

**SVEUČILIŠTE J.J. STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**KATARINA MARJANOVIĆ**

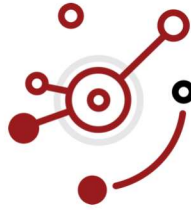
**MAHOVINA KAO BIOINDIKATOR RADIOAKTIVNOG  
ONEČIŠĆENJA U PARKU PRIRODE KOPAČKI RIT**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2019.**

**SVEUČILIŠTE J.J. STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ODJEL ZA FIZIKU**



**KATARINA MARJANOVIĆ**

**MAHOVINA KAO BIOINDIKATOR RADIOAKTIVNOG  
ONEČIŠĆENJA U PARKU PRIRODE KOPAČKI RIT**

**Diplomski rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi  
stjecanja akademskog naziva magistra edukacije fizike i informatike

**Osijek, 2019.**

Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Branka Petrinca u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

## **Zahvale**

*Zahvaljujem Jedinici za zaštitu od zračenja Instituta za medicinska istraživanja i medicinu rada u Zagrebu na provedenim visokorezolucijskim gamaspektrometrijskim mjerenjima uzoraka mahovina.*

*Uvelike zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Branku Petrincu na nesebičnoj pomoći, stručnim savjetima i komentarima kroz sve faze izrade ovog rada.*

*Zahvaljujem profesoru Igoru Miklavčiću za svu pomoć oko prikupljanja i prijevoza uzoraka mahovine. Hvala mami i tati.*



Odjel za fiziku

**MAHOVINA KAO BIOINDIKATOR RADIOAKTIVNOG ONEČIŠĆENJA U PARKU  
PRIRODE KOPAČKI RIT**

**Katarina Marjanović**

**Sažetak:** U ovom radu prikazani su rezultati mjerenja i analize koncentracije aktivnosti sljedećih radionuklida:  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{210}\text{Pb}$  u Parku prirode Kopački rit. U Parku su prikupljeni uzorci mahovine jer su one dobri bioindikator radioaktivnosti. Uzorci su prikupljeni u poplavnim područjima Dunava i Drave, ali i izvan njih. Lokacije na kojima su uzorci skupljeni razlikovale su se i po dostupnosti izletnicima. Uzorci su analizirani gamaspektrometrijskom metodom koja je navedena i opisana u ovom radu.

(40 stranica, 18 slika, 7 grafikona, 1 tablica, 67 literaturnih navoda)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku**

**Ključne riječi:** radioaktivnost, bioindikator, gamaspektrometrija, koncentracija aktivnosti, Kopački rit

**Mentor:** izv. prof. dr. sc. Branko Petrincec

**Ocjenjivači:**

**Rad prihvaćen:**

**MOSSES AS A BIOINDICATOR OF RADIOACTIVE CONTAMINATION IN NATURE  
PARK KOPAČKI RIT**

**Katarina Marjanović**

**Abstract:** In this thesis the measurement and analysis results of specific activities of the following radionuclides are presented:  $^{40}\text{K}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in the nature park Kopački rit. In the park samples of moss were collected, which is a good bioindicator of radioactivity. Samples were collected across areas flooded by Danube and Drava rivers, as well as outside. Sampling locations are publicly accessible and inaccessible. The samples were analysed using gamma spectrometry which is introduced and described in the thesis.

(40 pages, 18 figures, 7 diagrams, 1 table, 67 references)

**Thesis deposited in Department of Physics library**

**Keywords:** radioactivity, bioindicator, gamma spectrometry, specific activity, Kopački rit

**Supervisor:** Associate Profesor Branko Petrinec Ph.D.

**Reviewers:**

**Thesis accepted:**

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje</b>	<b>2</b>
2.1	Elektromagnetsko zračenje . . . . .	2
2.1.1	Spektar elektromagnetskog zračenja . . . . .	3
2.2	Neionizirajuće zračenje . . . . .	4
2.3	Ionizirajuće zračenje . . . . .	4
2.3.1	Alfa zračenje . . . . .	5
2.3.2	Beta zračenje . . . . .	6
2.3.3	Gama zračenje . . . . .	7
2.3.4	Zakon radioaktivnog raspada . . . . .	9
2.3.5	Aktivnost uzorka . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Bioindikatorski organizmi</b>	<b>11</b>
3.1	Dagnje . . . . .	12
3.2	Lišaji . . . . .	12
3.3	Mahovine . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Park prirode Kopački rit</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>Gamaspektrometrija</b>	<b>16</b>
5.1	Glavni dijelovi gamaspektrometrijskog sustava . . . . .	16
5.2	Interakcija gama zračenja s materijom . . . . .	18
5.2.1	Fotoelektrični efekt . . . . .	18
5.2.2	Comptonovo raspršenje . . . . .	18
5.2.3	Tvorba parova . . . . .	19
5.3	Analiza spektra . . . . .	19
5.3.1	Aktivnost uzorka . . . . .	20
<b>6</b>	<b>Materijali i metode</b>	<b>21</b>

<b>7</b>	<b>Rezultati i analiza</b>	<b>25</b>
7.1	$^{40}\text{K}$ . . . . .	25
7.2	$^7\text{Be}$ . . . . .	26
7.3	$^{137}\text{Cs}$ . . . . .	26
7.4	$^{232}\text{Th}$ . . . . .	29
7.5	Uranijev niz . . . . .	29
<b>8</b>	<b>Zaključak</b>	<b>33</b>

# 1 Uvod

U prirodi postoje stabilne i nestabilne atomske jezgre. Nestabilne atomske jezgre prelaze u stabilnija stanja emisijom čestičnog ili fotonskog zračenja popraćenog oslobađanjem energije. Proces prelaska iz nestabilnih u stabilna stanja zovemo radioaktivnost. Radioaktivnost spada u skupinu ionizirajućih zračenja o čemu će se nešto detaljnije reći u ovome radu.

Određeni organizmi mogu akumulirati radioaktivnost. Takvi organizmi su i mahovine koje, zbog svojih jednostavnih sastavnica od kojih su građene te uvjeta pod kojima se hrane, predstavljaju zanimljiv bioindikatorski organizam. Mahovina je višegodišnja biljka sporog rasta te kao takva može poslužiti za određivanje koncentracije aktivnosti željenih radionuklida.

Osobito zanimljivo područje istraživanja je Park prirode Kopački rit. Sa statusom posebnog zoološkog rezervata park je od velike međunarodne važnosti.[34] Osim toga, prostor je netaknute prirode što ga čini pogodnim za mnoga ispitivanja, pa tako i prikupljanje uzoraka, kao što su mahovine, za istraživanje i praćenje koncentracija aktivnosti.

U ovom radu provedena su gamaspektrometrijska mjerenja nad 43 prikupljena uzorka.

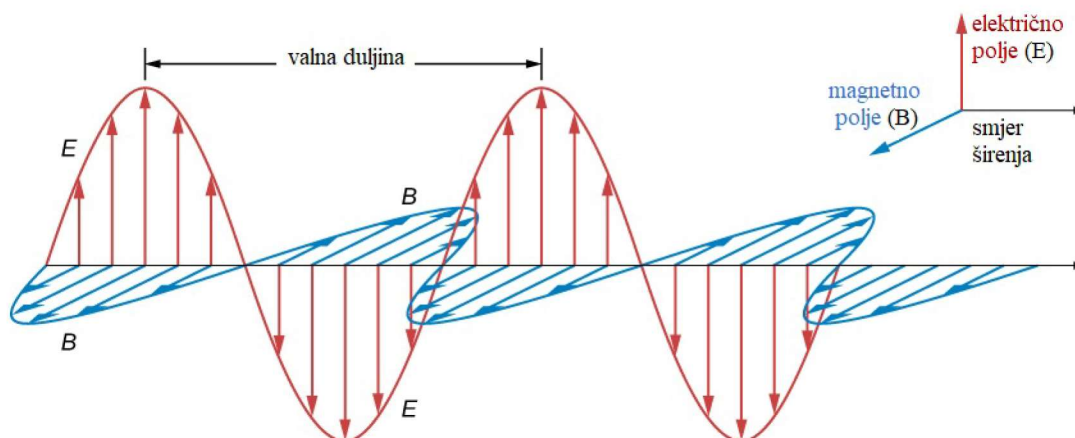


## 2 Ionizirajuće i neionizirajuće zračenje

### 2.1 Elektromagnetsko zračenje

Zračenje je proces u kojem se prenosi energija u obliku vala ili čestice. Postoje prirodna i umjetna elektromagnetska zračenja. Pod pojmom prirodnih zračenja podrazumijevamo npr. Sunčevo zračenje, kozmička zračenja, magnetsko polje Zemlje itd., dok su umjetna zračenja ona koja nastaju djelovanjem čovjeka.

Elektromagnetski valovi transverzalni su valovi koji nastaju međudjelovanjem električnih i magnetskih polja. Promjenjivo električno polje može inducirati promjenjivo magnetsko polje <sup>1</sup>. Električno polje titra okomito na magnetsko polje te su oba okomita na smjer njihova širenja, što je glavna karakteristika transverzalnih valova. Za širenje elektromagnetskih valova nije potreban medij; šire se i u vakuumu. U vakuumu se elektromagnetski valovi rasprostiru brzinom svjetlosti, dok rasprostiranje kroz različite medije ovisi o njihovim električnim i magnetskim svojstvima <sup>2</sup>.



Slika 1. Elektromagnetski val. [1]

<sup>1</sup>Danski fizičar Hans Christian Oersted prvi je otkrio vezu između električnog polja i magnetizma. Otvarajući i zatvarajući strujni krug uzrokovao je otklon magnetske igle koja je bila postavljena u blizini. Time je pokazano magnetsko djelovanje električne struje i postavljeni su temelji elektromagnetizma koji će kasnije biti predmet istraživanja mnogih znanstvenika. [3]

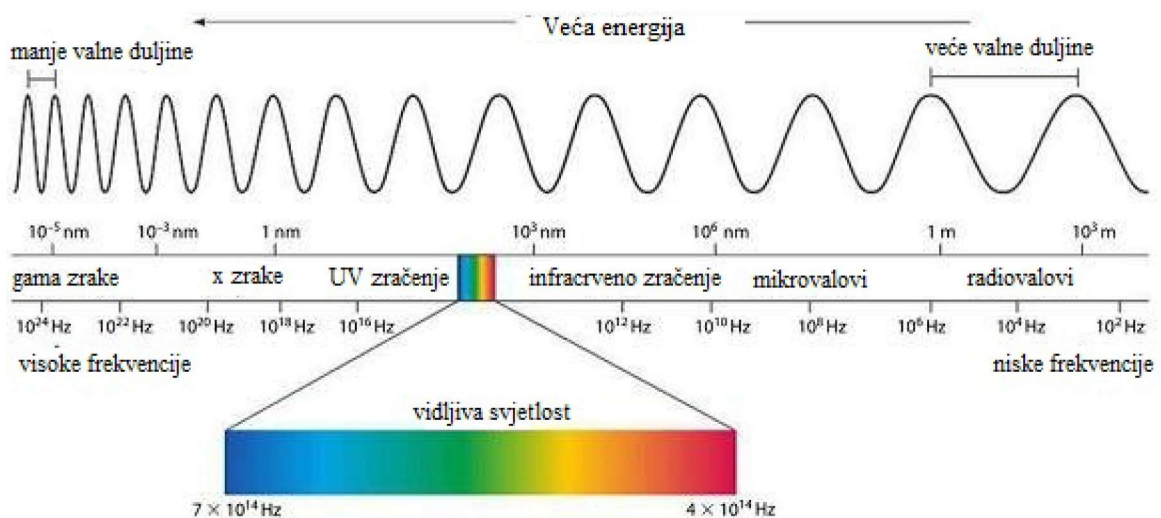
<sup>2</sup>Škotski znanstvenik James Clerk Maxwell u svijetu fizike poznat je po zakonima o elektromagnetskom polju. Svoje zakone prikazuje kao sustave jednačbi koje su osnovne jednačbe klasične elektrodinamike i opisuju elektromagnetske pojave u nekom mediju tj. sredstvu. On je uočio da je brzina elektromagnetskih valova u nekom sredstvu manja nego u vakuumu i opisana je jednačbom:  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \cdot \mu}}$  gdje je:  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ,  $\epsilon$  električna permitivnost medija i  $\mu$  magnetna permitivnost medija. [3]

Promjene u jakosti električnog i magnetskog polje ovise o izvoru, a većina umjetno proizvedenih elektromagnetskih valova su vremenski sinusoidalno ovisni, kako prikazuje Slika 1. Izvor umjetno proizvedenih elektromagnetskih valova jest električni titrajni krug, a može biti i titranje atoma i molekula u tvari. Veličina koja opisuje broj titraja izvora u jedinici vremena jest frekvencija ( $f$ ) i tom frekvencijom određen je i sam elektromagnetski val. Mjerna jedinica za frekvenciju je herc (Hz). Frekvencija je neovisna o sredstvu kroz koji se promatrani val rasprostire. Valna duljina ( $\lambda$ ) jest udaljenost između vrha dva brijega kako je prikazano na Slici 1. i mjeri se u metrima (m). [2]

### 2.1.1 Spektar elektromagnetskog zračenja

Pod pojmom spektra obično mislimo na podjelu intenziteta promatrane veličine ovisno o željenoj fizičkoj veličini. [7] Elektromagnetski spektar predstavlja raspon svih vrsta elektromagnetskog zračenja, a čine ga: radiovalovi, mikrovalovi, infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgensko zračenje i gama zračenje. [8].

