



Univerzitet u Novom Sadu
Prirodno-matematički fakultet
Departman za Fiziku



Merenje koncentracije aktivnosti tricijuma u vodi tečnim scintilacionim detektorom

MASTER RAD

Kandidat:
Anja Begović
138m/13

Mentor:
Doc. dr Jovana Nikolov

Novi Sad, april, 2014

SADRŽAJ

	Str.
Spisak slika	4
Spisak tabela	5
Uvod	8
1. Prirodna radioaktivnost	9
1.1. Zakon radioaktivnog raspada	9
1.2. Aktivnost	10
1.3. Jonizaciono zračenje	11
1.4. Veštačka radioaktivnost	12
1.5. Prirodna radioaktivnost	14
1.6. Kosmogeni radioizotopi	14
2. Tricijum ^3H	16
2.1. Hemija izotopa	16
2.1.1. Izotopski efekti	16
2.1.2. Nuklerni efekti izotopa	17
2.2. Tricijum	18
2.3. Značaj tricijuma	18
2.4. Primena u hidrogeologiji	20
2.4.1. Sastav podzemnih voda	21
2.4.2. Režim kretanja vode	22
3. Niskofonski tečni scintilacioni detektor, Quantulus 1220	24
3.1. Scintilacioni detektori	24
3.1.1. Organski scintilacioni detektori sa tečnim rastvorom	25
3.1.2. Fotodetektori	26
3.1.3. Fotomultiplikator	26
3.1.4. Fotodioda	27
3.2. Analiza signal	28
3.2.1. Kalibracija scintilacionog detektora	29
3.2.2. Unutrašnja efikasnost detektora	29
3.2.3. Efikasnost detekcije elektrona	30
3.3. Tečni scintilacioni detektor - <i>Quantulus 1220</i>	30
3.3.1. Zaštita detektora	30

3.3.1.1. Aktivna zaštita	31
3.3.1.2. Pasivna zaštita	32
3.3.2. Višekanalna analiza	32
3.3.3. Princip rada	33
3.3.4. Program <i>Win Q</i>	34
4. Metode pripreme uzorka za merenje koncentracije tricijuma	37
4.1. Priprema i obrada uzorka pre hemijske analize	37
4.2. Direktna metoda pripreme uzorka vode za merenje tricijuma	38
4.2.1.1. Aparatura	38
4.2.1.2. Hemikalije	39
4.2.2. Priprema uzorka	39
4.2.3. Kalibracija	40
4.2.4. Metoda analize	40
4.3. Elektrolitičko obogaćenje uzorka vode za merenje tricijuma	41
4.3.1.1. Aparatura	41
4.3.1.2. Hemikalije	41
4.3.2. Priprema uzorka	41
4.3.4. Metoda analize	41
5. Rezultati merenja i diskusija	43
5.1. Prikupljanje uzoraka	43
5.2. Klaibracija sistema ASTM metodom	43
5.2.1. Efiksanost detektora	46
5.2.2. Recovery faktor	47
5.2.3. MDC	47
5.3. Eksperimentalna potvrda ASTM metode	50
6. Zaključak	54
Literatura	56
Biografija	59

SPISAK SLIKA

Br.		Str.
Slika 2.1.	Podela izotopskih efekata	16
Slika 2.2.	Procentualni udeo površinskih/podzemnih voda	20
Slika 2.3.	Klasifikacija podzemnih voda	22
Slika 3.1.	Podela scintilatora	24
Slika 3.2.	Specifičnosti hemijske veza za organske scintilatore sa tečnim rastvorm	26
Slika 3.3.	Fotomultiplikator	27
Slika 3.4.	Histogram	28
Slika 3.5.	Oblici izlaznih signala	29
Slika 3.6.	Quantulus 1220	31
Slika 3.7.	Fon - uzorak	31
Slika 3.8.	Pasivna zaštita kod detektura <i>Quantulus 1220</i>	32
Slika 3.9.	Princip premeštanja tacni sa bočicama	33
Slika 3.10.	Prostor za merenje	33
Slika 3.11.	Prozor <i>Win Q</i>	34
Slika 3.12.	<i>General Parameters</i> – prvo zaglavljje	34
Slika 3.13.	<i>MCA & Window Serrings</i> – drugo zaglavljje	35
Slika 3.14.	<i>Sample Parameters</i> – treće zaglavljje	35
Slika 4.1.	Aparatura za filtraciju	38
Slika 4.2.	Aparatura za destilaciju	39
Slika 5.1.	Destilacija	43
Slika 5.2.	DRW uzorci	43
Slika 5.3.	Grafik MDC-a	45
Slika 5.4.	Rezultati MDC-a	45

SPISAK TABELA

Br.		Str.
Tabela 1.1.	Pregled elemenata nastalih veštačkim putem	12
Tabela 1.2.	Vreme života nekih prirodnih radioaktivnih izotopa i njihovih potomaka	13
Tabela 1.3.	Period poluraspada kosmogenih izotopija	15
Tabela 2.1.	Efikasni presek za zahvat termalnih neutrona	17
Tabela 3.1.	Poređenje organskih i neorganskih scintilatora	25
Tabela 3.2.	Primer 1 – Prikaz unetih parametara prilikom merenja background (DRW) uzorka.	36
Tabela 3.3.	Primer 2. – Prikaz unetih parametara prilikom snimanja spektara za određivanje MDC (minimalna detektibilna koncentracija aktivnosti)	36
Tabela 5.1.	Odbroj dobijen pri merenju MDC-a	44
Tabela 5.2.	Rezultati dobijeni pri merenju DRW-a	44
Tabela 5.3.	Rezultati dobijeni za merenje DWTS-a	45
Tabela 5.4.	Rezultati dobijeni za merenje DRWTS-a	47
Tabela 5.5.	Rezultati dobijeni za MDC putem dve metode, u okviru pola godine	49
Tabela 5.6.	Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Savi kod Sremske Mitrovice	50
Tabela 5.7.	Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Savi kod Beograda	50
Tabela 5.8.	Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Dunavu kod Bezdana	51
Tabela 5.9.	Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Dunavu kod Novog Sada	51

Veliku zahvalnost dugujem svim članovima katedre za nuklearnu fiziku, koji su mi otvorili vrata ove moćne oblasti: Prof. dr Ištvanu Bikitu, Prof. dr Miroslavu Krmaru, Prof. dr Dušanu Mrđi, Prof. dr Jaroslavu Slivki, Prof. dr Miroslavu Veskoviću.

Posebnu zahvalnost dugujem Prof. dr Nataši Todorović na velikoj pomoći i posvećenosti pri realizaciji eksperimentalnog dela rada.

Takođe se zahvaljujem Prof. dr Maji Stojanović, pre svega što je pristala da bude član komisije, ali i na vedrini i veselom duhu koji je ulepšao studentske dane.

Svom mentoru, Doc. dr Jovani Nikolov, najiskrenije se zahvaljujem na savetima prilikom odabira teme, pomoći pri realizaciji rada, ali i otkrivanju svih pravopisnih grešaka koje sam obilato pravila.

Hvala

Mami

... na optimizmu,
zaraznom,
najčešće neosnovanom;

Tati

... na upornosti,
bio si toliko dosadan
da sam ... morala;

Emi

na pletenici,
'šuškanju',
... postojanju;

Prijateljima

bili ste velika podrška,
... ali i spoticaj.

Autor

1. Uvod

Tricijum (3H) predstavlja radioaktivni izotop vodonika, nastao interakcijom kosmičkog zračenja i azota u slojevima atmosfere. Raspada se beta raspadom uz oslobođanje male energije, $E_{max} = 18,6 \text{ keV}$ (*Theodorsson P.* 1996.). Vreme poluraspara tricijuma iznosi $(4500 \pm 8) \text{ dana}$ (*Lucas and Unterweger*, 2000.). Tricijum gradi hemijske veze sa drugim elemetima na isti način kao i vodonik. Najznačajnija veza vodonika je sa vodom H_2O . Voda koju tricijum gradi sa kiseonikom zove se tricijumska, a hemijski se ova veza označava kao $'H^3HO$ ili HTO . Pošto je ulaz tricijuma u sastav svih jedinjenja sa vodonikom nesmetan, mora se vršiti detekcija na prisustvo ovog radioaktivnog izotopa. I pored toga što je slab beta emiter može da izazove zdravstvene promene ukoliko uđe unutar živog organizma.

Pored javne žaštite analiza tricijuma ima primenu i u oblasti industrije. Praćenjem prisustva tricijuma vrši se monitoring nuklearnih postrojenja. Vrše se merenja vezana za hidrogogeologiju, protok vode, praćenje reka ponornica, određivanja starosti bunara, brzinu vodotokova.

Tricijum koji se danas meri nije u potpunosti kosmičkog porekla. Velika količina ovog izotopa nastala je i uticajem čoveka, odnosno testovima nuklearnog oružja, čijom se prilikom oslobođa. Danas više nisu moguća merenja vezana za određivanje starosti sa površinskim vodama baš zbog povećanja sadržaja tricijuma. Međutim, ovaj metod, datiranja starosti, je dobar za određivanje starosti podzemnih voda. Ukoliko podzemna voda nema tricijuma, znači da je mlađa od 100 godina i kao takva može se zaključiti da se ne dopunjava i da će takav izvor brzo presušiti. Međutim ukoliko postoji određena količina tricijuma, takav rezervoar vode je star i dopunjava se. Značaj poznавanja prisustva tricijuma se ponajviše ogleda u nalaženju izvora kvalitetne i zdravstveno ispravne vode za piće, kako bi se omogućilo vodosnabdevanje naselja i industrijskih postrojenja (*Kiurski J.* 2008.). Pored snabdevanja industrije sa zdravstveno ispravnom vodom, vrši se monitoring tricijuma u vodi oko nuklearnih objekata kako bi se uočilo curenje i sprečila kontaminacija okoline. Naravno, od izuzetnog značaja je obezbeđivanje neradioaktivne vode i za navodnjavanja poljoprivredno zemljište, ali i za praćenje procesa odvodnjavanja močvarnih područja (*Veljković N.* 2009.).

Za detekciju tricijuma se koriste gasni proporcionalni brojači i tečni scintilacioni detektori. Daleko je veća primena tečnih scintilacionih detektora, pošto se merenja izvode direktno, nije komplikovan i dugačak predtretman (postupak pripreme uzorka za merenje), a i efikasnost je veća u odnosu na gasni (*Noakes J. E. i De Filippis S.* 1988.). Za uzorke koji imaju malu koncentraciju tricijuma treba uraditi elektrolitičko obogaćenje.

U radu je najpre prikazana kalibracija tečnog scintilacionog detektora *Quantulus 1220*, zatim su objašnjena dve metode pripreme uzorka za određivanje koncentracije aktivnosti tricijuma u vodi, ***direktna metoda i elektrolitičko obogaćenje***.

1. Prirodna radioaktivnost

Radioaktivnost je spontana pojava transformacije nestabilnih izotopa jednog hemijskog elementa u izotope drugog elementa koja je praćena emisijom nekih čestica (α, β) i γ zračenja. Promena koja nastaje može biti detektovana kao promena sastava jezgra ili energetskog stanja (emisija čestica). U slučajevima kada transformacija jezgra iznedri novu tvorevinu koja ne može da egzistira duže od 10^{-12} s, ne može se govoriti o radioaktivnosti. Usvojeno je da se svi procesi u kojima potomak živi kraće od 10^{-12} s (trenutni raspadi) ne smatraju radioaktivnošću (Pešić J. 2013.).

Sva jezgra se mogu podeliti na dva tipa, radioaktivna i stabilna. Ne postoji tačno utvrđena granica između ova dva tipa jezgara, ali se može reći da su stabilna jezgra, jezgra sa veoma velikim periodom poluraspada, koji se praktično ne može eksperimentalno izmeriti.

1.1. Zakon radioaktivnog raspada

Jezgro nije mikroskopski objekat, što onemogućava direktno merenje. Proces transformacije jezgra je statistički. Trenutak raspada jezgra ne može se odrediti, ali se može odrediti broj jezgara koja se raspadnu u određenom intervalu vremena. Verovatnoća raspada radioaktivnog jezgra je određena priodom samog jezgra i može se smatrati konstantnom za dato jezgro pošto na brzinu raspada ne utiču spoljni uticaji. Konstanta radioaktivnog raspada λ , predstavlja verovatnoću da se neko radioaktivno jezgro raspadne u jedinici vremena. Ova konstanta omogućava dobijanje informacije o srednjem životu nestabilnog jezgra τ (Krmar M. 2013.) što je dato izrazom 1.1.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1.1.)$$

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

τ – srednji život jezgra.

Analizom dinamike raspada velikog broja jezgara uočene su neke pravilnosti koje su dovele do nastanka zakona radioaktivnog raspada (Krmar M. 2013.), što je dato izrazom 1.2.

$$dN = -\lambda N dt \quad (1.2.)$$

dN – promena broja jezgara,

N – početni broj radiaktivnih jezgara,

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

dt – vremenski interval.

Integracijom jednačine 1.2. dobija se eksponentijalna zavisnost kod zakona radioaktivnog raspada prikazana izrazom 1.3. (Krmar M. 2013.).

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3.)$$

N – broj radioaktivnih jezgara nakon

t – vremena,

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

N_0 – početni broj jezgara.

Period poluraspada predstavlja vreme za koje se početni broj jezgara smanji za pola. Što znači da će za isto vreme i aktivnost uzorka pasti za pola. Veza perioda poluraspada i zakona radioaktivnog raspada data je jednačinom 1.4. (*Krmar M. 2013.*).

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.4.)$$

$T_{1/2}$ – period poluraspada

λ – konstanta radioaktivnog raspada.

1.2. Aktivnost

Broj raspada jezgra u jedinici vremena daje informaciju o broju raspada, odnosno aktivnosti uzorka, izraz 1.5. (*Krmar M. 2013.*).

$$\begin{aligned} -\frac{dN}{dt} &= \lambda N \\ A &= \lambda N \end{aligned} \quad (1.5.)$$

A – trenutna aktivnost,

dN – promena broja jezgara,

dt – vremenski interval

λ – konstanta radioaktivnog raspada,

N – broj preostalih radioaktivnih jezgara.

Broj raspada u jedinici vremena za dati izotop predstavljen je konstantom – konstanta raspada λ , zavisi samo od količine radioaktivnog elementa (broja radioaktivnih atoma) N . Jedinica za aktivnost je Bekerel¹ (Bq), predstavlja aktivnost radioaktivnog izvora u kojem se u jedinici vremena raspadne jedno jezgro. Pored Bekerela koristi se još Curie² (Ci ; aktivnost $1g^{226}Ra$) i iznosi $3.7 \cdot 10^{10} s^{-1}$ (*Theodorsson P. 1996.*).

Ukoliko se nekom radioaktivnom uzorku zna masa, broj jezgara, molarna masa, može se odrediti aktivnost prema formuli 1.6. (*Krmar M. 2013.*).

¹ *Anri Bequeler* (1852 – 1908.) francuski fizičar i član Pariske akademije nauka. Bavio se optikom i radioaktivnošću. Otkrio je pojavu spontanog zračenja uranijuma i nazvao je radioaktivnost. Za ovo otkriće je 1903. god. dobio Nobelovu nagradu zajedno sa bračnim parom Curie.

² *Pierre Curie* (1858 – 1906.) francuski fizičar i član Pariske akademije nauka. Bavio se radioaktivnošću, fizikom kristala i magnetizmom. Dobitnik je Nobelove nagrade 1903. zajedno sa M. Curie i A. Bequeler.

Maria S. Curie (1867 – 1934.) francuski fizičar (poreklom iz Poljske), direktor Instituta za radijum u Parizu. Naučni rad bazirala je na nuklearnoj fizici i hemiji. Dobila je Nobelovu nagradu 1903. sa P.Curiem i A. Bequeler, a 1911. Nobeovu nagradu za fiziku i hemiju.

$$A = \lambda \frac{mN_A}{M} \quad (1.6.)$$

A – trenutna aktivnost,
 λ – konstanta radioaktivnog raspada,
 m – masa,
 M – molarna masa,
 N_A – Avogadrov broj.

Aktivnost se može predstaviti i u eksponencijalnom obliku prema izrazu 1.7. (*Krmar M. 2013.*).

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.7.)$$

A – trenutna aktivnost,
 A_0 – početna aktivnost,
 t – vreme koje je prošlo od A_0 do A
 λ – konstanta radioaktivnog raspada.

1.3. Jonizacijono zračenje

Da bi neka čestica izazvala zračenje mora posedovati energiju veću od energije jonizacije sredine kroz koju prolazi. Prolazak zračenja kroz sredinu najčešće se smatra jonizacijom, jer je najdominantniji efekat koji proizvodi zračenje, jonizacija. Radioaktivni izvori najčešće emituju alfa, beta i gama zračenje (*Marinkov L. 2010.*).

- α zračenje se sastoji od dvostruko pozitivno nanelektrisanih čestica (dva protona i dva neutrona) identično kao kod helijuma. Kreću se brzinom od oko 1/20 brzine svetlosti, što je dovoljno sporo da mogu relativno dugo vršiti interakciju sa materijom. Zato imaju veliki jonizacioni potencijal. Zbog svoje veličine brzo se sudaraju sa nekim od atoma i gube energiju, pa im je domet mali (nekoliko cm), a zaustavlja ih već koža ili komad papira. Međutim, ako se unesu u organizam hransom ili udisanjem, mogu biti opasne zbog svog jakog jonizacionog delovanja.

- β zračenje čine elektroni, negativno nanelektrisane čestice, koje putuju velikim brzinama. Beta raspod predstavlja jednu od transformacija koje jezgro može da doživi (pored alfa i gama raspada), odnosno emisiju elektrona iz radioaktivnog jezgra. Pri beta raspodu jezgro može da emituje beta česticu sa pozitivnim ili negativnim nanelektrisanjem, ili da zahvati elektron iz atomske orbite. Beta raspod dozvoljava mogućnost da u jezgru dođe do promene u sastavu nukleona (transformacija neutrona u proton i obrnuto), čime je ustanovljeno postojanje dva tipa elektrona (*Janić I. 1992.*):

- elektroni nastali raspodom jezgra – *beta zraci* (imaju kontinualan energetski spektar) i
- elektroni koji se nalaze na atomskim orbitalama – *konverzioni* (njihov spektar je monoenergetski).

Kod detekcije tricijuma (koji je beta emiter) meri se emisija elektrona potekla sa orbitala (*Theodorsson P. 1996.*). Jonizaciono delovanje β zračenja je znatno slabije od delovanja α zračenja, ali mu je domet u vazduhu značajno veći (nekoliko m). Zaustavlja ga metalna ploča od nekoliko mm debljine. U ljudsko telo prodire do nekoliko centimetara dubine.

Opasno je za zdravlje ako se izvor unese u organizam (kao što je slučaj sa vodom sa povišenim sadržajem tricijuma).

- γ zračenje je elektromagnetsko zračenje velike energije, koje potiče iz jezgra atoma, čija je brzina kretanja jednaka brzini svetlosti. Njegovo ionizujuće delovanje je još slabije od delovanja β zračenja, ali mu je domet veći. Prolazi kroz ljudsko telo, a može se redukovati pomoću debelog sloja olova, betona ili vode.

