



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



ISPITIVANJE SADRŽAJA ^{222}Rn

U VODI

- diplomski rad -

Mentor: dr Nataša Todorović

Kandidat: Dejan Kastratović

Novi Sad, 2016

SADRŽAJ

1.	UVOD	3
2.	OPŠTI DEO.....	4
2.1.	Radioaktivnost.....	4
2.2.	Radioaktivni elementi.....	4
2.3.	Radioaktivno zračenje	5
2.4.	Interakcija alfa zračenja sa materijom	6
2.4.1.	Domet alfa čestica	6
2.5.	Radioaktivni nizovi.....	13
2.6.	Radon.....	15
2.6.1	Raspad radona ^{222}Rn	17
3.	UTICAJ RADONA NA ZDRAVLJE	19
3.1.	Rasprostranjenost radona.....	21
3.2.	Radon u vodi.....	22
3.3.	Dozimetrija zračenja.....	23
4.	MERENJE RADIOAKTIVNOSTI.....	25
4.1.	Alfa – spektrometrijska metoda merenja radona	26
4.2.	Alfa – spektrometar RAD7 (Durrige Co.)	26
5.	REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA	33
6.	ZAKLJUČAK	35
7.	LITERATURA	36

Popis oznaka i skraćenica:

SZO	Svetska zdravstvena organizacija (engl: World Health Organization)
EPA	Agencija za zaštitu životne sredine (engl: Environmental Protection Agency)
SDWA	Standardi bezbednosti vode za piće (engl: Safe Drinking Water Act)
ALARA	Onoliko nisko koliko se razumski može postići (engl: As Low As Reasonably Achievable)
DCF	Korekcija na raspad (engl: Decay Correction Factor)

1. UVOD

Radioaktivnost je svuda oko nas, svaki trenutak našeg postojanja je prožet radioaktivnošću, što prirodnom, što proizvedenom. Svest o štetnosti radioaktivnosti nije bila razvijena sve do početka prošlog veka, a i od tada spoznaja o štetnosti konstantne izloženosti radioaktivnosti se vrlo teško probija do šire populacije stanovništva. Najveća prepreka ozbilnjijem prilasku tom problemu je sama priroda radioaktivnosti, jer ona nema ni mirisa, ni ukusa, a ni boje, a posledice izloženosti radioaktivnosti često nisu trenutne, nego su spore, pa čak je nekad potrebno da prođu generacije dok se ne pojave posledice izloženosti radioaktivnim izvorima.

Danas, radioaktivnost nije više toliko egzotični pojam kojim se bavi veoma mali broj stručnjaka koji rade u naučnim i obrazovnim institucijama. Zahvaljujući ekspanziji medija i interneta sve više se edukuje široka populacija u razumevanju štetnog uticaja i neophodnosti zaštite od radioaktivnosti. Sistemi i procedure praćenja radioaktivnosti i metode zaštite od prekomernog zračenja su postale sastavni deo zakonodavstva razvijenih i ekološko osvešćenih država. Ta pozitivna regulativa zahvaljujući globalnim integracijama lagano dolazi i do naših balkanskih zemalja. Za ovakve pozitivne pomake je zaista trebalo dugo čekati, jer prva zabeležena pojava štetnog uticaja prirodne radioaktivnosti je bio veliki broj respiratornih bolesti kod rudara u Erz Mountains-u 1556. godine u istočnoj Evropi. Tek se u XIX veku došlo do zaključka da je u pitanju rak pluća koji su rudari dobijali kao posledicu dugotrajnom izlaganju visokoj radijaciji tokom rada u rudnicima.

Novija istraživanja pokazuju da u normalnim uslovima preko 70% ukupne godišnje doze radioaktivnosti koju primi stanovništvo potiče iz prirodnih izvora jonizujućeg zračenja, pri čemu 40% se odnosi na inhalaciju i ingestiju prirodnog radioaktivnog gasa radona ^{222}Rn i njegovih potomaka. To je danas pogotovo izraženo, jer savremeno gradsko stanovništvo, koje čini većinu ukupne svetske populacije, većinu svog vremena provodi u zatvorenim klimatizovanim prostorijama sa zatvorenim tokom vazduha. U tim sredinama bez prirodne cirkulacije vazduha se stvaraju izuzetno povoljni uslovi za stvaranje značajnijih koncentracija radona i njegovih potomaka. To dovodi do podatka da je radon odgovoran za preko 20000 smrtnih slučajeva obolelih od kancera pluća samo u EU, tj. za oko 9% svih smrtnih slučajeva uslovljenih kancerom pluća. Svetska zdravstvena organizacija (SZO) preporučuje da se izvrši merenja koncentracija radona gde god je to moguće i u zavisnosti od dobijenih rezultata izvršiti određene mere i akcije da bi se izloženost stanovništva radioaktivnom gasu umanjila koliko god je to moguće. Upravo iz razloga postoje radonske mape koje precizno pokazuju koncentracije radona na određenim teritorijama i u zavisnosti od informacija kojima se raspolaže zahvaljujući radonskim mapama, organizuju se akcije da bi se stanovništvo edukovalo ili zaštitilo.

Najveći deo radona sa kojim dolazimo u dodir migrira iz zemljišta kroz pukotine u prostorije u kojima boravimo, jedan deo radona može dolaziti i od građevinskog materijala, a takođe i putem vode koju koristimo u domaćinstvu (kuvanje, pranje, tuširanje...).

Nas u ovom radu prvenstveno interesuje radon rastvoren u vodi, a posebno ćemo obratiti pažnju na uzorce vode uzete sa prirodnih izvora u Crnoj Gori koji nemaju prethodnu industrijsku obradu. Izmerićemo njihovu radioaktivnost pomoću odgovarajućih instrumenata, rezultate predstaviti i izvući odgovarajuće zaključke iz dobijenih rezultata.

2. OPŠTI DEO

2.1. Radioaktivnost

Radioaktivnost, pojava da se jezgra nekih hemijskih elemenata spontano raspadaju usled čega dolazi do stvaranja drugih elemenata, uz emisiju radioaktivnog zračenja [1]. Do otkrića radioaktivnosti došlo se skoro slučajno, fizičar Bekerel (*Antoine Henri Becquerel*) je ispitivao eventualnu vezu između fosforescencije i rendgenskih zraka koji su bili već ranije otkriveni. Među materijama koje je ispitivao bili su i kristali nekih uranovih soli i došao do saznanja da emituju zračenje koje ima veću prodornu moć od rendgenskog zračenja. Tako je Bekerel (*Becquerel*) 1896. godine otkrio da uran i njegova jedinjenja bez ikakvog spoljašnjeg izazivača, spontano zrače. Te godine otkriveno je da i torijum emituje te iste zrake koje su nazvali Bekerelovi zraci. Ozbiljniji napredak u toj oblasti su 1898. godine napravili Marija i Pjer Kiri (*Maria Skłodowska-Curie i Pierre Curie*) koji su zaključili da su Bekerelovi zraci atomska pojava, karakteristična za element bez obzira na njegovo fizičko ili hemijsko stanje. Oni su ovu pojavu nazvali radioaktivnost, a zračenje koje emituju takvi radioaktivni elementi, radioaktivno zračenje [2].

2.2. Radioaktivni elementi

Radionuklidi su ušli u sastav naše planete još prilikom njenog formiranja, tako da su rasprostranjeni svuda oko nas. Možemo ih naći u vodi, zemljištu, vazduhu, živim organizmima, građevinskim materijalima... Nastanak radionuklida je vezana za proces sinteze jezgara. Prva jezgra, ona najlakša su nastala pre nekoliko milijardi godina u toku nastanka univerzuma. Kasnije se proces nukleosinteze odvija konstantno u jezgrima zvezda i tada nastaju složenija jezgra, osim stabilnih, mnoga formirana jezgra su i nestabilna. Starost Zemlje je ogromna i većina tih nestabilnih jezgara se već raspala. Do danas su preživela samo jezgra sa veoma velikim periodom poluraspada većim od 500 miliona godina, kao što su kalijum ^{40}K , uranijum ^{235}U , uranijum ^{238}U , itd.

Sve radionuklide možemo svrstati u dve kategorije [3]:

Prirodni radionuklidi, koji se dele na

- Primodijalni (provobitni), oni od pre nastanka naše planete i
- Kosmogeni, nastali interakcijom kosmičkih zraka sa atmosferom

Antropogeni (proizvedeni) radionuklidi

Primodijalni radionuklidi predstavljaju najznačajniji izvor jonizujućeg zračenja u životnoj sredini. Samo oni prvobitni radionuklidi sa periodom poluraspada od 10^5 - 10^{16} su značajnije zastupljeni u našem okruženju, kao što su: ^{235}U , ^{238}U i ^{40}K . Ostali terestrijalni radioaktivni elementi su manje zastupljeni i ne doprinose značajnije ukupnoj radioaktivnosti, i to su sledeći elementi: ^{50}V , ^{87}Rb , ^{113}Cd , ^{115}In , ^{123}Te , ^{138}La , ^{142}Ce , ^{144}Nd i drugi.

Kosmogeni radionuklidi nastaju interakcijom kosmičkog zračenja visoke energije koje nastaje u galaktičkim i solarnim izvorima. U gornjim slojevima atmosfere kosmičko zračenje reaguje sa atomima azota i kiseonika, nuklearnim reakcijama dolazi do sinteze nekoliko radioaktivnih elemenata, kao što su ^{14}C i ^{7}Be . Oni transportnim procesima koji se dešavaju u atmosferi šire svoje prisustvo i doprinose ukupnoj prirodnoj radioaktivnosti.

