

Radiološka karakterizacija tla Kopačkog rita

Lukanović, Irena

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:104534>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-06**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



IRENA LUKANOVIĆ

**RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TLA KOPAČKOG
RITA**

Završni rad

Osijek, 2016.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



IRENA LUKANOVIĆ

**RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TLA KOPAČKOG
RITA**

Završni rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja zvanja
prvostupnika/ce fizike

Osijek, 2016.

”Ovaj završni rad izrađen je u Osijeku i na Institutu za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu pod vodstvom doc. dr. sc. Marine Poje Sovilj i doc. dr. sc. Branka Petrineca u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.”

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Fizika radioaktivnog raspada	3
2.1	Vrste radioaktivnog raspada	3
2.2	Zakon radioaktivnog raspada	5
2.3	Sekularna ravnoteža	6
3	Pregled najznačajnijih radionuklida u okolišu	7
3.1	Nizovi primordijalnih radionuklida	7
3.2	Ostali radionuklidi od interesa	9
4	Materijali i metode	10
4.1	Visokorezolucijska gamaspektrometrija	10
4.1.1	Eksperimentalni postav gamaspektrometra	11
4.2	Uzorkovanje i priprema uzoraka za mjerenje	12
4.3	Izračun koncentracije aktivnosti uzorka	12
5	Rezultati i rasprava	13
6	Zaključak	20
7	Literatura	21
8	Životopis	23
9	Dodatak	XIV

RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TLA KOPAČKOG RITA

IRENA LUKANOVIĆ

Sažetak

Zračenje iz tla ovisi o udjelu radioaktivnih izotopa u tlu, a uglavnom potječe od primordijalnih nuklida uranijeva i torijeva niza (^{238}U , ^{232}Th) i izotopa ^{40}K . Analizom uzoraka dobivaju se informacije o prirodnoj radioaktivnosti te učincima ljudskih aktivnosti, pri čemu je visokorezolucijska gamaspektrometrija jedna od osnovnih metoda za jednoznačnu identifikaciju gama emitera. U radu su prikazani rezultati mjerenja koncentracije aktivnosti spomenutom metodom, a istraživanje je provedeno za šest različitih lokacija Kopačkog rita. U tlu radionuklida pronađeni su izotopi koji se često javljaju u prirodi, od kojih je očekivano najzastupljeniji ^{40}K . Od antropogenih radionuklida zabilježeni su izotopi cezija (^{134}Cs i ^{137}Cs) čija je prisutnost prvenstveno posljedica nesreće u Černobilu i Fukushima. ^{137}Cs kao vanjski i unutarnji izvor zračenja od posebne je važnosti jer može predstavljati opasnost za čovjeka s obzirom na dugo vrijeme poluraspada. Najveća koncentracija ^{137}Cs određena je na lokaciji Dunav - Kazuk i ona iznosi 22,8 Bq/kg, dok su ostale vrijednosti znatno manje.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: radioaktivni raspad, gamaspektrometrija, primordijalni radionuklidi

Mentor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj, doc. dr. sc. Branko Petrinec

Ocjenjivači:

Rad prihvaćen:

University Josip Juraj Strossmayer Osijek
Department of Physics

Bachelor of Physics Thesis

RADIOLOŠKA KARAKTERIZACIJA TLA KOPAČKOG RITA

IRENA LUKANOVIĆ

Abstract

The radiation from the soil depends on the ratio of radioactive isotopes in the soil, and mainly comes from the primordial isotopes of uranium and thorium series (^{238}U , ^{232}Th) and ^{40}K . With sample analysis one obtains information about natural radioactivity and the effects of human activities, where the high-resolution gamma spectrometry is one of the basic methods for unique identification of gamma emitters. The work described in this report represents the investigation with the same method undertaken with the intention of examining activity concentrations for six different locations in Kopački rit. Radionuclides that are generally highly abundant in the nature were detected. Along with the isotopes of uranium series the most common nuclide is ^{40}K . Cesium isotopes have also been detected (^{134}Cs and ^{137}Cs) as a result of human activity (mainly from Chernobyl and Fukushima accident). ^{137}Cs as external and internal source of radiation is important topic because it is highly toxic due to its long half-life of radioactive decay. The highest concentration of ^{137}Cs is detected at Dunav - Kazuk location (22,8 Bq/kg) while the values at other locations are considerably smaller.

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: radioactive decay, gamma spectrometry, primordial radionuclides

Supervisor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj, doc. dr. sc. Branko Petrincec

Reviewers:

Thesis accepted:

Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.

Marie Curie

1 Uvod

Svijest o postojanju i izloženosti ionizirajućem zračenju nije postojala sve do otkrića radioaktivnosti. Suvremeno shvaćanje ionizirajućeg zračenja započelo je 1895. Rontgenovim otkrićem rendgenskih zraka. Prirodnu radioaktivnost otkrio je Henri Becquerel iduće godine proučavajući fosforescenciju uranijevih soli. Nedugo nakon toga ustanovljeno je da se brzina raspada čistog radioaktivnog uzorka eksponencijalno smanjuje s vremenom. Nekoliko godina je trebalo proći do spoznaje kako radioaktivnost predstavlja promjene u samim atomima, a ne u uzorku kao cjelini, a potom još dvije do novog otkrića - raspad je po prirodi statistički tj. nemoguće je predvidjeti točno vrijeme raspada pojedinog atoma. Ipak, vrhunac istraživanja predstavljaju umjetno proizvedene nuklearne reakcije što je omogućilo stvaranje umjetnih radionuklida s različitim svojstvima. Od druge polovice dvadesetog stoljeća, posebice realizacijom atomske bombe, radioaktivnosti se često pripisuju negativne konotacije s asocijacijama na ekološke katastrofe i oružja za masovno uništenje civilizacije. Međutim, radioaktivnost je sastavni dio čovjekovog okoliša, odnosno jedan od okolišnih uvjeta za koje smo kao biološka bića prilagođeni. Godine 2016. izvještaj programa zaštite okoliša UN-a (UNEP) sadrži sljedeće: “Danas znamo više o izvorima i utjecajima izlaganja [ionizirajućeg] zračenja nego bilo kojem drugom opasnom faktoru, a znanstvena zajednica redovito dolazi do novih spoznaja i analizira to znanje...Izvori zračenja koji uzrokuju najveću izloženost šire javnosti nisu nužno oni koji privlače najviše pozornosti. Zapravo, najveću izloženost uzrokuju prirodni izvori koji su uvijek prisutni u okolini, a velik doprinos izloženosti od umjetnih izvora jest korištenje zračenja u medicini širom svijeta.”

Radioaktivnost, kojoj smo svakodnevno izloženi, ima izvor u kozmičkim zrakama, radioaktivnosti iz tla, zraka i u svim onim tvarima koje unosimo u organizam (hrana i piće). Postoji oko 60 radionuklida koji su glavni izvori prirodne radioaktivnosti, a po svom nastanku dijele se na:

primordijalni - oduvijek prisutni na Zemlji (^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th itd.)

kozmojeni - nastaju kao posljedica djelovanja kozmičkih zraka (^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{36}C itd.)

antropogeni - posljedica ljudske tehnologije, poglavito razvoja nuklearnih reaktora i testiranja nuklearnog oružja (^{90}Sr , ^{129}I , ^{131}I , ^{137}Cs , ^{239}Pu itd.) [1]

Količina prirodnog zračenja vrlo se razlikuje od mjesta do mjesta na Zemlji ovisno o geološkim karakteristikama pojedine regije, kemijskoj i fizičkoj mobilnosti prirodnih radionuklida te čovjekovog utjecaja na okoliš. Da bi se ispitala radioaktivnost okoliša sakupljaju se uzorci tla, vode i zraka te se analiziraju u laboratoriju. Uz dobro razumijevanje okoliša (kako određeni utjecaji u okolini mogu promijeniti prisutnost radionuklida u okolišu) rezultati analize mogu se koristiti za predviđanje budućnosti pojedine komponente (radionuklida) u okolišu.

U ovom radu prikazana su istraživanja prirodne radioaktivnosti na prostoru Kopačkog rita pri čemu je korištena metoda gamaspektrometrije u svrhu određivanja aktivnosti gama emitera. Radionuklidi od interesa su ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{137}Cs , ^{226}Ra i ^{210}Pb . Analiza uzoraka provedena je u Jedinici za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu. Jedinica provodi istraživanja onečišćenja okoliša prirodnim i fisijским radionuklidima na području RH još od 1959. godine te obavlja poslove provođenja mjera zaštite od zračenja i određivanja ozračenosti stanovništva u skladu s ovlaštenjima Instituta. Također se bavi praćenjem i utvrđivanjem kretanja radioaktivnih tvari kroz sve komponente biosfere, identifikacijom radiološki osjetljivih lokacija i medija te proučavanjem mehanizama za kruženja biološki značajnih radionuklida koji direktno ili indirektno dospijevaju u živi organizam. Istraživanja se također provode na svim područjima gdje zbog tehnoloških postupaka postoji povišena prirodna radioaktivnost.

2 Fizika radioaktivnog raspada

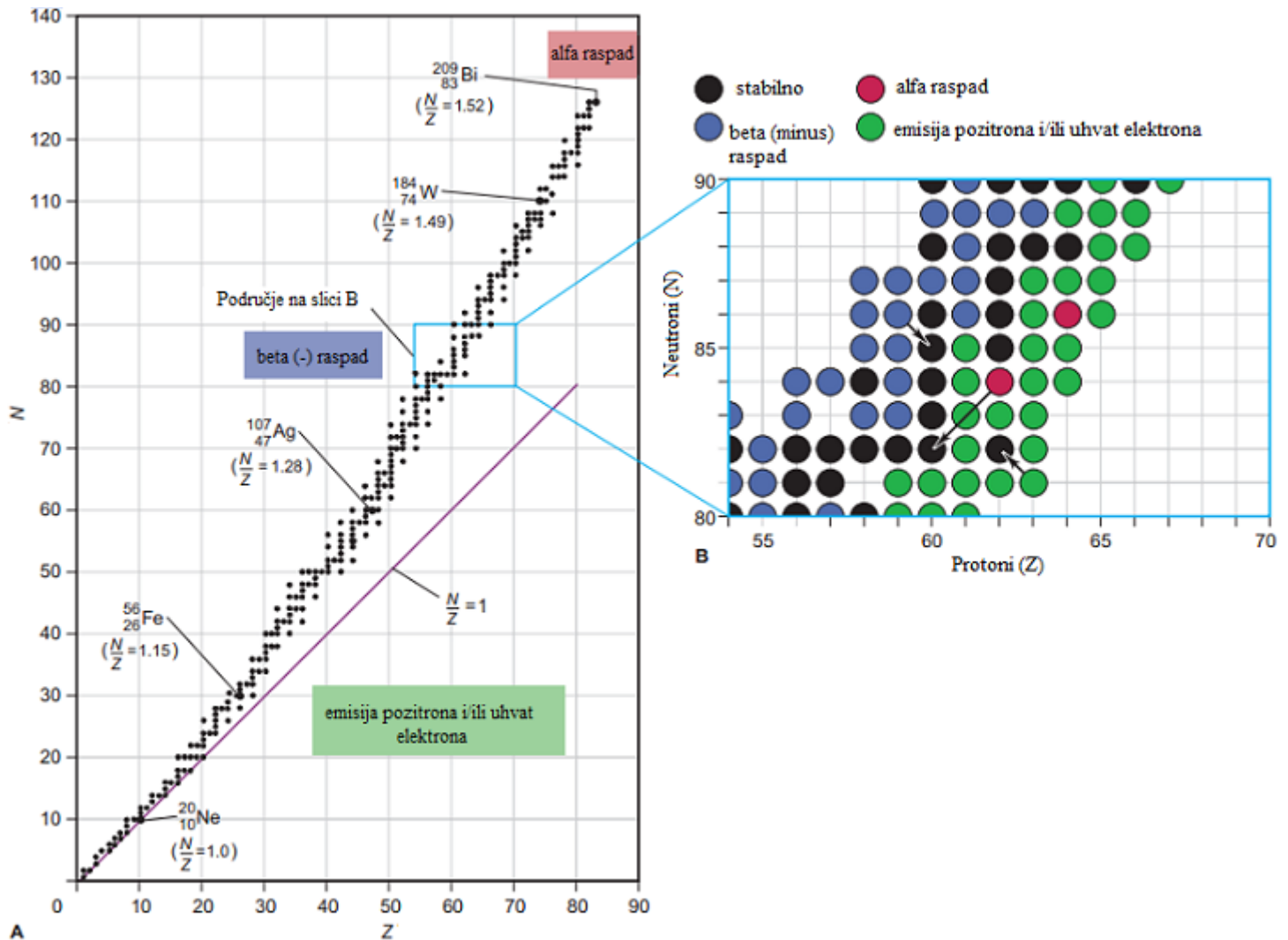
2.1 Vrste radioaktivnog raspada

Radioaktivnost je svojstvo određenih atomskih jezgri da se spontano raspadaju uz emisiju energije u obliku korpuskularnog ili elektromagnetskog zračenja, čime se formira novi stabilniji nuklid. Porijeklo radioaktivnosti nije se moglo rastumačiti dok nije otkrivena struktura atomske jezgre. Radioaktivni raspad vezan je uz nestabilne atomske jezgre, tj. jezgre koje nemaju dovoljnu energiju vezanja kako bi očuvale svoju cjelovitost zbog neuravnoteženog broja protona i neutrona u njoj. Tri osnovne vrste radioaktivnog raspada α -, β - i γ - zračenje, prikazane su na slici 2.1.1, pri čemu gama emisija nije primarni proces raspada, već prati ostale (uglavnom beta) vrste raspada. Jezgra pri emisiji γ - zračenja prelazi iz pobuđenog energijskog stanja u stanje niže energije. Ukoliko je vrijeme potrebno za prijelaz veće od nanosekunde, opisano stanje naziva se metastabilnim ili izomernim, a proces raspada naziva se izomerni prijelaz (*isomeric transition*; IT). [2]