Za elektromagnetski spektar možemo promatrati podjelu po valnoj duljini, frekvenciji i energiji (Slika 2.).



Slika 2. Spektar elektromagnetskog zračenja. [4]

Što je veća valna duljina dijela spektra elektromagnetskog zračenja, to je njegova energija manja, smanjivanjem valne duljine raste njegova energija. Analogno razmatranje vrijedi i za frekvencije promatranog dijela spektra; povećavamo li njegovu valnu duljinu, frekvencija će se smanjivati, a smanjujemo li valnu duljinu, frekvencija će rasti. Upravo frekvencija (energija) određuje način na koji će



elektromagnetsko zračenje međudjelovati s materijom kroz koju prolazi. Prema tome, elektromagnetski spektar možemo podijeliti na dva dijela: neionizirajuće zračenje i ionizirajuće zračenje.

## 2.2 Neionizirajuće zračenje

Neionizirajuće zračenje obuhvaća dio elektromagnetskog spektra valnih duljina većih od 100 nm, odnosno frekvencija od  $1 \cdot 10^3$  Hz do  $3 \cdot 10^3$  Hz. Osim vidljivog dijela spektra, neionizirajuće zračenje ne može se iskusiti niti jednim ljudskim osjetilom, osim kada je njegov intenzitet toliki da se može osjetiti kao toplina.

Izvori neionizirajućeg zračenja mogu biti: prirodni (npr. Sunčeva svjetlost) i umjetni (npr. bežične komunikacije, znanstvene i medicinske primjene). [5]

## 2.3 Ionizirajuće zračenje

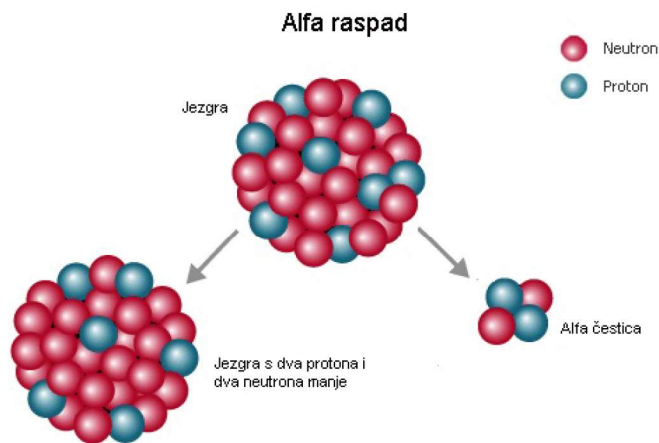
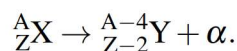
Za razliku od neionizirajućeg zračenja, ionizirajuće zračenje vrsta je zračenja koje ima dovoljno energije da ionizira tvar kroz koju prolazi. To znači da je energija zračenja dovoljno velika da može izbiti elektrone iz atoma i tako proizvesti ione. Ioni su električki nabijene čestice, a njihov naboj ovisi o tome hoće li atom (molekula) dobiti ili izgubiti elektron. Kada dobije elektron, nastaje negativno nabijeni ion (anion), a gubitkom elektrona dobivamo pozitivno nabijeni ion (kation). Proces dobivanja, odnosno gubitka elektrona nazivamo ionizacijom. [6, 9].

Ionizirajuće zračenje javlja se u dva oblika i to u obliku čestica i elektromagnetskih valova. Izvori ionizirajućeg zračenja mogu biti prirodni i umjetni. Prirodnom smo zračenju svakodnevno izloženi i do nas dolazi iz zemlje, atmosfere, svemira. Unosimo ga u organizam preko hrane i pića. Umjetni izvori ionizirajućeg zračenja nastali su ljudskom djelatnošću. Ionizirajućem zračenju nastalom umjetnim putem čovjek je izložen radi dijagnosticiranja u medicini, radi testiranja nuklearnih oružja ili nuklearnih katastrofa i sl. Ionizirajuće zračenje može biti alfa zračenje, beta zračenje, gama zračenje, neutronska zračenje i rendgensko zračenje. Za potrebe ovog diplomskog rada u nastavku će biti opisano alfa, beta i gama zračenje. [6]



### 2.3.1 Alfa zračenje

Alfa zračenje čestični je oblik ionizirajućeg zračenja koje se sastoji od alfa čestica velikih brzina. Alfa čestice nastaju pri raspadu<sup>3</sup> teških nestabilnih jezgara. Jezgra koja se raspada (jezgra roditelj) emitira alfa česticu i gubi dva protona i dva neutrona. Nakon što je emitirana alfa čestica novonastala jezgra (jezgra kćer) ima maseni broj umanjen za četiri, a redni broj umanjen za dva<sup>4</sup>. U općem obliku alfa raspad se zapisuje kao:



Slika 3. Alfa-raspad. [11]

Alfa čestica čvrsto je vezan sustav od dva protona i dva neutrona tj. alfa čestica je jezgra helija. [10, 12]. Alfa čestice su velike i masivne čestice i jako reagiraju s tvari kroz koju prolaze. Zbog toga im je domet u zraku nekoliko centimetara, a mogu se zaustaviti listom papira. Može se zaključiti da alfa zračenje izvan organizma ne predstavlja opasnost. Problem nastaje ako se alfa čestica unese u organizam. Zbog jake interakcije, prolazeći kroz tvar, stvara veliki broj ionskih parova. Energije koje posjeduje alfa čestica izrazito su visoke i može ih pohraniti u jednoj stanici i tako uzrokovati promjene

<sup>3</sup>U prirodi se nalaze stabilne i nestabilne atomske jezgre. Nestabilne jezgre prelaze u stabilna stanja spontanom raspadom i emisijom određene vrste zračenja (čestično ili elektromagnetsko). Takve procese spontanog raspada nazivamo radioaktivnim zračenjima i oni se ubrajaju u skupinu ionizirajućih zračenja. [10]

<sup>4</sup>Svaka atomska jezgra određena je masenim brojem ( $A$ ) i rednim brojem ( $Z$ ). Redni broj govori koliko neki atom ima protona u jezgri. Broj protona određuje o kojem se elementu radi. Maseni broj je ukupan broj protona i neutrona u jezgri. [10]

koje obično rezultiraju daljnjim razvojem nepravilnih stanica (karcinom). [10,12]

### 2.3.2 Beta zračenje

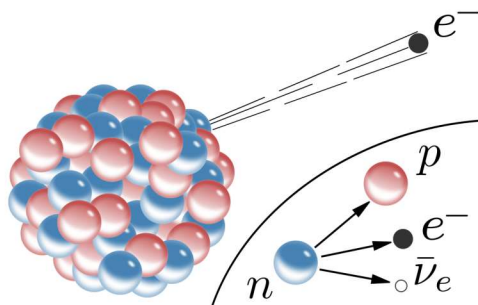
Beta zračenje čestična je vrsta ionizirajućeg zračenja i može se sastojati od dvije vrste beta čestica: elektrona ili pozitrona ovisno o kojoj je vrsti beta zračenja riječ. Tako se razlikuju beta minus raspadi i beta plus raspadi.

#### Beta minus raspad ( $^{-}\beta$ )

Beta minus raspad je raspad kod kojega se u jezgri neutron pretvara u proton. Ova transformacija popraćena je emisijom beta minus čestice (elektron)  $^{-}\beta$  i antineutrina  ${}^0_0\bar{\nu}_e$ , pa maseni broj ostaje isti. Općenito se beta minus raspad može zapisati kao:



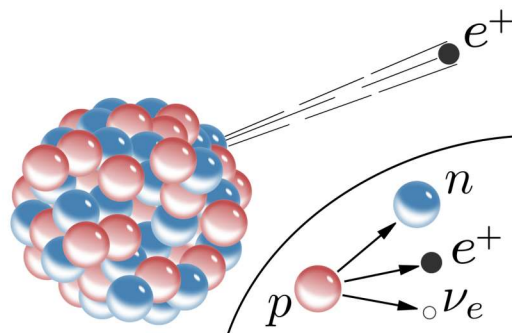
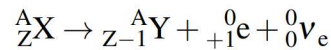
Pri beta minus raspadu maseni broj se ne mijenja, a redni broj se povećava za jedan.



Slika 4. Beta minus raspad. [13]

### Beta plus raspad ( $^+\beta$ )

Pri beta plus raspadu jezgra roditelj emitira beta plus česticu (pozitron)  $^+\beta$  i neutrino  $^0\nu$ , a proton iz jezgre se transformira u neutron. Kod beta plus raspada maseni broj ostaje nepromijenjen, a redni se broj smanjuje za jedan. Općenito, beta plus raspad se može zapisati kao:

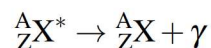


Slika 5. Beta plus raspad. [14]

Domet beta zračenja u zraku je puno veći nego kod alfa zračenja i može doprijeti i do nekoliko metara. Može se zaustaviti metalnom pločom debljine nekoliko milimetara, a u ljudski organizam može prodrijeti i do nekoliko centimetara. [10, 12]

### 2.3.3 Gama zračenje

Gama zračenje je zračenje valne prirode, odnosno elektromagnetska vrsta zračenja. Pri emisiji gama zračenja ne dolazi do nastanka nove jezgre dakle, ne mijenja se ni maseni ni redni broj, nego jezgra iz pobuđenog stanja<sup>5</sup> prelazi u stanje niže energije. Općeniti zapis gama zračenja dan je kao:

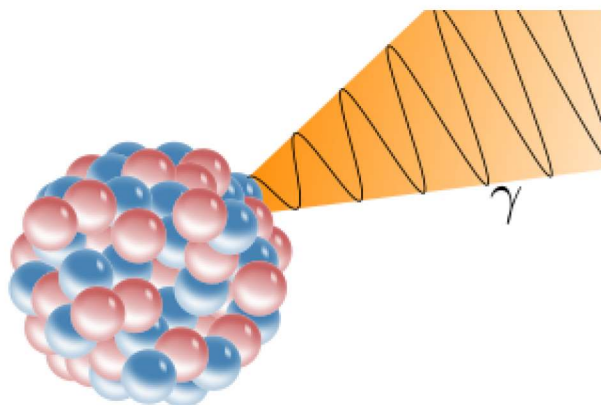


gdje je  ${}^A_ZX^*$  pobuđena jezgra, a  $\gamma$  gama zraka.

Gama zračenje obično nastaje kao posljedica alfa ili beta zračenja. Gama zračenje valnih je duljina

---

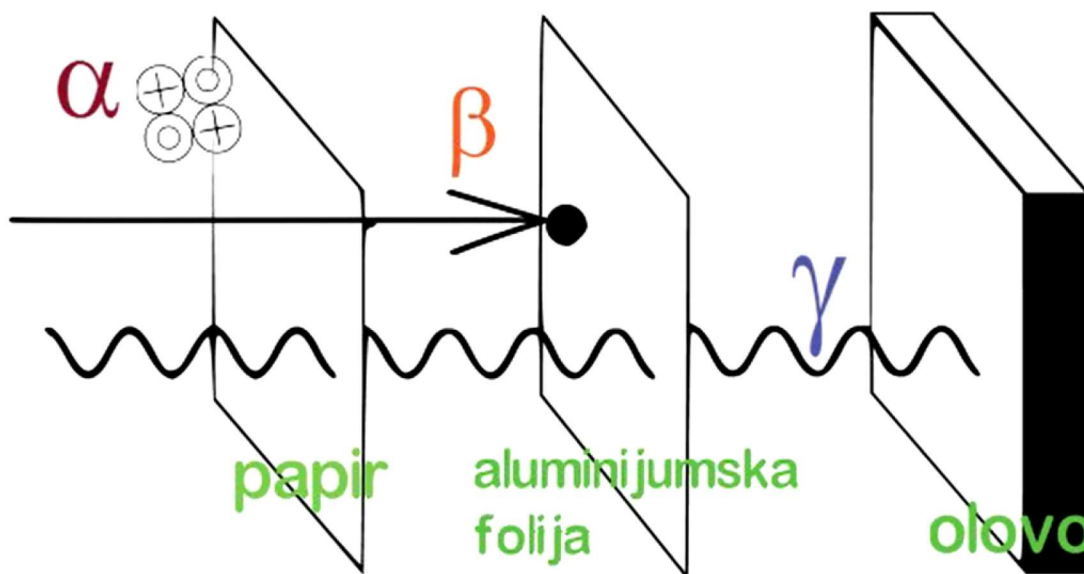
<sup>5</sup>Svaki je sustav opisan jednim stanjem najniže energije, a nađe li se u stanju više energije od osnovnog stanja onda se radi o pobuđenom stanju. [15]



Slika 6. Gama zračenje. [17]

manjih od 0,1 nm, a visokih frekvencija i energija. U odnosu na alfa i beta zračenje najslabije ionizira tvar, ali ima najveći domet od nekoliko kilometara u zraku. Gama zračenje zaustavlja nekoliko desetaka centimetara debela olovna ploča.

Usporedba prodornosti pojedinih zračenja i materijala koji ih zaustavljaju prikazani su na Slici 7.