1.4. Veštačka radioaktivnost

Veštački radioizotopi proizvode se u različitim nuklearnim reakcijama. Prvi put je veštačka radioaktivnost dobijena 1933. god. kada su Frederic Joliot³ i Irena Curie - Joliot⁴ bombardovali α česticama (polonijuma) mete bora B , aluminijuma Al , i magnezijuma Mg . Primetili su da se nastala emisija pozitrona nastavlja i po prestanku bombardovanja emisijom nastalog radioaktivnog produkta raspada nastaje stabilan izotop:

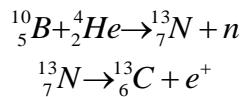


Tabela 1.1. Pregled elemenata nastalih veštačkim putem.

atomski broj	naziv elementa	oznaka	atomski broj	naziv elementa	oznaka
93	neptunijum	Np	106	siborgijum	Sb
94	plutonijum	Pu	107	bohrijum	Bh
95	americijum	Am	108	hasijum	Hs
96	kirijum	Cm	109	meinterijum	Mt
97	berklijum	Bk	110	darmstadijum	Ds
98	kalifornijum	Cf	111	rentgenijum	Rg
99	ajnštajnjum	Es	112	kopernicijum	Cn
100	fermijum	Fm	113	ununtrium	Uut
101	mendeljejevijum	Md	114	ununquadium	Uuq
102	nobelijum	No	115	ununpentium	Uup
103	lorencijum	Lr	116	ununhexium	Uuh
104	ruterfordijum	Rf	117	ununseptium	Uus
105	dubnijum	Db	118	ununoctium	Uuo

Vremenom istraživači su došli na ideju da stvore nova jezgra, novi niz, čiji bi smer bio nešto drugačiji od smera tri postojeća niza. Naime, ideja je bila sledeća: ukoliko bi neko jezgro bilo izloženo dejstvu nukleona odgovarajuće energije (dovoljno velike da nukleoni savladaju Coulumb⁵ barijeru, a ipak dovoljno male da ne pobegnu kad je savladaju), deo nukleona bi ostao

³ Frederic Joliot (1890 – 1958.) francuski fizičar i član akademije nauke. Naučni rad je posvetio nuklearnoj fizici i hemiji. Zajedno sa suprugom I. Curie dobio je 1935. godine Nobelovu nagradu za otkriće veštačke radioaktivnosti.

⁴ Irena Curie – Joliot (1897 – 1956.) francuski fizičar i radiohemičar. Bila je direktor Instituta za radijum u Parizu. Istraživanja je posvetila otkrivanju veštačkih radioaktivnih izotopa, za koja je dobila Nobelovu nagradu.

⁵ Charles Coulomb (1736 – 1806.) francuski fizičar i član Pariske akademije nauka. Njegov istraživački rad je osnova elektromagnetizma.

zahvaćen u jezgru. Tom prilikom bi se stvorilo novo jezgo, složeno jezgro. Složeno jezgro se nalazi u pobuđenom stanju i ono emitiše višak energije nekim raspadom, sve dok ne dođe u stabilno stanje. Način raspada takvog jezgra je nezavisan od načina kako je ono nastalo. Odnosno, ovo otvara mogućnost nastanka nekog sasvim novog jezgra, odnosno elementa, koji se razlikuje od jezgra izlaganom dejstvu nukleona.

Ukoliko se za početno jezgro koje izlažemo dejstvu nukleona uzme najveći postojeći element na Zemlji – uranijum, dobija se prvi transuranski element – neptunijum. Izlaganjem u ovom slučaju pretka jezgra uranijuma – neptunijuma, nukleonima dobija se plutonijum... (primer: $^{238}U + n \rightarrow ^{239}U \rightarrow ^{239}Np \rightarrow ^{239}Pu\dots$). Nastanak elemenata sa ovako velikim atomskim brojem, moguć je u procesima neutronskog zahvata ili beta raspadom. Teže transuranske elemente je teže i skuplje dobiti u laboratorijama, sa porastom atomskog broja cena dobijanja raste i za nekoliko redova veličine, a pri tom dobijene količine su merljive samo pod mikroskopom (Pešić J. 2013.).

Tabela 1.2. Vreme života nekih prirodnih radioaktivnih izotopa i njihovih potomaka.

Radioaktivni izotop - predak	Potomak	Vreme poluraspada [godina]
Samarijum-147	Neodijum-143	$106 \cdot 10^9$
Rubidijum-87	Stroncijum-87	$48.8 \cdot 10^9$
Renijum-187	Osmijum-187	$42 \cdot 10^9$
Lutecijum-176	Hafnijum-176	$38 \cdot 10^9$
Torijum-232	Olovo-208	$14 \cdot 10^9$
Uranijum-238	Olovo-206	$4.5 \cdot 10^9$
Kalijum-40	Argon-40	$1.26 \cdot 10^9$
Uranijum-235	Olovo-207	$7 \cdot 10^8$
Berilijum-10	Bor-10	$1.52 \cdot 10^6$
Hlor-36	Argon-36	300 000
Ugljenik-14	Azot-14	5730
Uranijum-234	Torijum-230	248 000
Torijum-230	Radijum-226	75 400

Praktično stvoren je inverzni niz, odnosno transuranski. Transuranskim elementima se smatraju svi elementi sa atomskim brojem Z većim od 92, a do danas ih je poznato 25. Jedina prepreka u nastanku njihovog većeg broja je postizanje adekvatnih energija u akceleratorima, za veća jezgra teba i veća energija. Sa napredovanjem tehnike i njihov broj će rasti u budućnosti.

1.5. Prirodna radioaktivnost

Na Zemlji postoji ukupno oko 330 izotopa (90 hemijskih elemenata) (Miljanic Š. 2008.). Od toga, stabilnih izotopa je 270, a ostali su nestabilni-prirodno radioaktivni. Zračenja koja nastaju raspadom ovih prirodno radioaktivnih izotopa čine prirodnu radioaktivnost u našoj okolini. Njihovi periodi poluraspada su veliki, odnosno tempo raspada je spor. Elementi sa rednim brojem od 84 – 92 uopšte nemaju stabilnih izotopa. Samo neki dugoživeći izotopi su opstali i postoje i danas u prirodi. Ta jezgra koja još uvek postoji i nisu se u potpunosti raspala mogu da se grupišu u familije, ili nizove, a nastaju raspadom $^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$, $^{232}_{90}Th$:

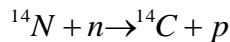
- Uranijum-radijumski niz
- Uranijum-aktinijumska niz
- Torijumska niz

1.6. Kosmogeni radioizotopi

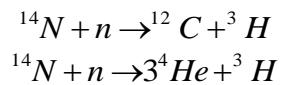
Radioaktivni elementi mogu nastati putem raspada tri osnovna prirodna niza radioaktivnih elemenata (uranijum-radijumskog, uranijum-aktinijumskog i torijumskog niza). Pored toga do stavranja radioaktivnih elemenata može doći i pod dejstvom kosmičkog zračenja. Radioaktivni izotopi koji nastaju putem raspada prirodnih nizova predstavljaju srednje teška jezgra, dok izotopi nastali kosmičkim zračenjem spadaju u luke elemente.

Kosmičko zračenje koje se uglavnom sastoji od piona i alfa čestica deluje ne pojedine delove gasne smeše koja čini atmosferu, a koju najvećim delom čini kiseonik O_2 i azot N_2 (Gaisser T. 1990.). Kosmičko zračenje uništava postojeće molekule gasa i na taj način oslobađa neutrona. Slobodni neutroni deluju na druge molekule i ukoliko dođe do neutronskog zahvata od strane drugih elemenata nastaje izotop koji se raspada nekom brzinom.

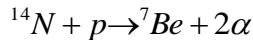
Ukoliko su slobodni neutroni spori delovače na jezgra azota i nastaje izotop ugljenika ^{14}C , sa periodom poluraspada od 5730 godina,



Brzi neutroni će ukoliko budu zahvaćeni od strane azota dati izotop tricijuma (sa periodom poluraspada od 12.33 godina) u sledeće dve moguće reakcije:

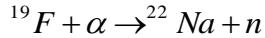


Isto zahvatom protona od strane jezgra azota može nastati izotop berilijuma čiji je period poluraspada 55.3 dana:

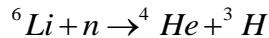


U reakciji azota i kosmičkog zračenja nastaju (Tykva R. 2004.): 3H , 4H , ^{12}C , ^{14}C i 7Be .

Međutim, neki laci izotopi kao posledica dejstva kosmičkog zračenja mogu nastati i na površini zemlje, a ne samo u atmosferi (Povinec P. P. 1992.). Tako nastaje izotop natrijuma sa periodom poluraspada od 2 605 godina, usled delovanja alfa zračenja na fluor:



Na ovaj način može da se stvori i izvesna količina tricijuma, pri neutronskom zahvatu na litijumu koji se nalazi u zemlji:



Osim putem kosmičkog zračenja postoji i mala količina radioaktivnih izotopa koja ima poreklo iz meteorita.

Izotopi koji su nastali putem kosmičkog zračenja na Zemlju su: *Be* (vreme poluras pada ^{10}Be je 1.51×10^6 godina), *Al*, *Mn*, *Na*, *Si*... ali njihov udio je veoma mali, a takođe nisu svi radioaktivni.

Tabela 1.3. Period poluras pada kosmogenih izotopija.

izotop	$t_{1/2}$
3H	12.33 g
7Be	53.3 d
^{10}Be	1.51×10^6 g
^{14}C	5 730 g
^{22}Na	2.6 g
^{26}Al	7.17×10^5 g
^{32}Si	172 g
^{32}P	14.26 d
^{36}Cl	3.08×10^5 g
^{39}Al	269 g
^{53}Mn	3.74×10^6 g
^{59}Ni	7.6×10^4 g
^{81}Kr	2.29×10^5 g

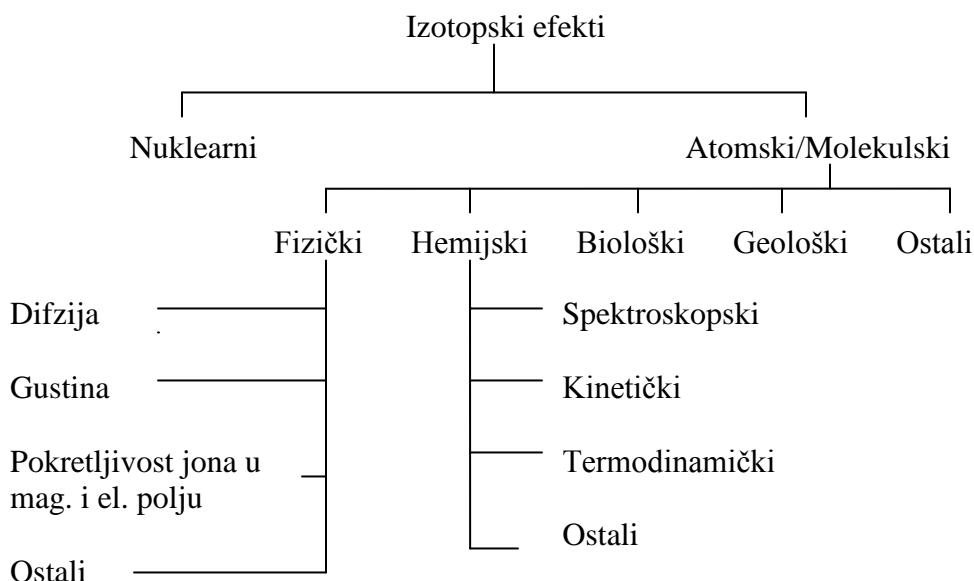
U tabeli 1.3. dat je pregled svih izotopa koji nastaju interakcijom kosmičkog zračenja sa već postojećim izotopima u atmosferi. Period poluras pada ne zavisi od načina kako je izotop nastao i može imati vrednost od 53,3 dana (7Be) do 3.74×10^6 godina (^{53}Mn).

2. Tricijum 3H

2.1. Hemija izotopa

U hemiji postoji oblast, *hemija izotopa*, koja se bavi svojstvima izotopa i njihovim ponašanjem u hemijskim (ali i nekim nehemijskim) procesima, praćenjem njihovih karakterističnosti i efekata koji se manifestuju (Miljanović Š. 2008.). Naravno, prvo se pomisli na stabilne izotope, ali postoji i značajna grupa radioaktivnih izotopa (u koju spada i sam tricijum). Ova oblast hemije bavi se pojavnama koje se javljaju zbog specifične različitosti među izotopima (forma u kojoj se neki izotop može pojaviti atom, molekul, jon; sistematika izotopa). Hemija izotopa, konkretno, se bavi izotopskim efektima, ali i metodama separacije i izotopske analize.

2.1.1. Izotopski efekti



Slika 2.1. Podjela izotopskih efekata.

Pod pojmom *izotopski efekti* podrazumevaju se razlike koje izotopi nekog elementa ispoljavaju u svojim svojstvima ili ponašanjima u fizičkim, hemijskim, biološkim, geološkim ili nekim drugim procesima (Miljanović Š. 2008.). U principu, svi izotopski efekti potiču od razlika u svojstvima izotopskih jezgara, pre svega razlike u masi (i spinu). Uslovna podjela izotopskih efekata data je na slici 2.1. što se grubo može podeliti na tri oblasti:

- nuklearni efekti izotopa,
- fizički efekti izotopa i
- hemijski efekti izotopa.

2.1.2. Nuklerani efekti izotopa

Nuklearni izotopski efekti odnose se na ponašanja jezgara u nuklearnim procesima i na nuklearna svojstva: spin, efikasni preseci za zahvat čestica itd. Pojava *ortho-para* varijeteta kod molekula vodonika je npr. posledica razlika u nuklearnom spinu. Ova vrsta efekata je posledica ne samo razlika u masama jezgara već i u njihovim strukturama. Izotopski efekat se oseća i u razlici za efikasni presek pri zahvatu termalnih neutrona kod izotopa istog elementa (u tabeli 2.1. date su karakteristične vrednosti za efikasni presek kod važnijih izotopa). Neke od posledica, u razlici efikasnog preseka za izotope, ogledaju se i u oblasti nuklearne energetike; tako da je teška voda bolji moderator od lake, a i ^{235}U je podložniji fisiji nego ^{238}U .

Tabela 2.1. Efikasni presek za zahvat termalnih neutrona.

Nuklid	σ, b
1H	0.332 (n, γ)
D	$3.2 \cdot 10^{-4}$ (n, γ)
6Li	942 (n, α)
7Li	0.0045 (n, γ)
^{235}U	582.8 (fis.)
^{238}U	2.7 (n, γ)

Pod nuklearne efekte izotopa spadaju i atomski (molekulski) efekti izotopa koji se odnose na opšte ponašanje atoma kao celine, bio posmatrani izotop slobodan, ili vezan u molekulu. Izotopski efekti mogu da se izraze i kvantitativno, kao razlika dva izotopa, ili češće kao, odnos veličina kojima se izražavaju svojstva izotopskih atoma (molekula). I pored toga što su izotopski efekti mali, oni se mogu meriti. Upravo, ovako mala, ali merljiva razlika je suštinska kod metoda za razdvajanje, analizu i izdvajanje izotopa iz prirodnih (i veštačkih) smeša.

Izotopski efekti rastu sa porastom atomske mase. Najveća razlika je kod vodonikovih izotopa, pošto su za njih najveće razlike masa.

Atomska razlika za vodonik i deuterijum je: $\frac{A_D}{A_H} = \frac{2}{1} = 2$

Za tricijum i vodonik: $\frac{A_T}{A_H} = \frac{3}{1} = 3$

Za sve druge elemente razlika u relativnim atomskim masama je manja, tako da već za litijum iznosi: $\frac{A_{^7Li}}{A_{^6Li}} = 1.167$, a za uranijum $\frac{A_{^{238}U}}{A_{^{235}U}} = 1.013$

2.2. Tricijum

Vodonik predstavlja najjednostavniji element u Periodnom sistemu. Jedan atom vodonika se sastoji od jednog protona i jednog elektrona. Predstavlja najlakši element i nalazi se u gasnom stanju pri standarnim uslovima (*Rauscher, A. Patkos, 1995.*).

Vodonik je takođe najzastupljeniji gas u Univerzumu i izvor energije u zvezdama. Nama najbliža zvezda, Sunce, praktično je džinovski balon od vodonika i helijuma. U procesu fuzije četiri vodonikova atoma se spajaju i stvaraju atom helijuma pri čemu se oslobađa energija, radijacijom. Nastanak energije procesom fuzije je jedan od najpouzdanih (*The NEED Project, 2012.*)

Na Zemlji se vodonik nalazi samo u vezanom stanju, najčešće u obliku gasa H_2 i vode H_2O , međutim može se vezati i za druge elemente kao što je ugljenik (kod organskih molekula, kiselina, baza...).

Kako vodonik ima jedan proton i elektron vidi se da izotopi mogu nastati dodatkom neutrona. Ukoliko vodonikovo jezgro primi jedan neutron nastaje deuterijum, dok sa proširenjem vodonika sa dva neutrona stvara jezgro tricijuma (*The WSRC Team, 2005.*). Vidi se da su za jedno malo jezgro kao što je vodonik previše dva neutrona tako da se može intutivno zaključiti da nije stabilno. Period raspada vodonikovog izotopa, tricijuma iznosi 12.33 godina. Raspadom se emituje mala količina beta zračenja.

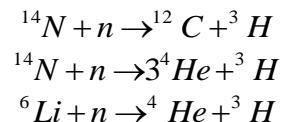
U prirodi postoje tri izotopa vodonika, to su elementi sa različitom atomskom masom, a isti atomski broj, tako da razlikujemo (*Perišić-Janjić N. 1993.*):

- vodonik ${}_1^1H$,
- deuterijum ${}_1^2H$,
- tricijum ${}_1^3H$.

Ko i vodonik, deuterijum i tricijum se vezuju sa kiseonikom i tvore vodu. Voda nastala kombinacijom tricijuma i kiseonika naziva se tricijumska voda (tricijum – oksid ${}^1H^3HO$) i radioaktivna je. Tricijum – oksid je identičan sa regularnom vodom, tako da se ne može uočiti organoleptičkom analizom ili izdvojiti filtracijom (*The WSRC Team, 2005.*).

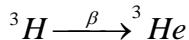
2.3. Značaj tricijuma

Kao što je već bilo rečeno tricijum nastaje usled delovanja kosmičkog zračenja pri čemu nastaju slobodni neutroni koji bivaju zahvaćeni od strane jezgara azota u vazduhu, ali i usled neutronskog zahvata na litijumu koji se nalazi u zemljишtu:



Ovaj radioaktivni izotop ima vreme poluraspada od 12.33 godina i prisutan je najvećim delom u vodi. Prisutan je u morskoj vodi, površinskim izvorima i podzemnoj vodi, ali kao izotop preko kog se određuje starost primenjuje se samo na mlađim podzemnim vodama i ponekad na morskoj vodi, pošto površinska voda se stalno obnavlja sa svežim količinama radioaktivnog tricijuma, pa podaci za starost takvih voda nisu validni.

Radioaktivni izotop vodonika, tricijum raspada se na helijum 3He beta raspadom.



