele se vidi da je za liniju ${}^{40}\text{K}$:

$$\bar{R} = 2.55 \cdot 10^{-2}$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{14} \chi_i = 75.95$$

te je:

$$\chi_*^2 = \frac{\chi^2}{14-1} = 5.84 > 1$$

$$\sqrt{\sigma^2} = 4.61 \cdot 10^{-4}$$

$$\sqrt{\chi_*^2} \sqrt{\sigma^2} = 0.0011$$

Konačna vrednost koju ima proizvod ϵp_γ za karakterističnu spektralnu liniju ${}^{40}\text{K}$ je:

$$\epsilon p_\gamma = (2.55 \pm 0.11) \cdot 10^{-2} \quad (45)$$

Za analitičku liniju ${}^{226}\text{Ra}$ je:

$$\bar{R} = 3.68 \cdot 10^{-2}$$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{15} \chi_i = 342.98$$

pa je:

$$\chi_*^2 = \frac{\chi_2}{15 - 1} = 24.5 > 1$$

$$\sqrt{\sigma^2} = 5.65 \cdot 10^{-4}$$

$$\sqrt{\chi_*^2} \sqrt{\sigma^2} = 2.8 \cdot 10^{-3}$$

Proizvod efikasnosti detektora i absolutne verovatnoće γ -prelaza ima za spektralnu liniju ^{226}Ra vrednost:

$$\epsilon p_\gamma = (3.68 \pm 0.28) \cdot 10^{-2} \quad (46)$$

Za liniju ^{232}Th je prema podacima u tabeli:

$$\bar{R} = 1.07 \cdot 10^{-2}$$

$$\chi^2 = 29, 19$$

pa je:

$$\chi_*^2 = \frac{\chi_2}{14 - 1} = 2.25 > 1$$

$$\sqrt{\sigma^2} = 3.20 \cdot 10^{-4}$$

$$\sqrt{\chi_*^2} \sqrt{\sigma^2} = 4.8 \cdot 10^{-4}$$

Srednja otežana vrednost za karakterističnu spektralnu liniju ima vrednost:

$$\epsilon p_\gamma = (1.07 \pm 0.05) \cdot 10^{-2} \quad (47)$$

Sa kalibracionih grafika (8.2.1 ; 8.2.2 i 8.2.3) se vidi da je zavisnost spektralnih intenziteta uzorka od njihove specifične aktivnosti linearna. Treba uzeti u obzir da na graficima nisu prikazani svi uzorci koji su dati u tabelama 8, 9 i 10, zbog toga što neki uzorci imaju mnogo veću specifičnu aktivnost od onih koji su prikazani na graficima, te zbog razmera grafika, nisu mogli biti uneti.

Tabela 8 Podaci iz kojih se računa srednja otežana vrednost εp_γ za karakterističnu spektralnu liniju ${}^{40}\text{K}$ (1461 KeV)

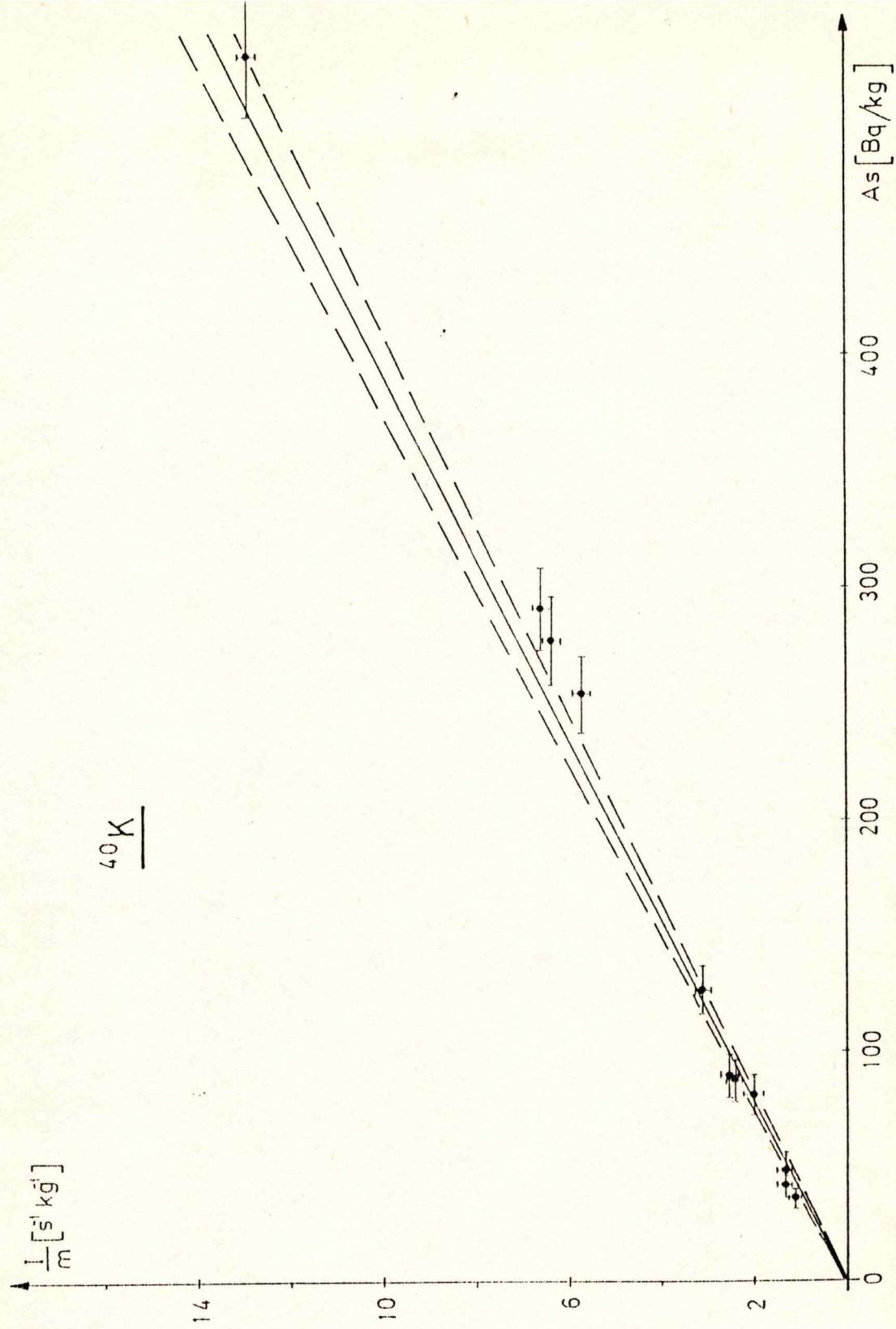
UZORAK	$x = A_s [\text{Bq/kg}]$	$y = 1/\text{m}[\text{s}^{-1}\text{kg}^{-1}]$	$R_i = y/x[10^{-2}]$	$1/(\Delta R_i)^2$	$R_i/(\Delta R_i)^2$	χ_i^2
K3	1179 ± 61	37.68 ± 0.20	3.20 ± 0.17	346021	11073	14.62
K6	951 ± 48	34.74 ± 0.20	3.65 ± 0.19	277008	10111	33.52
KR5	530 ± 26	12.88 ± 0.08	2.43 ± 0.12	694444	16875	1.00
FOS	-	-	-	-	-	-
OPK	680 ± 36	16.61 ± 0.08	2.44 ± 0.13	591716	14438	0.72
SIP	48 ± 6	1.33 ± 0.08	2.77 ± 0.38	69252	1918	0.34
BFC1	126 ± 9	3.10 ± 0.08	2.46 ± 0.19	277008	6814	0.22
BFC2	41 ± 4	1.35 ± 0.05	3.29 ± 0.34	86505	2846	4.74
BFC3	81 ± 7	1.99 ± 0.07	2.46 ± 0.23	189036	4650	0.15
BFC4	89 ± 8	2.56 ± 0.09	2.88 ± 0.28	127551	3673	1.39
BFC5	88 ± 7	2.41 ± 0.08	2.74 ± 0.24	173611	4757	0.63
BFC6	278 ± 17	6.35 ± 0.10	2.28 ± 0.14	510204	11633	3.72
BFC8	292 ± 16	6.54 ± 0.06	2.24 ± 0.12	694444	15556	6.67
BFC9	36 ± 4	1.11 ± 0.04	3.08 ± 0.36	77160	2377	2.17
BFC10	255 ± 15	5.69 ± 0.08	2.23 ± 0.13	591716	13195	6.06
Σ				4705676	119916	75.95