Slika 7. Prikaz materijala koji zaustavljaju pojedinu vrstu zračenja:  $\alpha$  zračenje zaustavlja papir,  $\beta$  zračenje nekoliko milimetara debela aluminijumska ploča, a  $\gamma$  zračenje desetke centimetara debela olovna ploča. [16]



### 2.3.4 Zakon radioaktivnog raspada

Sve prethodno opisane vrste raspada (zračenja) opisujemo pomoću zakona radioaktivnog raspada. Zakon kvantitativno opisuje brzinu raspada i on je statističke prirode. Ne može se predvidjeti koja će se jezgra raspasti niti se na proces raspada može na bilo koji način utjecati. Koliko brzo se će neki uzorak raspasti, ovisi o broju jezgara koje čine neki uzorak. Brzinu raspada matematički možemo zapisati kao:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

gdje je  $\lambda$  konstanta radioaktivnog raspada i ona opisuje vjerojatnost da se neka, bilo koja, jezgra raspadne u jedinici vremena, a  $N$  predstavlja broj neraspadnutih jezgara. Predznak minus ukazuje na to da se broj neraspadnutih jezgara smanjuje s vremenom.

Rješavanjem prethodne diferencijalne jednačbe dobiva se zakon radioaktivnog raspada:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

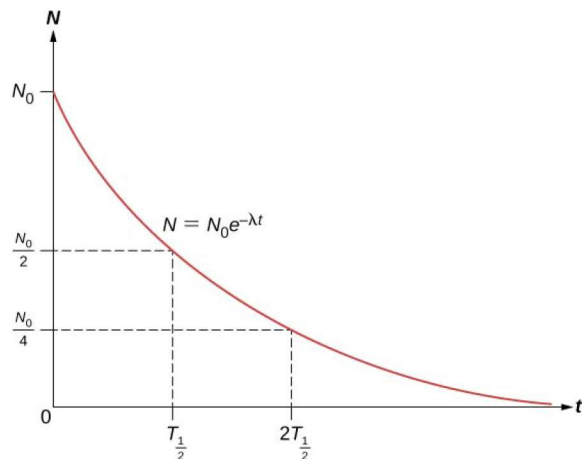
$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Jednačba (1) je matematički zapis radioaktivnog raspada, a grafički je prikazana na Slici 8.

Broj neraspadnutih jezgara po eksponencijalnom se zakonu smanjuje s vremenom. Na grafu se veličina  $T_{\frac{1}{2}}$  naziva vremenom poluraspada i ona predstavlja vremenski interval u kojem se raspala polovica od početnog broja jezgara. Vrijeme poluraspada i konstanta raspada povezane su jednačbom [19, 20]:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$



Slika 8. Zakon radioaktivnog raspada. [18]

### 2.3.5 Aktivnost uzorka

Aktivnost radioaktivnog uzorka definira se kao brzina raspada, odnosno broj raspada u jedinici vremena:

$$A = -\frac{dN}{dt}.$$

U SI sustavu mjerna jedinica za aktivnost je  $s^{-1}$  i zove se bekerel (Bq). Jedan bekerel predstavlja jedan raspad u sekundi. Što je više raspada u sekundi to je veća aktivnost radioaktivnog uzorka. Aktivnost uzorka u vremenu se smanjuje na isti način kao i broj radioaktivnih jezgara:

$$A = A_0 \cdot 2^{-\lambda t}.$$

Specifična aktivnost jest omjer aktivnosti izvora (uzorka) i njegove mase. Mjerna jedinica je Bq/kg.

### 3 Bioindikatorski organizmi

Bioindikatori su organizmi koji služe za prikaz stanja promatranog ekosustava. Bioindikatori su pogodni za pokazivanje postojanja i djelovanja neke štetne tvari budući da su osjetljiviji od drugih živih organizama. Razlikujemo mikrobne<sup>6</sup> bioindikatore, biljne bioindikatore i životinjske bioindikatore. Mikrobni bioindikatori mogu se koristiti kao pokazatelji onečišćenosti vodenih ili kopnenih ekosustava. Kada su izloženi onečišćivaču, mogu proizvesti stresni protein koji pri uzorkovanju i analizi može poslužiti kao rani pokazatelj povećanja ili promjena kod onečišćenja. [22, 23]

Prikupljanjem i analizom bioindikatorskih organizama od interesa može se pokazati stupanj onečišćenosti (zraka, tla) životne sredine. Ta se metoda naziva biomonitoring, a temelji se na prikupljanju živih organizama kao bioindikatora promjena u nekom vremenskom intervalu. [24]

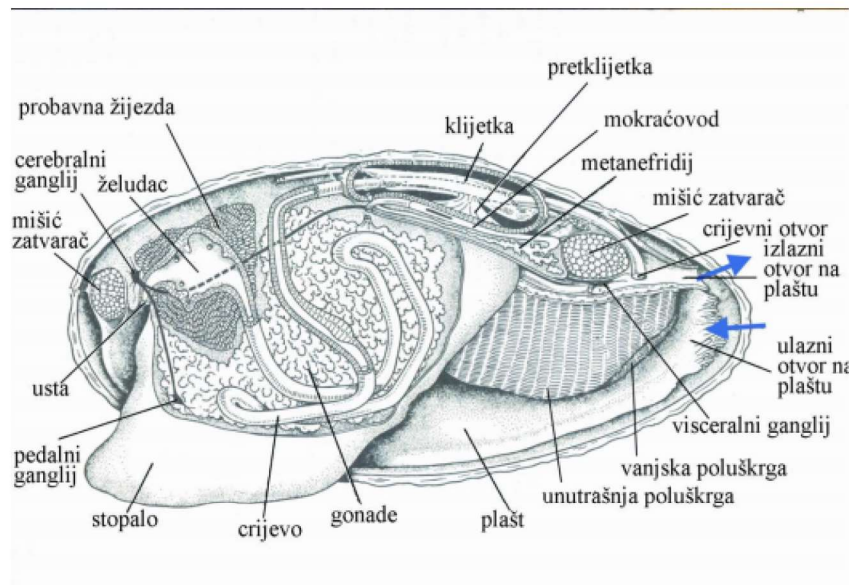
U biljne bioindikatore ubrajamo lišajeve, gljive, mahovine; u životinjske muzgavce, dagnje i sl., a neki će biti detaljnije objašnjeni u nastavku.

---

<sup>6</sup>Mikrobi ili mikroorganizmi predstavljaju najjednostavniju skupinu najmanjih bića, odnosno jednostaničnih organizama. Neki su mikroorganizmi predstavnici životinjskog svijeta (praživotinje), a neki pripadaju gljivama (plijesni). Pod pojmom mikroorganizama podrazumijevaju se i bakterije, biljke i virusi. [21]

### 3.1 Dagnje

Dagnje potječu iz razreda školjkaša. Jestivi su vodeni organizmi i žive u moru. Njihovo tijelo smješteno je između dviju ljuštura, a odmah uz njih prilježno je plašt. Ljuštore su s vanjske strane spojene zubićima, a zatvaraju i otvaraju ih mišići zatvarači. Ako se ljuštore i plašt razmaknu, može se primijetiti stopalo. U stopalu se nalaze svi ključni unutrašnji organi dagnje.



Slika 9. Građa dagnje. [25])

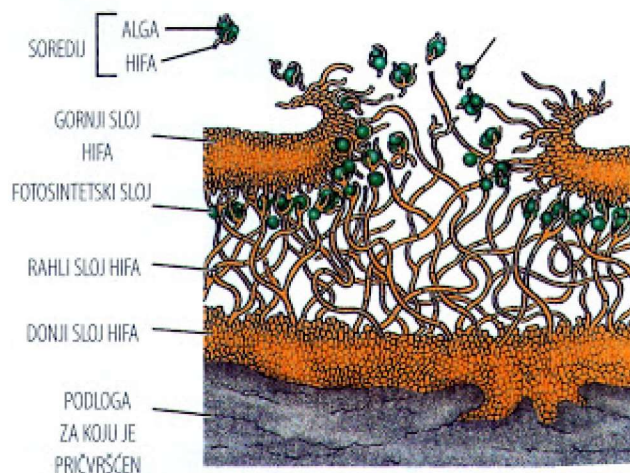
Glavna karakteristika školjkaša, odnosno dagnji jest da nemaju glavu, a hrane se tako da filtriraju vodu. U idealnim uvjetima dnevno mogu filtrirati i do 80 litara vode i tako iz nje akumuliraju i apsorbiraju otopljene tvari. Iz tog razloga dagnje su dobri životinjski indikatori, između ostalog, radioaktivnog onečišćenja mora. [26, 28, 29]

### 3.2 Lišaji

Simbioza jedne vrste gljiva i jedne vrste algi čini lišaje. Razlikuju se dva osnovna tipa građe lišaja: heteromerni i homeomerni tip. Uglavnom prevladala heteromerni tip, i kako je prikazano na Slici 10., može biti izgrađen od tri ili četiri sloja.

Gornji dio ili koru čine debelostjene i gusto zbijene hife. Sljedeći je asimilacijski sloj koji čine alge i tankostjene hife, a služi za fotosintezu. Ispod asimilacijskog sloja dolazi srž, a nju čine rahlo raspoređene tankostjene hife i ona je zaslužna za izmjenu plinova. Ako postoji, četvrti sloj je donja





Slika 10. Građa lišaja. [27]

kora koja je zapravo sloj rizoida koji učvršćuju lišaj za podlogu. Osim toga, služi i za upijanje vode i minerala. [28, 29]

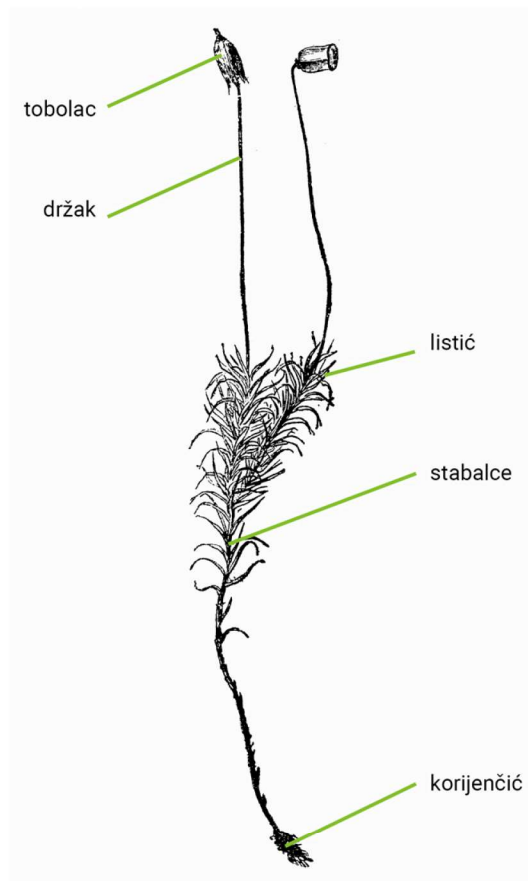
Lišaji mogu živjeti jako dugo, a procjenjuje se da su neki alpski i skandinavski stari i do tisuću godina. Takvog su sastava da brzo gube vodu i kao takvi prelaze u stanje prividne obamrlosti. U takvom su stanju kruti i lako se krte, ali s prvom se kišom oporavljaju i pokazuju znakove života.

Lišaji su osjetljivi organizmi, osobito na onečišćen zrak (sumporov dioksid). Zato ih je teško naći u gradu ili u blizini tvorničkih postrojenja. Zbog tog su svojstva prikladni kao indikatori onečišćenja zraka. Osim indikatori onečišćenja zraka lišaji su prikladni i kao indikatori radioaktivnog onečišćenja. Dug životni vijek i velika površina koju zauzimaju u odnosu na svoju masu glavni su razlog velikog kapaciteta za akumuliranje radionuklida. [30]

### 3.3 Mahovine

Mahovine su najprimitivnije stablašice zbog svoje jednostavne građe. Tijelo mahovine sastoji se od: stabilca, listića i rizoida (korjenčića).