Alfa raspad	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He$
Beta (minus) raspad	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$
Beta (plus) raspad	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu$
Uхват elektrona	${}^0_{-1}e + {}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}Y$
Gama emisija	${}^A_ZX^* \longrightarrow {}^A_ZX + \gamma$

Slika 2.1.1: Prikaz osnovnih raspada atomske jezgre. Kod α raspada nestabilna jezgra spontano emitira alfa česticu (jezgru helija) pri čemu se maseni broj A smanji za 4, a protonski broj Z za 2. U slučaju β raspada ne dolazi do promjene atomske mase, već se samo broj protona uveća ili smanji za jedan. Jezgre koje imaju višak neutrona N mogu spontano ostvariti β^- raspad (neutron se raspada u proton uz zračenje elektrona i antineutrina), a one s viškom protona β^+ raspad, pri čemu proton prelazi u neutron, a produkti zračenja su pozitron i neutrino. Drugi način da se smanji broj protona predstavlja uhvat orbitalnog elektrona. Uhvatom elektrona iz prve K-ljuske elektronskog omotača proton se mijenja u neutron, uz istovremeno zračenje neutrina. Gama raspadom jezgra u pobuđenom stanju odbacuje višak energije emisijom γ -zraka i prelazi u stanje niže pobuđenosti ili u osnovno stanje.

Stabilnost jezgre ovisi o dva bitna faktora, a radi se o omjeru broja neutrona i protona u jezgri $\frac{N}{Z}$ (uglavnom se odnosi na nuklide koji se raspadaju β raspadom) te ukupnoj masi nuklida, što je prije svega bitno za α raspad. Na slici 2.1.2 shematski su prikazani raspadni određeni jezgri na karti nuklida.



Slika 2.1.2: Shematski prikaz raspada nestabilnih jezgri.[3] Za lakše jezgre, poput ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ i ${}^{20}\text{Ne}$, jedan neutron za svaki proton ($N = Z$) dovoljan je za postizanje stabilnosti. Omjer $\frac{N}{Z}$ stabilnih nuklida povećava se porastom broja Z . (${}^{56}\text{Fe}$, $\frac{N}{Z} = 1,15$; ${}^{107}\text{Ag}$, $\frac{N}{Z} = 1,28$ i dr.) Sve jezgre sa $Z > 83$ su nestabilne što znači da svi nuklidi s većim brojem Z - aktinoidi ($Z = 89 - 103$) i elementi četvrte (6d) serije ($Z = 104 - 112$) su radioaktivni i raspadaju se emisijom alfa čestica.

Nestabilna jezgra općenito se raspada tako da omjer $\frac{N}{Z}$ teži liniji stabilnosti, što je vidljivo na uvećanom dijelu slike 2.1.2. Potrebno je istaknuti sljedeće:

1. Jezgre koje imaju previše neutrona da bi bile stabilne smještene su iznad linije stabilnosti. One

se raspadaju β^- raspadom, pri čemu neutron prelazi u proton i na taj način smanjuje vrijednost omjera $\frac{N}{Z}$.

2. Jezgre s previše protona nalaze se ispod linije stabilnosti. One se raspadaju emisijom pozitrona i/ili uhvatom elektrona, pri čemu se u oba slučaja proton mijenja u neutron. Raspad uhvatom elektrona je vjerojatniji s porastom Z -a, pa je β^+ raspad češći kod lakših jezgri, a EC među težim jezgrama.

3. Jezgre sa $Z > 83$ su preteške da bi bile stabilne i raspadaju se emisijom alfa čestica što smanjuje vrijednosti Z i N za dvije jedinice po emisiji.

2.2 Zakon radioaktivnog raspada

Riječ je o nasumičnom procesu opisanom sljedećim zakonom:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -k \cdot N(t) \quad (1)$$

Integracijom prethodnog izraza dobiva se zakon radioaktivnog raspada u integriranom obliku:

$$N(t) = N_0 e^{-kt} \quad (2)$$

Jednadžba (2) omogućuje da se predvidi broj neraspadnutih jezgri N nakon vremena t , gdje je N_0 broj jezgri na početku raspada, a k konstanta radioaktivnog raspada. Uglavnom je zgodnije raditi s vremenom poluraspada¹ nego s konstantom raspada, a njihova veza dana je sljedećom relacijom

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k} \quad (3)$$

Umjesto mjerenja broja neraspadnutih jezgri u uzorku, lakše je mjeriti broj raspada u vremenu, što odgovara definiciji aktivnosti A .

$$A(t) \equiv kN(t) \quad (4)$$

Uvrštavanjem (2) u prethodni izraz dobivamo da se aktivnost nekog uzorka mijenja prema jednakom zakonu

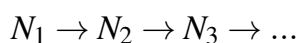
$$A = A_0 e^{-kt} \quad (5)$$

¹Vrijeme potrebno da se raspadne polovica početnog broja radioaktivnih nuklida; $t_{\frac{1}{2}}$.

gdje je A_0 aktivnost u početnom trenutku $t = 0$. SI-jedinica za aktivnost je *becquerel* (bekerel; 1 Bq = 1 raspad u sekundi).

2.3 Sekularna ravnoteža

Ako radioaktivni raspad ne vodi na stabilan nuklid, već je ovaj radioaktivan, dobiva se “raspad u nizu”:



Ograničimo li se samo na tri člana u nizu raspada, broj jezgara za prvi nuklid u nizu će padati po eksponencijalnom zakonu, dok će za drugi nuklid vrijediti:²

$$N_2 = \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot N_1(0)(e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) = \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot N_1(1 - e^{-(k_2 - k_1)t}) \quad (6)$$

Iz prethodne relacije vidljivo je da vrijeme potrebno za postizanje ravnoteže ovisi o vremenu poluraspada i roditelja i kćeri, pri čemu razlikujemo tri karakteristična slučaja:

1. $\tau_1 \gg \tau_2$; vrijeme poluraspada roditelja je puno duže u odnosu na poluraspad kćeri
2. $\tau_1 > \tau_2$; vrijeme poluraspada roditelja je duže u odnosu na poluraspad kćeri
3. $\tau_1 < \tau_2$; vrijeme poluraspada roditelja je kraće u odnosu na poluraspad kćeri

U prvom slučaju, tj. ako je $k_1 \ll k_2$, za $k_2 t \gg 1$ vrijedi:

$$N_2 = \frac{k_1}{k_2} N_1(0) e^{-k_1 t} \quad (7)$$

odnosno:

$$k_1 N_1 = k_2 N_2 \quad (8)$$

Aktivnost nuklida roditelja i kćeri je jednaka, a ovo stanje naziva se “sekularna ravnoteža”. Primjeri su odnosi između dugoživućih izotopa uranija i torija (^{238}U , ^{235}U i ^{232}Th) i njihovih potomaka. U uzorku koji sadrži dugoživućeg roditelja, može se izračunati ove dvije aktivnosti, što se često koristi u gamaspektrometriji uzoraka.

U slučaju prijelazne ravnoteže vrijeme poluraspada kćeri je istog reda kao i kod jezgre roditelja,

²Dobiveni izraz izvodi se iz općenite formule koja se uz pripadajuće diferencijalne jednadžbe nalazi u dodatku na kraju rada.

samo manje vrijednosti tj. $\tau_1 > \tau_2$, ($k_1 < k_2$). Nakon određenog vremena ($t \gg \tau_2$) drugi eksponencijalni član u jednadžbi (6) postaje zanemariv, a omjer aktivnosti jezgre roditelja i kćeri stalan, ali različit od jedan.

Kada jezgra roditelj ima kraće vrijeme poluraspada nego kći (neravnoteža; $\tau_1 < \tau_2$), aktivnost jezgre kćeri raste do određenog maksimuma, a potom se raspada s vlastitim karakterističnim vremenom poluraspada. [2]

3 Pregled najznačajnijih radionuklida u okolišu

Za razliku od umjetnih radionuklida čija je prisutnost u okolišu posljedica isključivo čovjekovog djelovanja, prirodna radioaktivnost potječe od izvanzemaljskih izvora, kao i od radioaktivnih elemenata u Zemljinoj kori. Od kozmogenih radionuklida jedino ^3H , ^7Be , ^{14}C i ^{22}Na značajnije doprinose ukupnoj dozi koju čovjek primi od prirodnog zračenja. Radionuklidi koji se prirodno pojavljuju na Zemlji, a koji su u svom sadašnjem obliku postojali i prije nastanka Zemlje, mogu se podijeliti u dvije skupine:

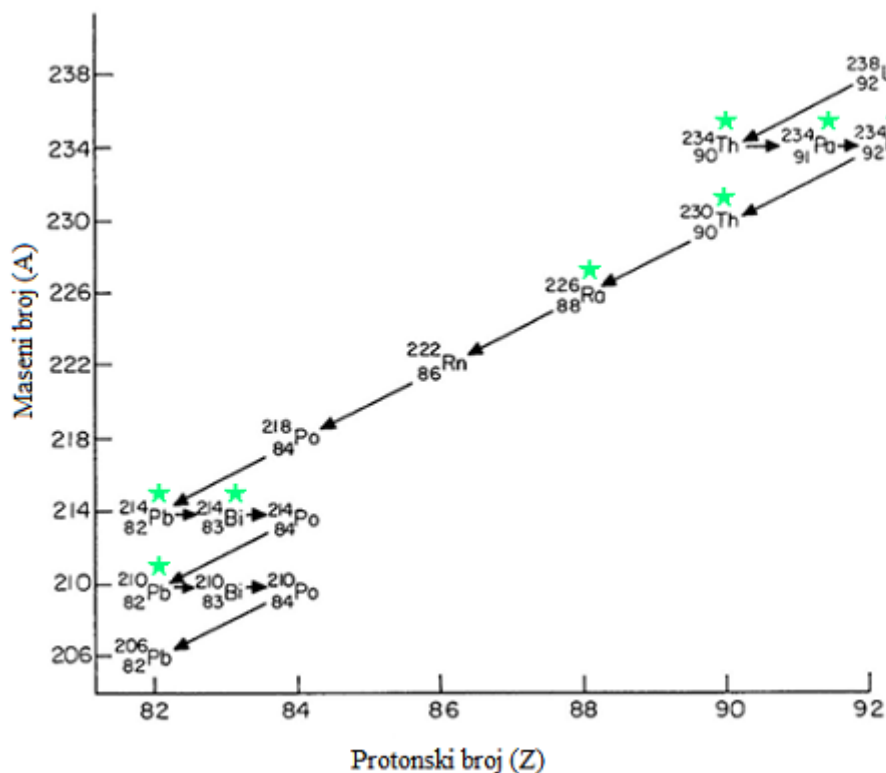
1. Primordijalni nuklidi koji se izravno raspadaju u stabilne nuklide.
2. Primordijalni nuklidi koji se preko niza izotopa raspadaju do stabilnog izotopa olova (uranijev, torijev i aktinijev niz).