Koncentracija tricijuma 3H u površinskim vodama je veoma mala i u odnosu sa vodonikom daje doprinos od 10^{-18} . Ovako mala koncentracija dobila je i jedinicu koja nosi naziv 'tricijumska jedinica' (*TU - Tritium Unit*). Jedna tricijumska jedinica odgovara odnosu jednog atoma tricijuma u 10^{18} atoma vodonika. Ovo odgovara 0.188 raspada u sekundi po litru vode, tj specifična aktivnost iznosi 0.188 Bq/kg (Tykva R. 2004.). Aktivnost površinskih voda iznosi oko 0.12 Bq/l . Ovako malu radioaktivnost je nemoguće direktno meriti, pošto je emisija β čestica bez emisije γ zračenja.

Uzorci vode se podvrgavaju elektrolizi kako bi im se obogatio sadržaj ovog izotopa (elektroličko obogaćenje je neophodno za uzorce čija je MDC (koncentracija aktivnosti tricijuma) manja od $2,1 \text{ Bq/l}$). Ova metoda se prvo upotrebljavalala na uzorcima (vina) poznate starosti, gde je potvrdila svoju tačnost. Kako je vreme poluraspada tricijuma 12.33 godine , ovaj metod za određivanje starosti vremenski je ograničen i može se reći da je primenjiv na „mlade“ uzorke.

Veliki problem ovoj metodi zadaje činjenica da je količina tricijuma u površinskim vodama povećana u zadnjih 50 godina usled termonuklearnih eksplozija, tako da je praktično više neupotrebljiv za određivanje starosti.

Međutim, ovaj metod je dobar za određivanje starosti podzemnih voda. Ukoliko podzemna voda nema tricijuma, znači da je mlađa od 100 godina i kao takva može se zaključiti da se ne dopunjava i da će takav izvor brzo presušiti. Međutim ukoliko postoji određena količina tricijuma, takav rezervoar vode je star i dopunjava se. Ovo ima primenu, na primer kod bušotine za vodu koje se iskopavaju u Africi, kako bi se znala pouzdanost izvora vode.

Tricijum može da se koristi kao radioaktivni obeleživač. Radioaktivni obeliživači služe za praćenj kretanja nekog elementa kroz neki proces. Tako tricijum predstavlja marker u molekulu vode (^3HHO) i služi za istraživanje reka-ponornica (Vučić D. i Popov S. 2004.)

Značaj poznavanja prisustva tricijuma se ponajviše ogleda u nalaženju izvora kvalitetne i zdravstveno ispravne vode za piće, kako bi se omogućilo vodosnabdevanje naselja i industrijskih postrojenja (Kiurski J. 2008.). Naravno, od izuzetnog značaja je obezbeđivanje navodnjavanja za poljoprivredno zemljište, ali i za odvodnjavanje močvarnih područja (Veljković N. 2009.).

Tokom raspada tricijuma emituje se mala količina beta zračenja koja ne može da prodre kroz kožu i praktično je bezopasna. Zdravstveni rizik nastaje ukoliko jedinka unese radioaktivni izotop koji je beta emiter u telo, što je veoma lako izvesti jednostavnim pijenjem vode. Vreme izloženosti koje je rizično po zdravlje zavisi od oblika u kom je tricijum unet u organizam (gas ili u formi tricijumske vode). Prema Evropskoj Komisiji definisan je limit za prisutnost tricijuma u vodi i iznosi 100 Bq/l (European Commission, 1998.).

Ukoliko se udahne tricijumski gas, posledice su beznačajne, jer disanjem se izbacici veliki deo unetog izotopa, tako da u roku od par minuta prvobitna koncentracija tricijuma u organizmu opadne za $0,004 \%$ (The WSRC Team, 2005.).

U slučaju unošenja tricijumske vode, telo ne razlikuje vodu i automatski je apsorbuje u tkiva. Tricijum ostaje u organizmu dok se ne izbaci putem uobičajenih fizioloških procesa, što znači da početna koncentracija unetog tricijuma opadne za pola u okviru deset dana (proces se može ubrzati većim unošenjem vode).

Unošenjem hrane koja sadrži tricijum, tricijum se apsorbuje u obliku tricijumse vode i njegovo izbacivanje zavisi od veličine organizma (The WSRC Team, 2005.).

Tricijum raspadom dovodi do ionizacije okolnog prostora. Ukoliko se ionizacija odvija u životu organizmu može doći do ozbiljnog oštećenja i promene u ćeliji. Praveći grubu podelu, prisustvo radioaktivnog izotopa u organizmu žive jedinke može da izazove (The WSRC Team, 2005.):

- nastanak kancera,
- genetske izmene i
- promene kod fetusa.

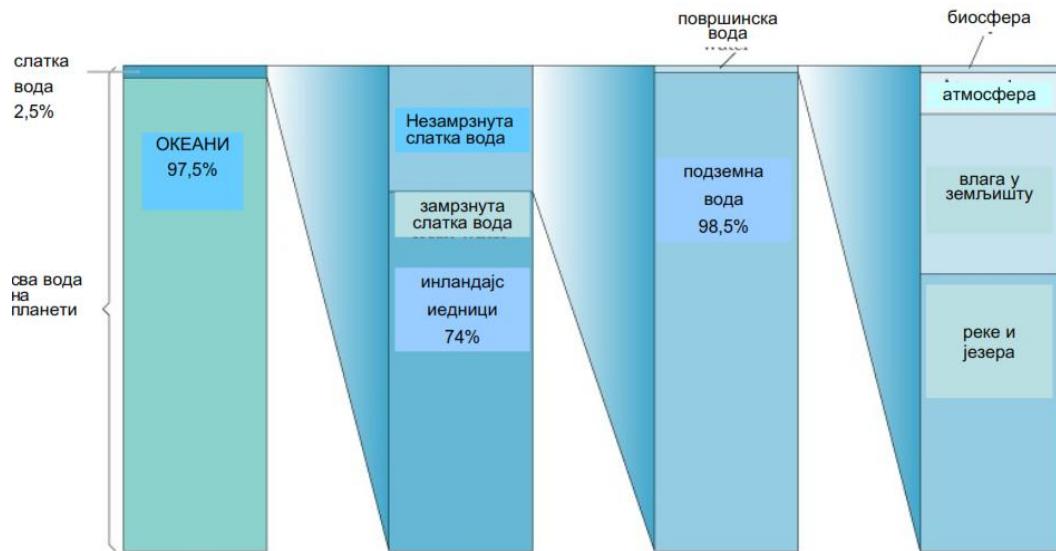
Kao što se može videti i slab beta emiter, kao što je tricijum, može da izazove promenu na DNK molekulu, zato su stručna lica i državne institucije u obavezi da propisu zakonom dozvoljen i zdravstveno bezbedan prag za graničnu vrednost radioaktivnosti u životnoj sredini. Povećanjem komercijalne proizvodnje, raste i prisustvo različitih radioaktivnih izotopa, tako da praćenje i održavanje njihove koncentracije u skladu sa propisima postaje stalna praksa (*Molak B. 1991.*).

Energija emitovana tokom beta raspada u proseku se kreće od $5.7 - 18.6 \text{ keV}$ - a, što nije velika vrednost, ali istraživanja su pokazala da energetski nisko beta zračenje može da prouzrokuje veća oštećenja nego gama zračenje visokih energija (*Straume T. i Carsten A. L. 1993.*).

Za laboratorijsku analizu određivanja starosti neophodno je oko 500-1000 ml vode. Uzorak se čuva i uzorkuje u staklenim flašama, pošto voda ne reaguje u dodiru sa stakлом (izbegavaju se plastične flaše). Flaša za skladištenje treba da bude čista i suva kako ne bi kontaminirala uzorak.

2.4. Primena u hidrogeologiji

Hidrogeologija predstavlja nauku o podzemnim vodama. Konkretna definicija hidrogeologije glasila bi da je to nauka koja se bavi nastankom i formiranjem vode, njenim kretanjem, protokom, rasprostranjenosću, principima nastanka podzemnih rezervoara, kao i oblicima egzistiranja u zemljisu (*Radovanović S. 1897.*). Osim „geografskog“ aspekta, hidrogeologija prati i fizičko-hemijska svojstva, mikrobiološki sastav i prisutnost izotopa. U hidrogeologiji su važni i stabilni izotopi, ali i radioaktivni. Određuje se radioarloški sastav, ali i definišu se uslovi i mogućnosti korišćenja i mere zaštite pri upotrebi vode (*Dragišić R. 1997.*).



Slika 2.2. Procentualni udio površinskih/podzemnih voda.

Hidrogeologija daje principe za rešavanje problema izazvanih podzemnim vodama pri izgradnji građevinskih objekata i saobraćajnica. Hidrogeologija se takođe bavi i istraživanjem

ležišta mineralnih sirovina, ali i predviđanjem njihove lokacije. Istraživanje okeana i pronađak basena mineralizovanih voda ima poseban značaj za industrijsko dobijanje sirovina kao što su: jod, litijum, natrijum hlorid, brom, stroncijum, bakar i druge. Koristi se i za dobijanje informacija o isplativosti pojedinih termalih izvora kao izvora energije za zagrevanje poljoprivrednih objekata, naselja ili čak i proizvodnju električne energije. Hidrogeologija se bavi samom ispravnošću podzemnih voda ali i njenom zaštitom.

Za ovaj rad je najbitnija veza hidrogeologije i radioaktivnosti vode. Posebana oblast radiohidrogeologije se bavi monitoringom nuklearnih sirovina i rešavanjem pitanja vezanih za upotrebu radioaktivnih voda. Hidrogeologija još propisuje i definiše uslove vezane za bezbednost radioaktivnih voda (*Dragišić R. 1997.*).

Velike potrebe za podzemnim vodama kao kompleksnom mineralnom sirovinom s jedne strane, kao i životno važan problem zaštite podzemnih voda od štetnog uticaja s druge strane, razlozi su za intenzivan razvoj hidrogeologije u današnje vreme. Hidrogeologija uključuje i niz samostalnih naučnih disciplina kao što su (*Vukmirović M. 2007.*):

- Opšta hidrogeologija,
- Regionalna hidrogeologija,
- Hidrogeohemija,
- Meliorativna hidrogeologija,
- Hidrogeologija ležišta mineralnih sirovina,
- Dinamika podzemnih voda,
- Metodika hidrogeoloških istraživanja,
- Vodosnabdevanje podzemnim vodama,
- Zaštita podzemnih voda,
- Paleohidrogeologija,
- Strukturalna hidrogeologija,
- Kriohidrogeologija,
- Hidrogeologija mineralnih voda,
- Hidrogeotermalna energija,
- Radiohidrogeologija i dr.

2.4.1. Sastav podzemnih voda

Pod sastavom vode, u ovom slučaju podzemne vode najbitniji su parametri vezani za prisutnost (*Dalmacija B. 2010.*):

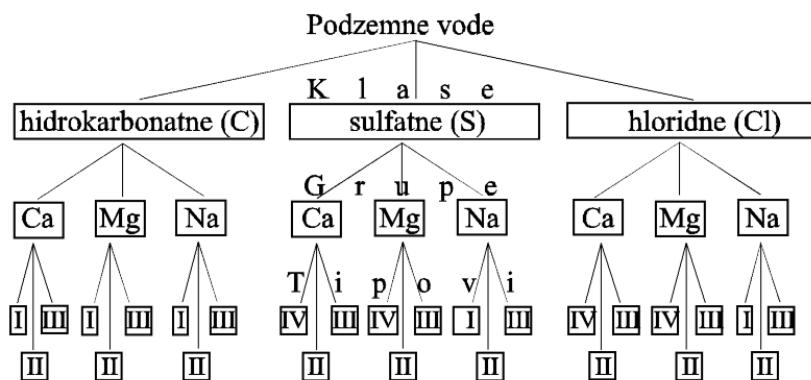
- mikrobioloških organizama,
- fizičkih nečistoća,
- hemijski elemenata i
- nuklearnih izotopa.

U nuklearnim reakcijama prilikom proba nuklearnog oružja, pri procesu dobijanja nuklearne energije i sl, stvara se niz novih radionuklida. Među njima se posebno ističu stroncijum ^{90}Sr i cezijum ^{137}Cs , koji često kontaminiraju podzemne vode i predstavljaju opasnost za zdravlje čoveka. Kada se počelo sa prvim probama nuklearnog oružja, pored stvaranja novih, došlo je do povećanja koncentracije kosmogenih radionuklida. Tako da je koncentracija tricijuma ^{3}H povećana minimalno pet puta.

Izvor radionuklida u podzemnim vodama mogu biti i agrotehničke mere kojima se vrši sistematsko obogaćivanje ^{40}K i ^{238}U iz veštačkih đubriva, a koje nije akcidentnog karaktera.

Sve podzemne vode su osim retkih izuzetaka, u određenom stepenu radioaktivne. Njihova radioaktivnost uglavnom potiče od radionuklida ^{235}U , ^{238}U i ^{232}Th . U manjem stepenu radioaktivnost potiče i od ^{40}K i ^{87}Rb (Tykva R. 2004.). Pored njih, u podzemnim vodama se javljaju i drugi radionuklidi prirodnog i veštačkog porekla.

Sadržaj radionuklida u podzemnim vodama je znatno manji nego u stenama. Najveće koncentracije radionuklida se nalaze u podzemnim vodama ležišta uranijuma.



Slika 2.3. Klasifikacija podzenih voda.

Koncentracija radionuklida u podzemnim vodama, pored njihovog karaktera, zavisi i od (Dragišić R. 1997.):

- geohemijskih uslova sredine (pH - Eh).
 - hemijskog sastava podzemnih voda,
 - mineraloškog i hemijskog sastava stena,
 - jonske zamene i dr.

Postoje radionuklidi koji se bolje ili slabije adsorbuju sa mineralnim česticama stena kroz koje se voda kreće. Izotopi ^{131}J i ^{35}S se ne adsorbuju, a ^{235}U , ^{137}Cs , ^{106}Ru i ^{90}Sr veoma malo se implementiraju u stenoviti materijal.

Radionuklidi kosmogenog porekla su najzastupljeniji u površinskim vodama. Samo putem padavina dospevaju u podzemne izvore voda. U dubljim delovima zemljine kore praktično nema prisutnosti kosmogenih radionuklidima. Praktično tricijum se sreće samo u vodenim sredinama bližim površini.

Prirodni radionuklidi najzastupljeniji u podzemnim vodama su radon, radijum i uranijum.

2.4.2. Režim kretanja vode

Po vremenu izmena nivoa i drugih elemenata, razlikuju se sledeći tipovi režima (*Vukmirović M.* 2007.):

- dnevni,
 - sezonski,
 - godišnji i
 - višegodišnji.

Dnevni režim. Karakterističan je za kolebanje slobodnog nivoa voda koje se nalaze relativno plitko ispod površine terena i može pre svega, biti izazvan dnevnim izmenama

isparavanja i transpiracije, koje se noću prekidaju, što dovodi do noćnog podizanja i dnevnog opadanja nivoa.

Sezonski režim. Uslovjen je sezonskom cikličnošću pojedinih meteoroloških faktora (temperatura vazduha, atmosferski pritisak i evapotranspiracije) i hidroloških (vodostaj i proticaj).

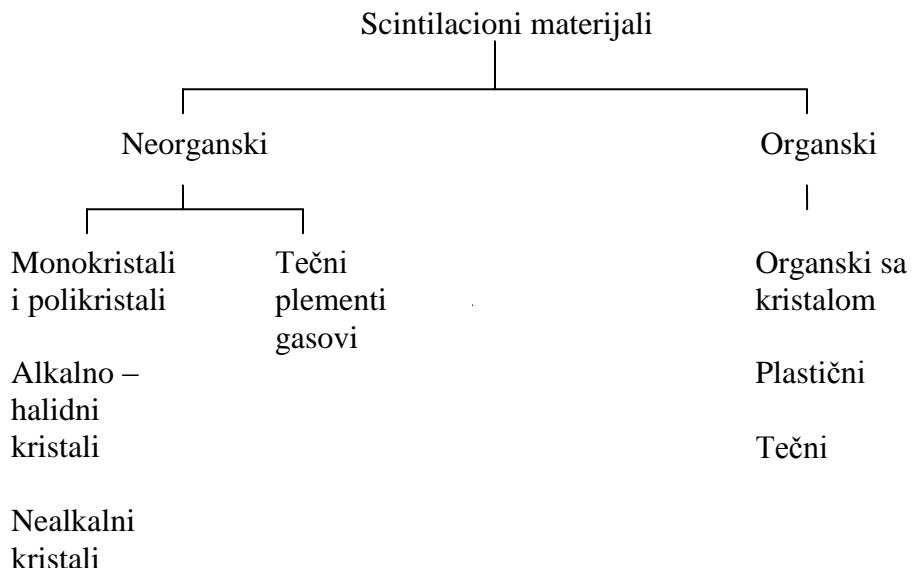
Godišnji režim. Uslovjen je cikličnim promenama određenih elemenata režima, u prvom redu režima nivoa u periodu od nekoliko godina. Amplitude godišnjih kolebanja nivoa i hemijskog sastava izdanskih voda su značajnije od sezonskih, a najčešće su izazvane cikličnim ponavljanjem vlažnih ili suvih perioda u godini.

Višegodišnji režim. Uslovjen je ciklicnim izmenama padavina, vodostaja i proticaja reka. Javlja se u periodu dužem od 10 godina. Amplitude kolebanja pojedinih elemenata režima, naročito nivoa voda, znatno prevazilaze sezonske i godišnje.

3. Niskofonski tečni scintilacioni detektor, *Quantulus 1220*

3.1. Scintilacioni detektori

Scintilatori spadaju u jedne od najstarijih tipova detektora zračenja. Jednu od prvih upotereba scintilacionog detektora izvršili su Gajger⁶ i Marsdenov⁷ u eksperimentu gde su rasejane α – čestice uočavane preko scintilacionog svetla koje su proizvodile na ZnS ekranu. Scintilaciono svetlo nastaje kada brza nanelektrisana čestica pobudi elektron u kristalu i prebací ga iz valentne u provodnu zonu (*Marinkov L.* 2010.).



Slika 3.1. Podela scintilatora.

U današnje vreme se svetlosni odziv (light output) pretvara u električni impuls koji se kasnije digitalno obrađuje. Uglavnom je cilj da se kod scintilacionih detektora dobije što veći svetlosni odziv u vidljivom delu spektra. Svetlosni odziv i vreme deekscitacije zavise od gustine ionizacije.

Scintilatori mogu da se podele u dve vrste, slika 3.1., zavisno od materijala koji se koristi kao aktivna zapremina, tako da razlikujemo scintilatore sa neorganskim kristalima i organskim materijalima. Mehanizam scintilacije je drugačiji za ove dve vrste (*Birks J. B.* 1964.).

⁶ Hans Geiger (1882 – 1945.) nemački eksperimentalni fizičar i član Berlinske akademije nauka. Radove je posvetio atomskoj i nuklearnoj fizici kao i fizici kosmičkog zračenja.

⁷ Ernest Marsden (1889 – 1970.) englesko – novozelandski fizičar i predsednik Kraljevskog društva nauke. Bavio se nuklearnim istraživanjima i detekcijom čestica. Osnovao je Departman za nauku i industrijski razvoj na Novom Zelandu.

Glavna razlika između organskih i neorganskih je u svetlosnom odzivu i brzini. Neorganski imaju veliki svetlosni odziv, ali su dosta spori, a organski imaju mali svetlosni odziv, ali veću brzinu.

Za idealni scintilator i malu jonizacionu gustinu važi da je luminescencija direktno proporcionalna energiji izgubljenoj u scintilatoru (Birkovo pravilo) (Knoll G. F. 1989.).