Rizoidi su izrasline u obliku niti koje čvrsto drže mahovinu i imaju ulogu korijena. Mahovine se obično mogu pronaći na kopnu, stablima, većem kamenju, zidovima kuća i sl. Iako mali broj vrsta mahovina živi u vodenim staništima, mahovine nisu prave kopnene biljke jer je za njihov razvoj i održavanje života potrebna veća količina vode. Ako se nađu na suhim staništima, životni ciklus im je kratak. Kako se radi o primitivnim organizmima one nemaju pravi provodni sustav, pa vodu i hranjive



Slika 11. Građa mahovina. [31]

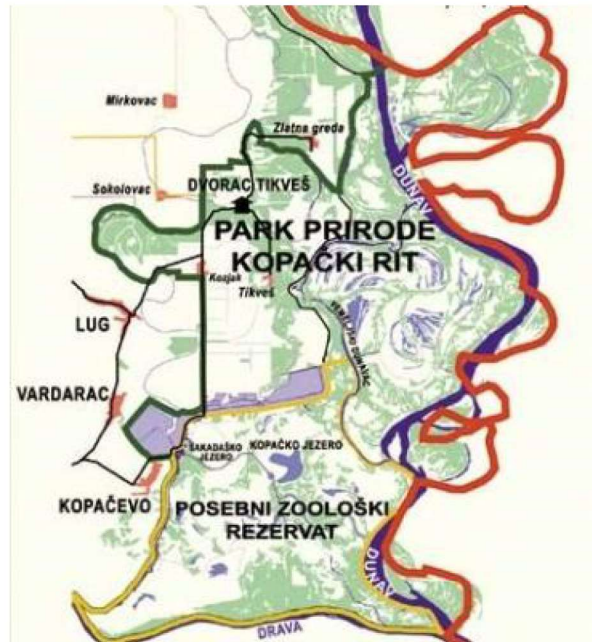
tvari uzimaju cijelom svojom površinom i provode je kapilarnim putem. [28, 29]

Mahovine imaju specifičan način uzimanja vode i hranjivih tvari iz okoline zbog čega mogu poslužiti kao bioindikatori različitih vrsta onečišćenja. Tako se, između ostalog, koriste i kao indikatori radioaktivnog onečišćenja. Spori rast, minimalne morfološke promjene tijekom života te široka rasprostranjenost čine ih prikladnim bioindikatorima. [32]

## 4 Park prirode Kopački rit

Park prirode Kopački rit nizina je koja zauzima površinu od 177 km<sup>2</sup>, a nalazi se u sjeveroistočnom dijelu Republike Hrvatske. Smješten je između Drave i Dunava te je zbog djelovanja tih dviju rijeka veliko poplavno područje. "Sjeverno, južno i zapadno od Parka prirode nalaze se poplavne površine

koje zauzimaju prostor do Batine na sjeveru, Bijelog Brda na jugu i Donjeg Miholjca na zapadu. Zemljopisno se Kopački rit prostire između  $45^{\circ} 32'$  i  $45^{\circ} 47'$  sjeverne geografske širine te  $18^{\circ} 45'$  i  $18^{\circ} 59'$  istočne geografske dužine. Najviša nadmorska visina parka je 86 m, a najniža je dno Kopačkog jezera i iznosi 78 m.



Slika 12. Park prirode Kopački rit. [33]

Na širem području izvan Parka prirode, zapadno i sjeverno na rubu nekadašnje poplavne doline, nalaze se naselja Bilje, Kopačevo, Vardarac, Lug, Grabovac, Kneževi Vinogradi, Suza, Zmajevac, Batina i Zlatna Greda, od kojih je Bilje prijelazno, jače urbanizirano naselje, a ostala naselja su ruralna.

Na desnoj obali Drave, jugozapadno od Parka, smješten je grad Osijek, makroregionalno središte istočne Hrvatske, a na lijevoj obali je prigradsko naselje Podravlje. Prema jugu i jugoistoku su naselja Nemetin, Sarvaš, Bijelo Brdo i Aljmaš. Sva naselja su u okrugu od pet kilometara od Parka. [34]

Sam reljef Kopačkog rita nastaje djelovanjem rijeka; na jednom mjestu se talože nanosi, a na drugom se produbljuje teren. Ovakvim njihovim djelovanjem Park poprima specifičan, valoviti izgled te zahvaljujući tomu nastaju bare i grede koje se rasprostiru i do nekoliko stotinjaka metara. Sve se bare spoje na krajevima pa se ulijevaju u Dunav pomoću prirodnih kanala. Tokovi rijeka Dunava i Drave stvaraju tzv. unutrašnju deltu<sup>7</sup>. Takav je oblik jedinstven za europski teritorij, što Parku daje poseban svjetski značaj. [34]

<sup>7</sup>Delta je riječno ušće koji se riječnim nanosima širi u more ili jezero i lepezastog je oblika. [35]



Park je u prosjeku poplavljen devedeset dana, a čitava njegova površina oko 32 dana. Prvi poplavni val posljedica je otapanja snijega na Alpama i dolazi početkom proljeća. Vrhunac poplavnog vala obično je u travnju ili svibnju, a vode se povlače koncem ljeta. Kako se područje parka neprestano plavi, tako se u parku razvijaju različite vrste vegetacije. Od šuma prevladavaju bijele vrbe koje najbolje mogu podnijeti dugotrajne poplave. Osim njih razvijaju se crne topole, na višim terenima hrast lužnjak, a na nešto sušim grab. Ipak je u parku najzastupljenija močvarna i vodena vegetacija, primjerice zajednice vodenih leća, zajednice mrijesnjava, zajednice krocnja itd. [36] Kako se radi o izrazito vlažnom terenu svoje stanište nalaze i mahovine koje neometano rastu na području Parka i imaju važnu ulogu bioindikatora radioaktivnog onečišćenja što će biti prikazano u nastavku.

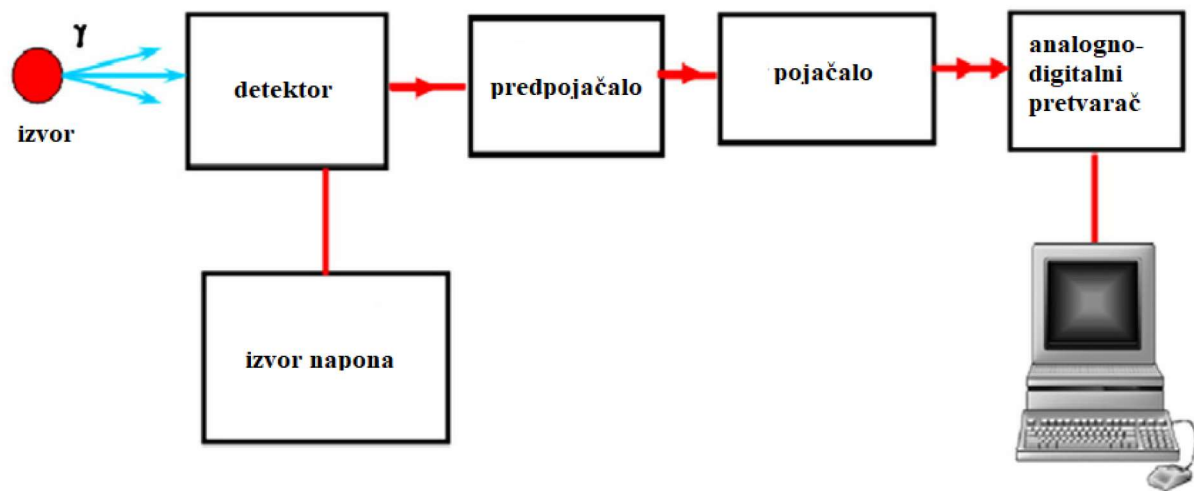
## 5 Gamasppektrometrija

Korišteni gamasppektrometrijski sustav temelji se na HP GMX detektoru ORTEC rezolucije 2,2 keV na 1,33 MeV  $^{60}\text{Co}$  i relativne efikasnosti od 74 % na 1,33 MeV  $^{60}\text{Co}$  povezanog s elektroničkim sustavom i osobnim računalom. Prema standardima Češkog meteorološkog instituta provedena je kalibracija efikasnosti, a sustavnim sudjelovanjima u usporednim mjerenjima u organizaciji Međunarodne agencije za atomsku energiju (IAEA) i Svjetske zdravstvene organizacije (WHO) osigurava se kvaliteta mjerenja. [37]

Gamaspektrometrija je nerazorna metoda koja se koristi za mjerenje elektromagnetskog zračenja u gama spektru radioaktivnih izvora. Proces mjerenja sastoji se od brojenja i mjerenja energije pojedinačnog fotona emitiranog iz uzorka. Izmjerena energija gama zrake odgovara vrsti izotopa, a broj izmjerenih zraka odgovara aktivnosti uzorka. Kako bi se identificirao željeni izotop potrebno je znati energije pri kojima se raspada. [38]

### 5.1 Glavni dijelovi gamasppektrometrijskog sustava

Gamaspektrometrijski sustav uobičajeno se sastoji od detektora, pretpojačala, pojačala, analogno-digitalnog pretvarača, računala, izvora napona i višekanalnog analizatora, kako je prikazano na Slici 13.



Slika 13. Dijelovi gamaspektrometrijskog sustava. [39]

**Izvor visokog napona** potreban je detektoru za prikupljanje naboja. Uzima se dovoljno visok napon kako bi se osiguralo skupljanje svih naboja i dovoljno nizak kako bi se izbjegao izboj napona. Visina napona koja je potrebna je reda veličine od nekoliko kV. [40]

**Prepojačalo** ima dvije glavne funkcije. Prva je da pretvara amplitudu malog iznosa, kratkotrajni električni impuls u impuls čija je amplituda proporcionalna energiji gama zrake u detektoru. Druga funkcija je da maksimizira omjer signala i šuma izlaznog impulsa i čuva informacije o energiji gama zrake. Kako bi se reducirala razina izlaznog šuma, prepojačalo se čuva što bliže detektoru. [40]

**Pojačalo** ima ulogu pojačavanja impulsa koji dolaze iz prepojačala u linearni naponski impuls u rasponu od 0 V do 10 V. Oblikuje i impulse kako bi se ispunili zahtjevi uređaja za analizu jačine impulsa. To je od velike važnosti jer analizator mjeri amplitudu ulaznog impulsa u odnosu na referentni napon kako bi se izlazni impuls iz pojačala vratio što brže na stabilni napon. Navedeni koraci ključni su za visoku kvalitetu spektra. [40]

**Jednokanalni analizator** uređaj je za analizu visine impulsa koji dolazi iz pojačala. U osnovi sadrži dva diskriminatora<sup>8</sup> i dozvoljeni su samo impulsi između neke dvije vrijednosti. Jednokanalni analizator povezan je s brojačem impulsa. [40]

<sup>8</sup>Diskriminator je elektronski sklop koji razlučuje ulazne signale po nekom zadanom svojstvu i na osnovi toga na izlazu daje neki drugi signal.[66]

**Višekanalni analizator** glavni je dio većine eksperimentalnih mjerenja. Obavlja glavne funkcije prikupljanja podataka i vizualizacije amplitude spektra dobivenog u detektoru. Analogno-digitalni pretvarač pretvara naponski impuls s pojačala u binarni izlaz. Pretvarač razvrstava impulse u mnogobrojne kanale ovisno o jakosti naponskog impulsa. Kako je jakost proporcionalna energiji gama zrake, veza broja kanala i energije približno je linearna. [40]

## 5.2 Interakcija gama zračenja s materijom

Tri su glavna procesa koja se javljaju u detektoru i pomoću kojih se mogu donositi zaključci i gama zrakama: fotoelektrični efekt, Comptonovo raspršenje i tvorba parova.

### 5.2.1 Fotoelektrični efekt

Kod fotoelektričnog efekta foton predaje svu energiju elektronu u atomu i elektron je zatim izbačen iz atoma. Njegova kinetička energija ( $E_k$ ) je jednaka razlici između energije upadnog fotona ( $E_\gamma$ ) i izlaznog rada<sup>9</sup> ( $W_0$ ):

$$E_k = E_\gamma - W_0.$$

Zahvaljujući fotoelektričnom efektu, može se izmjeriti energija fotona prenesena na elektron, što stvara jasno definirane vrhove (pikove) u spektru, nazvane fotovrhovi pune energije (FEP, engl. *full-energy photo peaks*). U idealnom slučaju, kada su procesi u detektoru samo fotoelektrični, dobiju se oštri FEP-ovi. [41]

### 5.2.2 Comptonovo raspršenje

Zbog Comptonovog raspršenja upadni foton prenosi dio energije na slobodni ili slabo vezani elektron preko sudara ovisno o smjeru između upadnog i raspršenog fotona. Raspršeni foton napušta

---

<sup>9</sup>Izlazni rad je veličina koja kaže koliko energije mora utrošiti elektron kod pojave fotoelektričnog efekta kako bi napustio metal ili poluvodič. [67]



detektor, a izmjerena je energija kinetička energija elektrona. Energije raspršenog fotona i elektrona dane su kao:

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + E_0(1 - \cos\theta)}$$

$$E_e = E_{\gamma} - E_{\gamma'} = E_{\gamma} - \frac{E_{\gamma}}{1 + E_0(1 - \cos\theta)}$$

gdje je  $E_{\gamma}$  energija upadnog fotona,  $E_{\gamma'}$  energija raspršenog fotona,  $E_e$  energija elektrona,  $E_0$  je dana kao  $\frac{E_{\gamma}}{m_e c^2}$  i  $\theta$  je kut raspršenog fotona energije  $E_{\gamma'}$ . Iz navedenih veza, proces rezultira kontinuiranim spektrom poznatim kao Comptonova distribucija po kojoj se energija izbačenog elektrona kreće od  $\theta = 0^\circ$  do maksimalne energije kada je  $\theta = 180^\circ$ . [41]

### 5.2.3 Tvorba parova

U tvorbi para pozitron-elektron u električnom polju atoma upadni foton mora imati najmanji iznos energije od 1,002 MeV. Nestabilni pozitron će anihilirati<sup>10</sup> slobodni elektron stvarajući dvije gama zrake energije od 511 keV. [41]

## 5.3 Analiza spektra

Kada se analizira gama spektar, važno je razumjeti da energija koja se mjeri je energija elektrona dobivena od gama fotona. Gama zrake koje ulaze u detektor mogu međudjelovati bilo kojom od prethodno tri opisane interakcije. Teško je razlučiti koja interakcija se dogodi jer je brzina gama zraka zapravo brzina svjetlosti. [41]