Pored prirodnih radionuklida u prirodi se mogu naći i radioaktivni elementi nastali ljudskom aktivnošću tokom različitih tehnoloških procesa. Najveći procenat tih radionuklida je nastao u procesima fisije prilikom cepanja teških jezgara. Fisioni procesi su veoma zastupljeni u oblasti energetike i vojne industrije. Pogotovo u periodu nekontrolisane trke u naoružanju kada je tokom testiranja atomskog oružja u atmosferu isporučeno $9,6 \cdot 10^{17}$ Bq jonizujućeg zračenja. Drugi uzrok su havarije nuklearnih objekata gde su najpoznatiji Černobil 80tih godina prošlog veka i Fukušima 2011. godine. Samo prilikom černobilske havarije u atmosferu je $3,8 \cdot 10^{16}$ Bq cezijuma ^{137}Cs , od čega je jedan deo dospeo i do naših teritorija [4].

2.3. Radioaktivno zračenje

Atomsko jezgro može da emituje tri vrste zračenja: α (alfa), β (beta) i γ (gama) zračenje. Svako zračenje je, u stvari, posledice neke promene u jezgru. Vrsta emitovanog zračenja zavisi od promene u jezgru koje ga je izazvalo, takođe, i svaka vrsta zračenja se drugačije ponaša u interakciji sa okolnom supstancijom. U zavisnosti od osobina zračenja, možemo ih podeliti u tri osnovne grupe:

- Alfa zraci (α -zraci) su korpuskularne prirode i predstavljaju dvaput jonizovano jezgro helijuma. To znači da su α -čestice pozitivno nanelektrisane sa dva elementarna nanelektrisanja e . Prilikom radioaktivne transformacije jezgra, α -čestice napuštaju jezgro u kom su nastale velikom brzinom, oko šestine brzine svetlosti. Prolaskom kroz materiju vrše intenzivnu ionizaciju atoma u neposrednoj blizini njihove trajektorije. Tokom ionizacije α -zraci veoma brzo gube energiju jer je ionizacija veoma intenzivna. Usled toga α -zraci imaju malu prodornost, jer veoma brzo izgube celokupnu početnu energiju i dovoljna je metalna folija debljine samo 0,1 mm da bi čestica izgubila svu svoju energiju. Čak je spoljni deo ljudske kože dovoljan da zaustavi α -zračenje. Alfa zračenje određenog radioaktivnog elementa ili ima samo određenu energiju zračenja ili je energija zračenja podeljena u nekoliko grupa i tada možemo govoriti o energetskim spektrima α -čestica.

- Beta zraci (β -zraci) su posledica tri vrste raspada u jezgru:
 - Beta minus raspad (β^-) se dešava kada je u jezgru višak neutrona, u tom slučaju se neutron transformiše u proton uz emisiju elektrona

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$
 - Beta plus raspad (β^+) se dešava kada je u jezgru višak protona, u tom slučaju proton se transformiše u neutron uz emisiju pozitrona

$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e$$
 - K zahvat se dešava kada jezgro zahvati jedan elektron iz K ljeske, tada se proton transformiše u neutron uz transformaciju u novi hemijski element. Nastala šupljina u K ljesci sa elektronom više energije i razlika energije se emituje karakterističnim fotonom (x-zrak) ili putem Augerovog elektrona.
- Gama zraci (γ -zraci) imaju prirodu elektromagnetskih talasa (fotoni) i ne skreću pod dejstvom električnog ili magnetnog polja. Zato ih odlikuje izuzetno velika prodornost kroz materiju. Gama zraci obično imaju veliku energiju, odnosno frekvenciju i spadaju u domen zraka veoma malih talasnih dužina [1][5].

2.4. Interakcija alfa zračenja sa materijom

U teške nanelektrisane čestice možemo svrstati alfa-čestice, protoni, deuteroni, jezgra tricijuma, lakih elemenata, pa čak i potpuno ogoljena jezgra nekih težih elemenata. Međutim, samo alfa-čestice su posledica prirodnih pojava, dok sve ostale teške čestice nastaju samo u laboratorijskim uslovima. Najbolje izučene su alfa-čestice, jer se za njih i najduže zna, pošto su otkrivene još od otkrića radioaktivnosti.

Za proučavanje interakcije zračenja i materije, najbolji medijum je vazduh ili gasovi, pošto je to i najjednostavniji način. A pošto je ionizacija osnovna interakcija, onda je najbolji način da se pomoću električnog polja prikupi stvoreno nanelektrisanje i tako se može dobiti kvantitativna mera učinka zračenja prilikom njegovog prostiranja.

2.4.1. Domet alfa čestica

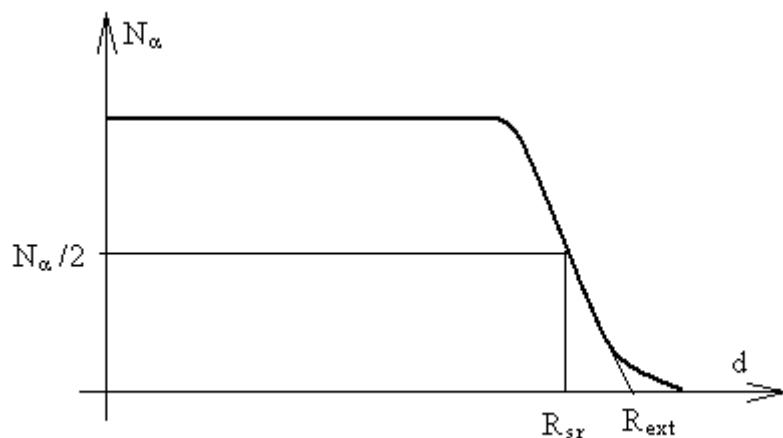
Najupečatljivija osobina alfa čestice koja ima uticaj na njeno ponašanje je velika masa, alfa čestica ima 7300 puta veću masu od elektrona. Ova razlika u masama ograničava količinu

energije koju može alfa čestica da preda elektronu usled sudara. Maksimalna energija koju elektron može dobiti pri ovakovom sudaru je:

$$E_e = 4 \frac{m_e}{m_\alpha} E_\alpha \quad 2.1$$

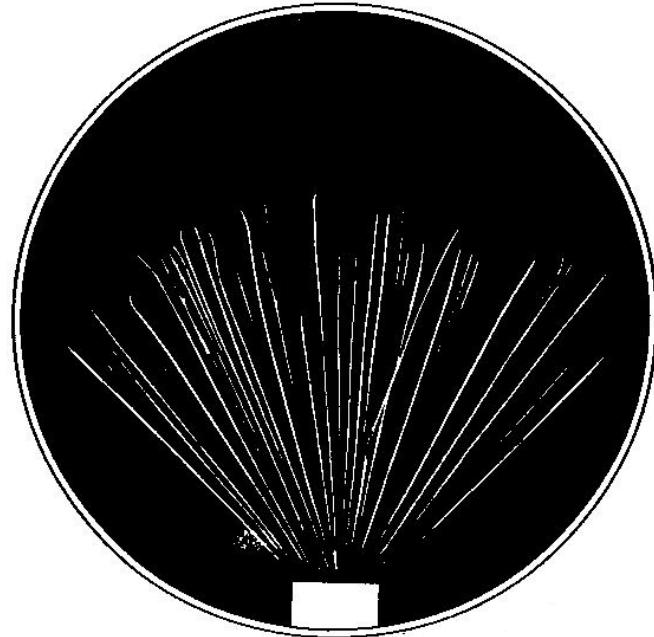
Iz izraza 2.1 vidimo da alfa čestica veoma mali deo energije predaje elektronu pri svakom sudaru, to je reda $5 \cdot 10^{-4}$, tako da će alfa čestica na svom putu predati energiju veoma velikom broju elektrona.

Posledica velike mase alfa čestice u odnosu na elektron je da alfa čestica neće skretati, već zadržava svoj pravac kretanja sve do konačnog gubitka energije. To se vidi i po tome što snop alfa čestica ne opada sve do svog krajnjeg dometa, što je dobro prikazano na sledećoj slici:



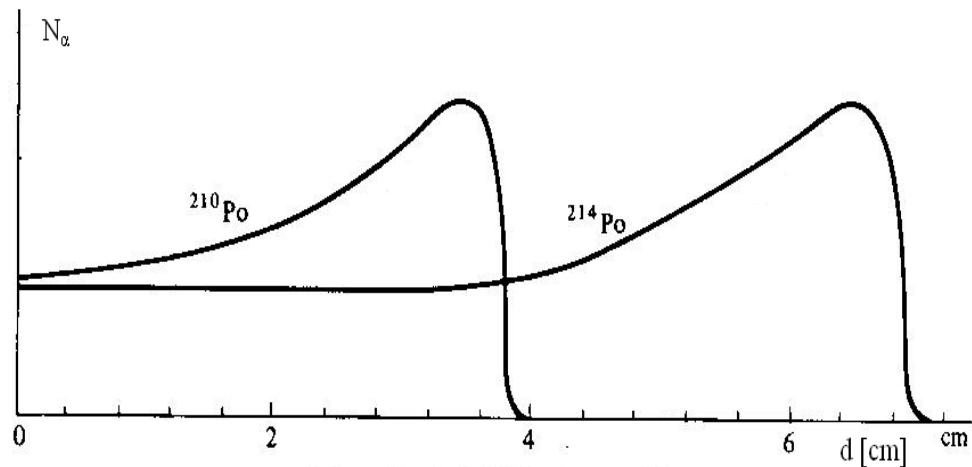
Slika 2.1. Zavisnost broja čestica od dužine puta