Obzirom na to da se čitav mehanizam scintilacionih detektora svodi na emitovane scintilacione fotone, glavno pitanje je: zašto se ti emitovani fotoni ne reapsorbuju? Naime, pošto pobuđeni elektroni idu u više vibracione nivoe singletnih traka, a deekscitovani silaze sa osnovnog singletnog nivoa, emisioni spektar je onda pomeren ka nižim energijama, odnosno višim talasnim dužinama.

Table 3.1. Poređenje organskih i neorganskih scintilatora.

	Neorganski	Organski
Zagušenja	malo	veliko
Vremenska konstanta	spor (μs)	brz (ns)
Temperaturana zavisnost	velika	mala
Gustina	u proseku velika	uvek mala
Detekcija gama zračenja	značajna	neprimetna
Efikasnost	0.1	0.02 - 0.04

U organskim scintilatorima veliki jonizacioni gubitak energije, dE/dx , uzrokuje veliku gustinu pobuđenih molekula, što povećava interakcije unutar molekula. Ove reakcije ometaju proces normalne singletne unutrašnje degradacije, što vodi ka radijativnom pobuđenom singletnom nivou. Proporcija brze komponente emitovane u odnosu na sporu komponentu je smanjena.

3.1.1. Organski scintilacioni detektori sa tečnim rastvorom

Organske tečnosti su tečni rastvori jednog ili više organskih scintilatora u organskom rastvaraču. Iako je scintilacioni proces isti kao i kod kristalnih organskih scintilatora, mehanizam apsorpcije energije je drugačiji. U rastvorima, jonizacionu energiju uglavnom upija rastvarač i potom je prosleđuje rastvorenom delu rastvora. Ovaj prenos je veoma brz i efikasan, mada mehanizam preko koga se on dešava još uvek nije baš najjasniji.

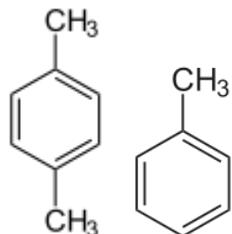
Nerastvarači koji se koriste u organskim scintilatorim su (Nemchenok I. 2009.):

- p-terfenil ($C_{18}H_{14}$),
- *PBD* (2-fenil1,5-(4-bifenilil)-1,3,4-oksadiazol($C_{20}H_{14}N_{20}$)),
- *PPO* (2,5-difenilosazol($C_{15}H_{11}NO$)) i
- *POPOP* (1,4-bis-(2-(5-fenilosazolil))-benzen($C_{24}H_{16}N_2O_2$)).

Među rastvaračima najviše su u upotrebi:

- ksilen,
- toluen,
- benzen,
- fenilcikloheksan,
- trietilbenzen i
- dekalin.

Merenja su pokazala da se efikasnost tečnih scintilatora povećava sa koncentracijom rastvorene supstance. Tipične koncentracije su 3 g supstance koja se rastvorene po litru rastvarača.



Slika 3.2. Specifičnosti hemijske veza za organske scintilatore sa tečnim rastvorm.

Odziv organskih tečnih scintilatora je kratak, 3 do 4 ns. Njihova velika prednost je to što se lako mogu poboljšati drugim materijalima, kako bi im se efikasnost povećala.

Slično, „pomerači” talasne dužine lako se dodaju, da bi scintilator bio više u skladu sa fotodetektorom na koji je spojen. Mešanje materijala, međutim, uglavnom produžava vreme raspada i smanjuje svetlosni odziv, zbog efekta slabljenja koji proizvode ovi materijali. Dodavanjem naftalina i bifenila u rastvarač pokazalo se kao dobra stvar za slabljenje ovog efekta. Osnovna odlika tečnih scintilatora je da su veoma osetljivi na nečistoće u rastvaraču.

Efekat prigušenja (quench) nastaje usled postojanja nečistoća unutar rastvora koji se analizira u detektoru. Prilikom emisije svetlosti ukoliko unutar rastvora postoje nečistoće tokom merenja scintilacionim detektorom, doći će do reapsorpcije zračenja. Praktično „quench” smanjuje realnu količinu zračenja koju bi rastvor emitovao, što će uticati na rezultate (dobiće se manje vrednosti). Pre svakog merenja se radi standardni test na prisustvo materija koje bi mogle prouzrokovati prigušenje (quench) pri analizi scintilacionog detektora. Ukoliko je test na prisustvo prigušenja (Standard Quenching Parametar – SQP) negativan, uzorak je spreman za merenje (*Laboratorijska metoda za ispitivanje radioaktivnosti uzoraka i doze ionizujućeg i nejonizujućeg zračenja*, 2012.).

3.1.2. Fotodetektori

Da bismo imali potpun uredaj za merenje, scintilaciono svetlo mora biti pretvoreno u električni signal. Postoji više vrsta fotodetektora, ali svi moraju ispunjavati uslov da imaju veliku senzitivnost, koja je izražena preko kvantne efikasnosti. Kvantna efikasnost je količnik broja emitovanih fotoelektrona i broja upadajućih elektrona.

Razlikujemo tri vrste fotodetektora zasnovane na:

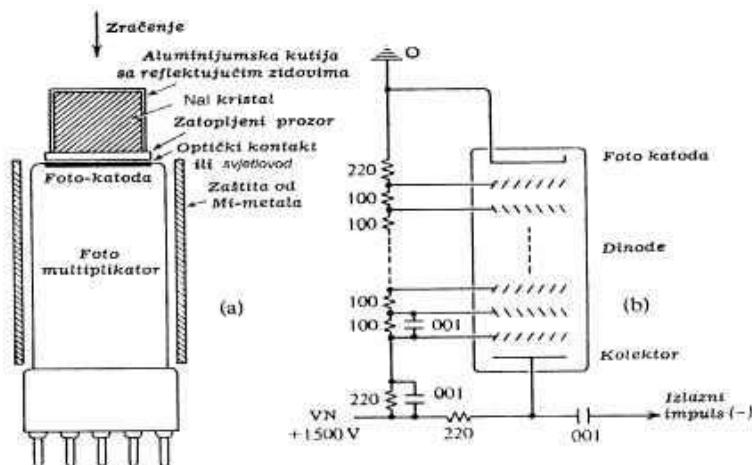
- gasu,
- vakuumu i
- detektore čvrstog stanja.

3.1.3. Fotomultiplikator

Nadolazeći foton udara u fotokatodu (fotokatoda je napravljena od fotoemisivnog materijala, odnosno metalnih slojeva sa viškom elektrona (bialkalne antimonske smeše), što znači da emituje elektrone kada je izložena UV ili vidljivom svetlu) i izbacuje elektron putem fotoelektronskog efekta (Durović S. 2004.). Verovatnoća za ovaj proces je oko 0.2 što znači da je potrebno da prođe 5 fotona da bi se dobio fotoelektron. Otpušteni elektron je potom ubrzan ka

dinodi, gde izbija još elektrona (2 – 6), koji se takođe ubrzavaju ka sledećoj dinodi, koja je na većem potencijalu, gde i oni sami izbijaju elektrone (Mijatović Z. i Đurović S. 2005). Broj izbijenih elektrona zavisi od potencijalne razlike između dinoda, kojih ima 9 – 12 (multiplikacioni faktor milion).

Tipični scintilacioni detektor je na naponu od 1000 V ili više, sa razlikama od 100 V između svake dinode.



Slika 3.3. Fotomultiplikator.

Scintilacioni detektori su jako osetljivi na promenu napona (1% promene u voltaži menja veličinu signala za 10%). Na kraju se svi elektroni skupe na anodi, gde proizvode kratak i merljiv električni impuls. Unutar fotomultiplikatora je vakuum, kako bi se spremio gubitak elektrona u sudarima sa molekulima vazduha.

Veličina signala proporcionalna je broju fotona koji udaraju u fotokatodu, a broj fotona proporcionalan je količini energije nanelektrisanih čestica koje udaraju u scintilator. Scintilator mora biti u potpunom mraku da fotoni vidljivog svetla ne bi bili pomešani sa fotonima stvorenim jonizujućim zračenjem. Često se zbog toga koristi tanka folija (koja mora imati malu masu, da ne bi slabila nadolazeće zračenje).

3.1.4. Fotodioda

Najvažniji parametri fotodiode su vreme odziva, totalna ekvivalentna snaga šuma, kvantna efikasnost i osetljivost. Ovi parametri zavise od tipa fotodiode i poluprovodničkog materijala od kog je napravljena. Prva dva parametra treba da budu što manja, a druga dva što veća. Kada je odziv fotodiode linearan, njena osetljivost je linearno srazmerna kvatnoj efikasnosti, pa su ta dva parametra istovetna.

Kod nelinearnog odziva osetljivost zavisi od drugih karakteristika fotodiode. U cilju povećanja kvantne efikasnosti, fotodioda na bazi klasičnog *pn* spoja zamjenjuje se *p-i-n* fotodiodom. Zbog postojanja *i* – oblasti kvantna efikasnost je višestruko uvećana. Kod lavinske fotodiode takođe je povećana osetljivost ali je, zbog multiplikacionog procesa na kome se zasniva njen rad, povećana vrednost vremenske konstante i šuma (Mijatović Z. i Đurović S. 2005).

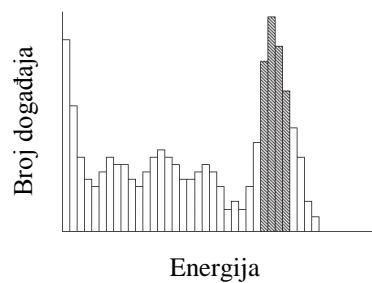
Hibridna fotodioda sastoji se od fotokatode ili *p-i-n* (ili lavinske) silikonske diode u vakuumskoj cevi. Između njih postoji visok napon (kod nekih čak i 15 kV), tako da su fotoelektroni ubrzani prema diodi, da bi postigli veći dobitak. Prednosti hibridne fotodiode su što (Nemchenok I. 2009.):

- može biti u snažnom magnetnom polju bez značajnog slabljenja dobitka, ukoliko je osa uređaja postavljena paralelno sa pravcem magnetnog polja,
- *HPD* ima potencijalno dobar odgovor za pojedinačne fotoelektrone;
- odaziv *HPD* je velik koliko i odaziv fotomultiplikatora,
- generalno je *HPD* manja od fotomultiplikatora, jer ima samo dve komponente.

Lavinska katoda ima faktor umnožavanja elektrona zbog jakog električnog polja (*Mijatović Z. i Đurović S. 2005*). Proces lavine dovodi do dobitka nekoliko stotina elektrona. Dobitak je veoma osetljiv na primenjenu voltažu i temperaturu.

3.2. Analiza signala

U ovom delu biće više reči o analizi i obliku signala, kao i tehničkim karakteristikama scintilacionih detektora.



Slika 3.4. Histogram.

Signal sa fotodetektora se uglavnom šalje u (pred)pojačavač, potom u *A/D* konvertor (pretvarač analognog u digitalni signal), koji određuje veličinu signala i prebacuje je u broj (uglavnom od 0 do 1023, u nekim slučajevima i od 0 do 2047).

Ti brojevi se potom histogramiraju (svaki broj je povezan sa po jednim brojačem, koji se oglašava kada se pojavi njegova vrednost). Svaka *ADC* (*analog – digital converter*) vrednost naziva se kanalom, a vrednost brojača naziva se sadržaj kanala. Ceo skup sadržaja kanala je spektar. Kad se crta histogram, na x – osu idu *ADC* vrednosti, a na y – osu ide sadržaj kanala. Ovaj proces vrši *MCA* (*multi channel analyzer*).

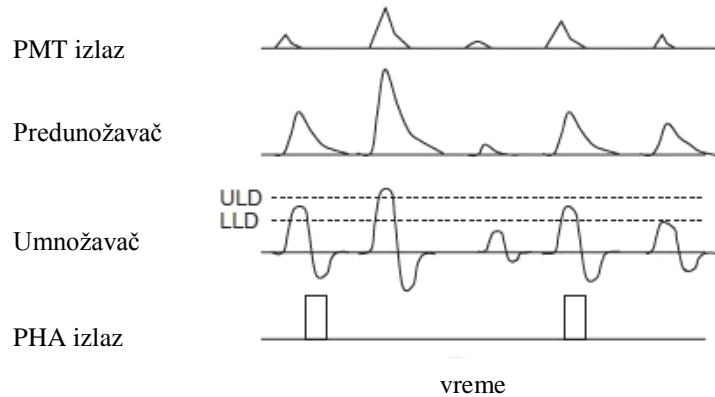
PHA, *pulse height analyzer*, ili analizator visine signala, može biti *SCA* (*single channel analyzer*) ili *MCA*, već pomenut. Princip rada jednokanalnog analizatora vrlo je jednostavan: on ima diskriminator za donje nivo (LLD, *lower level discriminator*) i diskriminator za gornje nivo (ULD, *upper level discriminator*). Kada se pojavi signal sa amplitudom većom od LLD, a nižom od ULD, analizator proizvodi signal (svodi se na 0/1). *MCA* se svodi na mnoštvo povezanih *SCA*.

Na slici 3.5. su prikazani oblici signala pri određenim tačkama procesa. Predpojačavač, koji se inače koristi da da snagu signalu i obezbedi mu prolazak kroz ostatak elektronike, širi signal do $2 - 5 \mu\text{s}$. Pojačavač pojačava signal i oblikuje puls tako što ga sužava, uglavnom mu menjajući znak. *PHA* linija izlaza daje da *PHA* stvara signal za svaki ulazeći puls odgovarajuće visine. Svi izlazi sa *PHA* su iste visine, što nije veliki problem pri malim brojanjima, ali predstavlja problem pri nagomilavanju impulsa.

Scintilacioni detektori imaju dve geometrije (*Nemchenok I. 2009.*):

- sonda geometriju i
- bunarsku.

U obe konfiguracije, scintilacioni kristal je cilindar dijametra oko 5 cm i visine oko 5 cm . Bunarska geometrija ima bunar dubine oko 2 cm .



Slika 3.5. Oblici izlaznih signala.

Sonda geometrija se koristi za spoljašnje merenje radioaktivnosti u organima (tiroidna žlezda). Cilindrični kristal je optički spojen sa jednim fotomultiplikatorom, koji je zaštićen od magnetnog polja mion – metalskim kućištem.

Bunarska geometrija se koristi za merenje uzoraka radioaktivnih materijala u probnim cevima (*test tubes*).

3.2.3. Kalibracija scintilacionog detektora

Bitna osobina scintilacionog detektora je mogućnost detektora da meri visokoenergetske fotone naspram niskoenergetske u proporcionalnom režimu.

Kalibracijom podešavamo skalu, a detektorska linearnost energije određuje koliko se dobro skala primenjuje na opseg energija koji je cilj merenja. *NaI* i drugi alkalno – halidni scintilatori pokazuju izvesnu nelinearnost, uglavnom pri nižim energijama ($< 200\text{ keV}$). Za većinu primena u nuklearnoj medicini, ova nelinearnost ne igra značajnu ulogu, ali treba je uvek imati na umu i s vremenom na vreme svakako proveravati da li se ona menja.

3.2.4. Unutrašnja efikasnost detektora

U principu, scintilacioni fosfori će odgovoriti na bilo kakvo zračenje koje direktno ili indirektno pobuđuje molekule ili atome fosfora. Međutim, za određeno zračenje datog scintilatora, može se uočiti da koristan signal nije baš efikasno stvoren. Dakle, mora se razmotriti način na koji zračenje interaguje sa molekulima datog scintilatora, verovatnoću ovih događaja unutar zapremine scintilatora i odgovor u obliku svetlosnog odziva. Odziv zavisi od mehanizma lumienscencije u scintilatoru.

Verovatnoća događaja unutar scintilatora data je srednjim slobodnim putem zračenja u njemu. Za ne tako visokoenergetske nanelektrisane čestice u običnoj materiji, razdaljina je uglavnom na mikroskopskom nivou, tako da je verovatnoća da ona izgubi deo energije gotovo 100%. Za neutralne čestice, međutim, srednji slobodni put u nekim materijalima može biti prilično veliki, tako da je potreban geometrijski velik detektor da bi bila osigurana velika efikasnost.

3.2.4.1. Efikasnost detekcije elektrona

Elektroni skoro uvek proizvode merljivi signal, tako da je efikasnost za njih gotovo 100%. Međutim, zbog njihove male mase, elektroni su skloni da se rasejavaju pod velikim uglovima. Ovo može uzrokovati da ulazeći elektron rikošetira izvan detektora, tako da ne stigne da preda svu svoju energiju. Efekat ‘rikošeta’ najviše zavisi od atomskog broja materijala i povećava se sa povećanjem Z . Pošto organski scintilatori imaju najmanje Z , oni su se pokazali kao najbolji za detekciju elektrona.

Mada, pri visokim energijama korišćenje neorganskih scintilatora više i nije tako loša ideja. Ovde je gubitak energije elektrona uglavnom kroz proizvodnju zakočnog zračenja i elektronskih ‘pljuskova’, pa je potreban materijal sa velikim Z da bi olakšao očitavanje ‘pljuskova’. Dakle, pri visokim energijama su pogodniji neorganski.

γ -zraci su, antipodno elektronima, pogodni za detekciju u materijalima sa velikim Z . Postoje 3 načina na koje fotoni mogu interagovati sa materijalom (*Marinkov L. 2010.*):

- fotoefekat,
- Komptonov efekat i
- proizvodnja parova.

Pri fotoefektu i proizvodnji parova, foton je potpuno apsorbovan i pretvoren u nanelektrisanu česticu ili čestice.

Pri Komptonovom efektu, gama zrak predaje samo deo svoje energije elektronu i moguće je da će izaći iz detektora, ako ne pretrpi još neki sudar u materijalu.

Da bi napravili efikasan detektor za fotone, dakle, potrebno je upotrebiti materijale koji imaju velike efikasne preseke za fotoefekat i stvaranje parova, a mali efikasni presek za Komptonov efekat.

Srećom, potrebna dva efekta imaju mnogo veću zavisnost od Z nego Komptonov efekat koji ima linearnu zavisnost od Z . Dakle, neorganski fosfori sa visokim Z su najpogodniji za gama detekciju.

3.3. Tečni scintilacioni detektor - *Quantulus 1220*

Quantulus 1220 spada u tečne scintilacione detektore koji mogu da mere izrazito niske energije. Proizvođač je **Perkin Elmer** (*Perkin Elmer Life Sciences*) iz Finske.

Standardni izgled *Quantulusa 1220* dat je na slici 3.7. Visina uređaja je 156 cm, dužina 101 cm, dužina 92 cm a težina 1000 kg. Ulaz za napon je podesiv tako da je moguće prikopčati uređaj na 100, 115, 120, 220, 240 V. Radi na frekvencijama u opsegu 50-60 Hz (*Perkin Elmer, 2002.*).

Optimalni spoljašnji uslovi za rad *Quantulusa 1220* predstavlja vlažnost vazduha od 75% i temperatura od oko 30 °C (granica je od 15-35 °C).

3.3.1. Zaštita detektora

Zaštita kod detektora *Quantulus 1220* koja je obezbeđena pretstavlja veoma moćnu i impresivnu celinu. Fon na ovom detektoru je uporediv sa fonom koji se javlja kod posebnih niskofonskih podzemnih laboratorija. Veoma mali fon je obezbeden postavkom dve zaštite, pasivne i aktivne.