Tabela 9 Podaci iz kojih se računa srednja otežana vrednost εp_γ za karakterističnu spektralnu liniju ^{226}Ra (1764 KeV)

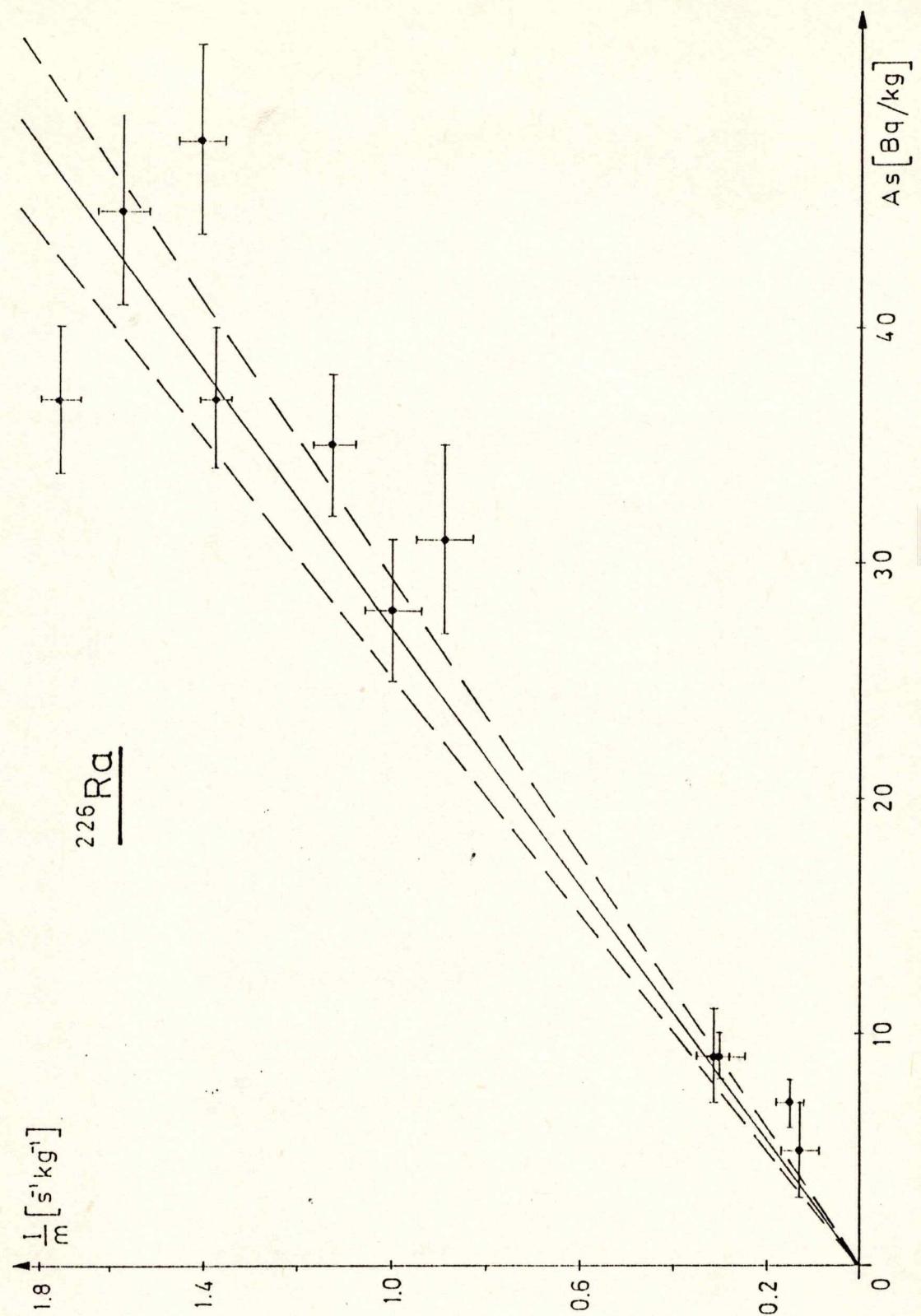
UZORAK	$x = A_s [\text{Bq}/\text{kg}]$	$y = 1/\text{m}[\text{s}^{-1}\text{kg}^{-1}]$	$R_i = y/x[10^{-2}]$	$1/(\Delta R_i)^2$	$R_i/(\Delta R_i)^2$	χ_i^2
K3	979 ± 27	49.66 ± 0.17	5.07 ± 0.14	510204	25867	98.58
K6	1348 ± 30	51.89 ± 0.19	3.85 ± 0.09	1234568	47531	3.57
KR5	44 ± 1	0.83 ± 0.06	1.89 ± 0.14	510204	9643	163.47
FOS	1509 ± 71	80.06 ± 0.19	5.31 ± 0.25	160000	8496	42.51
OPK	35 ± 3	1.13 ± 0.04	3.23 ± 0.30	111111	3589	2.25
SIP	5 ± 2	0.13 ± 0.04	2.60 ± 1.31	5827	152	0.68
BFC1	37 ± 3	1.71 ± 0.04	4.62 ± 0.39	65746	3037	5.81
BFC2	37 ± 3	1.38 ± 0.03	3.73 ± 0.31	104058	3881	0.03
BFC3	48 ± 4	1.41 ± 0.04	2.94 ± 0.26	147929	4349	8.10
BFC4	9 ± 3	0.30 ± 0.05	3.33 ± 1.24	6504	217	0.08
BFC5	45 ± 4	1.58 ± 0.05	3.51 ± 0.33	91827	3223	0.27
BFC6	31 ± 4	0.89 ± 0.05	2.87 ± 0.40	62500	1794	4.10
BFC8	9 ± 2	0.31 ± 0.03	3.44 ± 0.83	14516	499	0.08
BFC9	7 ± 1	0.15 ± 0.02	2.14 ± 0.42	56689	1213	13.44
BFC10	28 ± 3	1.04 ± 0.05	3.71 ± 0.44	51653	1916	0.01
Σ				3133336	113407	342.98

Tabela 10 Podaci iz kojih se računa srednja otežana vrednost εp_γ za karakterističnu spektralnu liniju ^{232}Th (3197 KeV)