Iz slike se vidi da je broj čestica konstantan skoro celom dužinom puta. Značajnije osipanje broja čestica se dešava tek pred kraj puta, što se lepo vidi na slici 2.1. Dužine tragova alfa čestica određenih energija su približno iste, tragovi su pravolinijski i tek pred kraj puta može se primetiti odstupanje pravolinijskog kretanja. Ova osobina putanja alfa čestica se može odlično videti u eksperimentu sa Vilsonovom maglenom komorom, gde se mogu videti putanje svake pojedinačne čestice i gde se tek na kraju putanje vidi blago odstupanje od prave linije pred sam nestanak alfa čestice, što je prikazano na sledećoj slici:



Slika 2.2. Vilsonova komora

Takođe interesantno je pogledati zavisnost stvaranja jona tokom putovanja alfa čestice kroz medijum. To se relativno lako može i eksperimentalno pokazati merenjem količine naelektrisanja koje se stvara duž putanje alfa čestice kroz medijum. Na sledećoj slici vidimo kako se menja broj dobijenih jona duž putanje alfa čestice i prikazani su rezultati za dve različite energije alfa čestica:



Slika 2.3. Broj jona stvorenih duž putanje alfa čestice

Sa slike se vidi da broj naelektrisanja raste kako alfa čestica prelazi put, u početku slabije da bi pred kraj jonizacija postigla maksimum i onda naglo pala na nulu. Maksimum krive koji

se vidi na slici se naziva Bregov pik. Vidi se da je gubitak energije obrnuto proporcionalan energiji koju čestica poseduje. Najveći gubitak je upravo na kraju, kada čestica ima najmanju energiju. Na kraju svoje putanje alfa čestica izgubi toliko energije da prvo prihvati jedan elektron, zatim i drugi i onda postane neutralni atom helijuma.

Jedna od osnovnih osobina alfa čestice je njen domet u nekom materijalu, tj. koliki put može alfa čestica preći dok u potpunosti ne izgubi svoju energiju i ne postane neutralni atom helijuma. Pošto je putanja alfa čestice pravolinijska, tako je jednostavno odrediti krajnji domet čestice. Detektor zračenja se udaljava od izvora sve dok ne prestane da detektuje zračenje koje potiče iz izvora, tada na detektoru merimo samo fonsko zračenje koje je prisutno i bez našeg izvora zračenja.

Na osnovu mnogih merenja, zaključeno je da alfa zračenje sa većom energijom ima veći domet, što možemo izraziti pomoću sledećeg izraza:

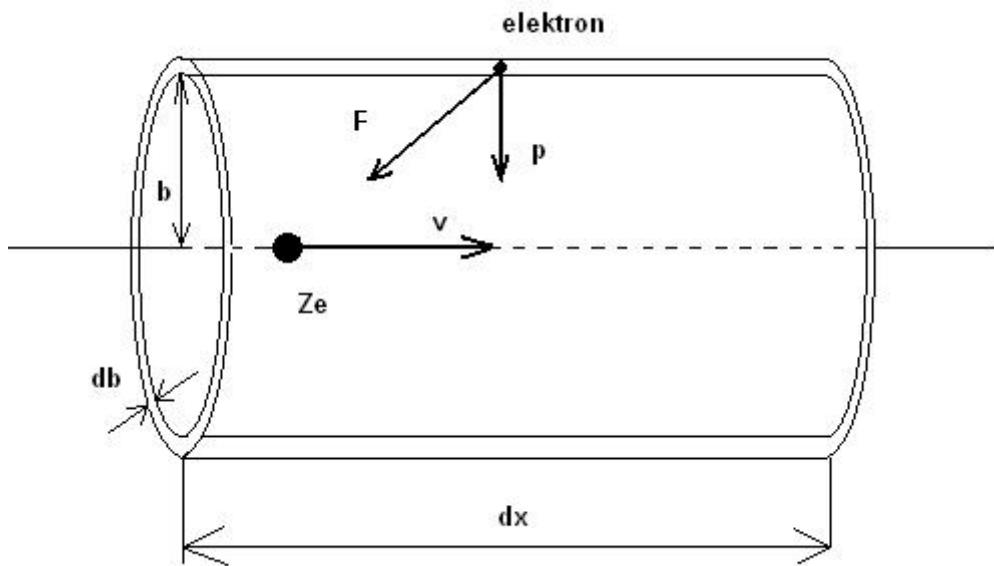
$$R_\alpha [cm] = 0.318 \cdot E_\alpha^{3/2} [MeV] \quad 2.2$$

Relacija 2.2 daje dobru procenu dometa alfa čestica za čestice čija se energija kreće između 3 i 7 MeV. Mora se uzeti u obzir da su dometi alfa čestica veoma mali, pa se uzimaju atenuatori mikrometarskih debljina. Breb i Kleman su došli do empirijske relacije koja daje odnos između dometa alfa zračenja određene energije u dva različita materijala:

$$\frac{R_1}{R_0} \cong \frac{\rho_0 \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_0}} \quad 2.3$$

ρ_0 i ρ_1 su gustine posmatranih materijala, a A_0 i A_1 su maseni brojevi. Pomoću relacije 2.3 može se proceniti domet u bilo kom materijalu, ako je poznat domet u nekom drugom materijalu.

Pri analitičkom objašnjenju ionizacionog gubitaka alfa čestice moramo napraviti nekoliko početnih pretpostavki, kao prvo pretpostavimo nanelektrisanje $+Ze$, koje se kreće pravolinijski brzinom v i posmatramo najjednostavniji slučaj kada se ova teška čestica prolazi pored jednog elektrona u stanju mirovanja na rastojanju b u odnosu na pravac kretanja, kao što je prikazano na sledećoj slici:



Slika 2.4 Prikaz interakcije teške čestice sa elektronom

Uzimamo da se jedino međudejstvo između teške nanelektrisane čestice i elektrona ostvaruje putem Kulonove sile. Tada imamo da je ukupan impuls koji će primiti elektron od teške nanelektrisane čestice prikazan sa:

$$p = \int_{-\infty}^{+\infty} F_{\perp} dt \quad 2.4$$

Ako izvršimo transformaciju da se integracija vrši po kordinati umesto po vremenu i Kulonovu силу izrazimo preko električnog polja dobićemo sledeći izraz:

$$p = \frac{1}{v} \int_{-\infty}^{+\infty} e E_{\perp} dx \quad 2.5$$

Iskoristimo Gausovu teoremu, koja kaže da je ukupan fluks električnog polja koje prolazi kroz neku zatvorenu površinu jednak ukupnoj količini nanelektrisanja zatvorenog tom površinom. Uzmimo da površina bude u obliku cilindra poluprečnika b i dužine dx , tada, primenom Gausove teoreme dobijamo za ukupan impuls koji normalna sila preda jednom elektronu prilikom prolaska teške nanelektrisane čestice jednak:

$$p = k \frac{2ze^2}{bv} \quad 2.6$$

Energija koju čestica preda elektronu je jednaka:

$$\frac{p^2}{2m_e} = k^2 \frac{2z^2 e^4}{m_e b^2 v^2} \quad 2.7$$

Ukoliko u zapremini kroz koju prolazi teška nanelektrisana čestica imamo više elektrona, onda dobijamo za ukupnu energiju koju preda po jedinici puta da je:

$$-\frac{dE}{dx} = k^2 \frac{2z^2 e^4}{m_e b^2 v^2} Zn \cdot 2b\pi \cdot db \quad 2.8$$

Ako integralimo po parametru b , onda za ukupnu energiju koju čestica preda po jedinici puta imamo:

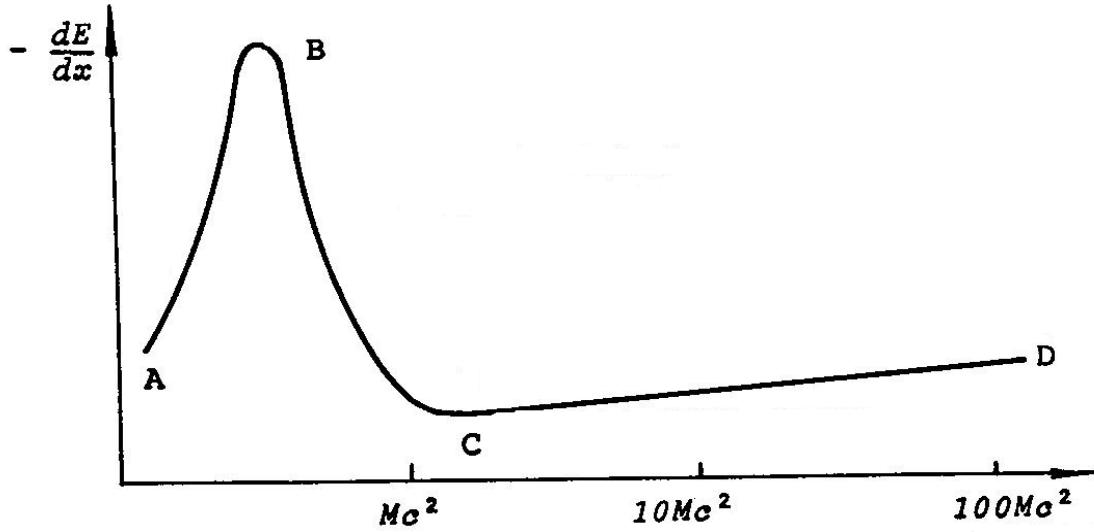
$$-\frac{dE}{dx} = k^2 \frac{4\pi Z z^2 e^4 n}{m_e v^2} \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \quad 2.9$$