Jednom kada je spektar dobiven, prelazi se na njegovu analizu kako bi se izvukle željene informacije. Obično se gama spektar koristi za dobivanje informacija o energiji i broju fotona emitiranih iz izvora. Iako spektar sadrži sve energetske iznose, obično se promatraju samo iznosi pune energije jer su oni karakteristična vrijednost za pojedini radionuklid. Nakon što je prikupljeni spektar radionuklida prikazan, proučava se lokacija (broj kanala), površina vrha (pika) i puna širina na pola visine vrha

<sup>10</sup>Anihilacija jest međusobno poništavanje elementarne antičestice i čestice prilikom sudara, odnosno njihovo pretvaranje u elektromagnetsko zračenje. Energija nakon anihilacije jednaka je početnoj energiji para čestica. [42]

(engl. *full width at half maximum*). [40]

Iz površine pika dobivaju se informacije o broju fotona određene energije. Površina vrha može se dobiti zbrajanjem pojedinih fotona svih kanala ispod vrha. Ova metoda se ne može koristiti za složene spektre gdje se vrhovi preklapaju. [40]

### 5.3.1 Aktivnost uzorka

Aktivnost uzorka izračunata je prema izrazu:

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot \gamma \cdot t_s \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5}$$

gdje su redom:

$N$ -ukupni broj impulsa odgovarajućeg vrha koji se računa kao:

$$N = N_s - \frac{t_s}{t_b} N_b$$

$N_s$  je ukupni broj impulsa odgovarajućeg vrha u spektru uzorka

$N_b$  je ukupni broj impulsa odgovarajućeg vrha u spektru osnovnog zračenja (*background*)

$\varepsilon$  je efikasnost detektora u energiji promatranog vrha

$t_s$  je vrijeme brojenja uzorka u sekundama (*livetime*)

$t_b$  je vrijeme brojenja osnovnog zračenja u sekundama (*livetime*)

$m$  je masa uzorka izražena u kilogramima,

$\gamma$  predstavlja vjerojatnost emisije gama linije koja odgovara energiji vrha

$K_1$  je korekcijski faktor za nuklearni raspad od vremena uzorkovanja do početka mjerenja, a dan je kao:

$$K_1 = e^{\frac{-\ln 2 \cdot \Delta t}{T_{1/2}}}$$

gdje je  $\Delta t$  vrijeme proteklo od vremena uzorkovanja do vremena mjerenja, a  $T_{1/2}$  vrijeme poluraspada.

$K_2$  je korekcijski faktor za nuklearni raspad tijekom mjerenja, a dan je kao:

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

$t_r$  je stvarno proteklo vrijeme tijekom mjerenja,



$K_3$  je korekcijski faktor za samoatenuaciju, tj. atenuacijski faktor u mjerenom uzorku u usporedbi s uzorkom za baždarenje, a definiran je kao omjer efikasnosti pune energije pika  $\varepsilon(\mu, E)$  za uzorak s linearnim atenuacijskim koeficijentom  $\mu$  i efikasnosti pune energije pika  $\varepsilon(\mu_{ref}, E)$  za uzorak s linearnom atenuacijom  $\mu_{ref}$ :

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

$K_4$  je korekcijski faktor za gubitak impulsa zbog nasumičnog sumiranja i dan je izrazom:

$$K_4 = e^{-2R\tau}$$

gdje je  $\tau$  vremenska rezolucija mjernog sustava, a  $R$  prosječna vrijednost brzine brojenja. Kada je prosječna vrijednost brzine brojenja niska ovaj faktor ima vrijednost 1.

$K_5$  je korekcijski faktor za jezgre koje se raspadaju kroz niz fotonskih emisija. Definira se kao omjer odgovarajuće prividne efikasnosti  $\varepsilon_{ap}(E)$  i efikasnosti ukupne energije  $\varepsilon(E)$ :

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

Ako se jezgra ne raspada nizom gama zraka onda ima vrijednost 1. Općenito ovaj faktor ovisi o shemi raspada radionuklida, geometriji uzorka i njegovom sastavu te o parametrima detektora. [43]

## 6 Materijali i metode

Mahovina je uzorkovana na području Parka prirode Kopački rit uz dozvolu Ministarstva zaštite okoliša i energetike kao i na određenim lokacijama od Osijeka prema Donjem Miholjcu. Uzorci su prikupljeni tijekom svibnja, lipnja, srpnja i kolovoza 2018. godine. Prikupljena su ukupno 43 uzorka (s drvenih, zemljanih i kamenih površina) te su svi detaljno očišćeni i osušeni do stalne mase. Uzorci su pakirani u plastične Marinelli posude volumena 1 litre i prije mjerenja su ostavljeni na čekanju do postizanja ravnoteže radionuklida.



Slika 14. Čišćenje mahovine od primjesa.

Za određivanje geografske širine i geografske dužine korišten je ručni GPS uređaj eTrex 20.



Slika 15. Garmin eTrex 20. [44]

Uređaj se može povezati i na GPS i na GLONASS<sup>11</sup> satelite. To mu omogućuje povezivanje na 24 satelita više (nego da koristi samo GPS). Male dimenzije i brojne mogućnosti čine ga pogodnim za razne aktivnosti, a za potrebe ovog diplomskog rada korišten je za iščitavanje longitude i latitude. [45, 46]

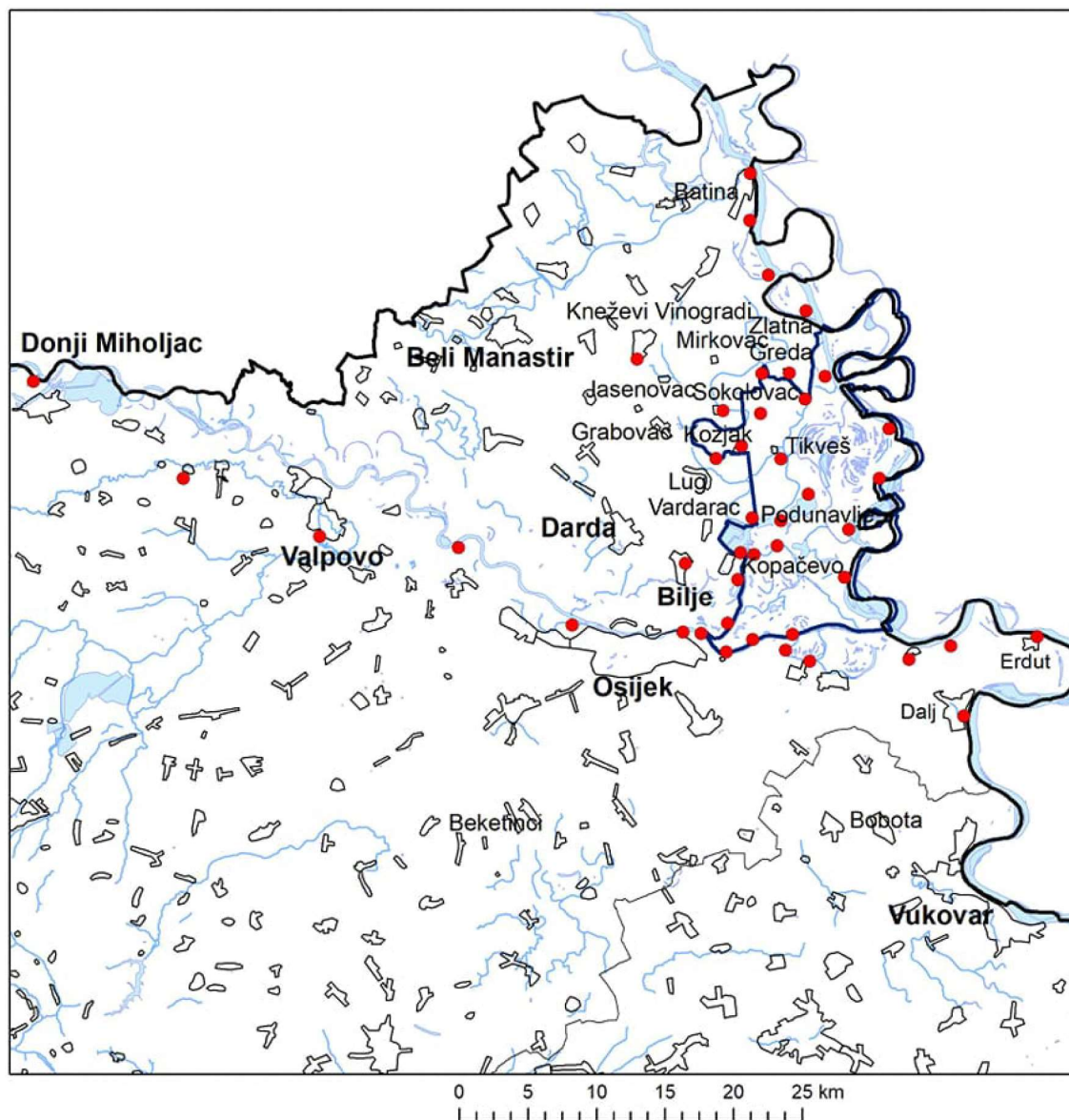
Za izradu zemljovida korišten je softver ArcGIS 10.2.2. To je sustav koji se koristi za izradu i korištenje zemljopisnih karata, analizu mapiranih podataka, korištenje geografskih podataka u različitim aplikacijama te upravljanjem istim u bazama podataka. CSC IT Center for Science organizira ArcGIS softverski konzorcij za finska sveučilišta i sveučilišta primijenjenih znanosti. Za korištenje ove programske podrške potrebno je imati licencu. [47] Lokacije uzorkovanja mogu se vidjeti na Slici 16.

---

<sup>11</sup>GLONASS je ruski navigacijski sustav nastao kao odgovor na poznati američki GPS sustav.



## Zemljovid lokacija u Kopačkom ritu i okolici uzorkovanja mahovina



**Legenda:**

- mjesto uzorkovanja mahovine
- administrativna granica
- naselje
- granica PP "Kopački rit"



Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, kolovoz 2018.

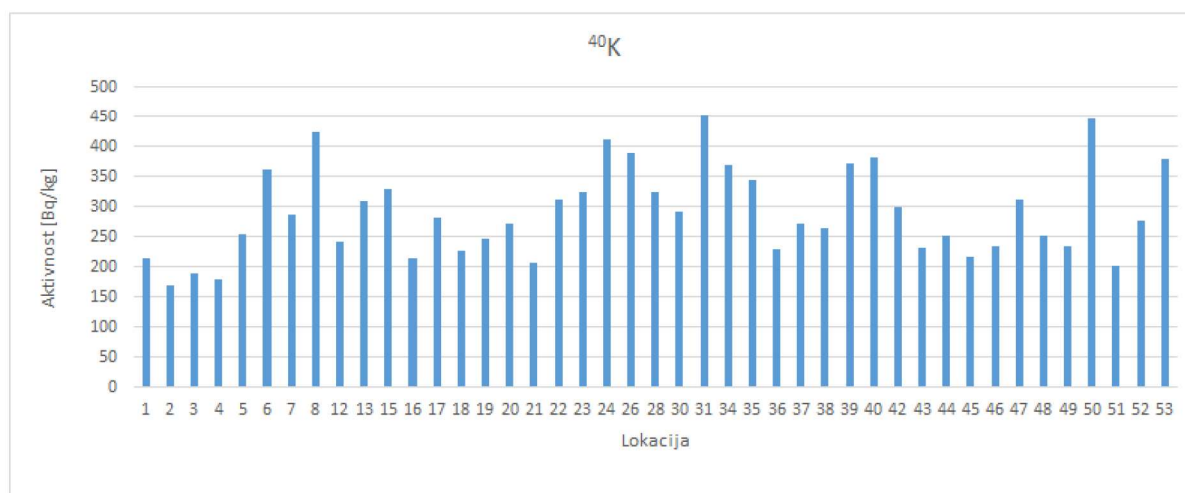
Slika 16. Prikaz lokacija uzorkovanja mahovina.

## 7 Rezultati i analiza

### 7.1 $^{40}\text{K}$

Kalij je mekan, srebrnkastobijeli metal. Važna je sastavnica tla te je široko rasprostranjen u prirodi i prisutan u biljnim i životinjskim tkivima. U prirodi postoje tri izotopa kalija. To su  $^{39}\text{K}$ ,  $^{40}\text{K}$  i  $^{41}\text{K}$  čija je zastupljenost redom 93,08 %, 0,0119 % i 6,9 % od kojih je  $^{40}\text{K}$  radioaktivan, tj. jedan je od najrasprostranjenijih prirodnih radioaktivnih elemenata. Nastao je s ostalim elementima tijekom stvaranja Zemlje, a zahvaljujući dugom vremenu poluraspada od  $1,29 \cdot 10^9$  godina još je prisutan na našem planetu. [48, 49, 50]

Izmjerene koncentracije aktivnosti  $^{40}\text{K}$  na području Parka prirode Kopačkog rita i njegove okolice su kako slijedi:



Grafikon 1. Koncentracija aktivnosti  $^{40}\text{K}$ .