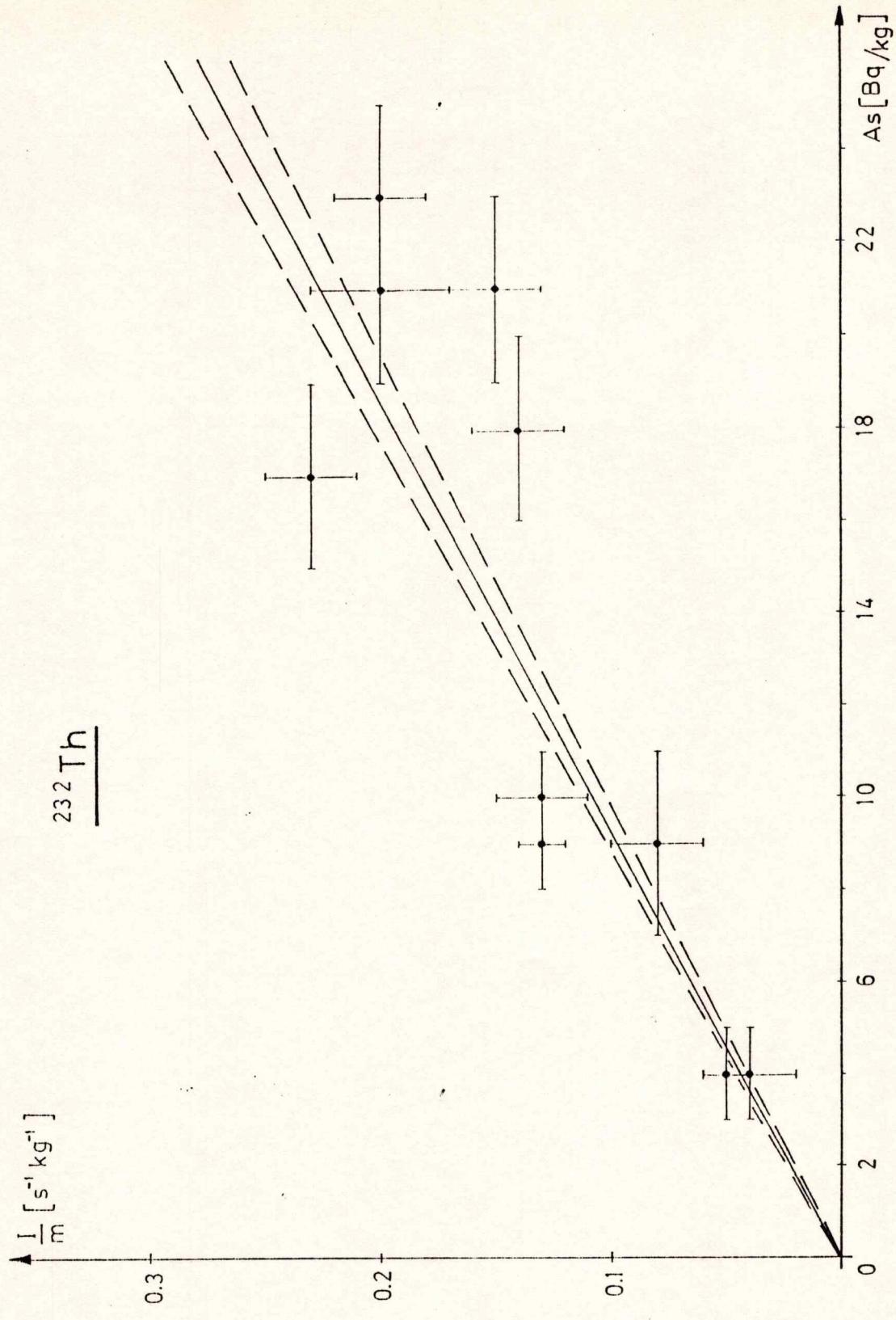
UZORAK	$x = A_s [\text{Bq/kg}]$	$y = I/m[\text{s}^{-1}\text{kg}^{-1}]$	$R_i = y/x \cdot [10^{-2}]$	$1/(\Delta R_i)^2$	$R_i/(\Delta R_i)^2$	χ_i^2
K3	128 ± 7	1.15 ± 0.01	1.13 ± 0.07	2040816	23061	0.73
K6	96 ± 7	0.96 ± 0.04	1.00 ± 0.08	1562500	15625	0.77
KR5	67 ± 3	0.77 ± 0.03	1.15 ± 0.07	2040816	23469	1.31
FOS	-	-	-	-	-	-
OPK	44 ± 3	0.54 ± 0.02	1.23 ± 0.10	1000000	12300	2.56
SIP	4 ± 1	0.04 ± 0.02	1.00 ± 0.56	31888	319	0.02
BFC1	17 ± 2	0.23 ± 0.02	1.35 ± 0.20	250000	3375	1.96
BFC2	9 ± 1	0.13 ± 0.01	1.44 ± 0.19	277008	3989	3.76
BFC3	21 ± 2	0.15 ± 0.02	0.71 ± 0.12	694444	4931	9.00
BFC4	9 ± 2	0.08 ± 0.02	0.89 ± 0.30	111111	989	0.36
BFC5	18 ± 2	0.14 ± 0.02	0.78 ± 0.14	510201	3980	4.29
BFC6	21 ± 2	0.20 ± 0.03	0.95 ± 0.17	346021	3287	0.50
BFC8	10 ± 1	0.13 ± 0.02	1.30 ± 0.24	173611	2257	0.92
BFC9	4 ± 1	0.05 ± 0.01	1.25 ± 0.40	62500	781	0.20
BFC10	23 ± 2	0.20 ± 0.02	0.87 ± 0.12	694444	6042	2.78
Σ				9795363	104405	29.19



SL. 8.2.1. KALIBRACIONI GRAFIK



SL. 8.2.2. KALIBRACIONI GRAFIK



SL. 8.2.3. KALIBRACIONI GRAFIK

8.3 Prag detekcije NaI(Tl) i Ge(Li) detektora

Građevinski materijali sadrže uglavnom niske koncentracije prirodnih radionuklida. Zbog toga se postavlja pitanje kada će prestati mogućnost detekcije izabranih analitičkih linija iz spektra datih uzoraka?

Da bi se procenila donja granica koncentracije ^{226}Ra , ^{40}K i ^{232}Th koja se još može detektovati primjenom γ -spektrometrijskom metodom, koriste se uglavnom dva kriterijuma.

Najčešće se koristi jednostavan kriterijum:

$$P_{MIN} = 3\sigma_F \quad (48)$$

tj. ako je odbroj pod čistom površinom vrha totalne apsorpcije (P_{min}) najmanje tri puta veći od standardne devijacije fona na mestu posmatrane analitičke linije, onda se ta linija još uvek može detektovati.

Drugi kriterijum je pouzdaniji i on razmatra čistu površinu nekog vrha totalne apsorpcije (P) koji potiče isključivo od apsorpcije γ -fotona date energije tog izotopa, a ne od statističkih fluktuacija fona (P_F), tj.:

$$P = P_P - P_F \quad (49)$$

gde je P_P - odbroj pod VTA nakon obračuna Komptonovog kontinuma.

Relativna greška ovog neto odbroja je:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{P} = \frac{[P_P + P_F]^{1/2}}{P} \quad (50)$$

tj.:

$$P^2\sigma^2 - P - 2P_F = 0 \quad (51)$$

Rešenje ove kvadratne jednačine je oblika:

$$P = \frac{1 + \sqrt{1 + 8\delta^2 P_F}}{2\delta^2} \quad (52)$$

i može se učiniti minimalnim ako se izabere $\delta = 1/3$ što odgovara 100% relativnoj grešci pri 99.7% "confidence level" i 33% relativnoj grešci pri 68% "confidence level".

Tada se minimalno merljivi odbroj u VTA određuje iz formule:

$$P_{min} = 4.5 + \sqrt{20.2 + 18P_F} \quad (53)$$

a pošto on određuje minimalno merljivu aktivnost datog radionuklida u uzorku, može se pisati:

$$A_{\min} = \frac{4.5 + \sqrt{20.2 + 18I_F t}}{\epsilon p_\gamma t} \quad (54)$$

gde je:

I_F - brzina brojanja fona (spektralni intenzitet fona)

t - vreme merenja uzorka

ϵ - efikasnost detekcije

p_γ - apsolutna verovatnoća γ -prelaza

Minimalno merljive aktivnosti datih radionuklida u uzorku, obrađivane su za različita vremena merenja uzorka (1, 5, 10 i 24 časa) i to za NaI(Tl) i Ge(Li) detektor. Spektralni intenziteti fona $I_F(s^{-1})$ uzeti su iz tabele 2c (poglavlje 8.1). Podaci za ϵ i p_γ , Ge(li) detektora uzeti su iz tabele 6 (poglavlje 8.2). Pri računanju A_{\min} za NaI(Tl) detektor korišćene su vrednosti ϵp_γ za ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th date izrazima (45), (46) i (47).