Da bi se dobio izraz za gubitak energije teške nanelektrisane čestice po jedinici puta, treba da odredimo maksimalne i minimalne vrednosti rastojanja na kojima se dešava interakcija između elektrona i čestice. Pošto je u pitanju Kulonova sila, interakcija se dešava od nultog rastojanja do beskonačnosti. Ukoliko uvrstimo bilo koju od ove dve vrednosti u izraz 2.9 dobićemo beskonačnu vrednost kao rešenje, što bi značilo da teška nanelektrisana čestica predaje svu svoju energiju svim elektronima koji se nalaze na rastojanju od nultog do beskonačnost u odnosu na njen pravac kretanja trenutno i praktično se ne bi ni kretala kroz sredinu koju posmatramo. Na osnovu eksperimenata vidimo da se ovakav slučaj, naravno, ne dešava i da postoje neka ograničenja usled kojih teška nanelektrisana čestica ne preda svoju energiju trenutno. Ta ograničenja potiču od toga da elektroni nisu slobodni, već su vezani u atomu, kao i da se ovde radi o mikro objektima, koji podležu kvantnim efektima. Uzimajući u obzir ova ograničenja, ispostavilo se da najbolje eksperimentalne rezultate opisuje Borova formula:

$$-\frac{dE}{dx} = k^2 \frac{4\pi Z z^2 e^4 n}{m_e v^2} \ln \left[\frac{2m_e v^2}{\bar{I}(1 - \beta^2)} - \beta^2 \right] \quad 2.10$$

Sa \bar{I} je označen srednji jonizacioni potencijal atoma materijala kroz koji se čestica kreće, a sa β je odnos brzine čestice i brzine svetlosti.

Na osnovu Borove formule vidimo da je energija koju čestica izgubi po jedinici puta proporcionalna kvadratu njenog nanelektrisanja, broju elektrona po jedinici zapremine, a obrnuto proporcionalna dvadratu brzine. Ova zavisnost je prikazana na sledećoj slici:



Slika 2.5 Zavisnost gubitka energije teške nanelektrisane čestice po jedinici puta od energije

Deo krive od B do C predstavlja obrnutu proporcionalnost od energije čestice. Porast koji se vidi od C do D je zahvaljujući logaritamskom članu koji daje svoj doprinos kod viših energija. Prvi deo krive od A do B nije predviđen Borovom formulom, jer gubici nanelektrisane čestice naglo padaju na nulu prilikom smanjenja energije. To se objašnjava zahvatima elektrona, što dovodi da čestica postaje električno neutralna i nema više mogućnost da vrši ionizaciju, pa se samim tim i gubitak energije po jedinici puta naglo smanjuje. Ako uzmemo sledeći izraz za računanje dužine traga teške nanelektrisane čestice:

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{(-dE/dx)} \quad 2.11$$

Gde bi izraz u imeniocu podintegralne funkcije bio dat Borovom formulom, videćemo da ne uspeva da opiše ponašanje teške nanelektrisane čestice sa materijom u slučaju niskih energija. Tako da za domet alfa čestica u vazduhu još uvek koristimo poznate empirijske relacije [14]:

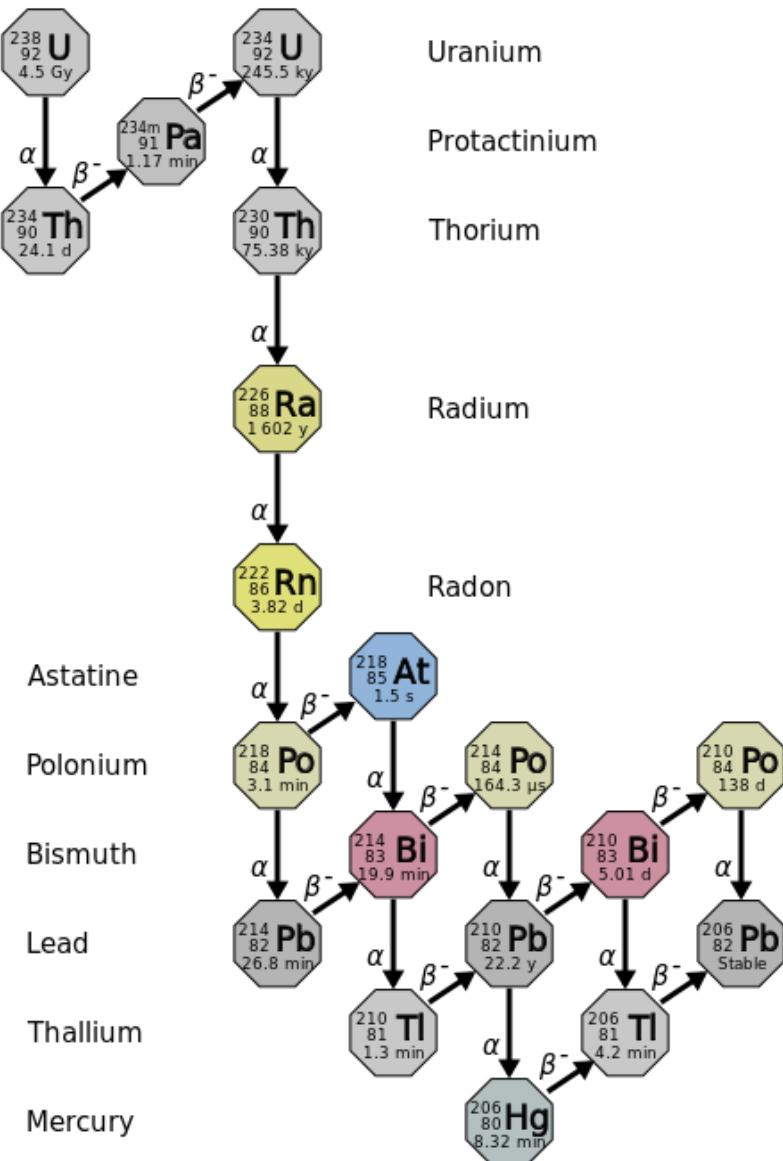
$$R_\alpha [cm] = 0.318 \cdot E_\alpha^{3/2} [MeV] \quad 2.12$$

2.5. Radioaktivni nizovi

U prirodi postoje mnogi radioaktivni elementi sa različitim periodima poluraspada. Mnogi od njih imaju periode poluraspada koji traju znatno manje od procenjene starosti Zemlje, tako, da bi bilo logično da elemente sa kraćim vremenom poluraspada ne bi smo mogli nalaziti više u prirodi. Ali njih ima i aktivnosti im je tolika da dolazimo do zaključka da nastaju kontinuirano u zemljinoj kori i njihov broj je konstantan. Tu pojavu možemo objasniti da su oni samo deo nekog od radioaktivnih nizova gde je rodonačelnik niza radioaktivni element čije je period poluraspada znatno veći od dosadašnje starosti naše planete i da je posmatrani član niza samo jedan od potomaka u tom specifičnom radioaktivnom nizu.

Radioaktivni niz je niz elemenata od kojih je svaki član produkt radioaktivnog raspada prethodnog elementa u tom nizu. Element koji prethodi i koji se raspada, naziva se „roditelj“, a element koji sledi i koji nastaje procesom raspada naziva se „potomak“. U periodnom sistemu elemenata, svi elementi većeg rednog broja od 83 su radioaktivni. Većina tih radioaktivnih elemenata pripadaju jednom od tri osnovna niza čiji su rodonačelnici ^{235}U , ^{238}U i ^{232}Th . Ako uzmemmo u obzir moguće transformacije jezgra koje imaju za posledice radioaktivno α , β i γ zračenje, možemo objasniti vezu između elemenata niza od njihovog rodonačelnika do zadnjeg člana, stabilnog potomka, koji se dalje ne raspada. Zadnji stabilni član u sva tri niza je jedan od izotopa olova. Ono što je nama interesantno i što je zajedničko za sva tri niza je da imaju jedan od izotopa gasa radona (^{222}Rn , ^{219}Rn i ^{220}Rn).

- Prvi niz je torijumski niz, počinje rodonačelnikom niza torijumom ^{232}Th , a završava se stabilnim izotopom olova ^{208}Pb . Ovaj niz sadrži izotop radona ^{220}Rn . Niz karakteriše promena masenog broja koju možemo da opišemo formulom $4n$.
- Drugi niz je uranijum-aktinijumski niz koji počinje rodonačelnikom niza izotopom urana ^{235}U i završava se stabilnim izotopom olova ^{207}Pb . Karakteristika ovog niza je promena masenog broja po formuli $4n+3$. Ovaj niz sadrži izotop radona ^{219}Rn .
- Treći niz je uranijum-radijumski niz ili niz koji počinje rodonačelnikom niza izotopom urana ^{238}U i završava se stabilnim izotopom olova ^{206}Pb . Ovaj niz nam je posebno interesantan jer sadrži izotop radona ^{222}Rn kojim se i najviše bavimo u ovom radu. Ovaj niz karakteriše pravilnost promene masenog broja koju možemo izraziti pomoću izraza $4n+2$. Niz predstavljamo sledećom slikom:

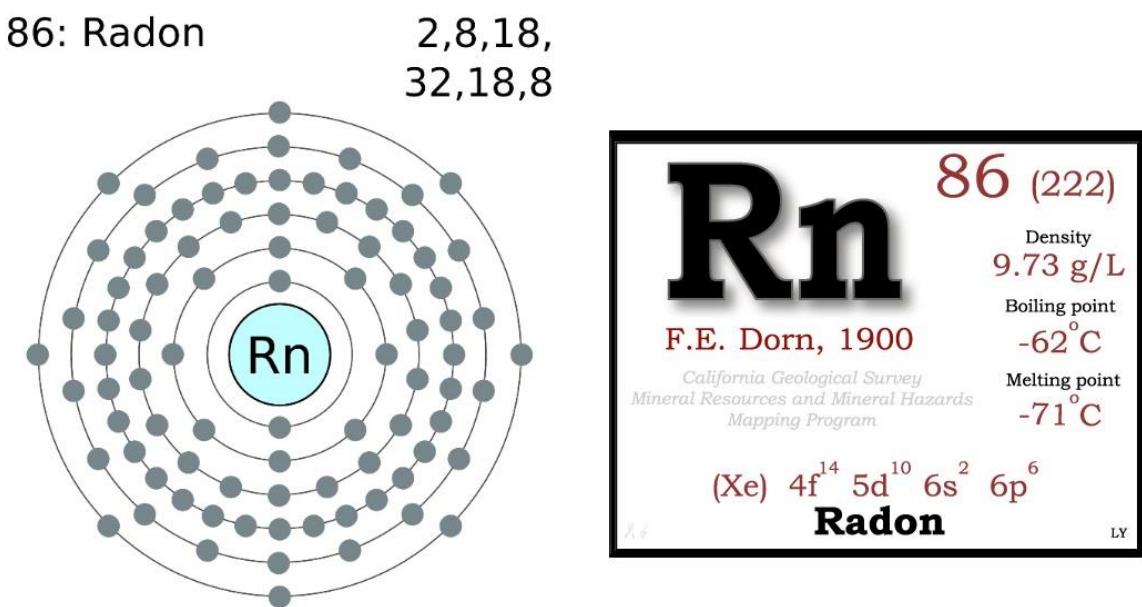


Slika 2.6 Uranijum-radijumski niz

Pomenućemo još jedan niz koji više ne postoji u prirodi jer je njegov period poluraspada kraći od vremena koje je prošlo od nastanka naše planete. Dobijen je samo u laboratorijskim uslovima, a to je neptunijumski niz koji započinje rodonačelnikom niza izotopom neptunijuma ^{237}Np , a završava se stabilnim izotopom talijuma ^{205}Tl .

2.6. Radon

Radon je inertan isparljiv gas bez mirisa, boje i ukusa. Ime je dobio po radijumu od koga raspadom i nastaje, otkrio ga je nemački fizičar Fridrik Dorn (Fredrich Ernst Dorn) 1898. godine, po nekim izvorima se uzima za godinu otkrića i 1900. godina.



Slika 2.2 Radon

Radon ima 27 poznatih izotopa od kojih je najznačajniji nestabilni izotop ^{222}Rn koji je alfa emiter ($E_{\alpha 1}=5.489 \text{ MeV}, I_{\alpha 1}=99.9\%$; $E_{\alpha 2}=4.986 \text{ MeV}, I_{\alpha 2}=0.1\%$) sa periodom poluraspanja 3.824 dana i nastaje alfa raspadom radijuma ^{226}Ra koji pripada uranijum – radijumskom nizu. Radonovi kratkoživeći potomci imaju veliku moć ionizacije. Istraživanja iz oblasti epidemiologije su pokazala je prisustvo radona ^{222}Rn u životnoj sredini jedan od najvažnijih uzročnika malignih oboljenja pluća. I to je osnovni razlog monitoringa ovog radionuklida u vazduhu, vodi i zemljištu.

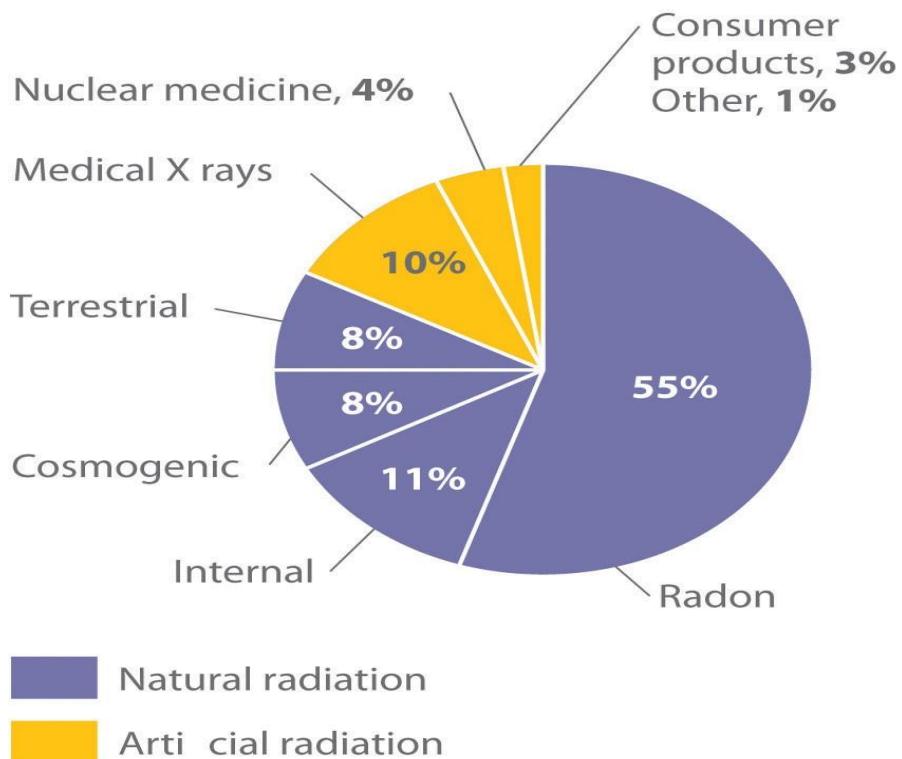
Voda prilikom prolaska kroz zemljinu koru dolazi u dodir sa stenama i zemljištem koje sadrži izotope radijuma ^{226}Ra [15] i koji raspadom stvoreni radon predaje toj vodi. Ta podzemna voda bogata radonom dospeva na površinu (bunarima, mineralnim vrelima, izvorima...). Ako se voda koristi za piće odmah na izvoru, bez prethodnog pročišćavanja, stajanja ili tehničke obrade dolazi se do kontakta sa veoma velikim koncentracijama radona i njegovih kratkoživećih potomaka [16]. Zbog toga je veoma važno vršiti redovne kontrole koncentracije radona u vodama koje se koriste za piće, kako bi se utvrdila njena radiološka bezbednost.

Radon (hemijska oznaka: Rn) ima sledeće osobine:

- Elektronska konfiguracija: Xe $4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$
- Tačka topljenja: -71,15 °C
- Atomski broj: 86
- Standardna atomska basa: 222 g/mol
- Magnetičnost: nije magnetičan
- Emiteže α -čestice energije: 5,5 MeV

Većina radonovih izotopa ima veoma kratko vreme poluraspada osim tri izotopa radona: ^{222}Rn – 3,8 dana, ^{211}Rn – 14,7 sati i ^{210}Rn – 2,5 sati. Najveće radiološko opterećenje, a samim tim i zdravstveni rizik dolazi od radonovog izotopa ^{222}Rn , koji je član uranovog niza ^{238}U , mada i radonovi izotopi koji su članovi druga dva radioaktivna niza imaju određeni uticaj na zdravlje [6].

Nas prvenstveno interesuje prirodno zračenje koje potiče od radona i njegovih kratkoživećih potomaka koji su i ujedno i najveći izvori prirodnog jonizujućeg zračenja. Radon sa 1.26 mSv je odgovoran za više od polovine zračenja kojem smo izloženi u našem okruženju (2.4 mSv) [UNSCEAR, 2008], što vidimo i na sledećoj slici:



Slika 2.3 Izvori ionizujućeg zračenja

Vidimo da na radon otpada 55% zračenja kojem smo izloženi, sledećih 27% su prirodni izvori zračenja (bez radona). Na rendgensko zračenje odlazi sledećih 10%, a onda na ostale

medicinske tretmane odlazi još 4%. Za sledećih 3% zračenja su odgovorni potrošački proizvodi koje svakodnevno koristimo.

Doprinos radijacionom riziku usled prisustva radona u vodi je relativno mali, manje od 5% u odnosu na radon u vazduhu unutar prostorija u kojim boravimo. Inhalacija radona ^{222}Rn i njegovih potomaka izaziva 89% kancera koji se pripisuje izloženosti povišenim koncentracijama radona. Preostalih 11% kancera izaziva ingestija vode u kojoj su povišene koncentracije radona, i to direktno utiče na razvoj kancera želuca, a u nekim slučajevima i kancera jetre i debelog creva[17].

Prema evropskim standardima [18,19], referentna granica radona u vodi iznosi 100 Bq l^{-1} .

Prema načinu kontaminacije organizma možemo napraviti sledeću podelu:

- Spoljašnja (eksterna) kontaminacija
- Unutrašnja (interna) kontaminacija

Kod spoljašnje kontaminacije radionuklid se nalazi izvan i na površini tela. Nastaje direktnim dodirom nezaštićenog organizma sa radioaktivnom materijom. Postoje sistemi zaštite kojim se može sprečiti ili drastično umanjiti stepen izloženosti radioaktivnom izvoru, a u slučaju spoljašnje kontaminacije znatno je lakše izvršiti dekontaminaciju.

Prilikom unutrašnje kontaminacije radionuklid dospeva u unutrašnjost organizma na tri načina:

- Disajni organi – inhalacija
- Organi za varenje – ingestija
- Koža – perkutana apsorpcija

Unutrašnja kontaminacija je daleko opasnija kod malih intenziteta zračenja, pogotovo u slučaju α -zračenja, jer prilikom unošenja alfa emitera u unutrašnjost organizma nema kože kao zaštite između radionuklida i osetljivih unutrašnjih organa. Radon kao gas veoma lako dopire do unutrašnjosti organizma bilo inhalacijom, bilo ingestijom i njegovi produkti raspadanja ostaju veoma dugo u organizmu.