Uzimajući u obzir čovjekovo izlaganje prirodnom zračenju, bitni su samo neki od tih radionuklida. Vanjska izloženost zračenju uglavnom je rezultat ^{40}K i ^{87}Rb te radionuklida koji su članovi triju radioaktivnih nizova. [4]

3.1 Nizovi primordijalnih radionuklida

Sva tri niza primordijalnih radionuklida počinju s dugoživućim izotopom teškog elementa, a završavaju s nekim od stabilnih izotopa olova. Također, za sve tri serije postoje dvije mogućnosti raspada (α i β raspad), a zajedničko im je i prisutnost izotopa radona kao plinovitog produkta ovih reakcija.

Izotop ^{238}U polazni je izotop uranijevog radioaktivnog niza³, shematski prikazanog na slici 3.1.1. U ovom nizu potrebno je izdvojiti ^{222}Rn čije zračenje predstavlja najveći pojedinačni doprinos dozi zračenja koju prosječni čovjek primi.

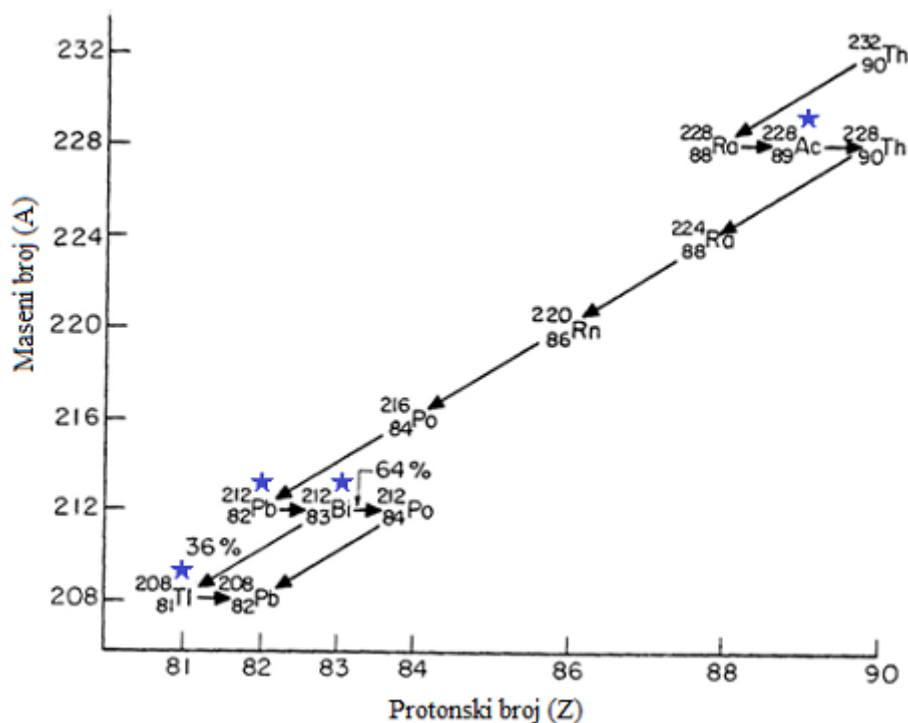


Slika 3.1.1: Uranijev radioaktivni niz $4n + 2$. [5] Polazni nuklid ^{238}U emisijom alfa čestice prelazi u ^{234}Th , koji se potom raspada u $^{234\text{m}}\text{Pa}$ i tako sve do stabilnog izotopa ^{206}Pb u 14 transformacija. Simbolom zvijezdice naznačeni su značajni gama emiteri čiji se fotovrhovi analiziraju u gama spektru uzorka iz okoliša.

Na slici 3.1.2 dana je shema raspada torijevog niza. Više od 99 % prirodnog torija postoji u obliku izotopa ^{232}Th s vremenom poluživota $1,405 \cdot 10^{10}$ godina. Zbog izrazito sporog raspada, ukupan iznos prirodnog torija u Zemlji ostaje gotovo isti, a razlike u koncentraciji mogu nastati zbog premještanja s jednog mjesta na drugo prirodnim ili ljudskim utjecajem. U nizu se gamaspektrometrom lako mogu detektirati sljedeći nuklidi: ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi i ^{208}Tl .

S obzirom na relativno malu zastupljenost izotopa ^{235}U u prirodnom uraniju, aktinijev niz nema značajniji doprinos u prirodnoj radioaktivnosti na Zemlji.

³Svi izotopi uranijevog niza imaju nukleonski broj $4n + 2$, gdje je n prirodni broj, pa se taj niz zove $(4n + 2)$ -niz. Analogno, torijev niz nosi naziv $4n$ -niz, a aktinijev $(4n + 3)$ -niz.



Slika 3.1.2: Shema raspada ^{232}Th . [5] Torijev niz počinje sa ^{232}Th kao nuklidom roditeljem i nakon 10 transformacija dolazi se do stabilnog izotopa ^{208}Pb . Simbolom zvijezdice naznačeni su značajni gama emiteri čiji se fotovrhovi analiziraju u gama spektru uzorka iz okoliša.

3.2 Ostali radionuklidi od interesa

Osim radioaktivnog raspada kojim nastaju članovi tri prirodne serije, prirodni radionuklidi mogu nastati i interakcijom kozmičkih zraka s atomima u atmosferi. Primjeri kozmogennih radionuklida su izotopi elemenata berilija, ugljika, aluminijsa, klora, kalcija i joda, od kojih jedino ^7Be , ^{14}C i ^{22}Na značajnije doprinose ukupnoj dozi koju čovjek primi od prirodnog zračenja. Za gamaspektrometriju najznačajniji je ^7Be koji elektronskim uхватom prelazi u ^7Li uz emisiju gama zrake od 478 keV.

Dva primordijalna radionuklida koji se ne raspadaju preko lanaca drugih nestabilnih radionuklida, a koji bitno doprinose pozadinskom zračenju, su ^{40}K i ^{87}Rb . Radioaktivni kalij je vrlo mali udio kalija koji postoji na Zemlji, a njegov doprinos prirodnom zračenju ovisi o koncentraciji u stijevama i tlu. Aktivnost ^{40}K određuje se direktno preko njegove karakteristične γ -zrake tj. iz vrha energije 1460 keV.

Glavni izvori umjetne radioaktivnosti su radionuklidi koji se koriste u medicini, testiranja nuk-

learnog oružja i nuklearne elektrane, pri čemu se najviše pozornosti posvećuje potonjima. Iako nuklearna postrojenja u normalnim uvjetima najmanje pridonose ozračivanju stanovništva, dođe li do nesreće, ona mogu postati veliki zagađivači okoliša. Opasnost najčešće prijete od fisijskih proizvoda, među kojima se nalaze sljedeći radionuklidi: radioaktivni izotopi joda (od ^{131}I do ^{135}I), izotopi cezija (^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs), izotopi rubidija (od ^{88}Rb do ^{91}Rb) te radioizotopi nekih drugih elemenata (^{132}Te , ^{140}Ba , ^{99}Mo) i dr. [6,7] Od prethodno navedenih radionuklida najvažniji su ^{131}I , ^{137}Cs i ^{134}Cs koji se obično nazivaju biološki značajnim radionuklidima.

Izotopi ^{131}I i ^{137}Cs su β - emiteri s vremenima poluraspada od 8,05 dana i 30 godina. Oko 95 % izotopa ^{137}Cs raspada se beta emisijom u metastabilni nuklid ^{137m}Ba , dok se ostatak izravno raspada u stabilni ^{137}Ba . ^{137m}Ba ima vrijeme poluraspada oko 153 s i gama emisijom se također raspada u stabilni ^{137}Ba , što se može mjeriti gama spektrometrom. Zbog relativno dugog vremena poluraspada te velikih aktivnosti nađenih u radioaktivnim oborinama, ^{137}Cs je uz ^{90}Sr i najopasniji radionuklid. [4]

4 Materijali i metode

4.1 Visokorezolucijska gamaspektrometrija

Svrha analize uzoraka gamaspektrometrijom je odrediti aktivnosti radionuklida koji emitiraju gama zračenje. Ispitivanje koncentracija aktivnosti podrazumijeva:

- uzorkovanje
- pripremu uzorka
- kalibraciju i mjerenje
- procjenu podataka
- izračun koncentracija aktivnosti i prikaz rezultata.

Ova metoda uglavnom se upotrebljava za nedestruktivnu analizu uzoraka te se koristi gamaspektrometrijski sustav kojeg čine poluvodički detektor koaksijalnog tipa, sustav za hlađenje (tekući dušik), napajanje visokog napona, prepojačalo, pojačalo, multikanalni analizator (MCA) te računalo na koje se pohranjuju podaci. Princip rada detektora zasniva se na interakciji zračenja s atomima

germanija visoke čistoće (*high – purity germanium*), pri čemu nastaju parovi elektron-šupljina koji bivaju privučeni na elektrode, što pak omogućuje detekciju signala i daljnju obradu.

4.1.1 Eksperimentalni postav gamaspektrometra

Gamaspektrometrijski sustav temelji se na High-Purity Germanium Coaxial Photon Detector System ORTEC HPGe detektoru ⁴(FWHM 2,24 keV na 1,33 MeV ⁶⁰Co s relativnom efikasnosti od 74,2 % na 1,33 MeV), spojenim s višekanalnim analizatorom koji je pak povezan s računalnim sustavom i dodatkom podataka.

Detektor je zaštićen s 10 cm olova i unutrašnjom stjenkom od dvomilimetarske bakrene folije te dvomilimetarske folije kadmija kako bi se smanjio utjecaj osnovnog zračenja. Izgled korištenog sustava može se vidjeti na slici 4.1.1. Vrijeme mjerenja bilo je najmanje 50000 sekundi, a računalni program za analizu podataka bio je GammaVision.



Slika 4.1.1: Eksperimentalni postav. a) olovni štitič unutar kojeg je detektor s uzorkom b) sustav za hlađenje (tekući dušik) c) elektronski uređaj za rad detektora d) računalo

⁴Germanij se nametnuo kao glavni materijal za detekciju ove vrste zračenje, jer ima veći udarni presjek za visokoenergijske fotone od Si, a moguće ga je i proizvesti u obliku masivnih monokristala čime je zadovoljen uvjet za velikim omjerom aktivnog volumena i površine upada.

4.2 Uzorkovanje i priprema uzoraka za mjerenje

Uspješno uzorkovanje dijela okoliša podrazumijeva poznavanje obilježja i dinamike područja koje se uzorkuje. Uzorci tla obično se prikupljaju za proučavanje ukupno nataloženih radionuklida ili njihove dostupnosti na površinama od interesa, a dubine na kojima se vade uzorci variraju s obzirom na cilj istraživanja i značajke tla.

Glavna svrha pripreme uzorka jest očuvati izvornu raspodjelu elemenata koja je bila u vrijeme uzorkovanja, a u nastavku je opisan postupak pripreme koji je korišten u okviru ovog istraživanja. Skupljeni uzorak prostre se na odgovarajuću površinu (npr. plastična folija) te se ostavi sušiti na sobnoj temperaturi na nekoliko dana. Nakon sušenja zemlja se prosije preko sita na čestice veličine 2 mm, a potom se prosijani dio uzorka suši u sušioniku na 105 °C dva do tri dana do konstantne mase. Neprosijani dio zemlje suši se na 105 °C dva do tri dana, izvaže i odbaci. Osušeni uzorak zemlje se važe te se uzorci spaljuju na temperaturi od 450 °C. Dobiveni uzorak se raspodijeli u odgovarajuće geometrije mjerenja te je spreman za spektrometrijsku analizu.