U tabelama 11 i 12 date su vrednosti minimalno merljive aktivnosti računate za analitičke linije ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th , za NaI(Tl) i Ge(Li) detektor.

Iz tabela 11 i 12 se vidi da je NaI(Tl) detektor osetljiviji 5 - 10 puta od Ge(li) detektora u zavisnosti od posmatrane karakteristične spektralne linije i dužine vremena merenja uzorka.

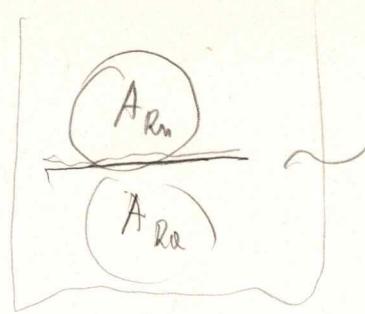
Ako imamo uzorke vrlo niskih aktivnosti onda ih moramo vrlo dugo meriti (i do nekoliko dana) ovim instrumentima.

Tabela 11 Minimalno merljiva aktivnost ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th , NaI(Tl) detektorom

A _{min} [Bq]			
t [s]	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
3600	3.2	0.7	1.3
18000	1.4	0.3	0.6
36000	1.0	0.2	0.4
86400	0.7	0.1	0.2

Tabela 12 Minimalno merljiva aktivnost ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th , Ge(Li) detektorom

A _{min} [Bq]			
t [s]	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
3600	22.3	9.5	7.1
18000	8.5	2.8	2.3
36000	5.8	1.8	1.5
86400	3.6	1.0	0.9



8.4 Merenje koeficijenta emanacije

Postoje različite metode merenja koeficijenta emanacije. U jednoj od njih [1] meri se prvo γ -spektrometrom specifična aktivnost ^{226}Ra čvrstog uzorka. Zatim se određuje aktivnost ^{222}Rn izdvojenog iz tog istog, ali razdrobljenog uzorka, koji se stavlja u hermetički zatvoren stakleni sud. Veličina delića uzorka treba da bude značajno manja od dužine difuzije radona u materijalu, tj. ne veća od 1cm. Posle akumulacije ravnotežne količine radona u sudu (nakon dve nedelje), vazduh iz tog suda se prevodi u predhodno vakuiniziranu komoru radonometra, a potom se u njoj određuje aktivnost radona. Ovom metodom se može postići minimalno merljivi koeficijent emanacije od 0.6% pri specifičnoj aktivnosti ^{226}Ra od 26 Bq/kg.

U ovom radu meren je koeficijent emanacije radona sledećom metodom. Prvo se NaI(Tl) γ -spektrometrom meri odbroj pod analitičkim pikom koji karakteriše ^{226}Ra (na 1764 KeV), uzorka koji je bio hermetički zatvoren najmanje 40 dana, da bi se emanacija radona dovela u stanje radioaktivne ravnoteže, a za to je potrebno oko 10 perioda pluras-pada ^{222}Ra ($T_{1/2}(^{222}\text{Rn}) = 3.82$ dana). Potom se sud otvor i uzorak pomeša, pa ravnoteža biva narušena, a ^{222}Rn emanira. Zatim se izmeri odbroj na spektralnoj liniji ^{226}Ra (1764 KeV) tako promešanog uzorka. Koeficijent emanacije se tada računa po formuli:

$$\eta = \frac{I_z - I_o}{I_z} \quad (55)$$

gde je:

I_z - spektralni intenzitet zatvorenog uzorka

I_o - spektralni intenzitet otvorenog (pomešanog) uzorka

Vršena su merenja koeficijenta emanacije visokoaktivnih uzoraka zemljišta sa područja rudnika uranijuma Kalna (K3, K6) i uzorka zemljišta znatno niže aktivnosti sa područja Kragujevca (KR5). Dobijeni rezultati dati su u tabeli 13.

Greška koeficijenta emanacije računa se po formuli

$$\Delta\eta = \frac{I_o}{I_z} \sqrt{\left(\frac{\Delta I_z}{I_z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_o}{I_o}\right)^2} \quad (56)$$

Iz tabele 13 vide se da se koeficijent emanacije visokoaktivnih uzoraka (K3 i K6) mogu određivati ovom metodom, dok je za uzorce niskih aktivnosti (KR5) ona nepouzdana za dato vreme merenja jer greška ovakvog merenja iznosi preko 80%.

Dobijeni koeficijenti emanacije mogu se uporediti sa onima koji su dati u tabeli 3 (opšti deo). Vidi se da su koeficijenti emanacije koji su ovde proračunati, približni onima iz tabele 3.

Tabela 13 Koeficijenti emanacije uzoraka zemljišta izraženi u [%]

UZORAK	vreme merenja [ks]	$I[(\text{ks})^{-1}]$	$\eta(\%)$
K3 _z	82.377	14660 ± 49	
K3 _o	78.109	13140 ± 48	10.4 ± 0.5
K6 _z	104.897	13974 ± 51	
K6 _o	93.945	11918 ± 57	14.7 ± 0.5
KR5 _z	80.105	252 ± 20	
KR5 _o	84.821	223 ± 19	11.5 ± 10.3

8.5 Određivanje minimalno merljivog koeficijenta emanacije

Da bi se dobio izraz iz kog se može izračunati minimalno merljivi koeficijent emanacije, polazi se od kriterijuma - 3σ po kome je greška merenja 3 puta manja od rezultata merenja (99% je verovatnoća da se rezultati nalaze u granicama greške), tj.

$$\Delta n = \frac{1}{3}n \quad (57)$$

gde je n - rezultat merenja. Ako se uzme da je

$$n = N_z - N_o \quad (58)$$

gde su N_z i N_o - odbroji koje daju zatvoreni i otvoreni uzorak, onda iz jed 57. sledi:

$$\Delta(N_z - N_o) = \frac{1}{3}(N_z - N_o) \quad (59)$$

a kako je:

$$\Delta(N_z - N_o) = \sqrt{N_z + N_o} \quad (60)$$

biće:

$$\sqrt{N_z + N_o} = \frac{1}{3}(N_z - N_o) \quad (61)$$

Koeficijen emanacije može se definisati izrazom:

$$\eta = \frac{N_z - N_o}{N_z} \quad (62)$$

iz kojeg se dobija:

$$N_o = N_z(1 - \eta) \quad (63)$$

Koristeći formule (62) i (61) dobijamo:

$$\eta = \frac{3\sqrt{N_z + N_o}}{N_z} \quad (64)$$

Ako se ovaj izraz zameni u (63), biće:

$$\eta = \frac{3\sqrt{N_z + N_z(1 - \eta)}}{N_z} \quad (65)$$

Kvadriranjem leve i desne strane ovog izraza dobija se kvadratna jednačina:

$$N_z^2 \eta^2 + 9N_z \eta - 18N_z = 0 \quad (66)$$

Vcije rašenje je:

$$\eta = \frac{-9 + 3\sqrt{9 + 8N_z}}{2N_z} \quad (67)$$

Ovo je formula po kojoj se računa minimalno merljivi koeficijent emanacije za idealan slučaj kada je $N_C = 0$. (N_C je površina kontinuma pod VTA).

Rezultati računanja minimalno merljivog koeficijenta emanacije za idealan slučaj, dati su u tabeli 14. U računu su korištene proizvoljne, ali karakteristične vrednosti za specifičnu aktivnost kao i za vreme merenja uzorka (1, 10, 100 dana).