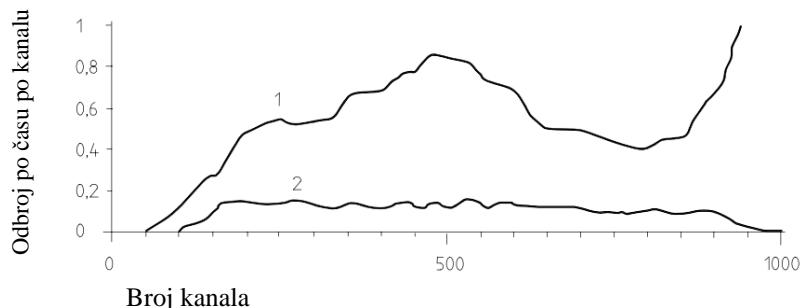


Slika 3.6. *Quantulus 1220.*

3.3.1.1. Aktivna zaštita

Aktivna zaštita se sastoji od mineralnih ulja koja se nalaze oko posude u koju se stavlja uzorak za analizu. Debljina aktivne zaštite je asimetrična i najdeblji sloj se nalazi iznad posude sa uzorkom. U ovoj celini postavljene su dve cevi fotomultiplikatora koje detektuju scintilaciju unutar zaštite. Kosmičko zračenja prouzrokovano brzim česticama dovodi do stvaranja Čerenkovljevog zračenja u staklu fotomultiplikatorske cevi. Kako bi se izbeglo nagomilavanje dodatnog zračenja na rezultate merenja dodat je još jedan fotomultiplikator koji beleži scintilaciju kod same zaštite koja se posle oduzima kao fon pri merenju (uredaj sam inhibira uticaj na rezultate).

Aktivna zaštita praktično daje informacije o gama i kosmičkom zračenju koje prolazi kroz materijal i na svom putu ekscituje atome i molekule. Pošto se oko uzorka nalazi aktivna zaštita svo dodatno spoljašnje zračenje, koje bi moglo uticati na merenje, na svom putu mora proći kroz nju. U aktivnoj zaštiti dolazi do detekcije na principu scintilacione svetlosti koja se emitiše pri prolasku čestica i detektuje fotomultiplikatorom. Dalje se prikupljeni signali šalju na obradu i oduzimaju kao fon od merenja. Dva fotomultiplikatora usmerena su na ‘hvatanje’ signala kod uzorka i dva na samu zaštitu koja se nalazi iznad uzorka. Signali se nezavisno prebrojavaju i tek naknadno se vrši korekcija. Na slici 3.7. vidi se razlika u signalu koji potiče od uzorka (kriva broj 1) i signala koji je dobijen snimanjem aktivne zaštite (kriva broj 2). Signal koji potiče od fona je konstantan duž merenja, ali nije beznačajan tako da se radi povećanja tačnosti merenja mora uzeti u obzir (Perkin Elmer, 2002.).



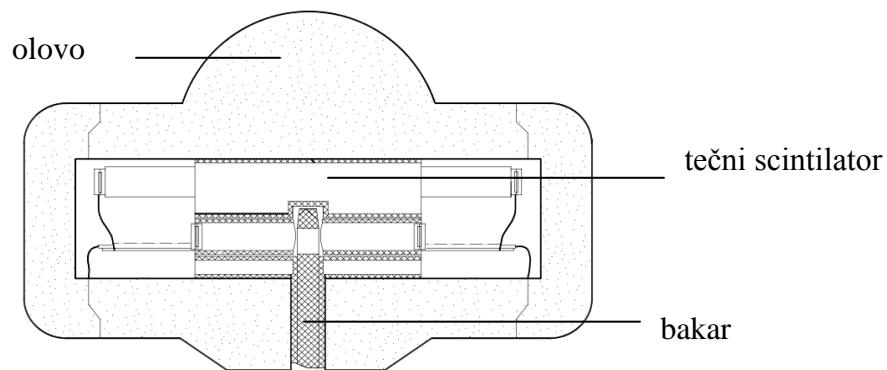
Slika 3.7. *Fon – uzorak.*

3.3.1.2. Pasivna zaštita

Sama pasivna zaštita se sastoji od nekoliko nivoa zaštite (slika 3.8.). Prvi nivo pretstavlja štit od olova. Drugi nivo je sloj bakra koji se nalazi oko kontejnera u kome je smeštena scintilaciona tečnost.

Štit od olova ima maksimalnu širinu od 20 cm a ukupna težina je 630 kg. Najveća debljina štita je iznad područja u kome se meri pošto je najveći uticaj kosmičkog zračenja sa gornje strane. Štit u ne kritičnim delovima ima širinu od 7 – 11 cm koja zaustavlja gama radijaciju koja postoji u krugu uređaja (Perkin Elmer, 2002.). Asimetrija u debljini štita daje zaštitu od kosmičkog i lokalnog zračenja.

Štit od bakra služi da X zračenje nastalo interakcijom kosmičkog zračenja sa štitom od olova ne dođe do scintilacione tečnosti. Dobra izolovanost scintilacione tečnosti omogućava da se detektuju male energije, za koje se može tvrditi da nisu spoljašnji uticaji.



Slika 3.8. Pasivna zaštita kod detektoru Quantulus 1220.

3.3.2. Višekanalna analiza

Quantulus 1220 spaja dve duple analize, čime se dobija umnožena višekanalna analiza. Svaki od četiri spektra ima po 1024 kanala rezolucije. Dobijen signal, ukoliko se prikaže logaritamski, daje jasniju sliku za srednju energiju rezolucije i bolje definisan signal za male energije koje se javljaju kod izotopa kao što je tricijum.

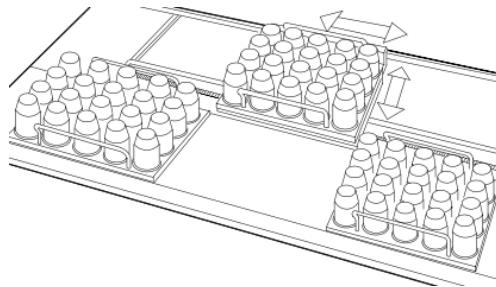
Višekanalna analiza daje informaciju o broju događaja i enegetskoj distribuciji izotopa koji se meri. Broj događaja je ukupan broj odbroja po kanalima, a energetska distribucija sadržaj svakog kanala. Praktično, višekanalni sistem analize podrazumeva postojanje što većeg broja kanala i memorije koja će da sačuva što veću količinu dobijenih informacija, tokom merenja. A/D konvertor određuje visinu pulsa, pozicionira i memoriše, pri čemu se broj podataka selektuje po odgovarajućim skalama. Prekizno i selektivno memorisanje daje mogućnost analize tačno određenih delova spekta, ali i preked merenja u bilo kom trenutku, nakon čega ostaju sačuvana prethodna merenja. *Quantulus 1220* ima, čak osam nezavisnih prozora za brojanje, tako da se svaki nezavisno može podešiti na merenje u okviru određene energije.

Kako bi se upotpunio višekanalni analizator u sistemu mora postojati predkorak koji zahteva prisustvo analizator oblika impulsa (PSA – *Pulse Shape Analysis*) i komparator amplituda impulsa (PAC – *Pulse Amplitude Comparator*). *Quantulus 1220*, od opreme sadrži još kolo za korekciju hemiluminescencije (DCOS – *Delayed Coincidence Circuit*). DCOS vrši korekciju na zakasnele koincidencije koje zatim šalje na višekanalni analizator. Višekanalni analizator ga tretira kao hemiluminescentni spektar. Na preostale višekanalne analizatore se usmerava sav drugi signal i snima kao spektar uzorka (u ovom slučaju – tricijuma). Kao bi se

odredila širina prozora (u slučaju tricijuma od 1 – 250) u kome se snima, prvo se snima standard i korekcija fona (*background*).

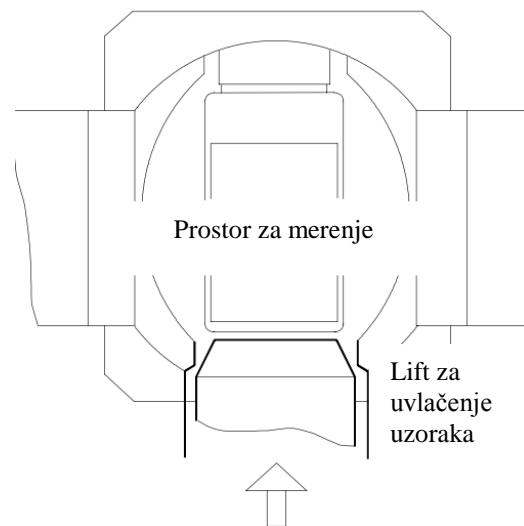
3.3.3. Princip rada

Merenje je automatizovano. Laboranta/tehničara postavlja bočice u uređaj na mesto predviđeno za njih. Dimenzije, oblik kao i materijal za izradu boćica su propisane i u skladu sa standardom predviđenim za rad *Quantulus-a 1220*. Boćice se prave od plastike ili stakla, i sve su jednakih dimenzija, načešće zapremine od 20 ml. Kod merenja koja su vezana za tricijum koriste se plastične boćice, zbog scintilacije na staklu (Nikolov J. et al. 2013.). U uređaju postoje predviđe tri tacne u koje se smeštaju boćice (20 boćica može da stane na jednu tacnu). Tacne se stavljuju na ravni plato koji ima mehanizam da izvalči tacne i nosi ih na analizu (slika 3.9.).



Slika 3.9. *Princip premeštanja tacni sa boćicama.*

Koja će tacna biti povučena zavisi od naredbe koja se saopštava uređaju preko računara i programa *WinQ*. Preko programa se saopštavaju informacije o dužini merenja i broju tacne i boćice koja će biti podvrgnuta analizi. *Quantulus 1220* razlikuje boćice po mestu postavljanja na tacni. Kada tacna stigne u centralni deo uređaja, automatski se namešta tako da zauzme položaj koji joj je zadao program.

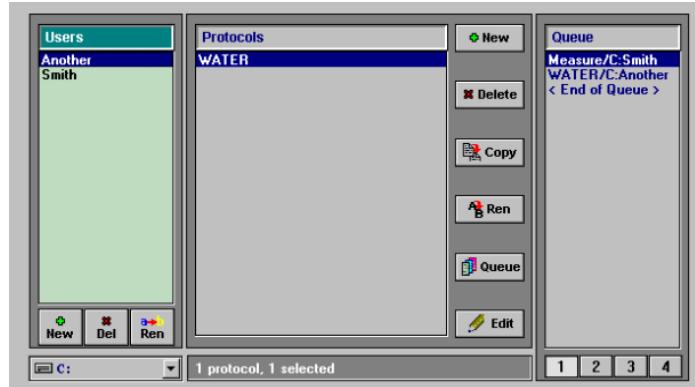


Slika 3.10. *Prostor za merenje.*

Postavlja se direktno ispod usisnog kanala koji uvlači boćicu sa mesta koji je program zadao. Zatim boćica završava u centralnom delu za analizu koji je zaštićen aktivnom i pasivnom

zaštitom, što je prikazano na slici 3.10. i vrši se analiza. Kada istekne zadati vremenski interval bočica se vraća na pređašnje mesto na tacni, a tacna se dalje pomera dok se ne postavi ispod usisnog kanala sa mestom na kom se nalazi sledeća zadata bočica. Merenja se automatski vrše dok se ne uradi pun ciklus koji je zadat (Perkin Elmer, 2002.).

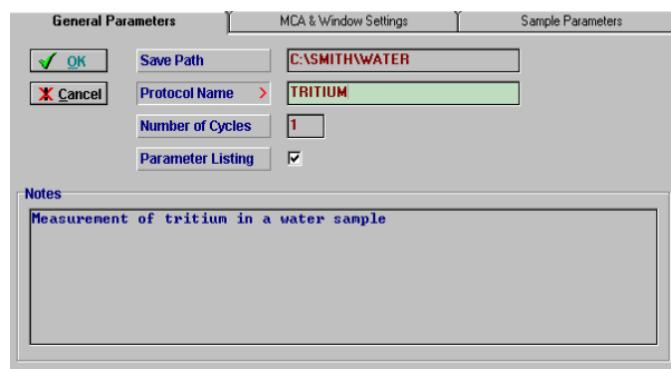
3.3.4. Program Win Q



Slika 3.11. Prozor Win Q (Perkin Elmer, 2000.).

Win Q program predstavlja softver za upravljanjem *Quantulus*-om 1220. Program je prilično jednostavan za korišćenje i opcije su uglavnom date u opadajućim menijima tako da se ne mogu napraviti velike greške pri unosu komandi (Perkin Elmer, 2000.). Na slici 3.11. dat je izgled prozora koji se otvori pri pokretanju programa. U ovom prozoru se upisuju komande u vidu davanja naziva i definisanja protokola. Kada se ispune ti zahtevi opcijom *Queue* se protokol koji je napravljen uvrštava u posebnu kolonu (treću) što znači da je taj protokol zadat za analizu i uređaj pomera tacne i analizira bočice prema definisanom nalogu u protokolu.

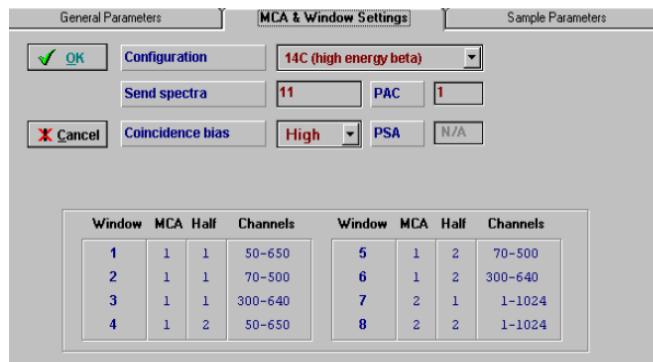
Definisanje protokola: opcijom *New*, otvara se prozor koji je prikazan na slici 3.12. U prvom zaglavlju *General Parameters* daju se informacije za naziv protokola, mesta gde će se sačuvati merenjem dobijeni podaci i o broju ponavljanja merenja za jedan uzorak (bočicu).



Slika 3.12. General Parameters-prvo zaglavljje (Perkin Elmer, 2000.).

Potvrđivanje se vrši naredbom *OK*, nakon čega se podešavaju parametri u drugom zaglavlju *MCA & Window Settings*. Izgled drugog zaglavlja je dat na slici 3.13. „*configuration*“ daje opciju da se odabere višekanalna analiza koja odgovara procesu koji se meri, tako da su date opcije da se odabere između analize (Perkin Elmer, 2000.):

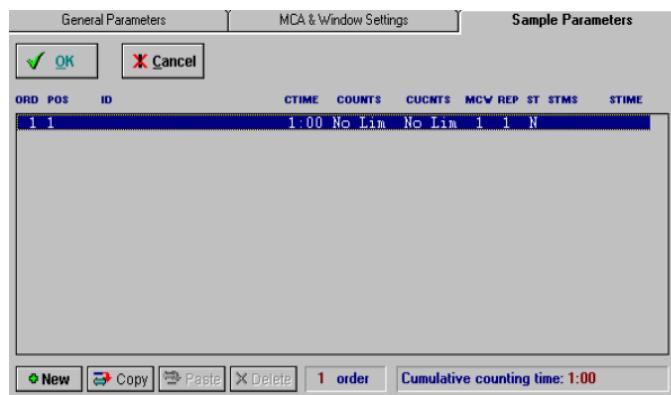
- ^{14}C (beta čestice visoke energije),
- 3H (beta čestice niske energije),
- alfa/beta i
- individualno podešavanje spektra.



Slika 3.13. *MCA & Window Settings*-drugo zaglavlj (Perkin Elmer, 2000.).

Na polju *Send spectra* vrši se selekcija spektra koji će biti sačuvan na disku. Zaglavlj *MCA* ima dve verzije *MCA1* i *MCA2*, obe imaju po dve polovine koje sadrže spektar, tako da je spektar kodiran brojevima 11, 12, 21, 22. *PAC* (*Pulse Amplitude Comparation*), komparacija amplitude signala, i *PSA* (*Pulse Shape Analyzer*), analiza oblika signala, su elektronski dodaci koji mogu da utiču na dodatnu analizu pulsa. Opcija *Coincidence Bias* predstavlja biranje pragova pri merenju. Može se opredeliti samo za dve opcije (Perkin Elmer, 2000.):

- *High* – se koristi kod merenja beta čestica visoke energije (poput ^{14}C),
- *Low* – se koristi kod merenja beta čestica niske energije (poput 3H)



Slika 3.14. *Sample Parameters* – treće zaglavlj (Perkin Elmer, 2000.).

U trećem zaglavju, *Sample Parameters*, (slika 3.14.) unose se podaci vezani za redosled, poziciju i dužinu merenja bočica na tacnama, što je prikazano na slići 3.9.. U prvu kolonu, *ORDER*, se unosi redosled kojim se bočice mere. Na delu sa *POS* daje se informacija sa poljem na kome se nalazi bočica koju zelimo da analiziramo. Na mestu *ID* se daje naziv date bočice. U polju *CTIME* se upisuje informacija o vremenu merenja bočice. U polju *STD* se još menja sa *N* u *Y*, kako bi se uključilo merenje eksternog standarda europijuma koji je ugrađen u *Quantulus*.

1220. Ostale naredbe ostaju nepromenjene. U tabelama 3.1. i 3.2. dati su primeri za pravilno pounjene kolone *Sample Parameters*-a.

Tabela 3.2. Primer 1 – Prikaz unetih parametara prilikom merenja background (DRW) uzorka.

ORDER	POS	ID	CTIME	COUNTS	CUCNTS	MCW	REP	STD	STMS	STIME
1	1	DRW1	360:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
2	2	DRW2	360:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
3	3	DRW3	360:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00

Tabela 3.3. Primer 2 – Prikaz unetih parametara prilikom snimanja spektara za određivanje MDC (minimalna detektabilna koncentracija aktivnosti).

ORDER	POS	ID	CTIME	COUNTS	CUCNTS	MCW	REP	STD	STMS	STIME
1	10	DRW1	30:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
2	10	DRW1	60:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
3	10	DRW1	90:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
4	10	DRW1	120:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
5	10	DRW1	150:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
6	10	DRW1	200:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
7	10	DRW1	250:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
8	10	DRW1	300:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
9	10	DRW1	350:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
10	10	DRW1	400:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
11	10	DRW1	500:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
12	10	DRW1	600:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00
13	10	DRW1	900:00	NO LIM	NO LIM	1	1	Y	1/ 1	1:00

Program *Win Q* daje mogućnost relativno jednostavne manipulacije tečnim scintilacionim detektorom *Quantulus 1220*. Dobijeni rezultati su pregledni i lako dostupni. Sama upotreba programa *Win Q* ne zahteva dugu i skupu obuku stručnog lica za rad sa detektorom.

4. Metode pripreme uzorka za merenje koncentracije aktivnosti tricijuma

Analiza tricijuma ima značajnu ulogu za monitoring nuklearnih postrojenja, dozimetriju, javnu zaštitu i hidrogogeologiju. Tricijum koji se danas meri nije u potpunosti kosmičkog porekla. Velika količina ovog izotopa nastala je i uticajem čoveka, odnosno testovima nuklearnog oružja.