4.3 Izračun koncentracije aktivnosti uzorka

Koncentracija aktivnosti općenito se definira kao broj raspada po jedinici mase ili volumenu uzorka, a pripadajuća mjerna jedinica je Bq/kg. Standardna formula kojom je određena koncentracija aktivnosti (A) gama emitera u uzorku dana je sljedećim izrazom:

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot \gamma \cdot t_s \cdot m \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5} \quad (9)$$

pri čemu je N ukupan broj impulsa odgovarajućeg fotovrha:

$$N = N_s - \frac{t_s}{t_b} N_b \quad (10)$$

N_s - ukupni broj impulsa odgovarajućeg vrha u spektru uzorka

N_b - ukupni broj impulsa odgovarajućeg vrha u spektru osnovnog zračenja (background)

ε - efikasnost detektora u energiji promatranog vrha

t_s - vrijeme brojanja uzorka u sekundama (livetime)

t_b - vrijeme brojanja osnovnog zračenja u sekundama (lifetime)

m - masa uzorka u kg

γ - vjerojatnost emisije gama linije koja odgovara energiji vrha

Veličine K_1 , K_2 , K_3 , K_4 i K_5 su redom korekcijski faktor za nuklearni raspad od vremena uzorkovanja do početka mjerenja, korekcijski faktor za raspad tijekom mjerenja, korekcijski faktor za samoatenuaciju, korekcijski faktor za gubitak impulsa zbog nasumičnog sumiranja i korekcijski faktor podudaranosti za one nuklide koji se raspadaju kaskadom sukcesivnih emisija fotona. Detaljnije o njima može se pronaći u dodatku na kraju rada.

Za nuklide koji imaju više od jedne gama zrake u spektru provodi se težinska statistika. [8]

5 Rezultati i rasprava

Provedena su mjerenja prirodne radioaktivnosti gamaspektrometrijom na prostoru Parka prirode Kopački rit, a vršila su se na sljedećim lokacijama: Zlatna Greda, Šumska kuća, Kopački rit-Brod 1, dvorac Tikveš, Dunav Kazuk, Zlatna Greda- lovačka kuća (slika 5.0.1).

U spektru su zabilježene energije izotopa koji se često javljaju u prirodi: ^{40}K , ^{235}U , određeni izotopi iz ^{238}U niza (^{210}Pb , ^{214}Pb , ^{226}Ra), te izotopi iz ^{232}Th niza (^{228}Ra , ^{208}Tl). Zbog svog kratkog vremena poluraspada (53,4 dana), izotopa ^7Be nema puno u uzorcima tla, te nije analiziran. U spektru su zabilježeni i neki nuklidi koji su nastali ljudskim djelovanjem (^{134}Cs , ^{137}Cs). Izotop ^{137}Cs može biti opasan za čovjeka kao vanjski i unutarnji izvor zračenja ($t_{1/2} = 30,1$ godina). Kada je čovjek izložen ^{137}Cs u okolišu, izložen je emisiji gama zraka od 661,62 keV dok je istovremena emisija beta čestica manje opasna zbog slabije prodornosti kroz materiju (koža djeluje kao zaštita). Ukoliko se ^{137}Cs unese u tijelo, beta čestice predstavljaju jednaku opasnost kao i gama zrake, a zbog sličnosti kemijskih svojstava cezija (Cs) s kalijem (K), Cs može zamijeniti K u čovjekovom tijelu. [9] Aktivnost ^{134}Cs znatno je manja u odnosu na aktivnost ^{137}Cs jer ga inicijalno ima puno manje te ima kraće vrijeme poluraspada ($t_{1/2} = 2,06$ godina). Radioaktivni izotopi joda (od ^{131}I do ^{135}I), također nastali nakon Černobilske nesreće, nisu pronađeni zbog svog kratkog vremena poluraspada.

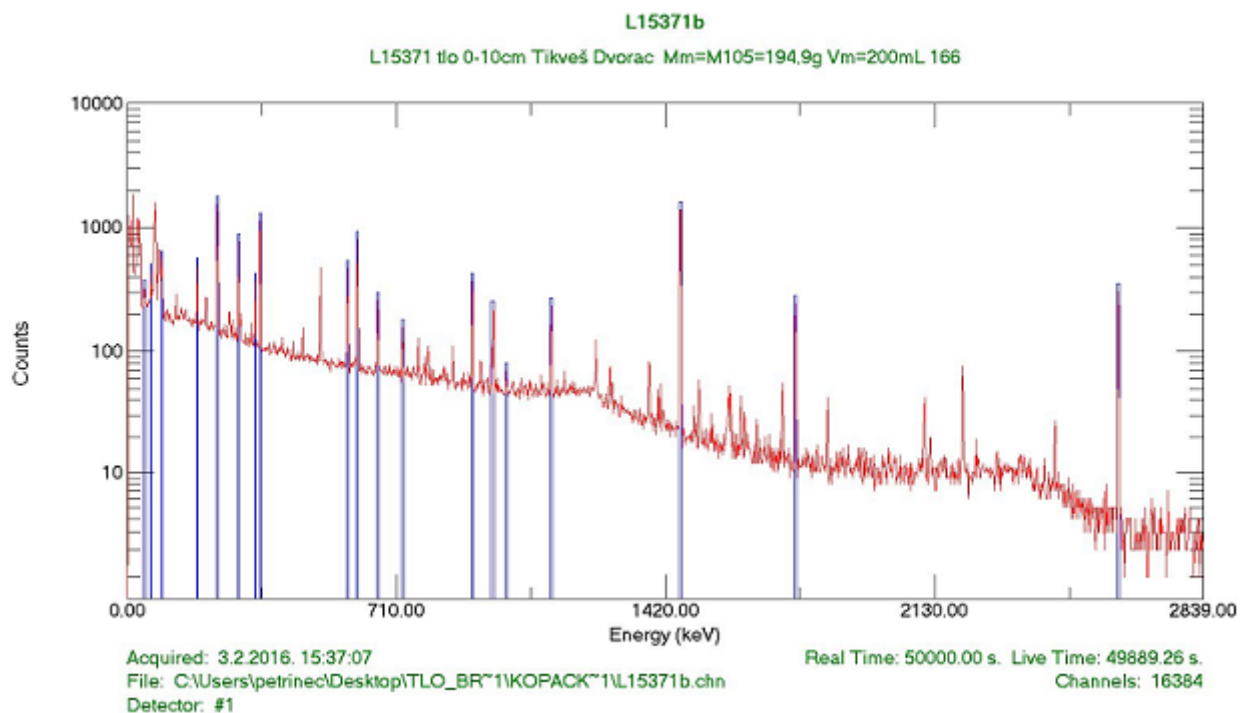


Slika 5.0.1: Smještaj Parka prirode Kopački rit [10]. Kao fluvijalno-močvarna nizina, područje Kopačkog rita nastalo je zasipanjem sedimenata rijeka Drave i Dunava uz stalno zamočvarivanje i djelomično ujezerivanje prostora. U sastavu sedimenata javljaju se šljunci, pjeskovita i glinovita ilovača te fluvijalni les. Plavljenje je posebno izraženo na području Posebnog zoološkog rezervata. U središnjem dijelu rezervata je Kopačko jezero, koje je zajedno s jezerom Sakadaš, kanalima Čonakut i Hulovskim kanalom stalno pod vodom, dok ostali dijelovi povremeno plave.

Na slici 5.0.2 prikazan je tipični izmjereni spektar, uzet s prostora dvorca Tikveša.

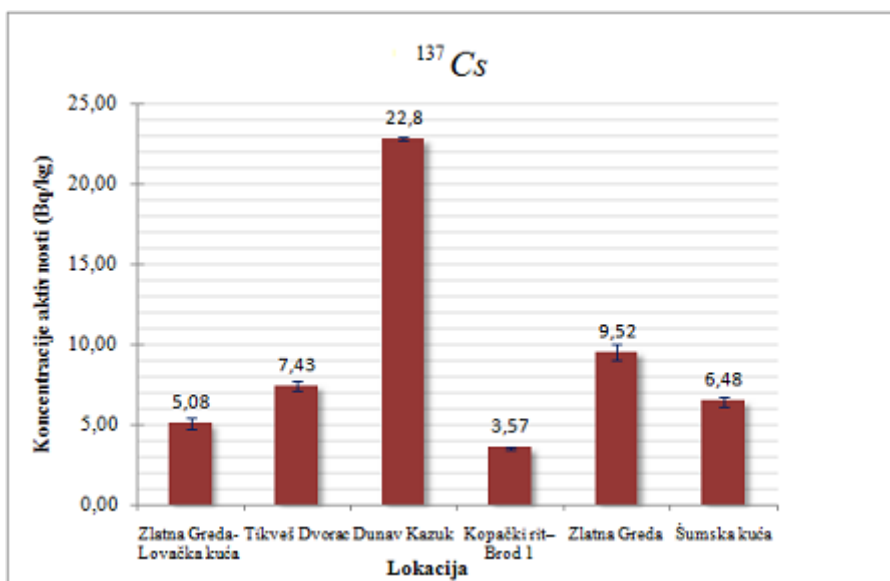
U tablici na slici 5.0.4 prikazani su rezultati kao srednje vrijednosti koncentracije aktivnosti za prirodne radionuklide, pri čemu su vrijednosti izražavane na dvije decimale. Koncentracija aktivnosti određena je prema relaciji (9).

Prirodnoj radioaktivnosti na svim lokacijama najviše doprinosi izotop kalija ^{40}K što smo i očekivali. Kalij je sedmi element po zastupljenosti u Zemljinoj kori, stoga ga u uzorku tla ima dosta. Najviše ^{40}K zabilježeno je na lokaciji dvorac Tikveš ($5,56 \cdot 10^5$ Bq/kg). Najveća koncentracija ^{137}Cs za-



Slika 5.0.2: Spektar uzorka tla L15371.

bilježena je na lokaciji Dunav - Kazuk i ona iznosi 22,8 Bq/kg, dok su ostale vrijednosti znatno manje. U usporedbi sa dobivenim vrijednostima na području Ličko - senjske županije koje se nalaze u prilogu C [11], na području Kopačkog rita dobivene su u prosjeku znatno manje vrijednosti što se može pripisati načinu širenja oblaka radioaktivne prašine koji je manje pogodno ovo područje nakon Černobilske nesreće. Grafički prikaz koncentracije aktivnosti ^{137}Cs po lokacijama nalazi se na slici 5.0.3, a grafovi drugih radionuklida od interesa nalaze se u prilogu A.



Slika 5.0.3: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{137}Cs po lokacijama

Lokacije	Koncentracije aktivnosti						
	Bq/kg						
	^{238}U	^{235}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{210}Pb	^{40}K	^{137}Cs
Zlatna Greda-Lovačka kuća	$(4,19\pm 1,10)\text{E}+0$	$(1,96\pm 0,51)\text{E}-1$	$(3,37\pm 0,15)\text{E}+1$	$(3,62\pm 0,87)\text{E}+1$	$(1,97\pm 0,76)\text{E}+1$	$(5,26\pm 0,09)\text{E}+2$	$(5,08\pm 0,31)\text{E}+0$
Tikveš Dvorac	$(5,12\pm 0,67)\text{E}+1$	$(2,39\pm 0,31)\text{E}+0$	$(3,59\pm 0,09)\text{E}+1$	$(4,88\pm 0,07)\text{E}+1$	$(3,23\pm 0,55)\text{E}+1$	$(5,56\pm 0,05)\text{E}+5$	$(7,43\pm 0,32)\text{E}+0$
Dunav Kazuk	$(7,16\pm 1,09)\text{E}+1$	$(3,34\pm 0,51)\text{E}+0$	$(2,51\pm 0,09)\text{E}+1$	$(3,98\pm 0,09)\text{E}+1$	$(6,46\pm 1,30)\text{E}+1$	$(4,19\pm 0,06)\text{E}+2$	$(2,28\pm 0,01)\text{E}+1$
Kopački rit-Brod 1	$(4,48\pm 0,34)\text{E}+1$	$(2,09\pm 0,16)\text{E}+0$	$(1,91\pm 0,03)\text{E}+1$	$(2,14\pm 0,02)\text{E}+1$	$(2,31\pm 0,13)\text{E}+1$	$(3,88\pm 0,02)\text{E}+2$	$(3,57\pm 0,10)\text{E}+0$
Zlatna Greda	$(9,20\pm 1,26)\text{E}+1$	$(4,29\pm 0,59)\text{E}+0$	$(3,70\pm 0,12)\text{E}+1$	$(6,76\pm 0,12)\text{E}+1$	$(7,69\pm 0,18)\text{E}+1$	$(4,64\pm 0,06)\text{E}+2$	$(9,52\pm 0,49)\text{E}+0$
Šumska kuća	$(4,09\pm 0,46)\text{E}+1$	$(1,91\pm 0,22)\text{E}+0$	$(2,75\pm 0,08)\text{E}+1$	$(3,33\pm 0,06)\text{E}+1$	$(1,38\pm 0,24)\text{E}+1$	$(4,32\pm 0,04)\text{E}+2$	$(6,48\pm 0,30)\text{E}+0$

Slika 5.0.4: Koncentracije aktivnosti prirodnih radionuklida

Iz podataka prikazanih u tablici izračunate su brzine doze jednadžbom (11), a vrijednosti doza

nalaze se u tablici na slici 5.0.5.