Veza između N_z i A_s data je formulom

$$A_s = \frac{N_z}{\epsilon p_\gamma m t} \quad (68)$$

a odatle sledi:

$$N_z = A_s \epsilon p_\gamma m t = A_s C t \quad (69)$$

gde je $C = \epsilon p_\gamma m$ konstanta, jer je za $\epsilon \cdot p_\gamma$ uzeta vrednost za analitičku liniju ^{226}Ra data izrazom (46) ($\epsilon \cdot p_\gamma = 0.0368$), a za masu uzorka uzeta je tipična vrednost od 0.3 kg.

Ako se izraz (69) ubaci u (67) dobija se:

$$\eta = \frac{-9 + 3\sqrt{9 + 8A_s C t}}{2A_s C t} \quad (70)$$

pri čemu je $C = 1.1 \cdot 10^{-2}$.

Tabela 14 Minimalno merljivi koeficijent emanacije za idealan slučaj dat u [%], za vremena merenja od 1, 10 i 100 dana)

A_s [Bq/kg]	$\ln A_s$	$\eta[\%]$		
		$t=84600$ s	$t=864000$ s	$t=8640000$ s
10000	9.2	0.1	0.04	0.01
1000	6.9	0.4	0.1	0.04
100	4.6	1.4	0.4	0.1
10	2.3	4.3	1.4	0.4
1	0.0	13.3	4.3	1.4

Zavisnost $\eta = \eta(A_s)$ predstavljena je grafički na sl. 8.5.1 gde vreme meranja uzorka t figuriše kao parametar.

Sa grafika 8.5.1. kao iz tabele 14 se vidi koliko se smanjuje vrednost minimalno merljivog koeficijenta emanacije za idealan slučaj, pri povećanju vremena merenja uzorka (npr. za $A_s = 100$ Bq/kg, $\eta = 1.4; 0.4; 0.1\%$ za $t = 1, 10$ i 100 dana, respektivno).

U realnim situacijama pik analitičke linije uvek leži na komptonskom fonu i tada su odbroji koje daju zatvoren i otvoren uzorak dati izrazima:

$$N_z = N_z^T - N_C \quad (71)$$

$$N_o = N_o^T - N_C \quad (72)$$

gde su N_z^T i N_o^T - totalne površine pod VTA zatvorenog i otvorenog uzorka, a N_C površina kontinuuma pod VTA.

Iz 71 i 72 se vidi da su greške odbroja:

$$\Delta N_z = \sqrt{N_z^T + N_C} \quad (73)$$

$$\Delta N_o = \sqrt{N_o^T + N_C} \quad (74)$$

pa je odatle:

$$\Delta(N_z - N_o) = \sqrt{N_z^T + N_o^T + 2N_C} \quad (75)$$

tj. koristeći 71 i 72

$$\Delta(N_z - N_o) = \sqrt{N_z + N_o + 4N_C} \quad (76)$$

Koristeći 59. i 76. dobija se

$$N_z - N_o = 3\sqrt{N_z + N_o + 4N_C} \quad (77)$$

a iz 62, 63 i 77 sledi:

$$\eta \frac{3\sqrt{2N_z - N_z\eta + 4N_C}}{N_z} \quad (78)$$

Kvadriranjem leve i desne strane ove jednačine dobija se kvadratna jednačina:

$$N_z^2\eta^2 + 9N_z\eta - 18(N_z + 2N_C) = 0 \quad (79)$$

čije je rešenje:

$$\eta = \frac{-9 + 3\sqrt{9 + 8(N_z + 2N_C)}}{2N_z} \quad (80)$$

Koristeći izraz 69 dobijamo konačnu formulu za računanje minimalno merljivog koeficijenta emanacije za realan slučaj, u kojoj figurišu A_s i t :

$$\eta = \frac{-9 + 3\sqrt{9 + 8t(A_s C + 2I_C)}}{2A_s C t} \quad (81)$$

gde je I_C - spektralni intenzitet kontinuuma pod VTA, a vrednost A_s , C i t su iste kao i kod računanja η za idealan slučaj.

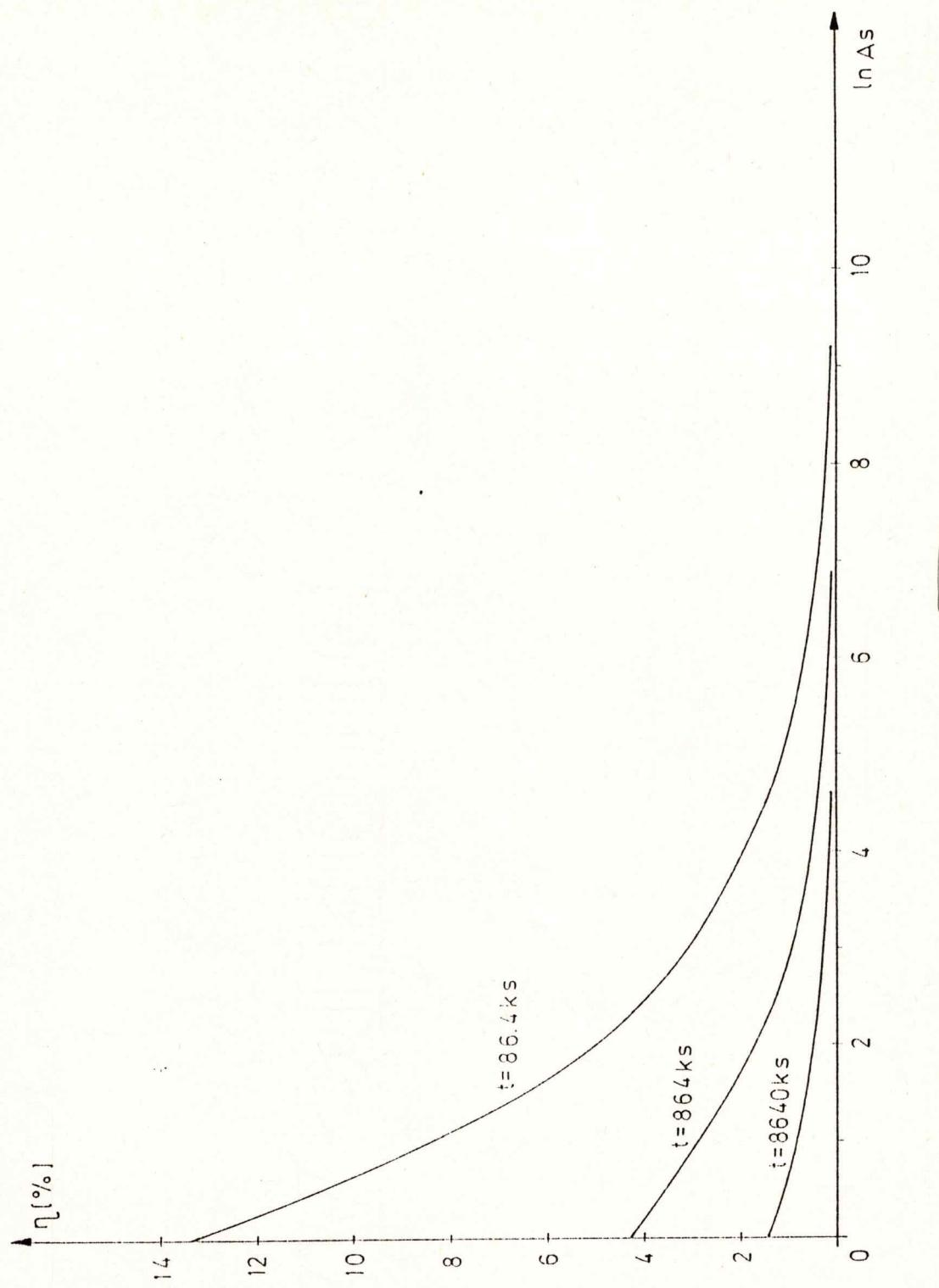
Rezultati računanja minimalno merljivog koeficijenta emanacije za realan slučaj, dati su u tabeli 15. Svi rezultati izvedeni su za standardni uzorak fosfata koji ima $I_C = 22.79 \text{ s}^{-1}$ (spektralni intenzitet kontinuuma pod VTA na 1764 KeV) i pod predpostavkom da se I_C ne menja sa promenom A_s .