2.6.1 Raspad radona ^{222}Rn

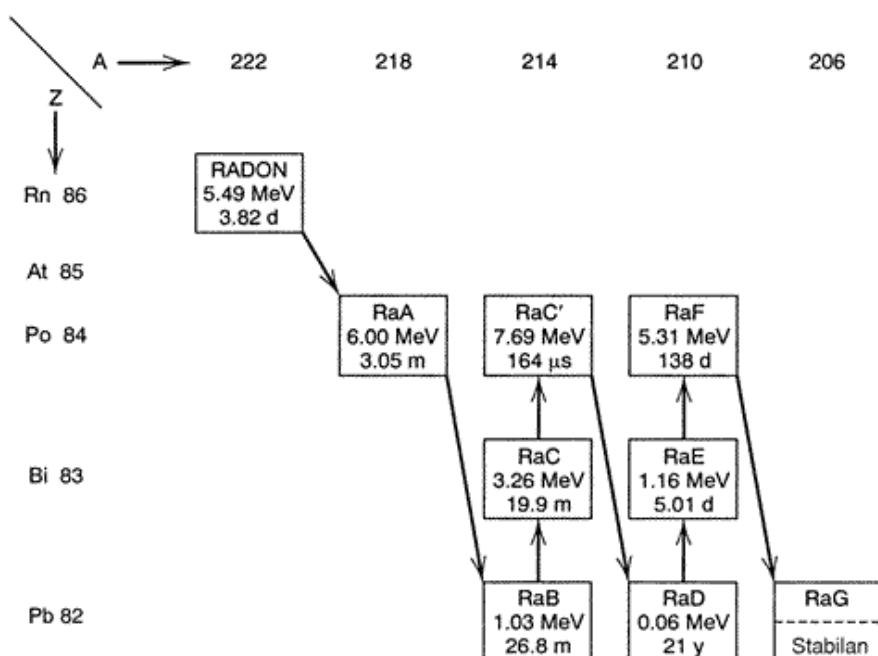
Pošto najveće radiološko opterećenje dolazi od radonovog izotopa ^{222}Rn , razmotrićemo samo potomke tog izotopa.

Radon se α -raspadom, energije 5,5 MeV raspada na kratko živeće potomke polonijum ^{218}Po , olovo ^{214}Pb , bizmut ^{214}Bi , polonijum ^{214}Po i dugoživeći stabilni potomak ^{210}Pb sa periodom raspada od 22,3 godine.

Radon ^{222}Rn se α -raspadom raspada na polonijum ^{218}Po , to je metal čiji se atomi lepe za čestice prašine ili se talože na površinama sa kojima dođu u kontakt. To mogu biti npr. zidovi prostorija, nameštaj, pa čak i unutrašnjost pluća. Polonijum ^{218}Po ima kratak period poluraspada od samo 3,05 minuta i raspada se α -raspadom na olovo ^{214}Pb . Olovo se, zatim, β -emisijom i γ -

zrakom sa periodom poluraspada od 26,8 minuta raspada na bizmut ^{214}Bi . Bizmut je u čvrstom stanju i ima period poluraspada od 19,8 minuta. Raspada se emisijom β -čestice na polonijum ^{214}Po . Polonijum ^{214}Po ima period poluraspada od samo 164 μs i emituje α -česticu energije 7,69MeV. Rezultat raspada je dugoživeći izotop olova ^{210}Pb sa periodom raspada od 22,3 godine.

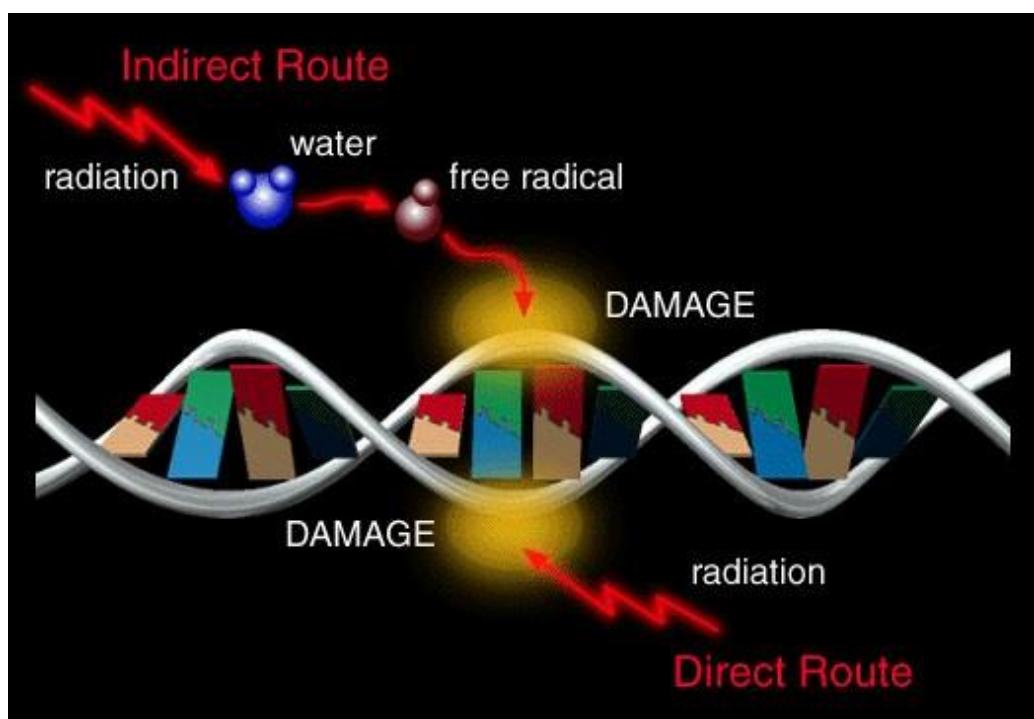
Na sledećoj slici imamo prikazane sve potomke radona ^{222}Rn do izotopa stabilnog olova ^{206}Pb . Takođe su prikazane energije oslobođene prilikom radioaktivnih raspada. U tabeli su navedeni i periodi poluraspada, o smer strelica određuje da li je u pitanju α -raspad (koso prema dole) ili je u pitanju β -raspad (vertikalna prema gore).



Slika 2.4 Radonovi potomci

3. UTICAJ RADONA NA ZDRAVLJE

Jonizujuća zračenja pri određenim dozama i određenom intenzitetu pokazuju štetna dejstva na sva živa bića. Količina štete načinjene organizmu jonizovanim zračenjem zavisi od mnogo faktora. Prvenstveno šteta zavisi od doze zračenja, jer radijaciona oštećenja se ispoljavaju tek kada primljena doza pređe određenu granicu iza koje stepen oštećenja raste sa porastom doze zračenja. Ovi efekti zračenja se nazivaju deterministički (nestohastički) za razliku od stohastičkih koji nemaju ograničenu dozu, jer i svaka najmanja doza može da prouzrokuje biološke promene. Imale apsorbovane doze mogu da povećaju verovatnoću nastajanja malignih oboljenja. Verovatnoća se povećava sa povećanjem apsorbovane doze. Ne postoji donja granica doze zračenja za koju možemo sa sigurnošću da kažemo da ispod nje ne dolazi do nekog od stohastičkih efekata: genetski, teratogeni i leukemogeni (kancerogeni). Od samog otkrića radioaktivnosti se znalo da se energija jonizujućeg zračenja apsorbuje u materiji kroz koju prolazi, ali dugo se nije moglo odgometnuti neproporcionalnost apsorbovanog zračenja sa štetom koju to zračenje izazove u ozračenom organizmu. Jer šteta je bila višestruko veća nego što bi se očekivalo od doze zračenja koju je primio ozračeni organizam. Tek sredinom 20. veka je objašnjena ta pojava otkrićem DNK i oštećenjima koja zračenje izaziva na DNK lancima. Ta oštećenja mogu nastati usled direktnе i indirektnе interakcije zračenja sa DNK ozračenog organizma. Princip oštećenja DNK u ozračenom organizmu može se videti na sledećoj slici [7][3].