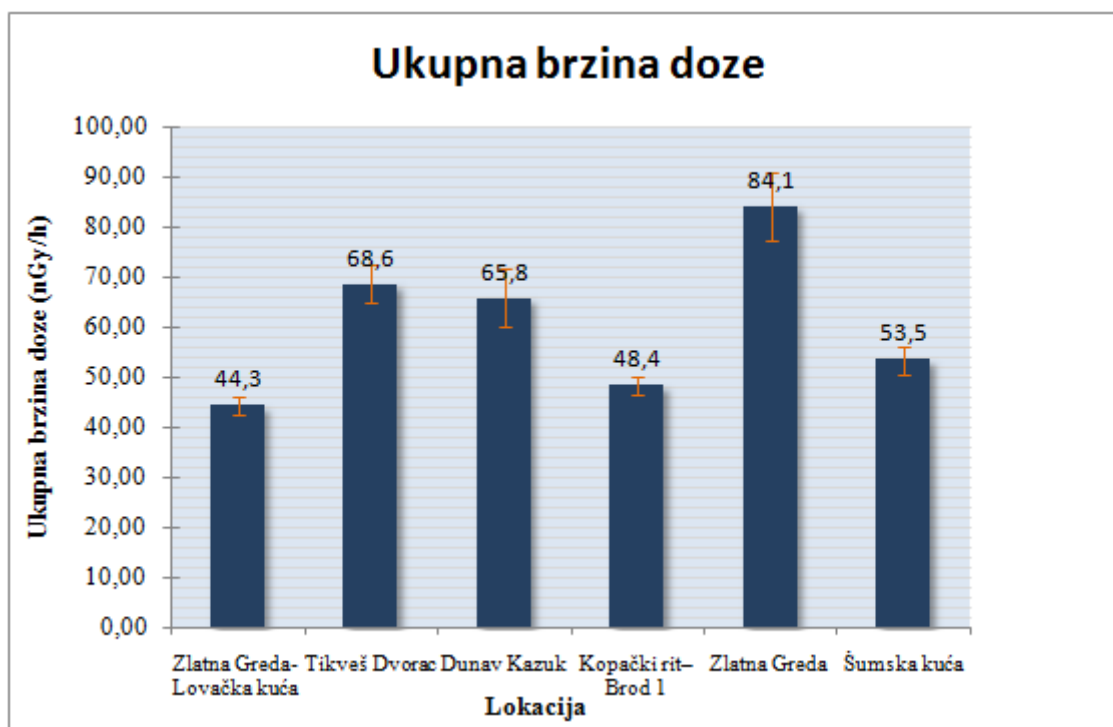
$$\dot{D} = 0,0417 \cdot A(^{40}K) + 0,462 \cdot A(^{238}U) + 0,604 \cdot A(^{232}Th) \quad (11)$$

gdje su $A(^{40}K)$, $A(^{238}U)$ i $A(^{232}Th)$ koncentracije aktivnosti ^{40}K , ^{238}U i ^{232}Th u $Bqkg^{-1}$. [12]

Najviša brzina doze izračunata je na lokaciji Zlatna Greda ($84,1 \text{ nGy } h^{-1}$) i iznosi oko $0,734 \text{ mGy/god}$. Najniža brzina doze od $44,3 \text{ nGy } h^{-1}$ izračunata je na mjestu lovačke kuće u Zlatnoj Gredi $84,1 \text{ nGy } h^{-1}$ i iznosi $0,388 \text{ mGy/god}$. Za usporedbu, prosječna godišnja brzina doze u Zagrebu iznosi $120 \text{ nGy } h^{-1}$. [12]

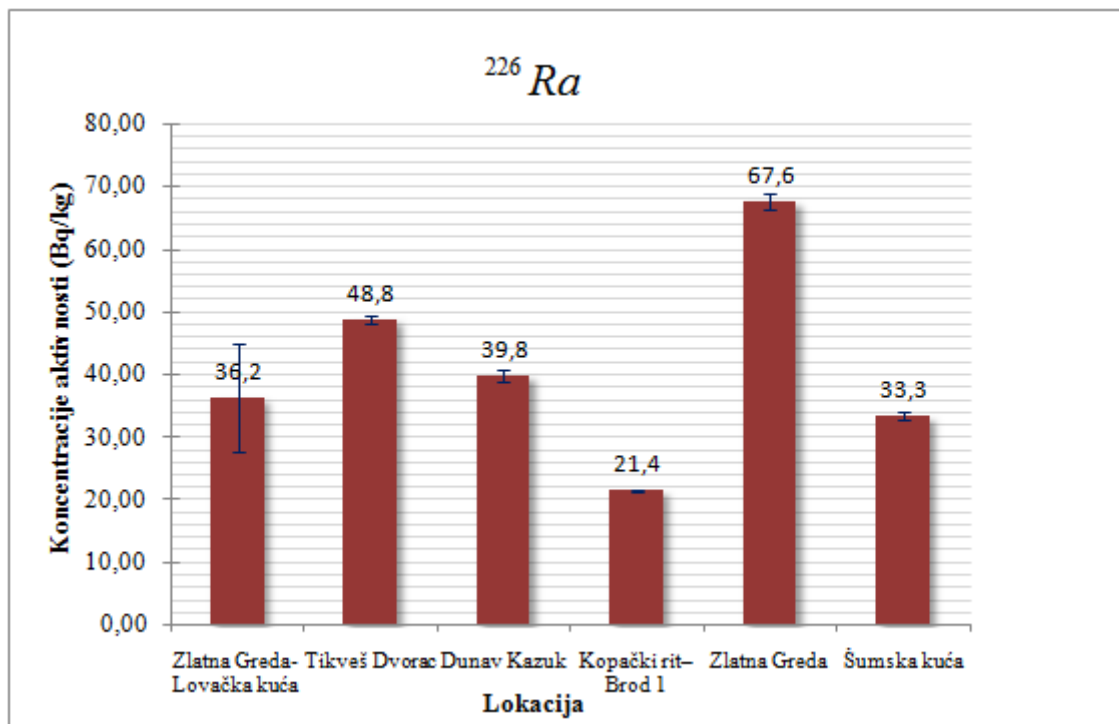
Lokacija	Brzina doze (nGy/h)				Godišnja brzina doze (mG y/god)
	^{238}U series	^{232}Th series	^{40}K	Ukupna brzina doze	
Zlatna Greda- Lovačka kuća	(1,94±0,51)E-0	(2,04±0,09)E+1	(2,19±0,04)E+1	(4,43±0,18)E-1	(3,88±0,16)E-1
Tikveš Dvorac	(2,37±0,31)E+1	(2,17±0,05)E+1	(2,32±0,02)E+1	(6,86±0,38)E+1	(6,01±0,33)E-1
Dunav Kazuk	(3,31±0,50)E+1	(1,52±0,05)E+1	(1,75±0,03)E+1	(6,58±0,58)E+1	(5,77±0,51)E-1
Kopački rit- Brod 1	(2,07±0,16)E+1	(1,15±0,02)E+1	(1,62±0,01)E+1	(4,84±0,19)E+1	(4,24±0,17)E-1
Zlatna Greda	(4,25±0,58)E+1	(2,23±0,07)E+1	(1,93±0,03)E+1	(8,41±0,68)E-1	(7,34±0,60)E-1
Šumska kuća	(1,89±0,21)E+1	(1,66±0,05)E+1	(1,80±0,02)E+1	(5,35±0,28)E+1	(4,69±0,25)E-1

Slika 5.0.5: Brzina doze i godišnja doza izračunata iz podataka dobivenih gamaspektrometrijom



Slika 5.0.6: Usporedba ukupne brzine doze po lokacijama

Na slici 5.0.7 dan je grafički prikaz koncentracija aktivnosti ^{226}Ra po lokacijama, dok se ostatak grafova nalazi u prilogu B. ^{226}Ra je najdugovječniji izotop radija, a njegovim raspadom nastaje štetan plin radon. Ovog izotopa je najviše zabilježeno na području Zlatne Grede (67,6 Bq/kg), a omjeri radija na ostalim lokacijama su slični. U usporedbi sa dobivenim vrijednostima na području Ličko - senjske županije [11] nisu vidljive veće razlike.

Slika 5.0.7: Koncentracija aktivnosti izotopa ^{226}Ra po lokacijama

6 Zaključak

Mjerenja predstavljena u ovom radu obavljena su na (*high purity germanium*) detektoru, a rezultati analize pokazali su se očekivanima. Uz uobičajne primordijalne radionuklide, od kojih je najzastupljeniji bio ^{40}K , pronađeni su i izotopi cezija, koji je prvenstveno posljedica nesreća u Černobilu i Fukushimi. Prosječna vrijednost koncentracije aktivnosti ^{137}Cs u tlu na području Kopačkog rita iznosi 7,20 Bq/kg s pripadnom standardnom devijacijom 0,28 Bq/kg, a u usporedbi s prosječnom koncentracijom aktivnosti ^{137}Cs na području Ličko - senjske županije ($41,47 \pm 0,43$ Bq/kg) [11], radi se o znatno manjim vrijednostima. Od drugih antropogenih radionuklida analizirani su izotopi joda (od ^{131}I do ^{135}I), ali nisu pronađeni zbog svog kratkog vremena poluraspada. Na temelju dobivenih rezultata može se izvući zaključak da testirano područje nema povišenu radioaktivnost.