Tabela 15 Minimalno merljivi koeficijent emanacije za realan slučaj dat u [%], za vremena merenja 1, 10 i 100 dana

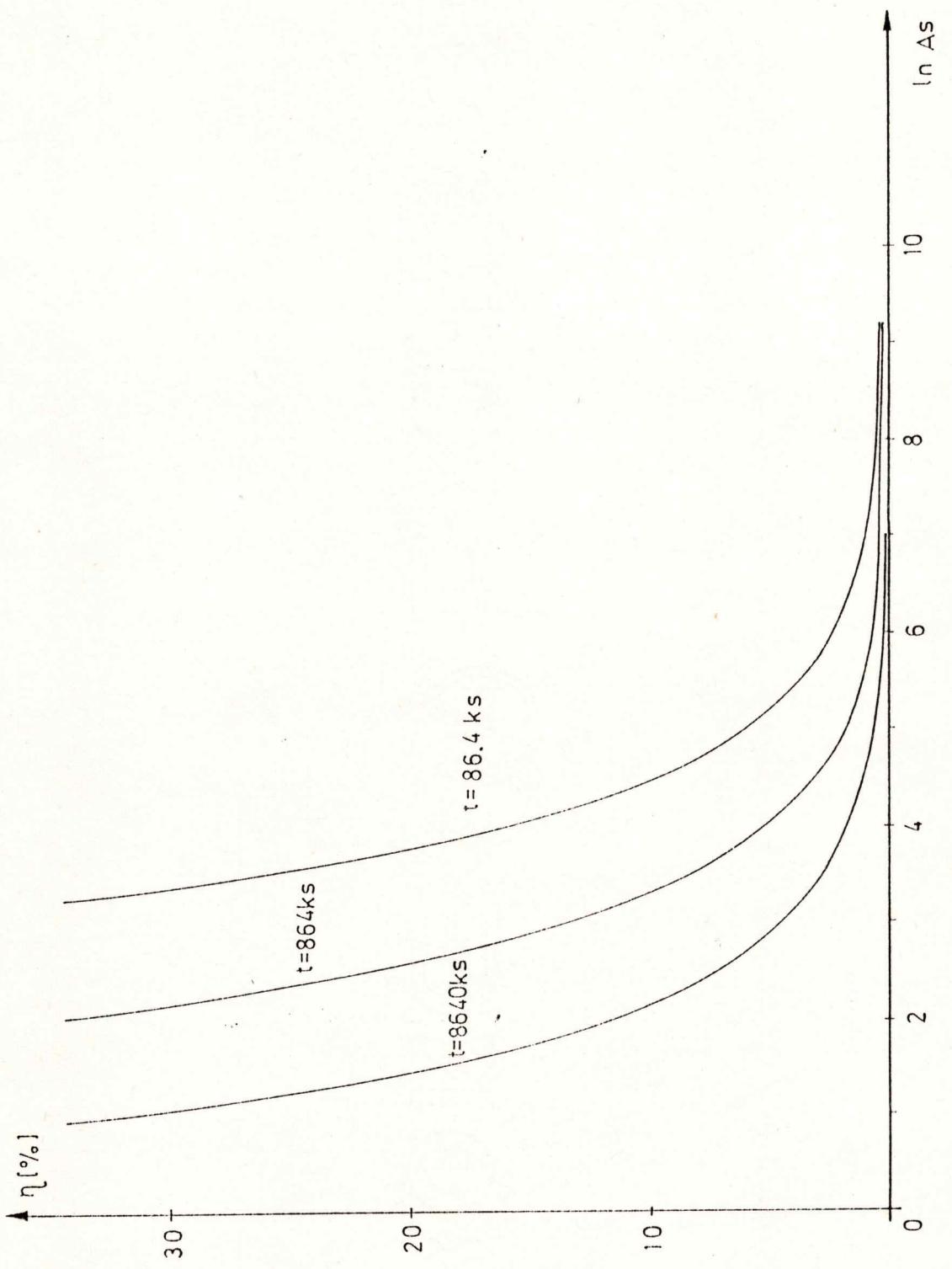
A_s [Bq/kg]	$\ln A_s$	$\eta [%]$		
		$t=84600 \text{ s}$	$t=864000 \text{ s}$	$t=8640000 \text{ s}$
10000	9.2	0.2	0.1	0.02
1000	6.9	1.0	0.3	0.1
100	4.6	9.0	2.8	0.9
10	2.3	88.6	28.0	8.9
1	0.0	885.5	280.1	88.6

Zavisnost $\eta = \eta(A_s)$ za realan slučaj predstavljena je na sl. 8.5.2., gde vreme merenja uzorka t figuriše kao parametar.

Grafici 8.5.1 i 8.5.2 imaju logaritamsku apscisu jer je dijapazon uzetih vrednosti za specifičnu aktivnost vrlo širok.



S.L. 8.5.1



SL. §.5.2.

Poslednja vrsta tabele 15 sadrži vrednosti minimalno merljivog koeficijenta emanacije koje nemaju fizičkog smisla (sem za slučaj $t = 8640000$ s). Može se zaključiti da u slučaju vrlo malih specifičnih aktivnosti (oko 1 Bq/kg), nema smisla koristiti ovaj metod za merenje koeficijenta emanacije, jer bi merenje trajalo izuzetno dugo. To praktično važi i za specifične aktivnosti od oko 10 Bq/kg, jer bi za $\eta \approx 9\%$ merenje moralo da traje oko 100 dana, što je krajnje necelishodno.

Upoređivanjem vrednosti minimalno merljivih koeficijenata emanacije za idealan i realan slučaj (tabele 14 i 15), vidi se da se oni malo razlikuju za visoke specifične aktivnosti ($A_s = 10000$ Bq/kg), a snižavanjem specifične aktivnosti i njihova razlika postaje sve veća.

8.6 Specifična aktivnost građevinskih materijala

U poglavlju 8.2 izvršena je kalibracija $NaI(Tl)$ detektora i dobijene su vrednosti $\epsilon \cdot p_\gamma$ za tri relevantne analitičke linije (1461, 1764 i 3197 KeV). Taj podatak je neophodno potreban ukoliko se određuje specifična aktivnost građevinskih materijala na $NaI(Tl)$ detektoru.

Kratkotrajna merenja omogućuju da se u relativno kratkom vremenskom periodu obradi veliki broj uzoraka, a takva merenja mogu se sprovesti sa zadovoljavajućom tačnošću, samo na $NaI(Tl)$ detektoru, zbog njegove velike efikasnosti. Prednost ovakvih merenja je i ta, što se fluktuacija fona mnogo lakše kontroliše. To se postiže tako što se fon snima pre i posle snimanja uzorka, pa je mogućnost značajnije fluktuacije fona svedena na minimum. Kratkotrajna merenja služe ipak samo za grubo određivanje specifične aktivnosti građevinskih materijala, jer je greška relativno velika za dato vreme merenja.

U ovom radu na ovaj način obrađeno je 10 uzoraka građevinskih materijala koji su snimani $NaI(Tl)$ detektorom za vreme od 4 ks. Rezultati ovih merenja dati su u tabeli 16 (a, b, c id). Puni nazivi građevinskih materijala koji su u tabeli dati pod šifrom, navedeni su u poglavlju 8.2.