Tricijum spada u slabe beta emitere ($E_{max} = 18,6 \text{ keV}$) (Theodorsson P. 1996.). Vreme poluraspada tricijuma iznosi (4500 ± 8) dana (Lucas and Unterweger, 2000.). Za detekciju se koriste gasni proporcionalni brojači i tečni scintilacioni detektori. Daleko je veća primena tečnih scintilacionih detektora, pošto se merenja izvode direktno, nije komplikovan i dugačak predtretman (postupak pripreme uzorka za merenje), a i efikasnost je veća u odnosu na gasni.

Za uzorke koji imaju malu koncentraciju tricijuma treba uraditi elektrolitičko obogaćenje. Za malu koncentraciju smatra se vrednost od 10 T.U. (1 T.U. = $0,118 \text{ Bq/ml}$) (Tykva R. 2004.).

Prema Američkoj agenciji za zaštitu okoline (United States Environmental Protection Agency - U.S.EPA) maksimalna dozvoljena vrednost tricijuma u vodi za piće je $0,74 \text{ Bq/ml}$. Prema Evropskoj Komisiji definisan je limit za prisutnost tricijuma u vodi i iznosi 100 Bq/l (European Commission, 1998.).

4.1. Priprema i obrada uzorka pre hemijske analize

Za hemijsko ispitivanje materijala (bez obzira da li je u pitanju naučna ili tehnička analiza), uzimaju se odgovarajući delovi materijala u prikladnim količinama, što predstavlja – uzorak. Uzorak koji se uzima direktno iz okoline izvora (iz rudnika, polja, vazduha, jezera...) naziva se primarni uzorak. Uzimanje primarnog uzorka se vrši prema određenim standardima. Da bi uzorak bio reprezentativan (tada se dobijaju najpreciznije informacije) mora da bude prosečan ili srednji. To praktično znači da reprezentativan uzorak manji deo materijala, uzet na poseban način, sa posebnim priborom (propisanim standardima), tako da predstavlja prosečan sastav cele mase iz koje je uzet (Nešić S. et al. 2002.).

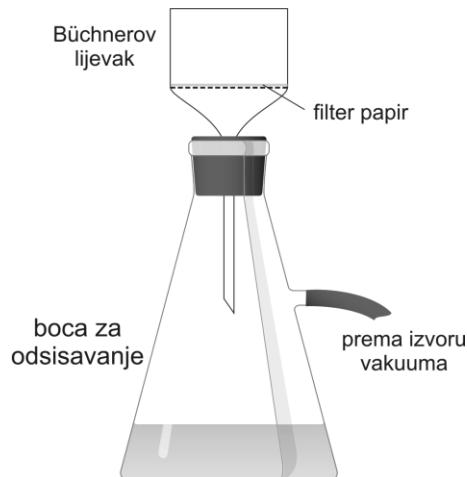
Tačnost hemijske analize zavisi u najvećoj meri od ispravnog postupka uzimanja uzorka. Masa uzorka koja će se prikupiti zavisi od vrste materijala i agregatnog stanja, što je sve propisano standardima (mase uzorka mogu da se kreću i do nekoliko tona). Pravilno uzet uzorak se direktno na terenu, uglavnom, podešava na optimalnu težinu i šalje na analizu.

Priprema uzorka za analizu obavlja se u laboratoriji. Zavisno od uzorka (da li je u pitanju ugalj, zemlja, ulje, gas, voda...) dati su posebni postupci za konačnu pripremu i načine ispitivanja.

Voda za hemijsku analizu se uzima na različite načine, što zavisi od same vrste vode koja se ispituje (da li je izvorska, rečna, kišnica, bunarska...). Naročito treba обратити pažnju na čistoću sudova u koje se sakuplja uzorak. Pre punjenja boca treba da se 4 – 5 puta ispere sa vodom koja se uzorkuje.

Prva priprema vode kod hemijske analize nalaže odstranjivanje krupnih nečistoća, što se obavlja dekantovanjem. Voda se pusti da odstoji neko vreme nakon čega teže nečistoće padaju na dno i formiraju talog. Odlivanjem vode, odnosno, dekantovanjem se postiže prva priprema za hemijsku analizu (naravno i dobijen krupni talog može odvojeno da se analizira). Malo finije

prečišćenje se odvija pomoću filter papira koji se postavi u levak, ovaj postupak se naziva filtracija, što je prikazano na slici 4.1. Zavisno od finoće filter papira koji se koristi za filtraciju dobija se manje ili više fizički čist uzorak vode. Osim filter papira može da se koristi i sterilni pesak, drveni, koštani ili životinjski ugalj, platno, pamuk, azbest, staklena vuna, alumo-silikatne zemlje, specijalna sita.



Slika 4.1. Aparatura za filtraciju.

Male količine taloga koje se teško cede mogu se odvojiti centrifugiranjem. Metoda se zasniva na udaljavanju čestica iz tečnosti pod uticajem centrifugalne sile, ali i različitim gustinama taloga i tečnosti. Nakon centrifuge tečnost se odvaja dekantovanjem (Nešić S. et al. 2002.).

4.2. Direktna metoda pripreme uzorka vode za merenje tricijuma

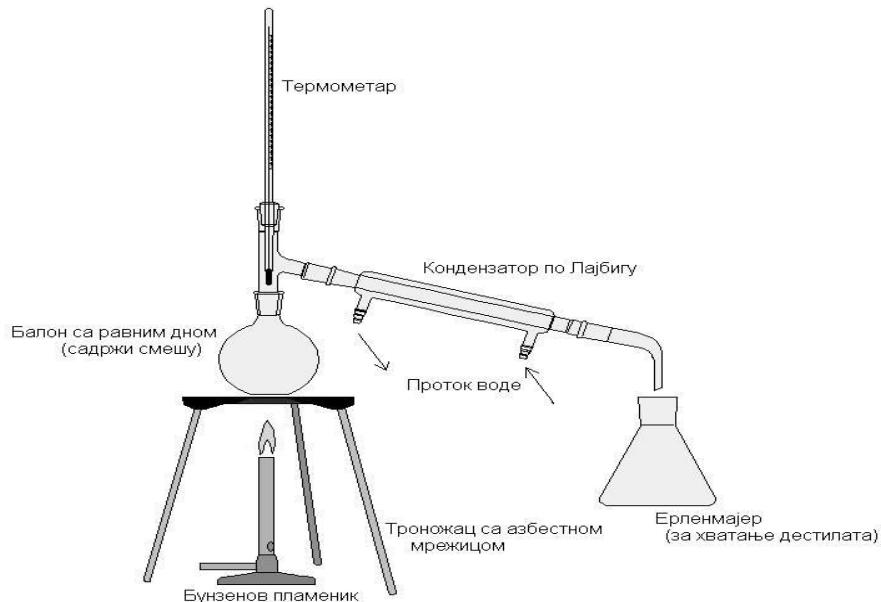
Direktna metoda (Nikolov J. et al. 2013.) se koristi za određivanje tricijuma kod sveže vode koja ne zahteva elektrolitičko obogaćenje. Spada u brze testove za ispitivanje regularnosti vode za piće. Može se koristi i kod provere radijacije vode koja služi za moderaciju ili hlađenje nuklearnih reaktora.

Direktna metoda određuje sadržaj tricijuma pomoću scintilacionog detektora koji može da registruje događaje male energije, u koje spada i emisija β čestice male energije koja prati raspad tricijuma. Detektor meri aktivnosti u granicama od $0,037 - 555 \text{ Bq/ml}$. Za mernje većih aktivnosti treba smanjiti veličinu uzorka, tako da je moguće izmeriti i veće aktivnosti od 555 Bq/ml .

4.2.1.1. Aparatura:

- tečni scintilacioni detektor - *Quantulus 1220*
- plastične boce od 20 ml ,
- aparatura za filtraciju,
- bočice za tečni scintilatorni detektor
- aparatura za destilaciju;
 - toplotni izvor,
 - balon za destilaciju,
 - termometar,

- kondenzator,
- sud za prihvatanje destilata,
- stativi,
- kleme za pričvršćivanje aparature.



Slika 4.2. Aparatura za destilaciju.

4.2.1.2. Hemikalije:

- za destilaciju;
- natrijum – hidroksid ($NaOH$),
- kalijum – permanganat ($KMnO_4$)
- scintilacioni koktel
- *OptiPhase Hisafe 3*

4.2.2. Priprema uzorka

Kod standardnog testa za merenje tricijuma u vodi za piće, tretira se uzorak od 100 ml vode sa malom količinom natrijum – hidroksida ($NaOH$) i kalijum – permanganata ($KMnO_4$). Kada se dodata hemijska jedinjenja u uzorku vode rastope, treba izvršiti destilaciju.

U uzorak vode se dodaje natrijum – hidroksid kako bi se sprečilo da drugi radioaktivni izotopi, koji su eventualno prisutni (^{131}I i ^{14}C) ne pređu u destilat. Prisustvo dodatnih radioaktivnih izotopa bi povećalo ukupnu aktivnost uzorka i doblele bi se veće vrednosti prilikom testa na prisustvo tricijuma.

Kalijum – permanganat se dodaje kako bi oksidovale organske nečistoće koje su prisutne u uzorku vode, jer bi njihova prisutnost kod analize ugušila emisiju svetlosti. Zagrušenje koje prouzrokuju fizičke nečistoće u uzorku dovodi do dobijanja manjih vrednosti za aktivnost, tako da je od velikog značaja neutralisati ih. Fizičke nečistoće koje dovode do zagrušenja su najčešće organskog porekla, pošto se sve mehaničke nečistoće mogu odstraniti pomoću grube filtracije.

Nečistoće zaklanjaju ili aporbuju emisiju svetlosti tako da scintilacioni detektor nema šta da detektuje.

Kod zagrevanja tokom destilacije treba postepeno povećavati temperaturu kako ne bi došlo do naglog ključanja koje bi moglo fizički da izbaci delove u kondenzator, a zatim da se oni nađu u destilatu. Takođe treba obezbediti načine održavanja temperature na kojoj se odvija destilacija.

Tako dobijen destilat je „čist“, pored tricijuma ne sadrži druge aktivne izotope, ili biološke nečistoće, pa je pogodan za analizu i određivanje sadržaja tricijuma.

Kod dobijenog destilata treba obratiti pažnju da se prikupi samo destilat dobijen sredinom destilacije. Početna ili krajnja frakcija sadrže materije koje mogu uticati na dobijanje lažnih rezultata kod prebrojavaja broja dogadaja na tečnom scintilacionom detektoru.

4.2.3. Kalibracija

Kalibracija podrazumeva pravljenje standarda za tricijumsku vodu i pravljenje rastvora sa „mrtvom“ vodom radi otklanjanja fona pri merenju.

Za pripremu standarda se koristi ista metoda kojom se priprema i uzorak, pošto rastvori koji se koriste tokom jedne analize moraju biti podvrgnuti istim uslovima da bi mernje i određivanje greške imalo smisla. Standardi su rastvori sa poznatom aktivnošću. U slučaju standardnog testa, u sve tri boćice se dodaje po 0,5 g natrijum – hidroksida, 0,1 g kalijum-permanganata i 100 ml filtriranog uzorka što se stavlja u balon za destilaciju od 250 ml i destiliše. Prvih 10 ml destilata se odbacuje a ostatak prikuplja i meša sa kaktelima na isti način kao i uzorak (zavisno od metode zavisi i odnos rastvora).

Kao bi se neutralisao fon pri merenju potrebo je uzeti istu količinu „mrtve“ vode (može koristiti voda iz dubokog bunara) i uraditi merenje na istoj aparaturi. Princip pripreme rastvora je isti, u sve tri boćice se dodaje po 0,5 g natrijum – hidroksida, 0,1 g kalijum – permanganata i 100 ml filtriranog uzorka što se stavlja u balon za destilaciju od 250 ml i destiliše. Prvih 10 ml destilata se odbacuje a ostatak prikuplja i meša sa kaktelima na isti način kao i uzorak (zavisno od metode zavisi i odnos rastvora).

4.2.4. Metoda analize

- dodaje se 0,5 g natrijum – hidroksida i
- 0,1 g kalijum – permanganata u
- 100 ml filtriranog uzorka
- i stavlja u balon za destilaciju od 250 ml
- balon se povezuje sa aparaturom za destilaciju
- uključuje se toplotni izvor
- prvi 10 ml destilata se odbacuje
- narednih 50 ml se prikuplja i služi za analizu tricijuma
- u 8 ml destilata se doda
- 12 ml koktela.

Kada se odabere scintilacioni rastvor od 50 ml dobijenog destilata prave se tri identična rastvora koja se pojedinačno mere u scintilacionom detektoru.

Sve se ponovi za standard za vodu sa tricijumom poznate aktivnosti (isto u tri boćice). Takođe se pravi u tri puta rastvori za komparaciju fona sa „mrtvom“ vodom prema gore navedenom uputstvu za pripremu uzorka.

Svi rastvori pre merenja potrebo je da se adaptiraju na tamu.

4.3. Elektrolitičko obogaćenje uzorka vode za merenje tricijuma

Kako bi analiza uzorka vode bila moguća direktnom metodom, ako je nedovoljna koncentracija tricijuma prisutna, potrebno je izvršiti elektrolitičko obogaćenje. U elektrolitičkom procesu raste ideo tricijuma (*Cameron J. F. 1967*).

Elektroliza predstavlja hemijski proces koji se javlja u rastvorima ili rastopima elektrolita pri proticanju struje (jednosmerne). Da bi se organizovala postavka pri kojoj dolazi do pojave elektrolize potebno je dve elektrode (najčešće od gvožđa), koje se nalaze u strujno kolu, staviti u rastope sa elektrolitom (*Nešić S. et al. 2002.*). Kada struja prolazi kroz elektrode javlja se usmereno kretanje jona iz rastvora ka elektrodama, što dovodi do odgovarajuhih hemijskih reakcija. Elektroliza se zasniva na principu oskido – redukcije usled čega se na jednoj elektrodi odvija reakcija okidacije, a na drugoj simultano, redukcije.

Kod proizvodnje teške vode najzastupljeniji metod za proizvodnju je elektroliza. Princip se zasniva na prostoj elektroliz vode iz alkalih rastvora. Vodonik se izdvaja na katodi.

Elektroliza spada u jednostavnije i primitivnije načine za separaciju izotopa, ali zato nije jeftina, pošto količina dobijenog izotopa i uložene energije nije rentabilna. Najčešće se koristi metoda sa kaskadiranjem kako bi proces bio ekonomičniji.

4.3.1.1. Aparatura:

- tečni scintilacioni detektor - *Quantulus 1220*
- plastične boce od 20 ml
- aparatura za elektrolizu
- koaksijalne elektrode

4.3.1.2. Hemikalije:

- za elektrolizu:
 - 1 g Na_2O_2
 - 250 ml filtriranog uzorka
- scintilacioni koktel
 - *OptiPhase Hisafe 3*

4.3.2. Priprema uzorka

Elektroliza se odvija u aparaturi koja se sastoji od elektrolitičkih ćelija, sa koaksijalnim ćeličnim elektrodama (otpornim na rđu). U ćelije se stavlja prethodno destilovan uzorak. U svaku ćeliju ide smeša 250 ml vode/uzorka i 1 g Na_2O_2 . Jedinjenje Na_2O_2 dodaje se vodi kako bi se obezbedila alkalna atmosfera, jer poboljšava elektrolitičku provodljivost. Struja koja se pušta kroz elektrode jačine je 5 A, dok se pošetna količina vode ne smanji na 25 – 30 ml. Elektrolitičko obogaćenje se izvodi pri temperaturi od 2 – 5 °C kako bi se izbegli gubitci usled isparavanja.

Nakon završetka elektrolize odmerava se 8 ml, sada obogaćene vode, i meša sa 12 ml *OptiPhase Hisafe 3* scintilacionog koktela u plastičnoj bočici od 20 ml. Bočica se stavlja u tečni scintilacioni detektor *Quantulus 1220* i meri.

4.3.4. Metoda analize:

- u ćelije se stavi 250 ml vode
- doda se 1 g Na_2O_2
- pusti se struja jačine 5 A

- podesi se temperatura od $2 - 5 {}^{\circ}C$
- od dobijnih $25 - 30 \text{ ml}$ obogaćene vode
- u 8 ml doda se
- 12 ml scintilacionog koktela *OptiPhase Hisafe 3*

Tako pripreljen uzorak obogaćene vode stavlja se u tečni scintilacioni detektor *Quantulus 1220* na merenje. Elektrolitičko obogaćenje vode je relativno dug proces i ponekad traje po nekoliko nedelja. Merenje koje se potom odvija u tečnom scintilacionom detektoru *Quantulus 1220* je znatno kraće i u proseku iznosi 90 min . Granica detekcije za uzorce vode koja je elektrolitički obogaćena iznosi 0.1, što omogućva veoma precizna merenja niskih vrednosti koncentracije aktivnosti tricijuma.

5. Rezltati merenja i diskusija

5.1. Prikupljanje uzorka

Uzorci vode koji su obrađeni u ovom radu prikupljeni su u skladu sa pravilnikom o uzorkovanju materijala. Uzorci su direktno sipani u flaše, koje su prethodno oprane i osušene. Deo uzorka vode na kojima je izvršeno elektrolitičko obogaćenje poslati su u Institut Vinča. Voda koja je korištena za korekciju fona, „background“, pri merenju uzimana je sa česme (voda iz novosadskog vodovoda). Kod svakog uzorka pravljen je svež „background“.

5.2. Kalibracija sistema direktnom (ASTM) metodom

Standard poznate aktivnosti $A = 20.24 \frac{kBq}{ml}$ se razblaži u predviđenoj razmeri kako bi se dobila aktivnost od 17 Bq/ml . To se radi mešanjem standarda poznate aktivnosti (proporcijom je dobijeno $0,42 \text{ ml}$) sa destilovanom vodom.

$$17 \frac{\text{Bq}}{\text{ml}} : 500\text{ml} = 20240\text{Bq} : X\text{ml}$$

$$X = 0.42\text{ml}$$

U normalni sud od 500 ml se pipetom doda $0,42 \text{ ml}$ standarda i sud se dopuni destilovanom vodom do meniska. Sve se dobro promučka i na taj način se dobije standard aktivnosti RWTS od 17 Bq/ml .

A_{DWTS} rastvor, predstavlja 8 ml RWTS aktivnosti standarda od 17 Bq/ml , čime se dobija:

$$\begin{aligned} A_{DWTS} &= 17 \frac{\text{Bq}}{\text{ml}} \cdot 8\text{ml} \\ A_{DWTS} &= 136\text{Bq} \end{aligned}$$

Druga tri rastvora dobiju se destilacijom. Na slici 5.1. prikazana je postavka aparature sa kojom je izvršena destilacija.

Rastvori pripremljeni za kalibraciju sistema su:

- DRW (*distilled raw water*) – destilat vode za korekciju fona (voda sa česme),
- DWTS (*distilled water tritium standard*) – destilat vode u koji je dodat standard tritijuma,
- DRWTS (*distilled raw water tritium standard*) – destilat 100 ml RWTS i $0,5 \text{ g NaOH}$ i $0,1 \text{ g KMnO}_4$.



Slika 5.1. Destilacija.