7 Literatura

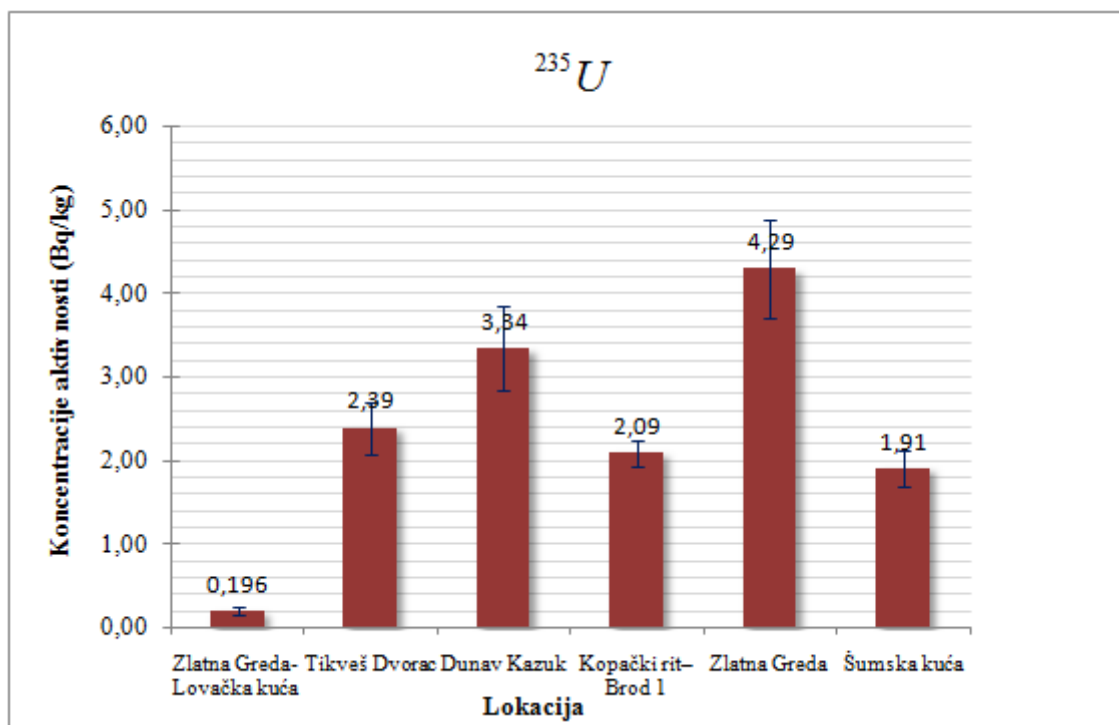
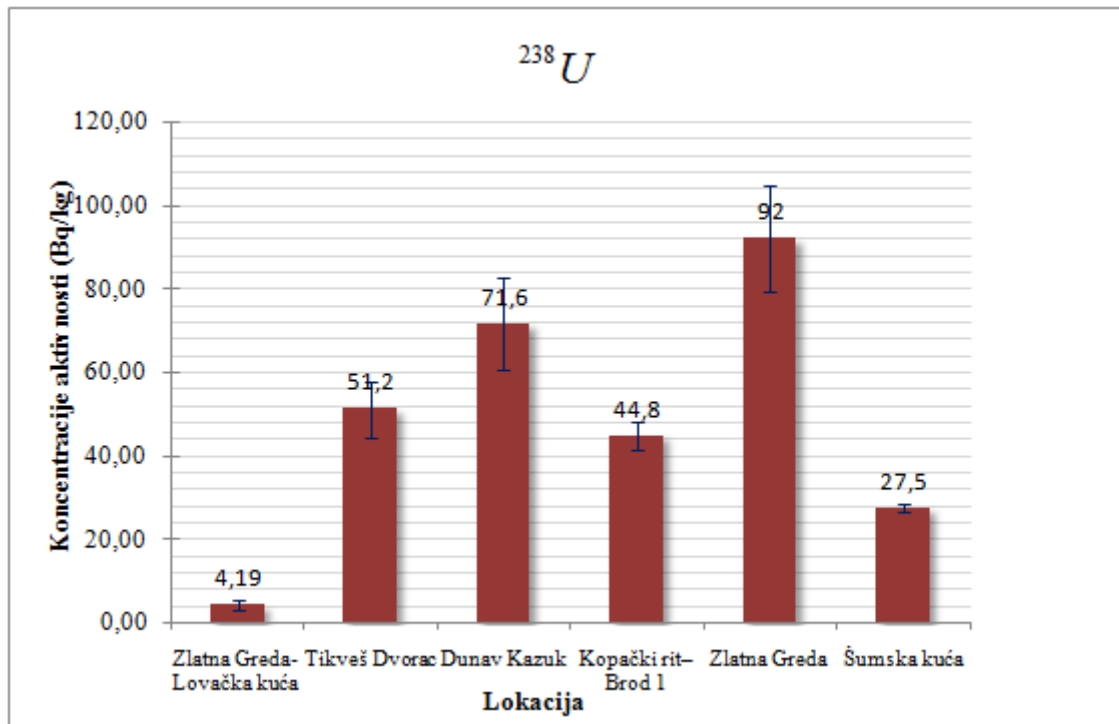
- [1] Froehlich K. i dr. *Environmental Radionuclides: Tracers and Timers of Terrestrial Processes*. Austria: Elsevier, 2010.
- [2] Magill J.; Galy J. *Radioactivity, radionuclides, radiation*. Njemačka: Springer, 2005.
- [3] Silberberg M. S. *Chemistry - The Molecular Nature of Matter and Change*. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009.
- [4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*. New York, 1958.
- [5] Sorensen K. Denaturing Thorium with Ionium. 2006. URL: <http://energyfromthorium.com/2006/10/06/denaturing-thorium-with-ionium/> (17.09.2016.)
- [6] Bell M.C.; Bell S.L. *Possible Effects of Nuclear Power Reactor Accidents on Agriculture*. University of Tennessee, Knoxville, 1981.
- [7] U.S. Department of Health, Education and Welfare. *Radiological Health Handbook* Rockville, 1970.
- [8] Petrincec B.; Franić Z.; Bituh T.; Babić D. *Quality Assurance in Gamma-ray Spectrometry of Seabed Sediments*. // Arhiv za higijenu rada i toksikologiju. 62, 2011, str. 17-23.
- [9] Šoštarić M.; Petrincec B.; Babić D. ^{137}Cs in Soil and Fallout around Zagreb (Croatia) at the Time of the Fukushima Accident. // Arhiv za higijenu rada i toksikologiju. 64, 2013, str. 561-565.
- [10] Benčina L.; Rožac V.; Bolšec B. Plan upravljanja Parkom prirode Kopački rit. 2010. URL: <http://pp-kopacki-rit.hr/docs/plan-upravljanja.pdf> (17.09.2016.)
- [11] Radolić V.; Miklavčić I.; Stanić D.; Poje M.; Krpan I.; Mužević M.; Petrincec B.; Vuković B. *Identification and Mapping of Radon-prone Areas in Croatia: Preliminary Results*

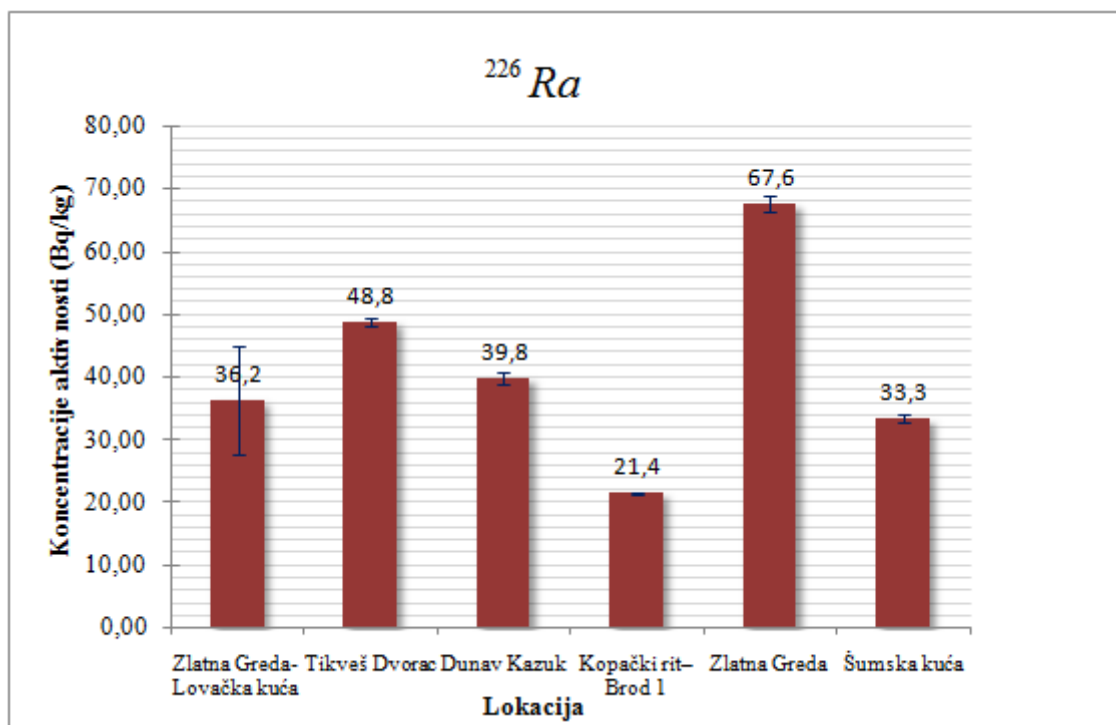
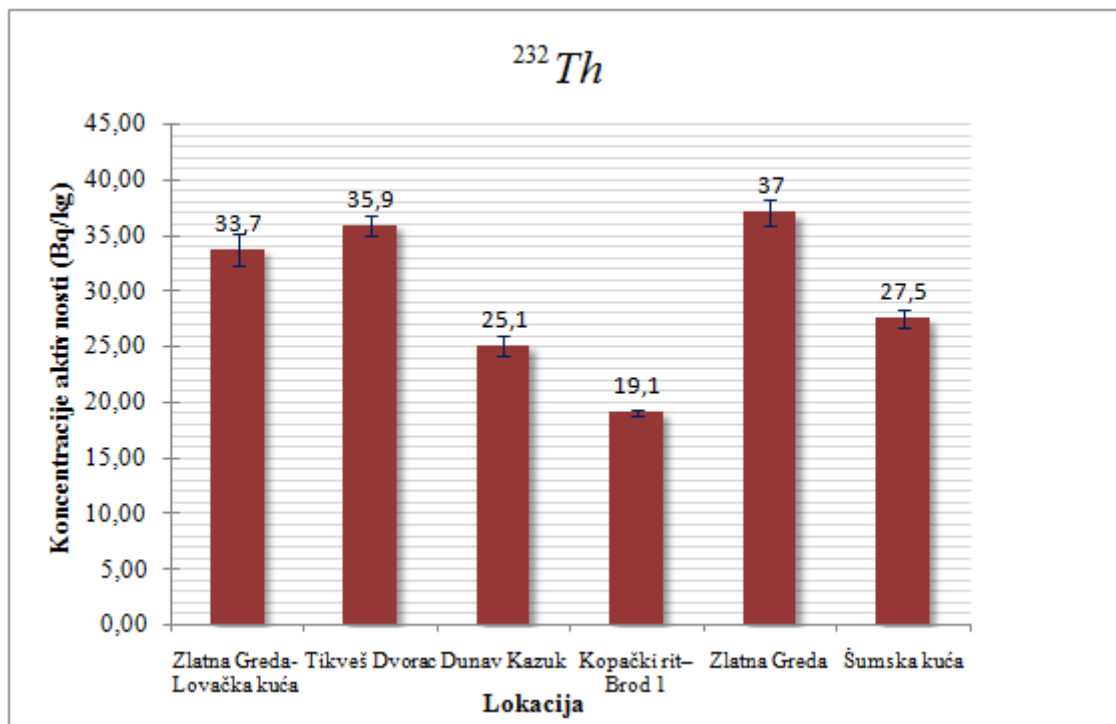
for Lika - Senj and the Southern Part of Karlovac Counties. // Radiation Protection Dosimetry. 2014, doi:10.1093/rpd/ncu212

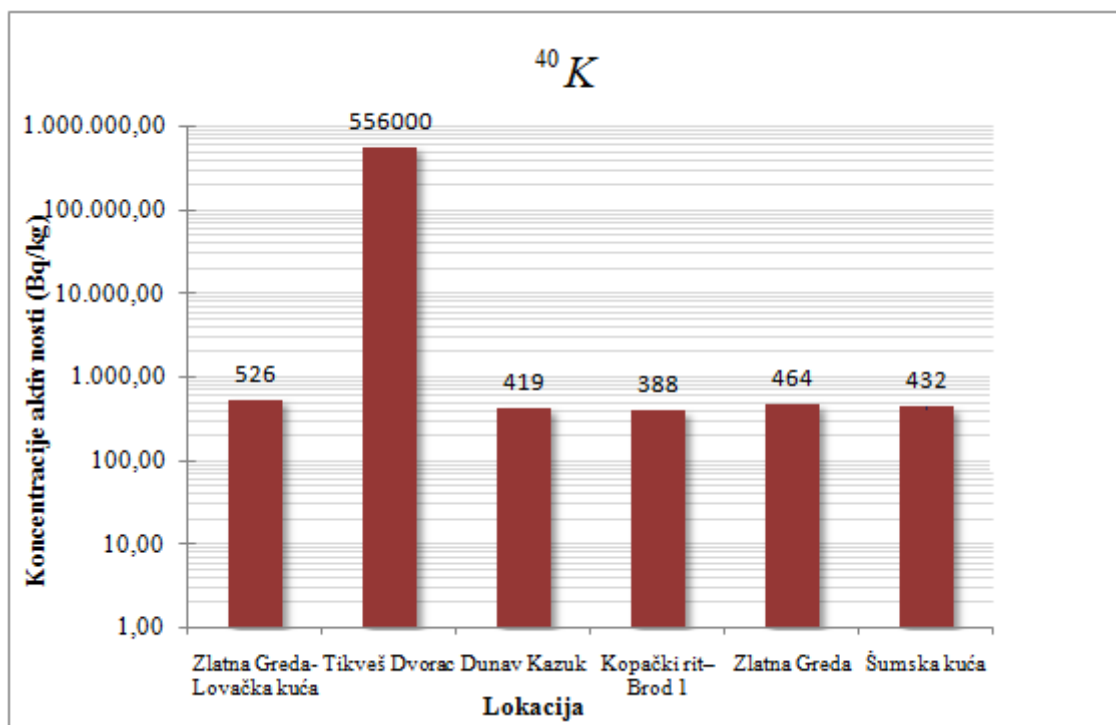
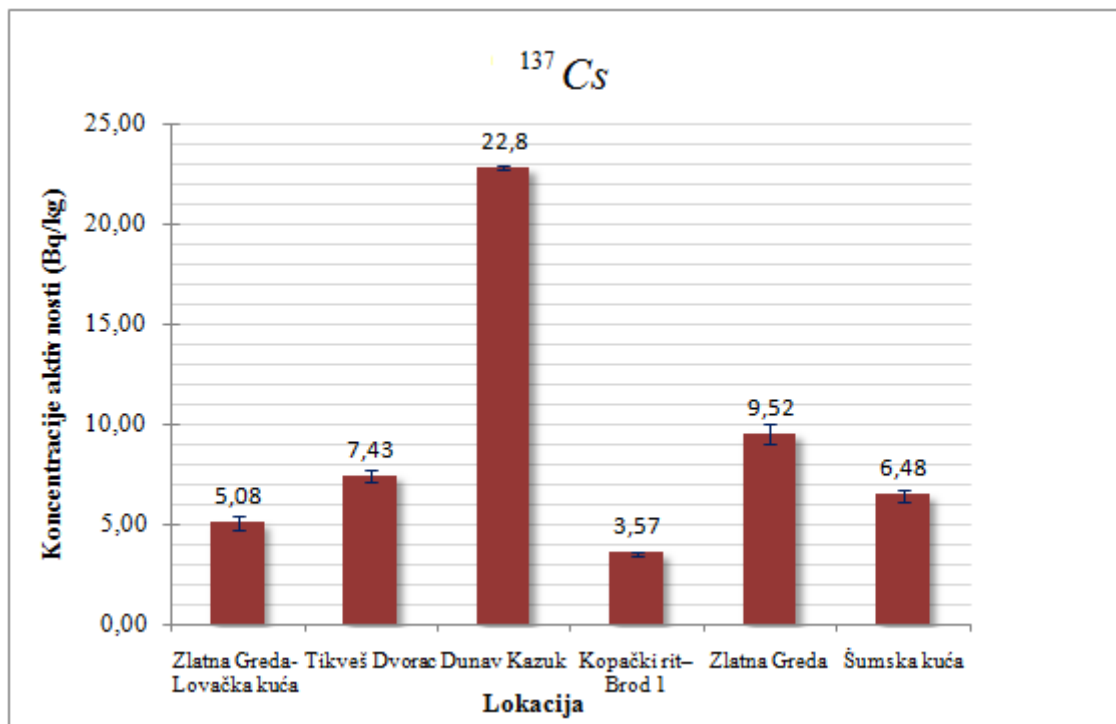
- [12] Petrinc B.; Franić Z.; Leder N.; Tsabaris C.; Bituh T.; Marović G. *Gamma Radiation and Dose Rate Investigations on the Adriatic Islands of Magmatic Origin. // Radiation Protection Dosimetry. 2010, str. 551-559. doi: 10.1093/rpd/ncp302*