Merenja su vršena tokom 5 dana, a za to vreme fon je sniman 10 puta (svaki put u trajanju od 4 ks). Spektralni intenziteti fona koji je sniman pre i posle snimanja uzorka, usrednjeni su i kao takvi oduzeti od spektralnog intenziteta uzorka iz tabele 16b. Greška za spektralne intenzitete uzoraka građevinskih materijala koja je data u tabeli 16c, računata je po formuli 85. Do te formule dolazi se na sledeći način:

$$\Delta(I_U - I_F) = \sqrt{(\Delta I_U)^2 + (\Delta I_F)^2} \quad (82)$$

gde je I_U - spektralni intenzitet uzorka iz tabele 16b (nije oduzet fon), a I_F je dat izrazom:

$$I_F = \frac{I_{F1} + I_{F2}}{2} \quad (83)$$

pa je

$$\Delta I_F = \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta I_{F1})^2 + (\Delta I_{F2})^2} \quad (84)$$

konačno se dobija:

$$\Delta I = \Delta(I_U - I_F) = \sqrt{(\Delta I_U)^2 + \frac{1}{2} \sqrt{(\Delta I_{F1})^2 + (\Delta I_{F2})^2}} \quad (85)$$

gde je ΔI - greška spektralnog intenziteta uzorka iz tabele 16c.

Tabela 16. a Merenje odbroja uzorka građevinskih materijala i fona na NaI(Tl) detektoru za $t = 4$ ks

UZORAK	1461 KeV - ^{40}K			1764 KeV - ^{226}Ra			3197 KeV - ^{232}Th		
	P	L	D	P	L	D	P	L	D
FON1	12101	384	235	3427	235	132	1175	106	117
BFC1	23023	769	496	9688	496	264	1830	199	140
FON2	11846	370	266	3217	266	142	1217	127	102
BFC2	18316	665	484	7521	484	231	1647	172	120
FON3	11792	404	245	3219	245	125	1191	127	84
FON4	11929	390	202	3489	202	121	1153	123	103
BFC3	20014	688	447	7680	447	249	1896	183	137
BFC4	16178	481	323	4573	323	158	1503	134	107
BFC5	20832	725	462	7975	462	249	1818	193	134
FON5	12197	414	214	3463	214	150	1148	122	103
BFC6	21111	614	361	5665	361	200	1723	195	117
BFC7	16636	521	361	5774	361	201	1374	154	96
FON6	11931	380	249	3277	249	157	1147	121	108
FON7	11907	375	219	3318	219	120	1122	140	95
BFC8	23981	607	313	4838	313	142	1637	147	138
BFC9	14416	437	279	4022	279	155	1368	124	109
FON8	11901	385	245	3236	245	138	1098	118	90
FON9	11560	364	223	3194	223	119	1163	120	94
BFC10	23014	596	395	6460	395	201	1945	197	130
FON10	11713	369	249	3114	249	121	1131	129	100

Tabela 16.b Spektralni intenziteti uzoraka građevinskih materijala i fona

UZORAK	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
	$I(\text{ks})^{-1}$	$I(\text{ks})^{-1}$	$I(\text{ks})^{-1}$
FON1	1400 \pm 71	146 \pm 40	35 \pm 19
BFC1	2435 \pm 101	950 \pm 59	63 \pm 24
FON2	1292 \pm 72	29 \pm 42	38 \pm 20
BFC2	1563 \pm 95	495 \pm 56	72 \pm 22
FON3	1244 \pm 72	88 \pm 40	53 \pm 19
FON4	1428 \pm 69	246 \pm 38	26 \pm 19
BFC3	2024 \pm 95	572 \pm 56	102 \pm 24
BFC4	1934 \pm 81	211 \pm 46	96 \pm 20
BFC5	2092 \pm 97	616 \pm 40	74 \pm 24
FON5	1401 \pm 71	161 \pm 40	25 \pm 19
BFC6	2718 \pm 90	329 \pm 50	68 \pm 23
BFC7	1844 \pm 84	355 \pm 50	53 \pm 21
FON6	1332 \pm 71	33 \pm 42	21 \pm 20
FON7	1418 \pm 70	173 \pm 38	7 \pm 20
BFC8	3580 \pm 89	328 \pm 45	78 \pm 22
BFC9	1725 \pm 76	165 \pm 43	71 \pm 20
FON8	1322 \pm 71	67 \pm 41	33 \pm 19
FON9	1349 \pm 69	136 \pm 39	42 \pm 19
BFC10	3152 \pm 91	460 \pm 51	106 \pm 24
FON10	1306 \pm 71	62 \pm 40	17 \pm 20

Tabela 16. c Spektralni intenziteti uzoraka građevinskih materijala (oduzet fon)

UZORAK	masa [kg]	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
		$I(\text{ks})^{-1}$	$I(\text{ks})^{-1}$	$I(\text{ks})^{-1}$
BFC1	0.3033	1089 \pm 101	862 \pm 59	27 \pm 24
BFC2	0.3347	295 \pm 95	444 \pm 57	27 \pm 23
BFC3	0.3308	610 \pm 96	368 \pm 56	77 \pm 30
BFC4	0.2630	520 \pm 81	8 \pm 46	70 \pm 28
BFC5	0.3397	678 \pm 98	413 \pm 40	49 \pm 31
BFC6	0.2269	1387 \pm 115	297 \pm 65	48 \pm 30
BFC7	0.2844	512 \pm 110	322 \pm 65	32 \pm 28
BFC8	0.3516	2211 \pm 89	208 \pm 45	58 \pm 22
BFC9	0.3647	355 \pm 77	45 \pm 44	51 \pm 20
BFC10	0.2819	1825 \pm 91	362 \pm 52	77 \pm 24

Treba reći da su pri računanju spektralnih intenziteta, markirani isti kanali kao i u slučaju računanja spektralnih intenziteta u poglavlju 8.2.

Koristeći podatke iz tabele 16c za spektralne intenzitete uzoraka građevinskih materijala kao i vrednosti $\epsilon \cdot p_\gamma$ izračunate u poglavlju 8.2 za tri karakteristične spektralne linije, može se izračunati specifična aktivnost datih uzoraka građevinskih materijala po formuli 8.2.1.

U tabeli 16d date su izračunate vrednosti specifičnih aktivnosti ovih uzoraka, pri čemu su u računu korištene vrednosti spektralnih intenziteta izražene u s^{-1} . Greška za specifičnu aktivnost računa se po formuli:

$$\Delta A_s = A_s \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\epsilon p_\gamma)}{\epsilon \cdot p_\gamma}\right)^2} \quad (86)$$

Tabela 16. d Specifične aktivnosti uzoraka građevinskih materijala

UZORAK	A_s [Bq/kg]		
	1461 KeV - ^{40}K	1764 KeV - ^{226}Ra	3197 KeV - ^{232}Th
BFC1	141 ± 14	77 ± 8	8 ± 7
BFC2	35 ± 11	36 ± 5	8 ± 7
BFC3	72 ± 12	30 ± 5	22 ± 9
BFC4	78 ± 13	1 ± 6	25 ± 10
BFC5	78 ± 12	33 ± 4	13 ± 8
BFC6	240 ± 22	36 ± 8	20 ± 13
BFC7	71 ± 16	31 ± 7	11 ± 10
BFC8	247 ± 15	16 ± 4	15 ± 6
BFC9	38 ± 8	3 ± 3	13 ± 5
BFC10	254 ± 17	35 ± 6	26 ± 8

Vrednosti za specifičnu aktivnost uzoraka građevinskih materijala (tabela 16d), koje su dobijene kratkotrajnim merenjem uzoraka ($t = 4$ ks), uglavnom odgovaraju (u granicama eksperimentalne greške) vrednostima dobijenim iz merenja koja su trajala oko 80 ks (tabela 7). To znači da se kratkotrajna merenja uzoraka mogu koristiti za brzu selekciju građevinskih materijala prema veličini njihove specifične aktivnosti.