Nakon odbacivanja početnog destilata (u kolčini koja je navedena u poglavlju 4. vezanom za pripremu uzoraka) sakuplja se destilat, koji se pažljivo obeležava i privremeno smešta u erlenmajere sa šlisovanim poklopcem, što je prikazano na slici 5.2. konkretno za dobijen destilat DRW-a. Destilata je prikupljano u dovoljnoj količini kako bi se obazbedilo pravljene tri uzorka za jedan rastvor (veći broj obezbeđuje veću tačnost).



Slika 5.2. DRW uzorci.

U tabeli 5.1. date su vrednosti dobijene za merenja, izvršena tečnim scintilacionim detektorm Quantulus 1220. Sa R su označeni odbroji, za DRW. Grčkim slovom, sigma, σ , označene su greške koje je uređaj dobio za dato merenje. Rastvor na kome je izvršeno merenje dobijen je destilacijom vode sa česme.

Tabela 5.1. Rezultati dobijeni pri merenju DRW-a.

$R(\sigma)s^{-1}$	
DRW1	0.0220(6)
DRW2	0.0230(6)
DRW3	0.0240(6)
DRW	0.0230(6)

Rastvor DWTS-a dobijen je destilacijom vode sa česme, oko 700 ml, kako bi se od čistog destilata dobilo 600 ml. Dobijeni destilat se meša sa tricijumskim standardom u balnu od 500 ml kako bi se dobio rastvor aktivnosti koja odgovara specifičnoj aktivnosti RWTS-a. Tako nastao rastvor u balonu predstavlja DWTS. Radene su tri serije, a od svake je napravljeno po 5 uzoraka, tako da je ukupano DWTS-a za merenje napravljeno 15. Odbroji i greške za svaki od 15 uzoraka dat je u tabeli 5.2. zajedno sa srednjom vrednosti, koja je izračunata kao aritmetička srednja vrednost.

Tabela 5.2. Rezultati dobijeni za merenje DWTS-a.

$R(\sigma)s^{-1}$	
DWTS1	41.78(16)
DWTS1	41.21(16)
DWTS1	41.82(16)
DWTS1	41.07(16)
DWTS1	41.10(16)
DWTS2	41.61(16)
DWTS2	41.27(16)
DWTS2	41.30(16)
DWTS2	41.16(16)
DWTS2	41.44(16)
DWTS3	41.51(16)
DWTS3	41.50(16)
DWTS3	41.23(16)
DWTS3	41.48(16)
DWTS3	41.30(16)
DWTS	41.39(16)

Rastvor DRWTS-a nastaje destilacijom 100 ml RWTS-a, 0,5 g NaOH i 0,1 g KMnO₄. Prvih 10 ml destilata se odbacuje, a narednih 50 ml sakupi i označi kao DRWTS. Rezultati su dati u tabeli 5.3. za 45 uzoraka koji su tom prilikom napravljeni.

Tabela 5.3. Rezulati dobijeni za merenje DRWTS-a.

	$R(\sigma)s^{-1}$		$R(\sigma)s^{-1}$		$R(\sigma)s^{-1}$
DRWTS1-1	41.85(16)	DRWTS2-1	41.60(16)	DRWTS3-1	41.74(16)
DRWTS1-1	41.38(16)	DRWTS2-1	41.52(16)	DRWTS3-1	41.40(16)
DRWTS1-1	42.04(16)	DRWTS2-1	41.53(16)	DRWTS3-1	42.06(16)
DRWTS1-1	42.11(16)	DRWTS2-1	41.26(16)	DRWTS3-1	41.48(16)
DRWTS1-1	41.60(16)	DRWTS2-1	41.67(16)	DRWTS3-1	41.77(16)
DRWTS1-2	41.45(16)	DRWTS2-2	41.27(16)	DRWTS3-2	41.17(16)
DRWTS1-2	41.25(16)	DRWTS2-2	41.53(16)	DRWTS3-2	41.49(16)
DRWTS1-2	41.36(16)	DRWTS2-2	41.37(16)	DRWTS3-2	41.59(16)
DRWTS1-2	41.09(16)	DRWTS2-2	41.72(16)	DRWTS3-2	41.45(16)
DRWTS1-2	41.27(16)	DRWTS2-2	41.30(16)	DRWTS3-2	41.69(16)
DRWTS1-3	42.10(16)	DRWTS2-3	41.13(16)	DRWTS3-3	42.11(16)
DRWTS1-3	42.02(16)	DRWTS2-3	41.49(16)	DRWTS3-3	41.63(16)
DRWTS1-3	41.45(16)	DRWTS2-3	41.48(16)	DRWTS3-3	41.46(16)
DRWTS1-3	41.70(16)	DRWTS2-3	41.71(16)	DRWTS3-3	42.13(16)
DRWTS1-3	41.52(16)	DRWTS2-3	41.82(16)	DRWTS3-3	41.97(16)
DRWTS	41.61(16)	DRWTS	41.49(16)	DRWTS	41.68(16)

Srednje vrednosti za odbroje dobijena računanjem aritmetičke sredine za date tabele (*DRWTS*, *DWTS*, *DRW*) daje sledeće rezultate:

$$\overline{R_{DRWTS}} = 41.59(16)s^{-1}$$

$$\overline{R_{DWTS}} = 41.39(16)s^{-1}$$

$$\overline{R_{DRW}} = 0.0232(6)s^{-1}$$

5.2.1. Efikasanost detektora

Efikasanost detektora predstavlja sposobnost detektora da registruje što veći broj čestica koje dospeju na njegovu efikasnu zapreminu (efikasna zapremina predstavlja prostorni deo detektora koji nakon interakcije sa zračenjem može da proizvede neki merljiv podatak o postojanju čestice). Efikasanost detektora se izražava najčešće u procentima.

Efikasanost za tečni scintilacioni detektor *Quantulus 1220* se izračunava prema formuli (*ASTM D 4107 – 08, 2006.*):

$$\varepsilon = \frac{\overline{R_{DWTS}} - \overline{R_{DRW}}}{A_{DWTS}} \quad (1.8)$$

Prema merenjima urađenim pri izradi rada dobijeno je da je efikasanost detektora:

$$\varepsilon = 0.304146 \approx 30.4\%$$

Greška efikasnosti detektora (tečnog scintilacionog *Quantulus 1220*) izračunava se prema izrazu 1.9. (*ASTM D 4107 – 08*, 2006.).

$$U(\varepsilon) = \sqrt{\frac{\overline{R}_{DWTS} + \overline{R}_{DRW}}{\frac{\overline{t}_{DWTS}}{A_{DWTS}}^2 + \varepsilon^2 \left(\frac{U(A_{DWTS})}{A_{DWTS}} \right)^2}} \quad (1.9.)$$

Za grešku pri merenju efikasnosti detekotra dobijeno je:

$$U(\varepsilon) = 2.0735 \cdot 10^{-3} \approx 2.1 \cdot 10^{-3}$$

Tako da celokupan rezultat za mrenje efikasnosti i greške napravljene pri merenju iznosi:

$$\varepsilon = 0.3041 \pm 0.0021$$

Za određivanje efiksnosti detektora i geške merenja korišteni su sledeći podaci (koji su dobijeni merenjem):

$$A_{DWTS} = 136Bq$$

$$U(A_{DWTS}) = 0.188Bq$$

$$t_{DRW} = 21600s$$

$$t_{DWTS} = 600s$$

$$\varepsilon = 0.304$$

$$\varepsilon = 30.41(21)\%$$

5.2.2. Recovery faktor

Raccovery faktor definiše ponovljivost merenja. Izračunava se prema formuli 1.10. (*ASTM D 4107 – 08*, 2006.).

$$F = \frac{\overline{R}_{DRWTS} - \overline{R}_{DRW}}{\varepsilon \cdot A_{DWTS}} \quad (1.10.)$$

Kako bi se merenje smatralo ponovljivim, rekovery faktor treba da je što približniji jedinici. Kod ASMT metode dobijeno je za rekovery faktor (korištenjem dole navedenih podataka) 1.005021 što je u skladu sa zahtevom.

$$\overline{R}_{DRWTS} = 41.59(16)s^{-1}$$

$$F = 1.005021 \approx 1$$

$$\overline{R}_{DRW} = 0.0232(6)s^{-1}$$

$$A_{DWTS} = 136Bq$$

$$\varepsilon = 0.304$$

5.2.3. MDC

MDC predstavlja minimum aktivnosti koja se može detektovati. Minimalna aktivnost detekcije MDC se računa prema sledećem obrascu 1.11. (*Currie L. L. A.*, 1968.).

$$MDC = \frac{2.71 + 3.29 \sqrt{R_{DRW} \cdot t_a \cdot (1 + \frac{t_a}{t_b})}}{\varepsilon \cdot t_a \cdot F \cdot V \cdot e^{-\lambda t}} \quad (1.11.)$$

$$V = 8ml$$

t_a – vreme merenja uzorka

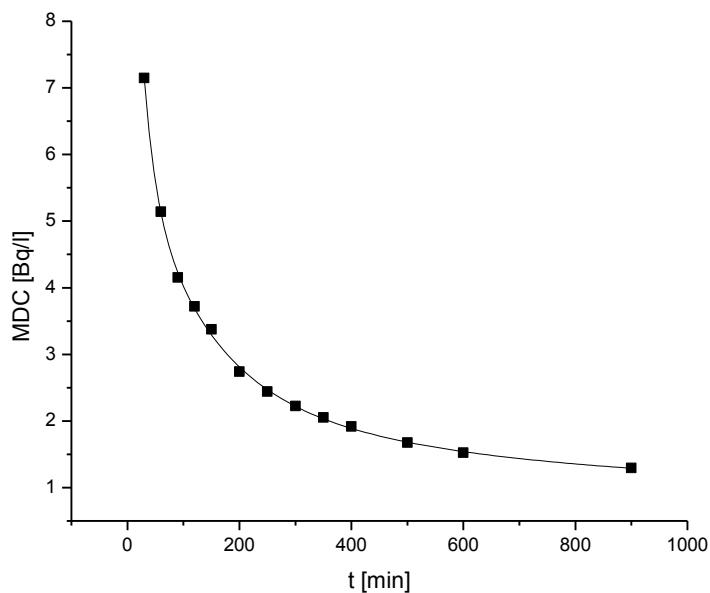
t_b – vreme merenja DRW

U tabeli 5.4. predstavljene su vrednosti dobijene za grešku i odbroje dobijene *Quantulus-om 1220*. Druga kolona u tabeli 5.4. prikazuje vreme mernja. Na jednom uzorku je izvršeno trinaest merenja različite vremenske dužine (30, 60, 90, 120 ... minuta) koja je data u sekundama. Pošto su merenja vršena na uzorku DRW, što je korekcija fona, vremena za uzorak i DRW su izjednačena. Poslednja kolona prikazuje vrednosti dobijene uvršavanje datih rezultata u formulu 1.11. za MDC.

Tabela 5.4. Odbroj dobijen pri merenju MDC-a.

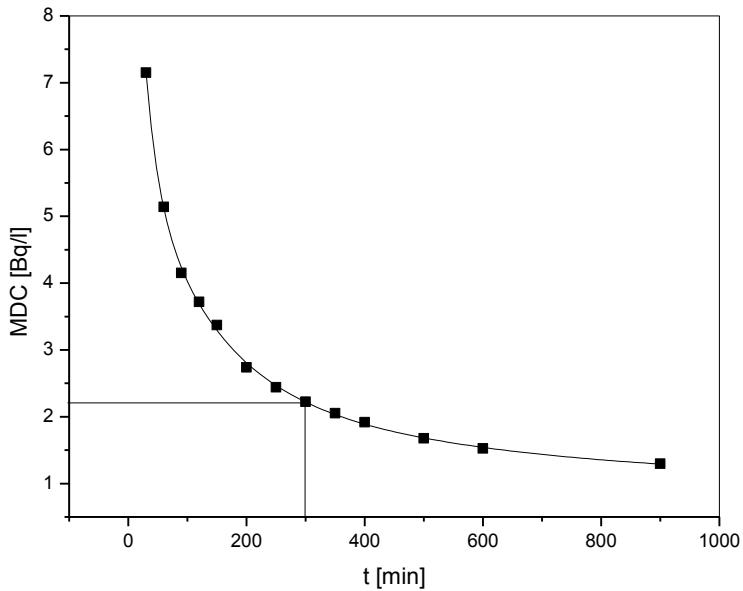
$R_{DRW}(\sigma)s^{-1}$	$t_a[s]$ ($t_a=t_b$)	$MDC(Bq/l)$
0.0210(21)	30	7.149806
0.0230(16)	60	5.142366
0.0230(13)	90	4.152348
0.0250(11)	120	3.717579
0.0260(9)	150	3.373598
0.0230(8)	200	2.739912
0.0230(7)	250	2.441884
0.0230(7)	300	2.223216
0.0230(6)	350	2.054047
0.0230(6)	400	1.918179
0.0220(5)	500	1.674488
0.0220(5)	600	1.525637
0.0240(4)	900	1.295306

Na slici 5.4. prikazan je MDC faktor u zavisnosti dužine merenja izražne minutama. Povlačenjem krive koja ima najbolja poklapanja sa tačkama koje su nacrtane, može se dobiti vrednost MDC za dati detektor korištenjem ASTM metode (*ASTM D 4107 – 08*, 2006.).



Slika 5.3. Grafik MDC-a.

MDC faktor u ovom radu očitan je za vreme od 300min i iznosi 2.22321599 Bq/l .



Slika 5.5. Rezultati MDC-a.

Rezultati vezani za određivanje MDC, dobijeni u ranijim merenjima putem direktnе metode i elektrolitičkog obogaćenja uzorka (Nikolov J. et. al. 2012.) prikazani su u tabeli 5.5. Merenja su vršena u vremenskom okviru od pola godine, na uzorcima kišnice prikupljenim sa Zelenog Brda i potoka Mlaka (okolina nuklearnog centra Vinča). Vidi se da je granica detekcije aktivnosti, MDC, kod primene direktnе metode 2.1 Bq/l (Nikolov J. et. al. 2012.). Vreme merenja

je različito, odnosno, kod uzorka koji su elektrolitički obogaćeni, potrebno je manje vremena za merenje. Direktnom metodom se meri 300 min, dok kod uzorka koji su obogaćeni vreme merenja je smanjeno na 90 min.

Tabela 5.5. Rezultati dobijeni za MDC putem dve metode, u okviru pola godine (Nikolov J. et. al. 2012.).

Uzorci iz 2010.-e	Direktna ASTM metoda (Bq/l)	Elektrolitičko obogaćenje (Bq/l)
Kišnica Zeleno brdo, April	< MDC	1.37±0.20
Kišnica Zeleno brdo, Maj	2.19±0.20	2.53±0.13
Kišnica Zeleno brdo, Jul	2.63±0.24	2.59±0.20
Kišnica Zeleno brdo, Avgust	3.7±0.3	3.9±0.4
Kišnica Zeleno brdo, Oktobar	2.83±0.26	2.93±0.24
Kišnica Zeleno brdo, Novembar	2.83±0.26	3.56±0.27
Potok Mlaka, April	26.7±2.4	26.5±1.1
Potok Mlaka, Jul	24.9±2.3	26.0±1.1
Potok Mlaka, Oktobar	44±4	42.8±1.1

Odabir metode za pripremu uzorka zavisi od vremenskog zahteva za dobijanje rezultata, kao i koncentracije aktivnosti koja se određuje. Priprema uzorka elektrolitičkim obogaćivanjem traje osam dana. Uzorak vode može da se pripremi putem direktne metode za samo par sati (5 - 6 h). Vreme potrebno za merenje u tečnom scintilacionom detektoru da bi se dobila zadovaljavajuća granica detekcije, sa druge strane je manje kod uzorka koji su obogaćeni (90 min), za razliku od uzorka dobijenih direktnom metodom (300 min). Uzorci koji su elektrolitički obogaćeni imaju izuzetno nizak prag detekcije (0.1 Bq/l), dok je kod uzorka pripremljenih direktnom metodom granica detekcije 2.1 Bq/l (Nikolov J. et. al. 2012.).

5.3. Eksperimentalna potvrda ASTM metode

U okviru programa Monitoringa Srbije u periodu od maja 2011. do aprila 2012.godine, Laboratorija za nuklearnu fiziku sa Departmana za fiziku, pored ostalih merenja merila je i koncentracije aktivnosti tricijuma u vodi za piće uzetoj iz vodovoda koji se dopunjaje rečnom vodom. Uzorci vode, predviđeni za analizu sadržaja tricijuma putem ASTM metode, prikupljani su iz vodovoda koji se dopunjaju vodom iz Save i Dunava. Uzorci vode iz Save su uzimani u dve tačke, Sremskoj Mitrovici i Beogradu, a uzorci vode iz Dunava kod Bezdana i Novog Sada. Merenja su vršena prema ASTM metodi, tečnim scintilacionim detektorom *Quantulus 1220*. Kalibracijom tečnog scintilacionog detektora Quantulus 1220 dobijena je granica detekcije MDC, minimalna koncentracija aktivnosti koja se može detektovati u vrednosti od 2.1 Bq/l. Dobijeni rezultati su izraženi u obliku specifične aktivnosti tricijuma u vodi, odnosno Bq/l.

U nastavku dat je hronološki pregled rezultata dobijenih za merenja od godinu dana, tačnije od maja 2011. do aprila 2012. godine. (*Laboratorija za ispitivanje radioaktivnosti uzorka i doze ionizujućeg i nejonizujućeg zračenja*, 2012.)

Praćenjem promena koncentracije aktivnosti tricijuma, na primer, na reci Savi uzorkovanoj na dve lokacije, kod Sremske Mitrovice i Beograda, pokazalo je da je aktivnost tricijuma u pomenutom periodu bila konstantno i uglavnom ispod granice detekcije tečnog scintilacionog detektora *Quantulus 1220* kod uzorka prpremeljenim direktnom metodom. Blago povišenje koncentracije aktivnosti tricijuma vidi se samo u uzorku iz januara 2012. uzetog iz Save kod Sremske Mitrovice, tabela 5.6. Skok sa nemerljive vrednosti koncentracije aktivnosti

tricijuma (manje od MDC 2.1 Bq/l) na vrednost od 17.9 Bq/l, objašnjen je remontom nuklearne elektrane Krško u Sloveniji. Povišenje koncentracije aktivnosti tricijuma u reci Savi i dalje je daleko ispod zakonske granice (100 Bq/l).

Tabela 5.6. Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Savi kod Sremske Mitrovice.

	A(³ H) [Bq/l]		A(³ H) [Bq/l]
Maj 2011.	< 2.1	Novembar 2011.	< 2.1
Jun 2011.	< 2.1	Decembar 2011.	< 2.1
Jul 2011.	< 2.1	Januar 2012.	17.9 ± 2.3
Avgust 2011.	< 2.1	Februar 2012.	< 2.1
Septembar 2011.	< 2.1	Mart 2012.	< 2.1
Oktobar 2011.	3.166 ± 0.013	April 2012.	< 2.1

Tabela 5.7. Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Savi kod Beograda.

	A(³ H) Bq/l		A(³ H) Bq/l
Maj 2011.	< 2.1	Novembar 2011.	< 2.1
Jun 2011.		Decembar 2011.	
Jul 2011.		Januar 2012.	
Avgust 2011.	< 2.1	Februar 2012.	< 2.1
Septembar 2011.		Mart 2012.	
Oktobar 2011.		April 2012.	