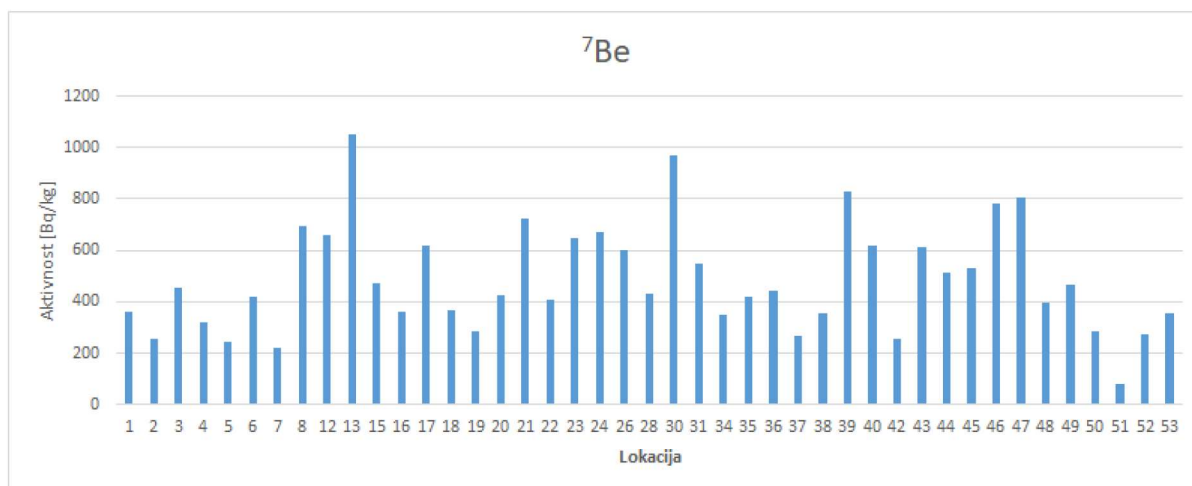
Prosječna vrijednost izmjerenog  $^{40}\text{K}$  na području Kopačkog rita i okolice su niske i ne predstavljaju radiološki rizik<sup>12</sup>. Izmjerena srednja vrijednost iznosi  $(291 \pm 7)$  Bq/kg s maksimalnom  $(452 \pm 53)$  Bq/kg i minimalnom vrijednošću od  $(171 \pm 4)$  Bq/kg. Kako je kalij jedan od najzastupljenijih elemenata u Zemljinoj kori, očekivano je izmjeren u svim uzorcima mahovine.

<sup>12</sup>Specifična aktivnost kalja na površini Zemlje iznosi 870 Bq/kg, a aktivnost u ljudskom tijelu iznosi oko 4000 Bq [51]

## 7.2 $^7\text{Be}$

Kozmogeni radionuklidi, kao što je  $^7\text{Be}$ , nastaju interakcijom kozmičkih zraka i atoma dušika i kisika koji se nalaze u atmosferi (osim radionuklida, nastaju i protoni i neutroni).  $^7\text{Be}$  nastaje u gornjim slojevima atmosfere i po nastanku se brzo veže za čestice aersola<sup>13</sup>. Spuštanjem zračnih masa, s visina na kojima nastaje,  $^7\text{Be}$  se taloži na Zemljinoj površini. [53, 54, 55]

Izmjerene koncentracije aktivnosti  $^7\text{Be}$  su kako slijedi:



Grafikon 2. Koncentracija aktivnosti  $^7\text{Be}$ .

Izmjerena srednja vrijednost  $^7\text{Be}$  iznosi  $(484 \pm 13)$  Bq/kg s maksimalnom  $(1045 \pm 26)$  Bq/kg i minimalnom vrijednošću od  $(78 \pm 7)$  Bq/kg.

## 7.3 $^{137}\text{Cs}$

Cezij je srebrnkastobijeli, mekani metal. Na temperaturi nešto višoj od sobne prelazi u tekuće stanje ( $28,5^\circ\text{C}$ ). U usporedbi sa drugim alkalijskim metalima<sup>14</sup> cezij ima najnižu točku vrelišta i tališta što ga čini jednim od najreaktivnijih alkalijskih metala. Dobro se topi u vodi, a po svojim biološkim, kemijskim i fizikalnim svojstvima sličan je kaliju. [57]

Postoji nekoliko radioaktivnih izotopa<sup>15</sup> cezija u rasponu od  $^{114}\text{Cs}$  do  $^{145}\text{Cs}$ . Od toga su dva najvažnija

<sup>13</sup>Aerosoli su suspenzije čestica krutih tvari ili kapljica tekućine promjera manjeg od  $1 \mu\text{m}$  u plinu [52]

<sup>14</sup>Alkalijski metali spadaju u prvu skupinu kemijskih elemenata periodnog sustava. Spajaju se s kisikom, burno reagiraju s vodom te su mekani i male gustoće. Zbog svoje reaktivnosti u prirodi se mogu naći, većinom, u spojevima. [56]

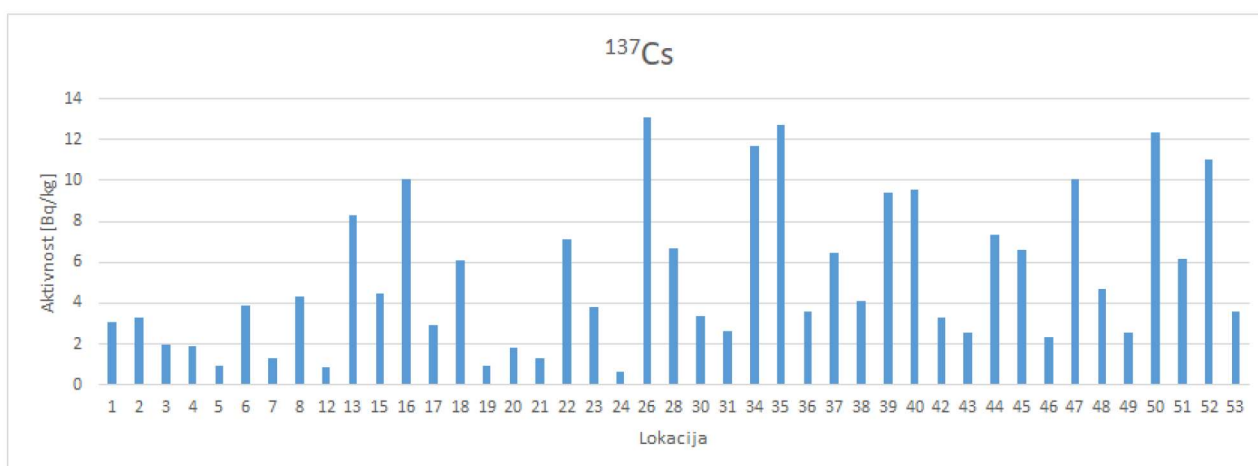
<sup>15</sup>Izotopi su atomi istog kemijskog elementa koji imaju isti broj protona u jezgri, a različit broj neutrona [58].



izotopa  $^{134}\text{Cs}$  s vremenom poluraspada od 2,1 godinu i  $^{137}\text{Cs}$  s vremenom poluraspada od 30,1 godinu. Radionuklid od interesa  $^{137}\text{Cs}$  u znatnijim se količinama javlja nakon testiranja nuklearnog oružja tijekom pedesetih i šezdesetih godina prošlog stoljeća. Značajna količina  $^{137}\text{Cs}$  otpuštena je u atmosferu uslijed nesreće u Černobilu 1986. godine te dopijeva i na područje Republike Hrvatske. Zbog relativno velikog vremena poluraspada,  $^{137}\text{Cs}$  se može pratiti i danas. Černobilski  $^{134}\text{Cs}$  se, zbog relativno kratkog vremena poluraspada, do sada raspao. Dakle, opisana dva izotopa,  $^{134}\text{Cs}$  i  $^{137}\text{Cs}$ , nastaju kao fisijski produkti, pri radu nuklearnih elektrana ili pri eksplozijama nuklearnog oružja. [48, 50, 57, 59]

Kako je u prethodnim poglavljima objašnjeno, mahovina je biljka višegodišnjeg rasta, što je čini pogodnim organizmom koji skladišti, između ostalih radionuklida,  $^{137}\text{Cs}$ . Kako mahovine nemaju pravog korijenja, one iz zemlje ne apsorbiraju radionuklide, a sve što je u njima akumulirano dolazi iz zraka ili oborina. Ono što mahovine čini posebnim jest to da je akumulacija radionuklida proporcionalna unosu, a sva se akumulacija zadržava u gornjim, zelenim slojevima. [60]

Izmjerene koncentracije aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na području Parka prirode Kopački rit i njegove okolice su kako slijedi:

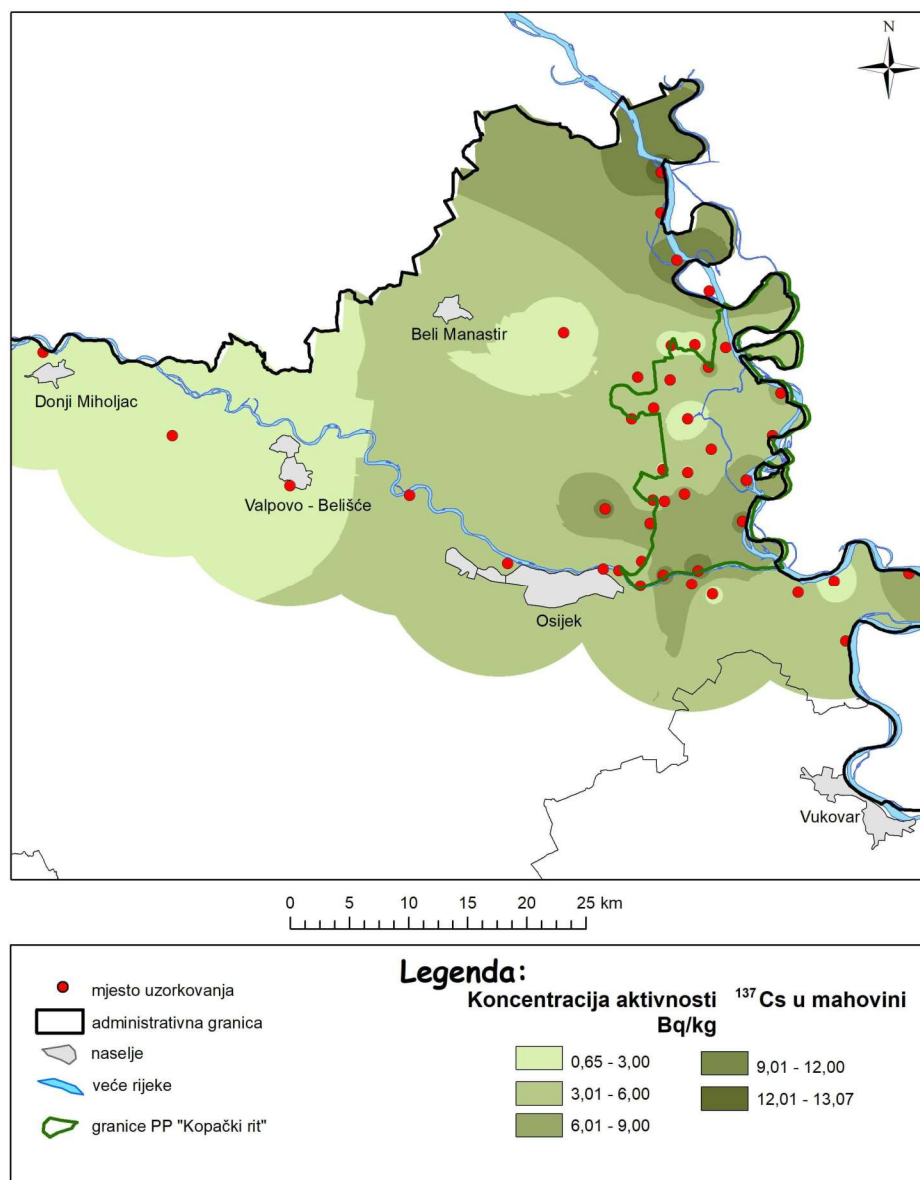


Grafikon 3. Koncentracija aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$ .

Prosječna vrijednost izmjerenog  $^{137}\text{Cs}$  na području Kopačkog rita i okolice je niska i ne predstavlja radiološki rizik. Izmjerena srednja vrijednost iznosi  $(5 \pm 1)$  Bq/kg s maksimalnom  $(13 \pm 1)$  Bq/kg i minimalnom vrijednošću od  $(1 \pm 1)$  Bq/kg. Iz grafa je vidljivo kako su na lokacijama 16, 26, 34, 35, 50 i 52 izmjerene više vrijednosti koncentracije aktivnosti od prosječne. Točne lokacije povišene

koncentracije mogu se vidjeti na slici 15 IDW<sup>16</sup> prikaza <sup>137</sup>Cs.

### Zemljovid lokacija uzorkovanja mahovine u Osječko-baranjskoj županiji na <sup>137</sup>Cs i prikaz IDW



Slika 17. IDW prikaz <sup>137</sup>Cs.

Lokacija 16 je park kod dvorca u Bilju. Kako je park relativno šumsko područje, a <sup>137</sup>Cs se duže

<sup>16</sup>engl. *inverse distance weighting* interpolacijska je metoda kojom se vrijednost na nekoj lokaciji procjenjuje tako da vrijednost pojedinih točaka na mjerenu vrijednost ima utjecaj obratno proporcionalan njihovoj udaljenosti. [61]



zadržava u šumskim područjima, uzrok je to povišene koncentracije aktivnosti ovog radionuklida.