8 Životopis

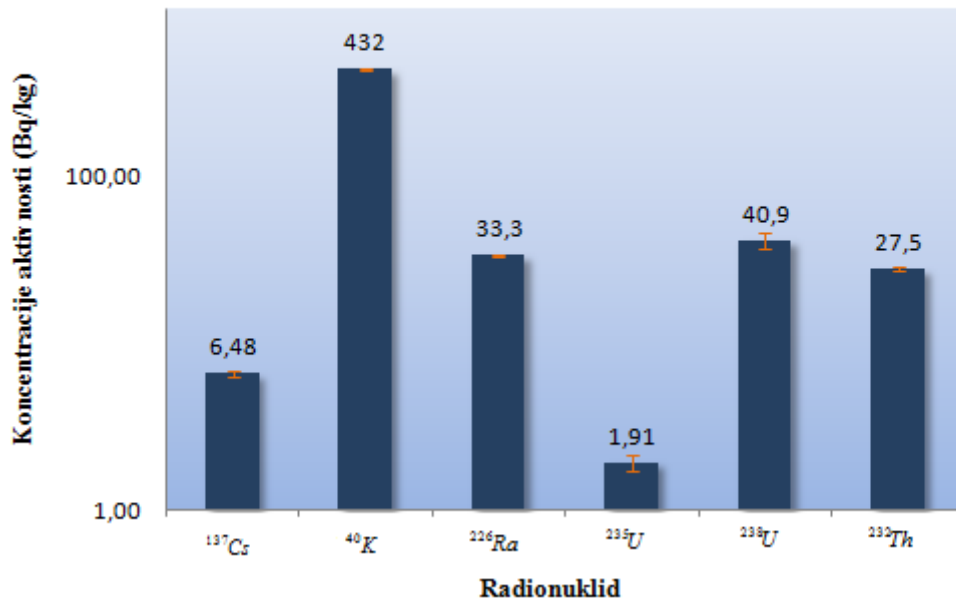
Irena Lukanović, rođena je 4.12. 1994. godine u Vinkovcima, u kojima je stekla svoje osnovnoškolsko i srednjoškolsko obrazovanje. Završila je Gimnaziju Matije Antuna Reljkovića 2013. godine s odličnim uspjehom. Iste godine upisuje se u Osijeku na Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Odjel za fiziku. Dobitnica je Rektorove nagrade Sveučilišta u akademskoj 2014./2015. godini i 2015./2016. godini. Već više od deset godina trenira rukomet u klubu ŽRK Vinkovci, a u slobodno vrijeme voli igrati šah.