Tricijum ima period poluraspada od 12.33 godina tako da je i malo povišenje koncentracije aktivnosti iz januara zabeleženo kod Sremske Mitrovice opalo i postalo nemerljivo

tečnim scintilacionim detektorom *Quantulus 1220* u uzorcima koji su u istom periodu uzeti na analizu u Beogradu. Pored perioda poluraspada smanjenje koncentracije aktivnosti tricijuma kod Beograda prouzrokovano je i prilivom velike količine vode iz Dunava koja je razblažila koncentraciju tricijuma. Tabela 5.7. prikazuje koncentracije aktivnosti dobijene za uzorke reke Save prikupljene u Beogradu. U vremenskom periodu od godinu dana nije zabeležen nijedan slučaj porasta aktivnosti tricijuma i tokom celog perioda bio je manji od granice detekcije.

Tabela 5.8. *Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Dunavu kod Bezdana.*

	A(${}^3\text{H}$) Bq/l		A(${}^3\text{H}$) Bq/l
Maj 2011.	3.943 ± 0.005	Novembar 2011.	2.891 ± 0.004
Jun 2011.	2.151 ± 0.004	Decembar 2011.	< 2.1
Jul 2011.	< 2.1	Januar 2012.	< 2.1
Avgust 2011.	< 2.1	Februar 2012.	2.852 ± 0.003
Septembar 2011.	< 2.1	Mart 2012.	< 2.1
Oktobar 2011.	< 2.1	April 2012.	< 2.1

Tabela 5.9. *Rezultati dobijeni za merenje tricijuma u Dunavu kod Novog Sada.*

	A(${}^3\text{H}$) Bq/l		A(${}^3\text{H}$) Bq/l
Maj 2011.	< 2.1	Novembar 2011.	< 2.1
Jun 2011.		Decembar 2011.	
Jul 2011.		Januar 2012.	
Avgust 2011.	< 2.1	Februar 2012.	< 2.1
Septembar 2011.		Mart 2012.	
Oktobar 2011.		April 2012.	

Analiza Dunava pokazala je da u periodu od godinu dana nije bilo značajnih porasta koncentracije aktivnosti tricijuma, koja je uglavnom bila ispod merljive vrednosti. U tabeli 5.8. predstavljene su vrednosti dobijene za uzorke prikupljene kod Bezdana. Uzorci prikupljeni u delu Dunava kod Novog Sada dati su u tabeli 5.9. Izuzetno male varijacije u koncentraciji aktivnosti

tricijuma u uzorcima vode iz Dunava kod Bezdana mogu se objasniti prolaskom Dunava kroz nuklearno razvijene države Evrope.

Izmerene koncentracije aktivnosti tricijuma u uzorcima vode za piće su veoma niske i ispod granice detekcije za tečni scintilacioni detektor *Quantulus 1220*.

6. Zaključak

U radu je prikazana metoda pripreme uzoraka za određivanje tricijuma u svežoj vodi i objašnjen postupak merenja koncentracije aktivnosti tricijuma u pripremljenim uzorcima tečnim scintilacionim detektorom *Quantulus 1220*. Tečni scintilacioni detektor *Quantulus 1220* spada u detektore sa velikom osetljivosti za niske energije. Mogućnost detekcija niske energije zračenja od izuzetnog značaja je pri analizi tricijuma koji spada u slabe beta emitere (energija je u granicama od $5.6 - 18.6 \text{ keV}$). Tečni scintilacioni detektor *Quantulus 1220* ima aktivnu i pasivnu zaštitu koja mu omogćava visoku preciznost, stabilnost, dobru efikasnost i mali fon pri merenju niskoenergetskih čestica.

U radu su prikazane dve različite metode pripreme uzoraka vode za detekciju tečnim scintilacionim detektorom *Quantulus 1220*, *direktna metoda i metoda elektrolitičkog obogaćenja*.

Direktna metoda ima znatno kraće vreme predtretmana uzorka vode (nekoliko sati) u odnosu na metodu elektrolitičkog obogaćenja (nekoliko dana). Međutim, prag detekcije kod uzoraka koji su pripremljeni direktnom metodom je 2.1 Bq/l i veći je od granice detekcije koja iznosi samo 0.1 Bq/l za uzorce vode koji su elektrolitički obogaćeni. Vreme merenja koncentracije aktivnosti za uzorce pripremljene elektrolitičkim obogaćenjem iznosi okvirnih 90 min i manje je u odnosu na uzorce pripremljene direktnom metodom (300 min).

U radu je postupno prikazana kalibracija detektorskog sistema *Quantulus 1220* ASTM metodom i za minimalnu detektibilnu vrednost koncentracije aktivnosti (MDC) tricijuma u uzorcima vode dobijena je vrednost od 2.22 Bq/l što je zadovoljavajuća granica detekcije. Vrednost dobijena za *efikasanost detektora* prilikom merenja koncentracije aktivnosti tricijuma je 30.41% , a za *recovery faktor* 1.005 , što se lepo poklapa sa rezultatima drugih autora.

U radu su prikazane vrednosti koncentracija aktivnosti tricijuma u uzorcima pripremljenim na dva načina: putem direktnе metode i elektrolitičkog obogaćenja i merenim na tečnom scintilacionom detektoru *Quantulus 1220* za uzorce vode iz kišnice koja je sakupljana na Zelenom brdu, potoku Mlaka, rekama Savi (merenim u dve tačke, kod Sremske Mitrovice i Beograda) i Dunavu (merenim u dve tačke, kod Bezdana i Novog Sada).

Potok Mlaka i Zeleno brdo nalaze se u okolini Instituta za nuklearne nauke Vinča, iako danas reaktor ne radi pa ne postoji značajna bojazan od radiokontaminacije ovog područja, ipak je važno raditi kontinuiran monitoring ovog područja.

Praćenje koncentracije aktivnosti tricijuma u reci Savi radi se zbog njenog proticanja kroz područje gde se nalazi nuklearna elektrana (Slovenija, Krško).

Monitoring Dunava se radi iz istog razloga, proticanja reke kroz nuklearno razvijene zemlje zapadne Evrope.

Blago povišenje koncentracije aktivnosti tricijuma na uzorcima kišnice prikupljenim sa Zelenog brda su u skladu sa postojanjem nuklearnog centra i daleko su ispod kritičnih. U potoku Mlaka nešto su izraženije koncentracije tricijuma (44 Bq/l), ali to je u skladu sa malim protokom vode i velikom blizinom nuklearnog centra.

Analiza tricijuma u uzorcima reke Save pokazala je samo trenutni blagi porast (17.9 Bq/l) vrednosti koncentracije aktivnosti tricijuma kod Sremske Mitrovice, što je objašnjeno remontom nuklearne elektrane Krško u Sloveniji. Ostale vrednosti dobijene za uzorce vode su praktično ispod granice detekcije tečnog scintilacionog detektora *Quantulus 1220* (manje od $< 2.1 \text{ Bq/l}$).

Granična koncentraciju aktivnosti tricijuma u vodi propisana zakonom iznosi 100 Bq/l . Sve izmerene vrednosti ne prelaze zakonom propisanu vrednost i daleko su ispod kritičnih vrednosti.

Tečni scintilacioni detektor Quantulus 1220 je „*ultra-low-level*“ brojač i kao takav je pogodan za merenje izuzetno niskih koncentracija aktivnosti alfa i beta emitera, pa kao takav pruža širok spektar mogućnosti za rad i merenja ne samo tricijuma već i drugih radionuklida.

LITERATURA

- ASTM D 4107 – 08, *Standard Test Method for Tritium in Drinking Water*, ASTM International, West Conshohocken, PAhttp://dx.doi.org/10.1520/D4107-09. (2006.)
- Australijska vlada, *Australian drinking water guidelines*, Nacionalno istraživanje, Sidnej 29-35. (2011.)
- Birks J. B., *The Theory and Practice of Scintillation Counting*, New York (1964.)
- Browne E., R. B. Firestone, “*Table of Radioactive Isotopes*, New York (1986.)
- Burles S., Nollett K. M., Turner M. S., *Big-Bang Nucleosynthesis: Linking Inner Space and outer Space*, Čikago, (1999.)
- Cameron J. F., *A survey of Systems for Concentration and Low Background Counting of Tritium in Water*, Radioactive Dating and Methods of Low – Level Counting IAEA, Vienna, pp. 543-573 (1967.)
- Chalmer U., *Risk assessment tool*, Getemburg, in press (2005.)
- Ćirić– Marijanović G., *Molekulska spektroskopija*, Novi Sad (2010.)
- Currie L. L. A., *Limits for qualitative detection and quantitative determination*, Application to radiochemistry. Anal. Chem. 40, 586-593 (1968.)
- Dalmacija B., *Kontrola kvaliteta vode za piće u svetu HACCP-a*, Novi Sad, in press (2010.)
- Dragišić R., *Opšta hidrogeologija*, Beograd (1997.)
- Đurović S., *Atomska fizika*, Novi Sad (2004.)
- European Commission, *European Drinking Water Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the Quality of Water Intended for Human Consumption*, Official Journal Legislation, 330. (1998.)
- Gaisser T., *Cosmic Rays and Particle Physics*, Kembridž, in press (1990.)
- Grujić S., *Brze nedestruktivne metode detekcije fisionih produkata pri dekomisiji nuklearnih reaktora*, doktorska disertacija, Novi Sad (2012.)
- Gradska uprava grada Beograda, *Kvalitet životne sredine grada Beograda u 2009. godini*, nacionalno istraživanje, Beograd, 74-76, 82, 94-95. (2010.)
- Janić I., *Osnovi atomske fizike*, Novi Sad (1992.)
- Kiurski J.. *Tehnologija vode*, Kvalitet vode, danas. Banja Luka, 17-19, 23-24. (2008.)
- Knoll G. F., *Radiation Detection and Measurement*, New York, (1989.)
- Krmar M., *Uvod u nuklearnu fiziku*, Novi Sad (2013.)
- Lucas L. L., Unterweger M. P., *Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium*, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 150 (4), 541-549. (2000.)
- Laboratorijski zapisnik radioaktivnosti uzoraka i doze ionizujućeg i nejonizujućeg zračenja, Izveštaj o realizaciji programa sistemskog ispitivanja radioaktivnosti u životnoj sredini u periodu od maja 2011. do aprila 2012. godine, Monitoring radioaktivnosti u životnoj sredini na teritoriji Republike Srbije, Agencija za zaštitu od ionizujućeg zračenja i nuklearne sigurnosti Srbije (2012.)
- Marinkov L., *Osnovi nuklearne fizike*, Novi Sad (2010.)
- Miljanić Š., *Užbenik nuklearne hemije*, Beograd (2008.)
- Mijatović Z., Đurović S. „*Osnove elektronike i digitalne elektrotehnike*”, Novi Sad (2005.)
- Miljević N., Šipka V., Žujić A., Golobočanin D., *Tritium around the Vinča Institute of Nuclear Sciences*, J. Environ. Radioact. 48, 303-315. (2000.)

- Molak B., *Environmental Risk Analysis Needs in an Industrial City, Society for Risk Analysis*, Annual Meeting, Baltimor, USA (International Section), MPM-J1, A-37, 34, 69-75. (1991.)
- Nemchenok I., *Organski scintilatori*, International Seminar of Low-level Counting in Environmental Radioactivity Monitoring, London, 232-237, 360-375. (2009.)
- Nešić S., Jovetić M., Stojanović I., *Praktična obuka i laboratorijske vezbe iz hemije za 1. i 2. razred srednje škole*, Beograd (2002.)
- Nikolov J., Todorović N., Janković M., Voštinar M., Bikit I., Forkapić S., Mrđa D., Vesković M., *Different methods for tritium determination in surface water by LSC*, Applied Radiation and Isotopes. 71, 51-56. (2013.)
- Noakes J. E., De Filippis S., *Tritium monitoring of nuclear power plants by liquid scintillation counting*, In: Proceedings of the Second International Seminar od Liquid Scintillation Analysis, Tpkyo, Japan, p. 123-129. (1988.)
- Perkin Elmer, *Easy view*, user manual, Finland (1998.)
- Perkin Elmer, *Order Guide*, hardwer manual, Finland (2002.)
- Perkin Elmer, *Wallac Quantulus 1220, Ultra Low Level Liquid Scintillation Spectrometer*, software manual, Finland (2002.)
- Perkin Elmer, *Windowa software for controlling Wallac 1220 Quantulus*, software manual, Finland (2000.)
- Peebles P. J. E., *Principles od physical cosmology*, Prinston, in press (1993.)
- Perišić-Janjić N., *Opšta hemija*, Beograd (1993.)
- Pešić J., *Nuklearna fizika*, Beograd (2013.)
- Povinec P. P., *Analysis of environmental radionuclides*, Amsterdam (2008.)
- Povinec P. P., *Rare Nuclear Processes*, International Seminar of Nuclear Physic Today, Singapur, 40, 45-48, 62-63. (1992.)
- Svetolik Radovanović, *Podzemne Vode*, Beograd (1897.)
- Rauscher Patkos A.. *Origin of the Chemical Elements*, International Seminar of Chemistry, Kina 84-91. (1995.)
- Straume T., Carsten A. L., *Tritium Radiobiology and Relative Biological Effectiveness. Health Physics*, International Seminar of Health Influenc Nuclear Powerplants, Beč 17, 25-40. (1993.)
- Steigman G., *Primordial nucleosynthesis: successes and challenges*, London (2002.)
- Theodorsson P., *Measurement of Weak Radioactivity*, , International Seminar of od Liquid Scintillation Analysis, Singapur, A-71, 422-425, 428-431. (1996.)
- The NEED Project, *Hydrogen*, Secondary Energy Infobook, Canada p. 54-55. (2012.)
- The WSRC Team, *Health Effects od Tritium*, Washington Savannah River Company USA, in press. (2005.)
- Todorović N., Nikolov J., Forkapić S., Bikit I., *Određivanje koncentracije aktivnosti tricijuma u Dunavu tečnim scintilacionim detektorom*, Zbornik radova, Društvo za zaštitu od zračenja Srbije i Crne Gore, p. 78-81. (2011.)
- Tykva R., Dieter Berg,*Man-Made and Natural Radioactivity in Environmental Pollutin and Radiochronology*, Nizozemska (2004.)
- U.S.NRC, *Tritium, Radiation Protection Limits, and Drinking Water Standards*, United States Nuclear Regulatory Commissison, USA,
<http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/grndwtr-contam-tritium.html>
<http://www.epa.gov/radiation/radionuclides/tritium.htm> (2011.)
- Veljković N., *Procena i upravljanje rizicima u vodovodnim sistemima i indikatori rizika kvaliteta vode za piće u Srbiji*, Kvalitet vode na području Srbije, Beograd p.12-15. (2009.)

- Veljković N., *Unapređenje kvaliteta vode kod lokalnih vodovoda i kanalisanje manjih mesta u Srbiji*, Kvalitet vode na području Beograda, Beograd, p. 11-12, 18-21. (2010.)
- Vučić D., Popov S., *Fizička hemija*, Beograd. 2004. (knjiga)
- Vukmirović M., *Digitalna hidrogeološka karta*, Niš 2007. (naučn apublikacija)

Biografija



Anja Begović rođena je u Zagrebu 12.08.1988. godine. Osnovnu i srednju školu završila je u Novom Sadu. Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, Departman za fiziku, smer fizičar istraživac upisala je 2007. godine. Diplomske-master studije na matičnom fakultetu, modul-fizičar istraživac, nuklearna fizika, upisala je 2013. godine.

U slobodno vreme bavi se volonterskim radom, član je omladinske organizacije Relay.

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO – MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Master rad

VR

Autor:

Anja Begović

AU

Mentor:

Doc. Dr Jovana Nikolov

MN

Naslov rada:

Merenje koncentracije aktivnosti tricijuma u vodi tečnim scintilacionim detektorom

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Republika Srbija

ZP

Uže groografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2014.

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

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

Fizički opis rada:

FO

Broj poglavlja: 6
Broj strana: 65
Broj lit. citata: 54
Broj tabela: 16
Broj slika: 21
Broj grafika: 2
Broj priloga: 0

Naučna oblast:

Fizika

NO

Naučna disciplina:

Nuklearna fizika

ND

*Predmetna odrednica/ključne
reči:*

Radioaktivnost, radioizotopi, kosmičko zračenje,
tricijum, voda za piće, hidrogeologija, tečni scintilacioni
detektor, Quantulus 1220

PO

UDK

Čuva se:

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena:

Nema

VN

Izvod:

U ovom master radu opisano je merenje koncentracije aktivnosti tricijuma u vodi tečnim scintilacionim detektorom. Akcenat je stavljen na predtretman uzorka, tako da su opisane dve metode: direktna metoda i metoda elektrolitikog obogaćenja. Uzorci vode su bili podvrgnuti različitim predtretmanima, a dobijeni rezultati su upoređeni i prokomentarisani.

Kao tečni scintilacioni detektor korišten je *Quantulus 1220*, koji spada u „*ultra-low-level*“ brojače koji su pogodni za merenje izuzetno niskih koncentracija aktivnosti kao što je slučaj sa tricijumom.

Dobijeni rezultati su u saglasnosti sa predviđenim očekivanjima koja su potvrđena u literaturi i analizama izvršenim za određivanje koncentracije aktivnosti tricijuma u vodi.

IZ

*Datum prihvatanja teme od NN
veća:*

DP

Datum odbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Dr Nataša Todorović, Vanr. Prof.

Član:

Dr Maja Stojanović, Vanr. Prof.

Član:

Dr Jovana Nikolov, Doc., mentor

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type:

Monograph publication

DT

Type of record:

Textual printed material

TR

Content code:

MSc thesis

CC

Author:

Anja Begović

AU

Mentor/comentor:

Jovana Nikolov, PhD, Assistant professor

MN

Title:

Determination of tritium in drinking water by liquid scintillation counter

TI

Language of text:

Serbian (Latin)

LT

Language of abstract:

English

LA

Country of publication:

Serbia

CP

Locality of publication:

Vojvodina

LP

Publication year:

2014.

PY

Publisher:

Author's reprint

PU

Publication place:

Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja
Obradovica 4, Novi Sad

Physical description:

PD

Chapters: 6
Pages: 65
Literature: 54
Tables: 16
Figures: 21
Graphics: 2
Appendix: 0

Scientific field:

SF

Physics

Scientific discipline:

SD

Nuclear physics

Subject/ Key words:

SKW

Radioactivity, radioisotope, cosmic radiation, tritium,
drinking water, hidrogeology, liquid scintillation counter,
Quantulus 1220

UC

Holding data:

HD

Library of Department of Physics, Trg Dositeja
Obradovića 4

Note:

N

None

Abstract:

In this paper was done measuring the activity of the tritium concentration in the water by liquid scintillation detector. Emphasis is placed on the pretreatment of the sample, so that the described

two methods: the direct method and the method of enrichment electrolysis. Water samples were subjected to different pretreatments, and the results were compared and commented.

As for liquid scintillation detector is used *Quantulus 1220*, which belongs to the "ultra-low-level" counters which are suitable for the measurement of very low concentrations of the activities, such as is the case with tritium.

These results are in agreement with the predicted expectations are confirmed in the literature and in analysis which was performed to determine the activity concentration of tritium in water.

AB

Accepted by the ScientificBoard:

ASB

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President: Nataša Todorović, PhD, Associate Professor

Member: Maja Stojanović, PhD, Associate Professor

Member: Jovana Nikolov, PhD, Associate Professor, mentor