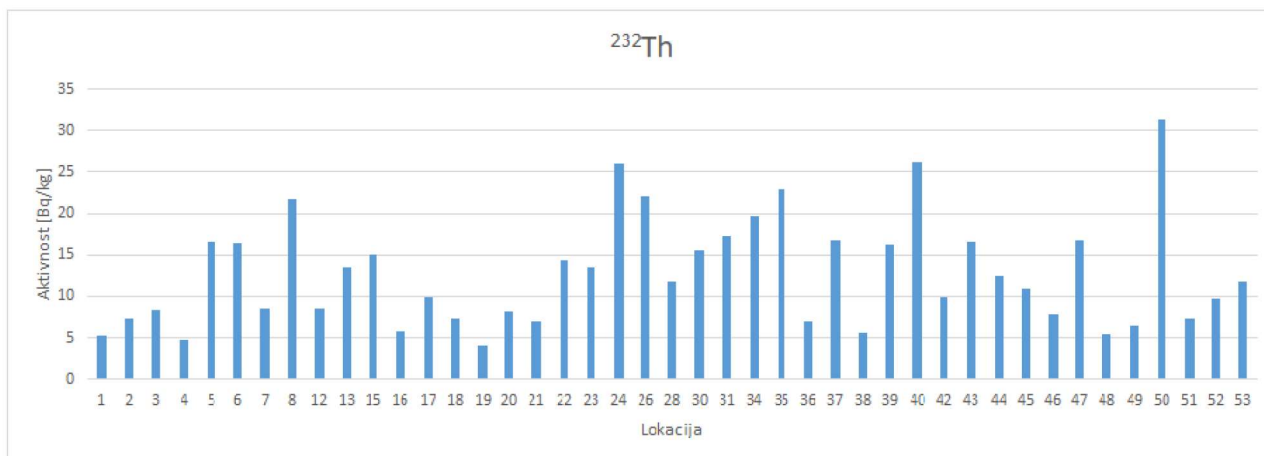
Lokacije 26, 34 i 35 poplavna su područja rijeke Dunava. S obzirom na svojstva  $^{137}\text{Cs}$  on će se duže zadržavati u šumskim i vlažnim područjima pa je koncentracija aktivnosti nešto viša.

Lokacije 50 i 52 poplavna su područja rijeke Drave, ali i područja guste šumske vegetacije. Kako je cezij lako topljiv u vodi i u šumskim područjima se zadržava duže, koncentracija aktivnosti je na spomenutim lokacijama viša.

## 7.4 $^{232}\text{Th}$

$^{232}\text{Th}$  je radioaktivni izotop koji ima udio od 99 % u prirodnom toriju. S obzirom na dugo vrijeme poluraspada, od  $1,2 \cdot 10^{10}$  godina, torij je prisutan još od vremena nastanka Zemlje. Također, zbog dugog vremena poluraspada zastupljenost torija u prirodi je gotovo konstantna i može se mijenjati samo uslijed prirodnih procesa i ljudskih aktivnosti. [62]

Izmjerene koncentracije aktivnosti  $^{232}\text{Th}$  su kako slijedi:



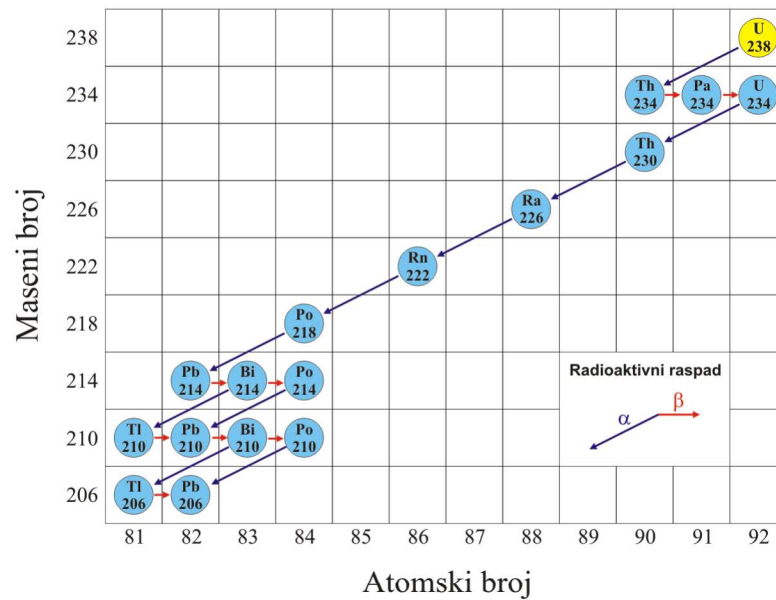
Grafikon 4. Koncentracija aktivnosti  $^{232}\text{Th}$ .

Izmjerena srednja vrijednost  $^{232}\text{Th}$  iznosi  $(13 \pm 1)$  Bq/kg s maksimalnom  $(31 \pm 2)$  Bq/kg i minimalnom vrijednošću od  $(4 \pm 1)$  Bq/kg.

## 7.5 Uranijev niz

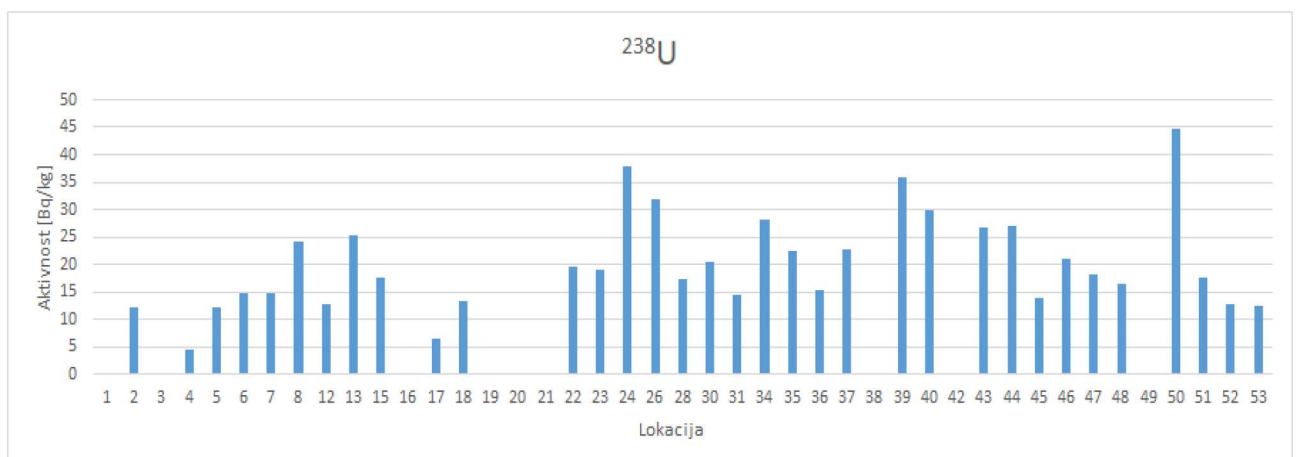
Prirodni uranij sastoji se od tri glavna izotopa:  $^{238}\text{U}$  čija je zastupljenost u prirodi od oko 99,28 %,  $^{235}\text{U}$  sa zastupljenošću od 0,71 % i  $^{234}\text{U}$  koji je zastupljen oko 0,0054 % u prirodi. Svi navedeni

izotopi su radioaktivni, a najstabilniji od njih je  $^{238}\text{U}$  s vremenom poluraspada od  $4,47 \cdot 10^9$  godina, što je približno i starost Zemlje.  $^{235}\text{U}$  ima vrijeme poluraspada oko  $7,13 \cdot 10^8$ , a  $^{234}\text{U}$  oko  $2,48 \cdot 10^5$  godina. [63] Uranijev radioaktivni niz započinje alfa-raspadom  $^{238}\text{U}$  i završava stabilnim  $^{206}\text{Pb}$  kako je prikazano na slici:



Slika 18. Uranijev radioaktivni niz. Kojim "putem" će se  $^{238}\text{U}$  raspasti do  $^{206}\text{Pb}$  je statističke prirode. [64]

Izmjerene koncentracije aktivnosti  $^{238}\text{U}$  na području parka i okolice su kako je prikazano na grafu:

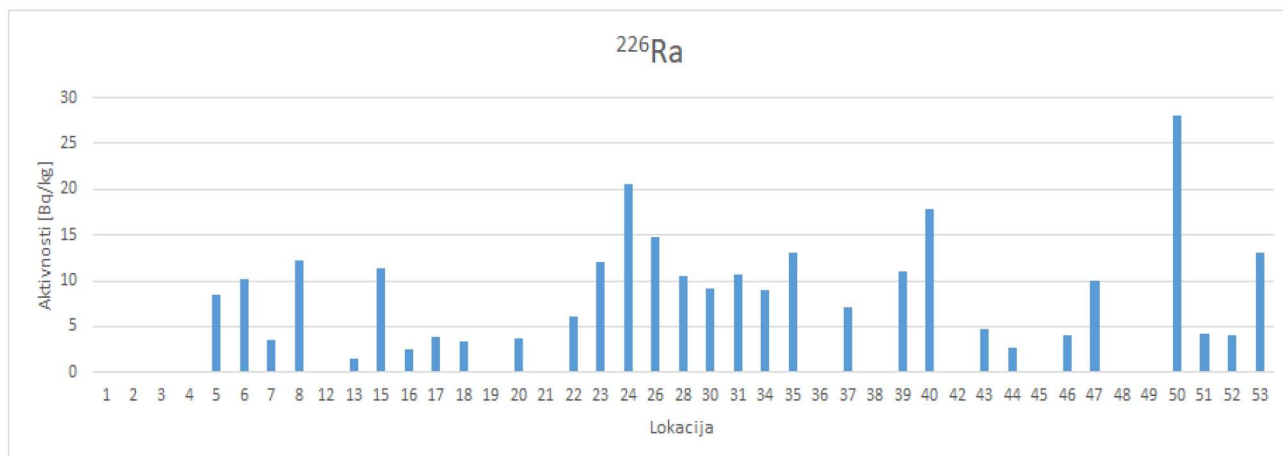


Grafikon 5. Koncentracija aktivnosti  $^{238}\text{U}$ .

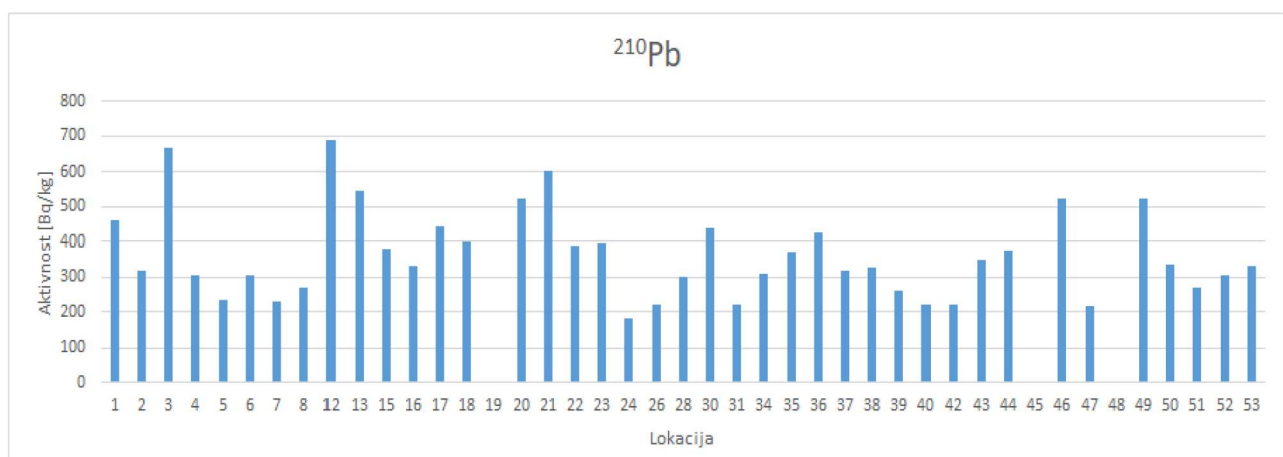
Izmjerena srednja vrijednost  $^{238}\text{U}$  iznosi  $(16 \pm 2)$  Bq/kg s maksimalnom  $(45 \pm 6)$  Bq/kg.  $^{238}\text{U}$  se

raspada alfa raspadom gdje nastaje  $^{234}\text{Th}$  koji proizvodi niskoenergetske gama zrake s niskom vjerojatnošću emisije. Stoga  $^{234}\text{Th}$  nije pogodan za gamaspektrometriju kako bi se odredila koncentracija  $^{238}\text{U}$ . Umjesto toga mogu se koristiti gama zrake nastale beta raspadom  $^{234}\text{Th}$  u  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ <sup>17</sup>.

Članovi uranijevog niza, između ostalih, su i  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{210}\text{Pb}$  čije su koncentracije aktivnosti također mjerene. Rezultati koncentracija prikazani su na grafikonima redom:



Grafikon 6. Koncentracija aktivnosti  $^{226}\text{Ra}$ .



Grafikon 7. Koncentracija aktivnosti  $^{210}\text{Pb}$ .

Za članove uranijevog niza izračunat je Pearsonov koeficijent korelacije. Rezultati su prikazani u tablici:

<sup>17</sup>Oznaka *m* kod  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  označava metastabilno stanje. Metastabilno stanje općenito označava da sustav u takvom stanju ima energiju veću nego u stabilnom stanju, ali još nije postao nestabilan. Odnosno,  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  će prijeći u stabilno stanje bez transmutacije jezgre. [65]

Tablica 1: Pearsonov koeficijent korelacije.