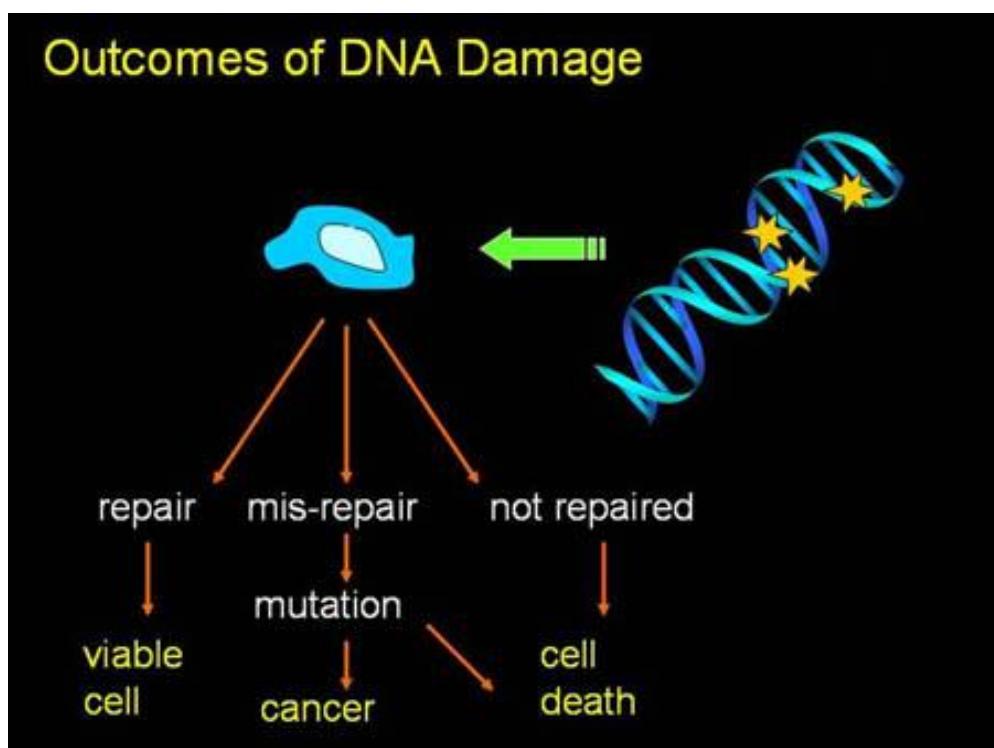


Slika 3.1 Oštećenja izazvana zračenjem

Mehanizam interakcije ionizujućeg zračenja razjašnjen je nakon otkrića helikoidne strukture DNK. Direktna interakcija ionizujućeg zračenja sa elektronima DNK molekula manifestuje se prekidom jednog ili oba heliksa. Kidanje vodoničnih veza dovodi do neregularnog sparivanja i mutacija, koje mogu imati i letalno dejstvo. Direktna interakcija, može u zavisnosti od predate energije, da izazove gubitak sposobnosti deobe ćelije, prestanak nekih funkcija ili čak i trenutno umiranje ćelije.

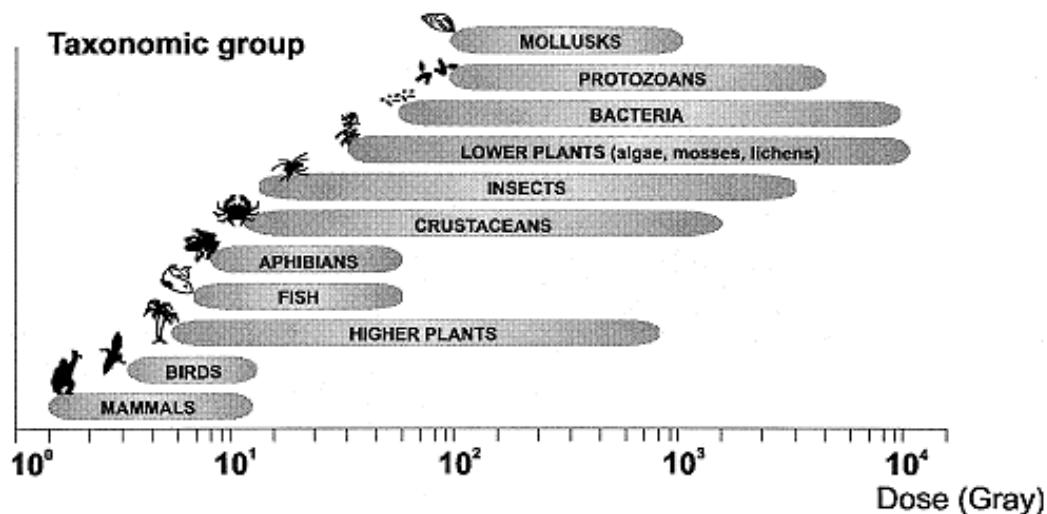
Indirektna interakcija dovodi do jonizacije vode, s obzirom da ljudski organizam sadrži oko 10^{13} molekula vode ili 70% organizma je voda, to je lako zaključiti do kakvih oštećenja može dovesti ozračivanje organizma. Prilikom jonizacije stvara se jon H_2O^+ i oslobađa se elektron koji primljenu energiju gubi pri daljim sudarima. Kada dovoljno uspore te elektrone opkoli jako polarizovana molekula vode i formira se akvatizovani elektron e_{aq} . Akvatizovani elektron sa jonom vode formira dva visokoreaktivna radikala H^+ i OH^- . Tako nastaju tri visokoreaktivna radikala: akvatizovani elektron, OH^- radikal i H^+ radikal u približnom odnosu 45%:45%:10%.

Oštećen DNA nije uvek i nepovratno oštećen, jedna od dobrih osobina živih organizama je mogućnost popravljanja oštećenja do kojih dođe. Osetljivost organizma na ozračivanje zavisi od naslednjih faktora, tj. od sposobnosti ćelije da se oporavi posle nastalog oštećenja, to određuje i nivoe zračenja koje će organizam moći da toleriše. Veliki uticaj ima i sposobnost organizma da se oslobodi od slobodnih radikala pomoću antioksidanata, a mogućnost organizma da stvara antioksidante je u najvećoj meri genetski predodređena, ali zavisi i od pola, starosne dobi, zdravstvenog stanja, načina života i uslova u životnoj sredini[8]. Mogući različiti odgovori ćelije na ozračenost vidimo na sledećoj slici:



Slika 3.2 Posledice ozračivanja ćelije

Poznato je da niže taksonomske grupe imaju veću otpornost prema visokim dozama ozračivanja. U novije vreme obraća se pažnja i na odgovore organizma na niske doze ionizujućeg zračenja tj. na „adaptivni odgovor“. Primer adaptivnog odgovora kod sisara je povišen rast i povišena reproduktivna sposobnost. Osetljivost na ionizovano zračenje u zavisnosti od složenosti organizma vidimo na sledećoj slici koja prikazuje stepen oštećenja i osetljivost organizma od doze zračenja



Slika 3.3 Osetljivost na zračenje

3.1. Rasprostranjenost radona

Dominantan izvor radona predstavlja zemljište ispod stambenih objekata. Uran i torijum se pojavljuju u: stenama, rudama, zemljištu, kao i u podzemnim i površinskim vodama. Koncentracija radijuma zavisi od tipa zemljišta i koncentracije uranijuma i torijuma u zemljištu. Stene koje oslobađaju najviše radona su granitne i vulkanske stene, dok sedimentne stene sadrže manju koncentraciju radona, a i manje su porozne pa vrše manju emisiju ovog gasa. Usled interakcije vode sa stenama i rudama dolazi do prevođenja radionuklida u mobilnu fazu i samim tim do transporta radionuklida ka površini zemljišta. Radon do površine dospeva procesom difuzije kroz pore i šupljine u zemljištu, pri tome se vezuje za vazduh ili vodu dok je u podzemlju. Analize pokazuju da između 10% i 50% ukupno nastalih atoma radona u površinskom sloju uspe da emanira u atmosferu.

Kao što je već navedeno, radijum je široko rasprostranjen u zemljinoj kori, pa se može odrađena količina naći i u građevinskim materijalima koji se dobijaju preradom materijala iz zemlje.

Radon koji dospe do atmosfere postaje podložan meteorološkim faktorima i transportnim procesima u atmosferi uspeva da kontaminira celokupno naše okruženje, ali srećom njegove koncentracije nisu uvek velike i samim tim ni opasne. Iz ovog zaključujemo da emanacija radona iz zemljišta zavisi od više faktora i to su:

- Koncentracija radijuma ^{226}Ra u zemljištu
- Permeabilnost (propustljivost) zemljišta
- Vlažnost zemljišta
- Stanja vegetacionog pokrivača i
- Meteoroloških prilika

Radonovi potomci i njihov doprinos radijacionom riziku je čak znatno veći od samog radona. Oko 80% posto novoformiranih potomaka je pozitivno nanelektrisano i hemijski su veoma aktivni. Oni interaguju sa negativnim jonima u atmosferi i pripajaju se za veštačke i prirodne aerosole. Nepričuvani potomci kao slobodni klasteri od samo nekoliko molekula lebde u vazduhu i imaju najizraženiji negativni zdravstveni efekat.

3.2. Radon u vodi

Voda je jedna od najvažnijih potreba ljudskog organizma, pa i sam organizam se sastoji od preko 70% vode, a i preko 70% površine naše planete čini voda, od toga, samo 0,3% je voda koju možemo da pijemo i da svakodnevno koristimo. Tu vodu možemo da podelimo na površinsku i vodu koju uzimamo iz dubine zemlje. Podzemna voda na svom putu kroz zemljinu koru prolazi pored stena koje sadrže radionuklide i tu preuzima radijum i radon koji je lako rastvorljiv u vodi. Većina radona se odmah oslobođeni kada voda dođe u dodir sa vazduhom, tako da površinske vode imaju znatno manje rastvorenog radona. Taj oslobođeni radon povećava koncentraciju u zatvorenim prostorijama koji je odgovoran za izazivanje kancera pluća, dok manja količina radona koji ostaje u vodi je odgovorna za kancer želuca. Najveće koncentracije radona se mogu naći u vodi koju uzimamo iz dubokih bunara, dok voda koju koristimo iz gradskih vodovoda sadrži znatno manje koncentracije radona, jer tehnološkim postupkom čišćenja i prerade vode dolazi do emanacije radona u dodiru sa vazduhom, tako da veoma male količine ostanu rastvorene u vodi.

Koncentracija radona u flaširanim pijačim vodama najviše zavisi od porekla vode, tj. dubine sa koje se ispumpava voda i vrsta zemljišta kroz koju voda prolazi na svom putu do tačke ispumpavanja. Na količinu radona utiče i tehnološki proces prerade, punjenja i skladištenja vode.