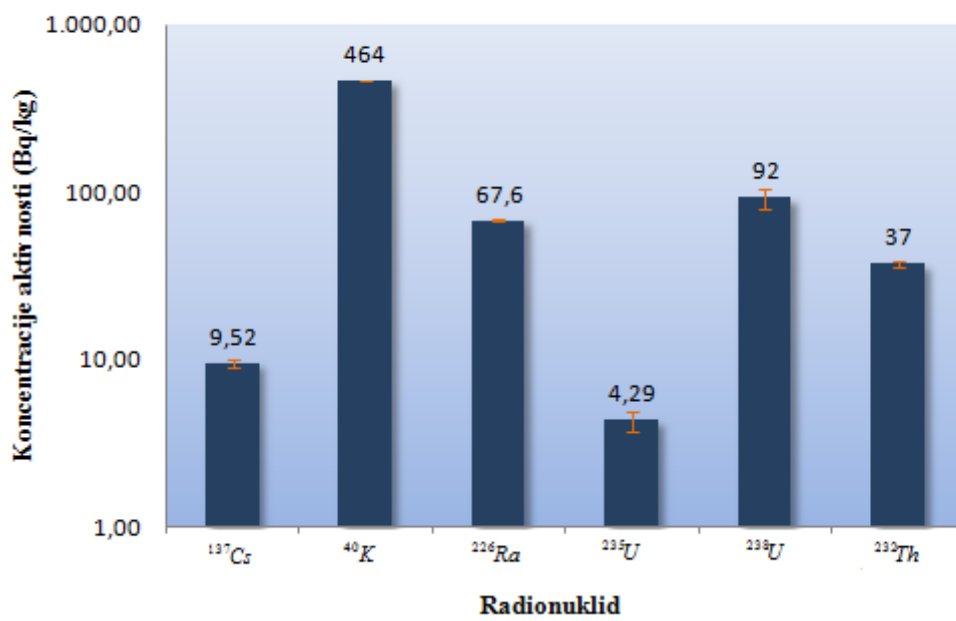




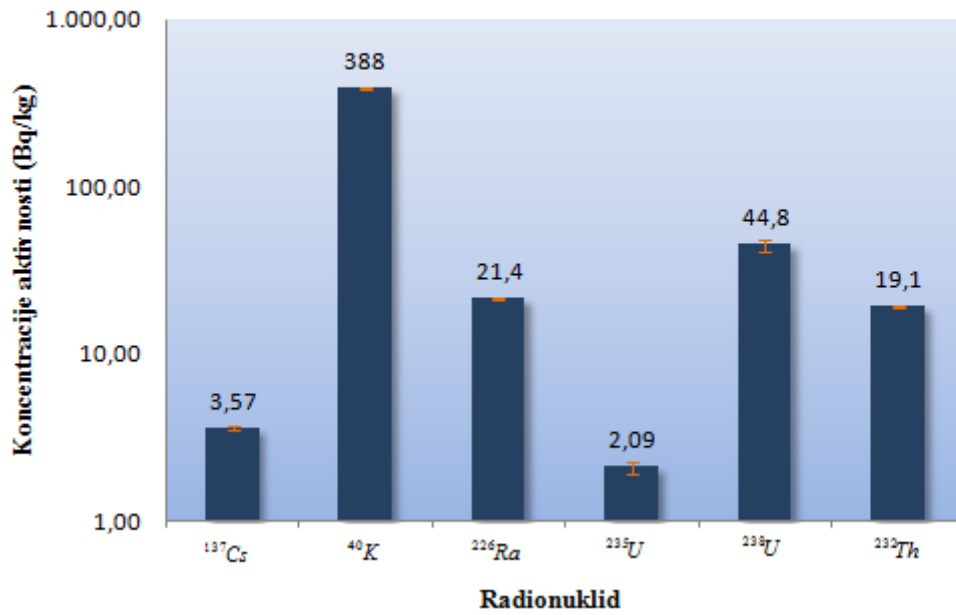
Šumska kuća



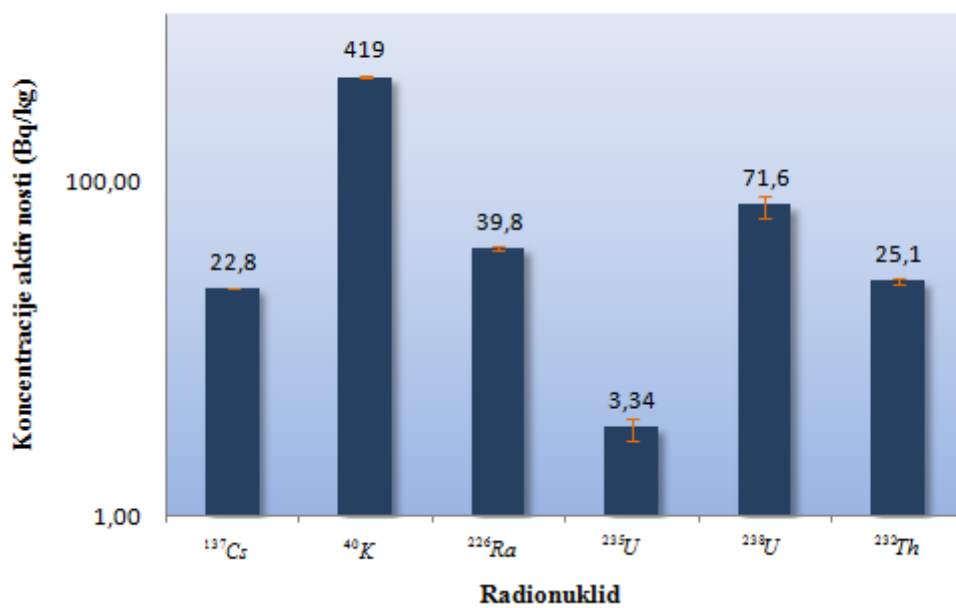
Zlatna Greda



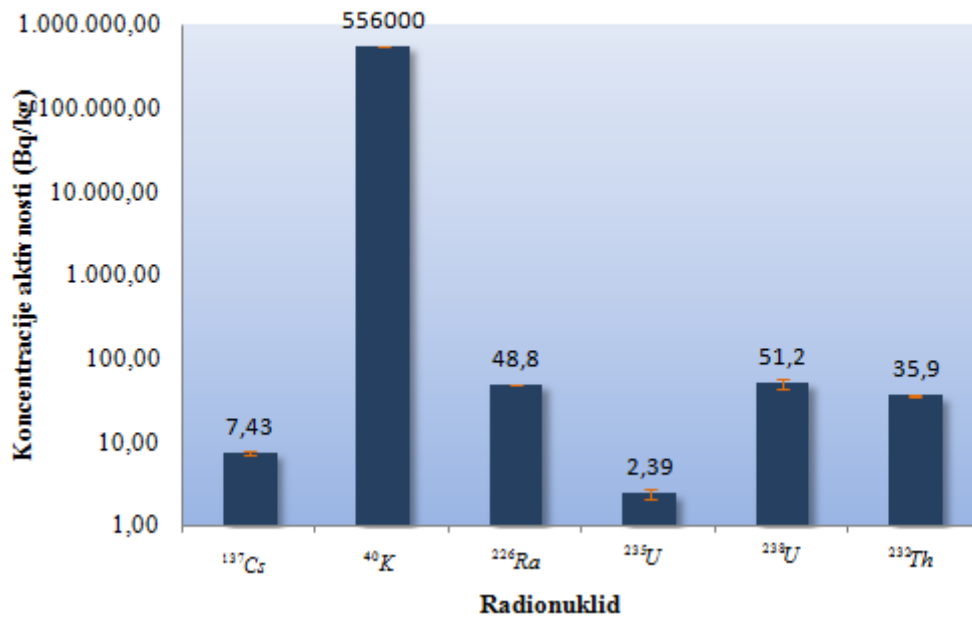
Kopački rit - Brod 1



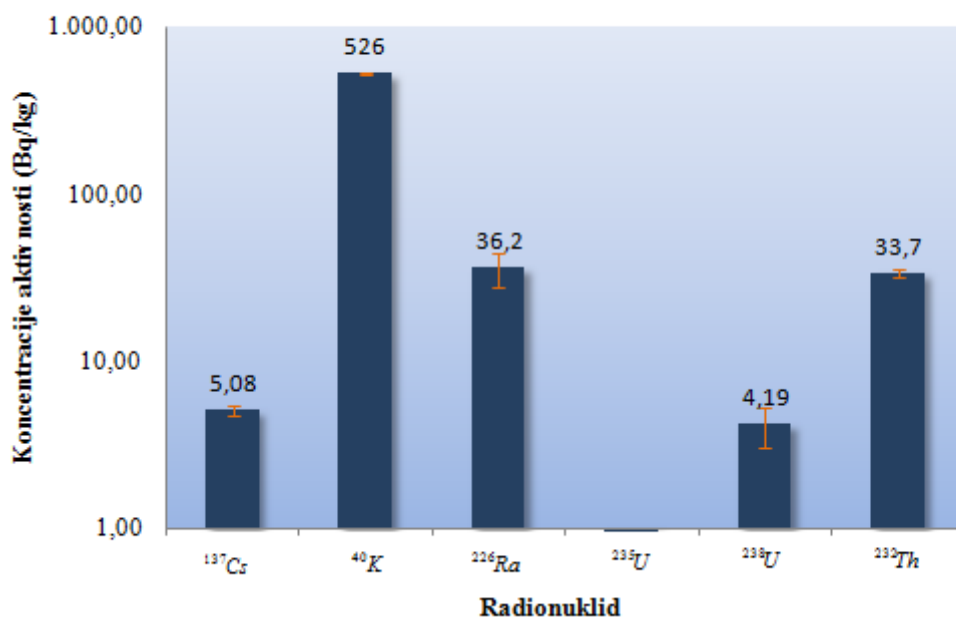
Dunav Kazuk



Tikveš Dvorac



Zlatna Greda - Lovačka kuća



Lokacije	Koncentracije aktivnosti						
	Bq/kg						
	^{238}U	^{235}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{210}Pb	^{40}K	^{137}Cs
Lug	(2,89±0,23)E+1	(1,44±0,09)E+0	(3,58±0,08)E+1	(3,62±0,048)E+1	(3,37±0,21)E+1	(5,14±0,05)E+2	(3,44±0,16)E+0
Sokolovac	(4,10±0,41)E+1	(2,39±0,31)E+0	(2,75±0,58)E+1	(4,01±0,49)E+1	(2,93±0,32)E+1	(4,52±0,04)E+2	(5,24±0,22)E+0
Hulovski kanal	(2,22±0,18)E+1	(2,39±0,31)E+0	(2,22±0,05)E+1	(2,84±0,04)E+1	(2,99±0,28)E+1	(4,30±0,03)E+2	(1,07±0,25)E+1
Mirkovac	(2,77±0,36)E+1	(2,39±0,31)E+0	(3,41±0,07)E+1	(4,12±0,46)E+1	(8,68±0,99)E+1	(4,89±0,03)E+2	(3,15±0,18)E+0
Kozjak	(3,61±0,32)E+1	(2,39±0,31)E+0	(2,78±0,59)E+1	(4,08±0,46)E+1	(8,27±1,04)E+1	(4,62±0,04)E+2	(1,81±0,16)E+0

Location	^{40}K , Bq kg ⁻¹	^{137}Cs , Bq kg ⁻¹	^{232}Th , Bq kg ⁻¹	^{238}U , Bq kg ⁻¹	^{226}Ra , Bq kg ⁻¹	^{222}Rn , kBq m ⁻³	^{220}Rn , kBq m ⁻³
Brinje	414.7 ± 5.7	20.6 ± 0.4	47.2 ± 1.3	30.9 ± 4.7	44.1 ± 1.1	21.1 ± 6.0	4.7 ± 0.4
Donje Pazarište	363.6 ± 4.4	51.3 ± 0.5	43.1 ± 0.9	36.5 ± 2.7	41.4 ± 0.5	78.3 ± 14.5	13.7 ± 0.5
Karlobag	213.1 ± 3.3	54.6 ± 0.5	30.1 ± 0.8	32.3 ± 2.4	57.0 ± 0.6	25.5 ± 2.9	17.7 ± 1.5
Korenica	323.9 ± 4.6	80.9 ± 0.6	34.7 ± 0.9	34.7 ± 2.6	58.5 ± 0.6	78.6 ± 15.5	11.9 ± 0.7
Ličko Lešće	395.3 ± 6.6	17.5 ± 0.3	52.0 ± 1.0	42.8 ± 3.0	101.0 ± 0.8	110.8 ± 19.1	20.3 ± 0.9
Lovinac	338.3 ± 4.0	18.9 ± 0.3	39.0 ± 0.9	35.2 ± 3.7	61.5 ± 0.6	118.2 ± 18.3	41.3 ± 1.7
Mušaluk	546.8 ± 6.3	16.0 ± 0.3	94.0 ± 1.4	198.8 ± 9.7	84.4 ± 0.9	161.5 ± 18.7	31.9 ± 1.2
Otočac	433.4 ± 5.7	27.4 ± 0.3	58.1 ± 1.0	49.8 ± 2.9	56.7 ± 0.6	49.2 ± 7.0	10.6 ± 0.5
Perušić	578.8 ± 6.6	34.9 ± 0.5	67.6 ± 1.7	60.0 ± 6.6	101.1 ± 1.2	144.6 ± 22.2	32.8 ± 1.8
Plitvička Jezera	257.5 ± 3.7	70.9 ± 0.5	28.7 ± 1.0	39.5 ± 2.8	100.7 ± 0.8	258.7 ± 25.7	11.7 ± 0.4
Senj	148.6 ± 3.4	40.2 ± 0.4	11.4 ± 0.5	26.6 ± 2.0	37.8 ± 0.5	30.1 ± 4.2	2.2 ± 0.2
Smiljan	482.7 ± 5.6	32.9 ± 0.4	78.5 ± 1.3	69.2 ± 3.6	80.4 ± 0.8	58.1 ± 11.0	8.4 ± 0.8
Široka Kula	507.9 ± 5.6	73.0 ± 0.6	73.9 ± 1.5	43.6 ± 5.4	64.8 ± 0.6	75.3 ± 10.6	49.2 ± 1.7

Slika 8.0.8: Preuzeto iz izvora [11]

9 Dodatak

[Odjeljak 2.3]

Čest je slučaj da se početna jezgra može raspasti na više različitih načina što u konačnici daje različite jezgre kćeri, a eksponencijalna ovisnost određena formulom (2) prestaje vrijediti. Jednadžba koja pritom opisuje radioaktivni raspad općenito ima oblik:

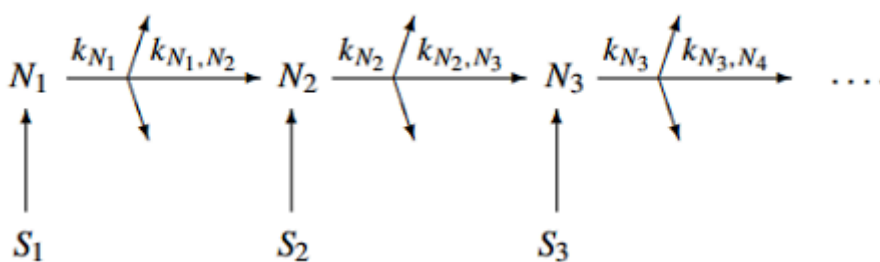
$$\frac{dN}{dt} = -(k_1 + k_2 + \dots + k_i + \dots)N$$

gdje je k_i konstanta i -tog načina raspada jezgre roditelja, a ukupna konstanta raspada je zbroj pojedinačnih konstanti tj. $k = k_1 + k_2 + \dots + k_i + \dots$

Omjer grananja za određeni raspad BR (*branching ratio*) definira se kao omjer broja atoma koji se raspadnu tim raspadom i ukupan broj nuklida koji se raspadnu:

$$BR_i = \frac{k_i}{k_1 + k_2 + \dots + k_i + \dots} = \frac{k_i}{k}$$

Općenito svaki nuklid u nizu N_i može se granati s faktorom grananja k_{N_i, N_j} na više od jedne jezgre kćeri. Također, može postojati i vanjski izvor S_i za stvaranje N_i (osim raspada jezgre roditelja), što je shematski prikazano na sljedećoj slici.



Ovaj proces je prvi puta sustavno opisao Harry Bateman 1910. godine. Pripadne diferencijalne jednadžbe su oblika [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= S_1 - k_{N_1} \cdot N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= S_2 + k_{N_1, N_2} \cdot N_1 - k_{N_2} \cdot N_2 \\ \frac{dN_i}{dt} &= S_i + k_{N_{i-1}, N_i} \cdot N_{i-1} - k_{N_i} \cdot N_i \end{aligned}$$

$$\frac{dN_n}{dt} = S_n + k_{N_{n-1}, N_n} \cdot N_{n-1} - k_{N_n} \cdot N_n$$

gdje je N_n broj atoma vrste n prisutnih u vremenu t , k_n konstanta raspada za vrstu n i $k_{n,n+1}$ parcijalna konstanta raspada povezana s omjerom granjanja $BR_{n,n+1}$ relacijom $k_{n,n+1} = BR_{n,n+1} \cdot k_n$.

Rješenje ovog sustava jednadžbi je:

$$N_n(t) = \sum_{i=1}^n \left[\left(\prod_{j=1}^{n-1} k_{j,j+1} \right) \times \sum_{j=i}^n \left(\frac{N_i(0)e^{-k_j t}}{\prod_{p=i, p \neq j}^n (k_p - k_j)} + \frac{S_i(1 - e^{-k_j t})}{k_j \prod_{p=i, p \neq j}^n (k_p - k_j)} \right) \right]$$

U slučaju kada lanac počinje od jednog roditelja nuklida bez člana S gornja relacija reducira se na:

$$N_n(t) = \prod_{j=1}^{n-1} k_{j,j+1} \sum_{j=i}^n \frac{N_i(0)e^{-k_j t}}{\prod_{p=i, p \neq j}^n (k_p - k_j)}$$

[Odjeljak 4.3]

K_1 - korekcijski faktor za nuklearni raspad od vremena uzorkovanja do početka mjerenja, definiran kao:

$$K_1 = \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot \Delta t}{T_{1/2}}\right)$$

pri čemu je Δt vrijeme proteklo od vremena uzorkovanja do vremena mjerenja, a $T_{1/2}$ vrijeme poluraspada.

K_2 - korekcijski faktor za nuklearni raspad tijekom mjerenja:

$$K_2 = \frac{T_{1/2}}{\ln 2 \cdot t_r} \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t_r}{T_{1/2}}\right)\right)$$

gdje je t_r stvarno proteklo vrijeme tijekom mjerenja.

K_3 - korekcijski faktor za samoatenuaciju, tj. atenuacijski faktor u mjernom uzorku u usporedbi s uzorkom za baždarenje, dan sljedećim izazom

$$K_3 = \frac{\varepsilon(\mu, E)}{\varepsilon(\mu_{ref}, E)}$$

gdje je $\varepsilon(\mu, E)$ efikasnost pune energije pika za uzorak s linearnim atenuacijskim koeficijentom μ , a $\varepsilon(\mu_{ref}, E)$ efikasnost pune energije pika za uzorak s linearnom atenuacijom μ_{ref} .
 K_4 - korekcijski faktor za gubitak impulsa zbog nasumičnog sumiranja

$$K_4 = \exp(-2R\tau)$$

gdje je τ vrijeme rezolucije mjernog sustava, a R srednja vrijednost brzine brojanja. K_5 - korekcijski faktor podudaranosti za one nuklide koji se raspadaju kaskadom sukcesivnih emisija fotona

$$K_5 = \frac{\varepsilon_{ap}(E)}{\varepsilon(E)}$$

pri čemu je $\varepsilon_{ap}(E)$ prividna efikasnost, a $\varepsilon(E)$ efikasnost ukupne energije.