Upoređivanjem podataka iz tabele 16d sa formulom (3.1), može se zaključiti da uzorci građevinskih materijala koji su ispitivani u ovom radu ne premašuju karakteristični nivo specifične aktivnosti u građevinskim materijalima koje je predložila međunarodna komisija za atomsku energiju. Do istog zaključka se može doći ako se upoređuju podaci iz tabele 16d sa formulom (3.2) koja govori o maksimalno dozvoljenim koncentracijama prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima prema našim zakonima.

9 Zaključak

U ovom radu ispitana je mogućnost, a potom i razvijena metoda kratkotrajnih merenja radioaktivnosti građevinskih materijala.

Detektori koji su korišćeni u svrhu razvijanja ove metode bili su: scintilacioni NaI(Tl) i poluprovodnički Ge(Li).

U ovom radu urađeno je sledeće:

a) **Merenje fona.** Rezultati ovih merenja korišćeni su u kasnijim izračunavanjima specifičnih aktivnosti građevinskih materijala. Fon je meren kako dugotrajnim (3-4 dana), tako i kratkotrajnim (1 sat) merenjima. U prvom slučaju dobija se manja greška merenja, a u drugom - bolja kontrola fluktuacije fona.

b) **Kalibracija efikasnosti detektora.** Snimanjem spektara kalibracionih uzoraka, trebalo je utvrditi da li je zavisnost spektralnog intenziteta uzorka od njihove specifične aktivnosti, linearna. Pomoću podataka dobijenih NaI(Tl) detektorom (spektralni intenziteti) i Ge(Li) detektorom (specifična aktivnost uzorka), nacrtani su kalibracioni grafici. Sa ovih grafika vidi se da je zavisnost spektralnog intenziteta uzorka od njegove specifične aktivnosti, linearna.

c) **Računanje praga detekcije NaI(Tl) i Ge(Li) detektora.** Računate su minimalno merljive aktivnosti datih radionuklida (^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th) u uzorcima za različita vremena merenja i to za NaI(Tl) i Ge(Li) detektor. Pokazalo se da je NaI(Tl) detektor osjetljiviji 5-10 puta od Ge(Li) detektora u zavisnosti od posmatrane karakteristične spektralne linije i dužine merenja vremena uzorka. Takođe se pokazalo da se uzorci niskih aktivnosti moraju meriti nekoliko dana ovim instrumentima da bi se moglo detektovati koliku koncentraciju prirodnih radionuklida sadrže.

d) **Merenje koeficijenta emanacije.** Meren je koeficijent emanacije visokoaktivnih uzoraka jalovine uzetih sa područja rudnika uranijuma Kalna (K3 i K6), kao i uzorka zemljista znatno niže aktivnosti (KR5). Prvo su mereni spektralni intenziteti ovih uzoraka koji su bili hermetički zatvoreni najmanje 40 dana (da bi dospeli u radioaktivnu ravnotežu), a potom spektralni intenziteti istih ali otvorenih uzoraka (narušena ravnoteža) iz kojih je emanirao radon. Pokazalo se da se ovom metodom za dato vreme mogu meriti samo koeficijenti emanacije visokoaktivnih uzoraka (K3 i K6), dok je za uzorke niskih aktivnosti (KR5) ona nepouzdana za dato vreme merenja.

e) **Određivanje minimalno merljivog koeficijenta emanacije.** Proračunavanje minimalno merljivog koeficijenta emanacije rađeno je za idealan slučaj (pik VTA ne leži na komptonskom fonu) i za realan slučaj (pik VTA leži na komptonskom fonu). Utvrđeno je da se minimalno merljivi koeficijent emanacije za idealan i realan slučaj malo razlikuju za visoke specifične aktivnosti ($A_s = 10000\text{Bq/kg}$), a snižavanjem specifične aktivnosti i njihova razlika postaje sve veća.

f) **Određivanje specifične aktivnosti građevinskih materijala.** Vršena su kratko-

trajna merenja ($t = 4$ ks) specifičnih aktivnosti prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima, na NaI(Tl) detektoru. Obradeno je 10 uzoraka građevinskih materijala. Fluktuacija fona je kontrolisana tako što je on sniman pre i posle snimanja uzorka.

Na osnovu merenja specifične aktivnosti desetak uzorka građevinskih materijala, može se tvrditi da je metoda koja je razvijena u ovom radu primenljiva za brzu selekciju građevinskih materijala, prema veličini njihove specifične aktivnosti.

Pokazalo se da uzorci građevinskih materijala koji su obradeni u ovom radu imaju nižu vrednost specifične aktivnosti od one koju su propisali eksperti međunarodne komisije za atomsku energiju. Naši zakoni dozvoljavaju koncentraciju prirodnih radionuklida u građevinskim materijalima koja je još viša od gore pomenute pa treba razmisiliti o njenom snižavanju.

L I T E R A T U R A:

- 1 Krisiuk E.M., Radiacionij fon pomeštenij, Moskva, Energoatomizdat, 1989.
- 2 Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials: Report by an NEA Group of experts (Kolb W.A., Chairman). Paris: NEA OECD 1979.
- 3 Toth A., Feher I. Gamma spectrometric method for measuring natural radioactivity of building material
- 4 Die strahlenexpostion von ausen in der Bundesrepublik Deutschland durch naturliche radioactive stoffe im freien und in wohnungen unter beruchsichtigung des einflusses von baustoffern: Bericht über ein von Bundesminister des Innern gevordertes Foschungsvorhaben 1978
- 5 Untersuchungen über die konzentration natürlicher radionuclide in baumaterialien in der DDR/ P.Clajus,R.Lehmann,E.Ettenhuber,D.Obrikat/ Report SAAS-250 Berlin, 19 str. 313-323
- 6 Lloyd R.D. Gamma-ray emitters in concrete/Health Phys. 1976. Vol. 31. p. 71-73.
- 7 Stranden E. Population doses from environmental gamma radiation in Norway /Health Phis. 1977. Vol.33 P.319-323
- 8 Barber D.E., Giorgie H.R., Gamma-ray activity in bituminous,subbituminous and lignite coals /Health Phys 1977. Vol 32 P.83-88
- 9 Swedjemark G.A. Radon in dwelling in Sweden: Report SSI: 1978-013. Stockholm, 1978.
- 10 Vijdelenie radona iz stroitelnih materijalov v žilištah / N.A.Koroleva, N.I.Šalak, E.M.Krisiuk i dr. / Gigiena i sanitarija. 1985. No7.S 64-66.
- 11 Issledovanie i normirovanie radioaktivnosti stroitelnih materijalov E.M.Krisiuk, S.I. Tarasov, V.P. Šamov i dr. / Report SZS-157,Berlin 1974. s. 22-27
- 12 Krisiuk E.M. Airborne radioactivity in buildings /Health Phis. 1980. Vol 38. P. 199-202.
- 13 Ionizirujuće izlučenie: istočniki i biologičeskie effekti: Doklad NKDAR OON za 1982 g. na Generalnoj Assamblee, Njujork 1978.

- 14 Exposure to enhanced natural radiation and its regulatory implications: Proc. of the seminar held in Maastricht (March,1985) / The science of total environment 1985. Vol. 45 P.233.
- 15 Doze oblučenija naselenija / E.M.Krisiuk,JU.O.Konstantinov,V.V.Nikitin i dr. /Gigijena i sanitarija 1984. No5 S.63-66
- 16 Hughes J.S. Roberts G.C. The radiation exposure of the U.K. population - 1984. Review: National Radiation Protection Board Report NRPB-R 173 1984.
- 17 Radiation-Doses,effects,risks,United Nations Environment Programme Copyright UN 1985.
- 18 Novak G. Gama-spektrometrijsko određivanje urana i torijuma u uzorcima iz prirode, magistarski rad, Prirodno-matematički fakultet, Novi Sad, 1989.
- 19 CANBERRA - Instruction manual Ge(Li) Spectrometr Systems 7000 series
- 20 Katalog Bicron - NaI(Tl) Scintillation Detectors