	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Pb}$
$^{238}\text{U}$	1		
$^{226}\text{Ra}$	0,74	1	
$^{210}\text{Pb}$	-0,21	-0,21	1

Između  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$  postoji srednje jaka pozitivna korelacija, što se objašnjava činjenicom da je  $^{226}\text{Ra}$  jedna od jezgara kćeri u uranijevom radioaktivnom nizu.

Između  $^{238}\text{U}$  i  $^{210}\text{Pb}$  postoji slaba negativna korelacija kao i između  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{210}\text{Pb}$ .



## 8 Zaključak

Određeni radionuklidi zastupljeni su u Zemljinoj površini još od vremena njenog nastanka. Neki nastaju djelovanjem kozmičkih zraka u atmosferi, a neki umjetnim putem. Tako su ljudi svakodnevno izloženi različitim vrstama radioaktivnog zračenja zbog čega je potrebno sustavno mjeriti koncentracije aktivnosti kako bi se mogao procijeniti radiološki rizik okoline u kojoj boravi čovjek.

Park prirode Kopački rit je zbog netaknute prirode i ljudske djelatnosti snižene na najnižu razinu, zanimljivo područje za mjerenje i analiziranje koncentracije aktivnosti, u ovom slučaju u mahovinama. Mahovine su jednostavni organizmi, višegodišnjeg rasta i predstavljaju dobre bioindikatorske organizme. Kako nemaju pravog korijenja, sve što akumuliraju dobivaju iz zraka ili vode. Tako je koncentracija aktivnosti  $^{137}\text{Cs}$  na određenim lokacijama, odnosno na poplavnim mjestima Dunava i Drave, nešto viša u odnosu na izmjereni prosjek. Izmjerene vrijednosti i dalje ne predstavljaju radiološki rizik.

Za članove uranijevog niza ispitivana je korelacija između koncentracija aktivnosti u uzorcima. Utvrđena je srednje jaka korelacija između koncentracije aktivnosti  $^{238}\text{U}$  i  $^{226}\text{Ra}$ . Također, postoji i slaba negativna korelacija između  $^{238}\text{U}$  i  $^{210}\text{Pb}$  kao i  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{210}\text{Pb}$ .

Za sve analizirane radionuklide izmjerena koncentracija aktivnosti nije povišena u odnosu na ostatak Hrvatske te se sve izletničke djelatnosti na području Parka mogu neometano izvoditi.

## Literatura

- [1] URL: <https://urlzs.com/a6Bo8> (02.05.2019.)
- [2] URL: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono102.pdf>  
(02.05.2019.)
- [3] Faj, Z. Pregled povijesti fizike. Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, 1999.
- [4] URL: <https://urlzs.com/pLb7D> (02.05.2019.)
- [5] URL: <https://www.who.int/peh-emf/meetings/archive/en/keynote3ng.pdf>  
(03.05.2019.)  
<https://www.who.int/peh-emf/meetings/archive/en/keynote3ng.pdf>
- [6] Kovač, E. Ionizirajuće zračenje: izvori, mjerenje, prevencija.  
URL: [www.e-vozila.com/slike\\_forum/Ionzra.doc](http://www.e-vozila.com/slike_forum/Ionzra.doc) (04.05.2019.)
- [7] Hrvatska enciklopedija.  
URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=57368> (04. 05. 2019.)
- [8] NASA Science.  
URL: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>  
(04.05.2019.)
- [9] Hrvatska enciklopedija.  
URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=27748> (04.05.2019.)
- [10] Dresto-Alač, B. Radioaktivnost. Primjena u medicini.  
URL: <https://urlzs.com/F6fX> (05.05.2019.)
- [11] URL: <https://urlzs.com/jZwL> (05.05.2019.)
- [12] S. Miljanić, Ščepan. Udžbenik nuklearne hemije. Beograd, Studentski trg 12-16: Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju, 2008.

- URL: [http://www.ffh.bg.ac.rs/Dokumenti/Radiohemija/Udzbenik-skripta\\_RHNNH.pdf](http://www.ffh.bg.ac.rs/Dokumenti/Radiohemija/Udzbenik-skripta_RHNNH.pdf) (05.05.2019.)
- [13] URL: <https://urlzs.com/2pzK> (05.05.2019.)
- [14] URL: <https://urlzs.com/ZCSb> (05.05.2019.)
- [15] Hrvatska enciklopedija.  
URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=17929> (05.05.2019.)
- [16] URL: <https://urlzs.com/UsRK> (05.05.2019.)
- [17] URL: <https://urlzs.com/PHh3> (05.05.2019.)
- [18] URL: <https://urlzs.com/xpXU7> (10.05.2019.)
- [19] URL: <http://www.ntec.ac.uk/Phys/pdfs/8-Radioactive%20Decay.pdf>  
(10.05.2019.)
- [20] Andreis, T.; Plavčić M., Simić, N. Fizika 4: udžbenik za 4. razred gimnazije i srodnih škola s četverogodišnjim programom (varijanta "B"). Zagreb: Profil. 2000.
- [21] Hrvatska enciklopedija.  
URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=40769> (10.05.2019.)
- [22] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/BioindicatorMicrobial\\_indicators](https://en.wikipedia.org/wiki/BioindicatorMicrobial_indicators)  
(10.05.2019.)
- [23] Mujić, Dž., Saulović, Đ. Prirodni bioindikatori u životnoj sredini. Banja Luka: 1<sup>st</sup> International Conference Ecological safety in post-modern enviroment. 2009.  
URL: <http://apeironsrbija.edu.rs/icama2009/Djurdjija%20Saulovic%20-%20Prirodni%20bioindikatori%20u%20životnoj%20sredi.pdf> (10.05.2019.)
- [24] URL: [http://bib.irb.hr/datoteka/743709.Tahir\\_Sofilic\\_EKOTOKSIKOLOGIJA.pdf](http://bib.irb.hr/datoteka/743709.Tahir_Sofilic_EKOTOKSIKOLOGIJA.pdf)  
(10.05.2019.)

- [25] URL: [https://www.pmf.unizg.hr/\\_download/repository/7\\_Bivalvia.pdf](https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/7_Bivalvia.pdf)  
(08.05.2019.)
- [26] Rožmarić Mačefat, M.; Rogić, M.; Barišić D.; Benedik, Lj.; Štok, M.  
Sustavno praćenje radioaktivnosti priobalnih voda Jadrana korištenjem  
dagnji (*Mytilus galloprovincialis*) kao bioindikatora.  
URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/44/128/44128579.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/128/44128579.pdf) (09.05.2019.)
- [27] URL: <http://instrukcije-kemija.blogspot.com/2012/12/lisaji-lichenes.html>  
1 (10.05.2019.)
- [28] Bačić, T.; Erben, R.; Krajačić, M. Raznolikost živoga svijeta. Udžbenik  
biologije za drugi razred. Zagreb: Školska knjiga. 2008.
- [29] Radnoić., M. M.; Veček Šimunović, S.; Šeparović Markota, Z. Biologija 2:  
Monera, protisti, gljive, biljke. Udžbenik iz biologije za drugi razred  
gimnazije. Zagreb: Profil. 2001.
- [30] URL: [http://www.ifin.ro/rjp/2011\\_56\\_7-8/0983\\_0992.pdf](http://www.ifin.ro/rjp/2011_56_7-8/0983_0992.pdf) (10.05.2019.)
- [31] URL: <https://urlzs.com/9og4G> (12.05.2019.)
- [32] Todorović, D., Popović, J., Ajtić, J. Mahovine kao indikatori zagađenja  
vazduha u urbanim sredinama.  
URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/066/39066551.pdf?r=1r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/066/39066551.pdf?r=1r=1) (12.05.2019.)
- [33] URL: <https://urlzs.com/q662p> (19.05.2019.)
- [34] URL: <https://pp-kopacki-rit.hr/oparku.html> (19.05.2019.)
- [35] Hrvatska enciklopedija.  
URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=14434> (19.05.2019.)
- [36] URL: <http://www.geografija.hr/hrvatska/kopacki-rit-turizam-u-parku-pri-rode/> (19.05.2019.)



- [37] Babić, D., Franić, Z., Marović G., Petirneć, B., Senčar, J., Šoštarić, M.  
Radioaktivnost mahovine pokazatelj radiološkog onečišćenja.  
URL: [www.hdzz.hr/wp-content/uploads/2017/04/11HDZZ\\_zbornik.pdf](http://www.hdzz.hr/wp-content/uploads/2017/04/11HDZZ_zbornik.pdf) (21.09.2019.)
- [38] Shouop Sebastien Joel, G., Penabei, S., Ndontchueng, M. M., Chene, G.,  
Jilbert Nguelem Mekontso E., Ngwa Ebongue, A., Ousmanou, M., Davida, S.  
Precision measurement of radioactivity in gamma-rays spectrometry using two  
HPGe detectors (BEGe-6530 and GC0818-7600SL models) comparison techniques:  
Application to the soil measurement  
URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5238602/> (21.09.2019.)
- [39] URL: <https://t.ly/vbN0p> (21.09.2019.)
- [40] URL: [https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/4710/11/11\\_chapter%202.pdf](https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/4710/11/11_chapter%202.pdf) (21.09.2019.)
- [41] URL: <https://t.ly/9gP2Y> (22.09.2019.)
- [42] Hrvatska enciklopedija.  
URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=2807> (22.09.2019.)
- [43] Petrineć, B., Franić Z. Quality Assurance in Gamma-Ray Spectrometry of  
Seabed Sediments  
URL: <https://hrcak.srce.hr/65310> (22.09.2019.)
- [44] URL: <https://urlzs.com/JzDMQ> (14.08.2019.)
- [45] URL: <https://buy.garmin.com/hr-HR/HR/p/87771> (14.08.2019.)
- [46] URL: <https://www.cnet.com/products/garmin-etrex-20-gps-glonass-receiver-series/> (14.08.2019.)
- [47] URL: <https://urlzs.com/5Moht> (14.08.2019.)
- [48] URL: [https://www.remm.nlm.gov/ANL\\_ContaminantFactSheets\\_All\\_070418.pdf](https://www.remm.nlm.gov/ANL_ContaminantFactSheets_All_070418.pdf)  
(27.08.2019.)

- [49] URL: <http://www.environmental-studies.de/Radioecology/Radiocesium/radiocesium.html> (27.08.2019.)
- [50] Popijač, M., Seletković, I., Volner, M., Lovrenčić, I., Barišić, D., Kezić, D. Dinamika kretanja  $^{137}\text{Cs}$  i  $^{40}\text{K}$  na stablima jele (*Abies alba*) na Sljemenu  
URL: <http://sumlist.sumari.hr/pdf/200402690.pdf> (27.08.2019.)
- [51] Hrvatska enciklopedija. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69870> (27.08.2019.)
- [52] Hrvatska enciklopedija. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=639> (02.09.2019.)
- [53] URL: <https://t.ly/rBeWn> (02.09.2019.)
- [54] URL: <https://t.ly/B0v2L> (02.09.2019.)
- [55] URL: <https://t.ly/50zDb> (02.09.2019.)
- [56] Hrvatska enciklopedija. URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=1787> (19.08.2019.)
- [57] URL: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp157-c4.pdf> (19.08.2019.)
- [58] Hrvatska enciklopedija. URL: <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=28361> (19.08.2019.)
- [59] Franić Z., Petrinec B. Radiocezij u neobrađenom tlu na nekim lokacijama u Republici Hrvatskoj.  
URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20606848> (21.09.2019.)
- [60] Franić Z., Marović G., Senčar J. Mahovina u radiološkom monitoringu  
URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/39/123/39123042.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/123/39123042.pdf) (21.09.2019.)
- [61] URL: <http://struna.ihjj.hr/naziv/inverzna-udaljenost/30901/> (26.08.2018.)

- [62] URL: <https://sempub.epa.gov/work/HQ/175255.pdf> (07.09.2018.)
- [63] Zubair Awan I., Qadeer Khan, A. Uranium - The Element: Its Occurrence and Uses  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/290490309\\_Uranium\\_-\\_The\\_Element\\_Its\\_Occurrence\\_and\\_Uses](https://www.researchgate.net/publication/290490309_Uranium_-_The_Element_Its_Occurrence_and_Uses) (15.09.2019.)
- [64] URL: <https://t.ly/wGpNx> (15.09.2019.)
- [65] URL: <https://www.hrleksikon.info/definicija/metastabilno-stanje.html>  
(15.09.2019.)
- [66] URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=15413> (15.09.2019.)
- [67] URL: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=70274> (15.09.2019.)

## Životopis

Katarina Marjanović rođena je 3. veljače 1994. godine u Ozimici u Općini Žepče. Osnovnoškolsko obrazovanje završava u Osnovnoj školi "Fra Grga Martić", Lug-Brankovići. Godine 2009. upisuje srednju školu u Katoličkom školskom centru "Don Bosco" Žepče, smjer ekonomski tehničar. Po završetku srednjoškolskog obrazovanja 2013. godine upisuje Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku u Osijeku, 2016. godine upisuje Diplomski studij fizike i informatike čiji je student i danas. Trenutno je zaposlena u Katoličkom školskom centru "Don Bosco" Žepče kao nastavnica fizike u Općoj gimnaziji.