3.3. Dozimetrija zračenja

Jedinica koja se danas isključivo koristi za merenje radioaktivnosti u SI sistemu je bekerel (Bq), uvedena 1975. godine i definisana je kao:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ raspad s}^{-1}$$

Do njenog uvođenja u upotrebu, za merenje radioaktivnosti se upotrebljavala merna jedinica kiri (Ci), koja je definisana kao:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ raspad s}^{-1} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Kiri je uvedena 1930. godine kao broj raspada u 1 gramu čistog radijuma ^{226}Ra ($t_{1/2} = 1600$ godina) za vreme od 1 sekunde.

Zračenje se može podeliti na ionizujuće i ne-ionizujuće u zavisnosti da li svojim delovanjem izaziva ionizaciju materije ili ne. Ionizujuće zračenje dodatno delimo na direktno ionizujuće zračeњe i indirektno ionizujuće zračenje. Direktno ionizujuće zračenje izazivaju nanelektrisane čestice α i β zračenja (jezgro helijuma, elektroni i teški joni) tako što direktno deluju na elektrone u medijumu na koji deluju. Indirektno zračenje izazivaju neutralne čestice kao što su fotoni i neutroni.

Zračenje ima različito delovanje u zavisnosti da li je elektromagnetno ili je korpuskularno, prilikom izloženosti materije dolazi do promene i u materiji i zračenju koje deluje na materiju.

Elektromagnetno zračenje deluje putem tri efekta:

- Fotoeletrični efekat nastaje kada foton ima energiju veću od energije vezivanja elektrona u atomu. Tada on preda svu svoju energiju elektronu koji usled toga napušta atom. Prilikom fotoelektričnog efekta nastaju pozitivni joni i elektroni.
- Kod komptonovog efekta primarni foton (X ili γ -zračenje) predaje deo svoje energije slobodnom elektronu prilikom čega se rasejava, tj. menja putanju.
- Stvaranje parova elektron – pozitron i tada svu energiju foton utroši na kreaciju ovih čestica i njihovu kinetičku energiju

Način delovanja korpuskularnog zračenja zavisi od količine nanelektrisanja, a nanelektrisane čestice se mogu podeliti na teške i lake čestice. Kad snop teških nanelektrisanih čestica prolazi kroz materiju on interaguje sa elektronima ili jonima u materiji, pobuđuje elektrone ili ionizuje atome i pri tom procesu znatno gubi energiju i u manjoj meri menja smer kretanja snopa. Dužina puta koji pređe ta nanelektrisana čestica definiše domet. To je ujedno i najmanja debljina materije koja je potrebna da zaustavi tu česticu. Kada su u pitanju lake nanelektrisane čestice, onda je znatno teže odrediti njihov domet, jer one pretrpe ogroman broj sudara pri kojima znatno menjaju smer kretanja, zbog čega im je putanja definisana izlomljrenom linijom.

Veličine koje definišu međudejstvo ionizujućeg zračenja i materije su:

- Apsorbovana doza **D** je odnos energije koju je zračenje predalo materiji i mase te materije. Dozimetri direktno mere zračenjem indukovano nanelektrisanje i ta informacija se odgovarajućim kalibracijama pretvara u apsorbovanu dozu – srednju apsorbovanu energiju E po jedinici mase m

$$D = \frac{dE}{dm} [Gy]$$

Jedinica za apsorbovanu dozu od 1975. godine je Grej, a dobila je ime po britanskom fizičaru Luisu Haroldu Greju. Pre se upotrebljavala jedinica rad (radijaciona apsorbovana doza) i odnos između te dve jedinice je $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$.

- Ekvivalentna doza je proizvod apsorbovane doze i težinskog koefijenta zračenja W_R , ona je uvedena jer samo poznavanje apsorbovane doze nije dovoljno za potpunu sliku o štetnosti zračenja izazvanog u izloženim tkivima

$$H_t = W_R D [Sv]$$

W_R – težinski koeficijent zračenja i on opisuje biološki učinak zračenja u odnosu na referentno zračenje. Kao referentno zračenje uzeto je zračenje nastalo u rendgenskoj cevi pri anodnom naponu od 200 KeV. Jedinica za ekvivalentnu dozu (Sv – sivert) je dobila ime 1979. godine po švedskom fizičaru Rolf Maksimilijanu Sivertu. Ranije je korištena jedinica rem i njen odnos sa sadašnjom jedinicom je $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$.

- Efektivna doza je uvedena jer isto zračenje može izazvati različito biološko dejstvo u zavisnosti od osetljivosti pojedinih tkiva i organa.

$$E = \sum_T H_T W_T$$

H_T je ekvivalentna doza zračenja za tkivo T, W_T je težinski koeficijent zračenja za tkivo T [13].

4. MERENJE RADIOAKTIVNOSTI

Najveći deo ispitivanja osobina atoma sprovodi se pomoću merenja radioaktivnog zračenja. Zbog izuzetno malih dimenzija atoma nismo u stanju da vršimo neposredno posmatranje atoma i moramo da se prvenstveno oslonimo na pojavu radioaktivnog zračenja. Veoma važnu ulogu u razvoju atomske fizike imaju detektori zračenja. Treba napomenuti da detektori nisu samo ekskluzivno pravo naučnih krugova, već se danas koriste u mnogim oblastima savremenog života.

Detektori prema principu rada mogu se podeliti u tri grupe:

- Detektori na principu jonizacije gasova
 - Jonizaciona komora
 - Proporcionalni brojač
 - Geiger – Mullerov brojač
 - Wilsonova maglena komora
- Fotoemulzije
- Scintilacioni brojači

Nas prvenstveno interesuju metode pomoću kojih se meri koncentracija aktivnosti radonovih izotopa i njegovih kratkoživućih potomaka u vodi, vazduhu ili zemljištu. U zavisnosti od trajanja merenja i načina uzorkovanja imamo podelu na tri vrste:

- Trenutne metode služe za brzu procenu koncentracije radona na dатој lokaciji i sprovode se za relativno kratko vreme
- Kontinuirani monitoring se koristi u automatskom očitavanju koncentracije radona. I vrši se u kratkim ciklusima za jedan duži period merenja. Ovakva merenja daju informaciju o varijaciji koncentracije radona u određenom vremenskom periodu.
- Dugo vremenske metode vrše se pomoću uređaja za integralno prikupljanje podataka za dugi vremenski period. To može biti od nekoliko dana do nekoliko meseci. Rezultati merenja daju srednju koncentraciju radona na određenoj lokaciji za duži vremenski period.

Takođe razlikujemo aktivne i pasivne metode merenja koncentracije radona u zavisnosti da li se u toku uzorkovanja koristi izvor napajanja električnom energijom ili ne. Merni instrumenti koji su najčešće u upotrebi su: alfa – spektrometri koji imaju mogućnost

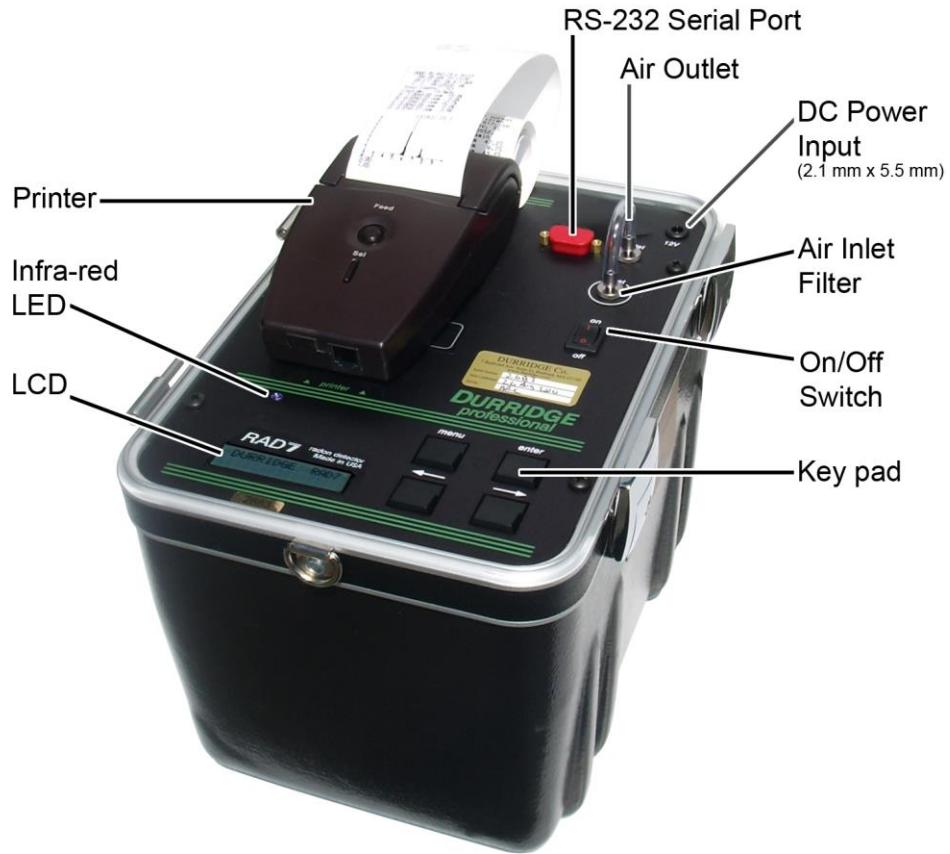
trenutnog merenja, a takođe mogu da vrše kontinuirani monitoring koncentracije radona, detektori tragova i ugljeni kanisteri. Detektori koji ćemo koristiti u merenju zavisi od vrste informacija koju hoćemo da dobijemo, od tačnosti, finansijskih mogućnosti, dužine merenja, itd.

4.1. Alfa – spektrometrijska metoda merenja radona

Alfa spektrometrijska metoda omogućuje kontinuirano praćenje koncentracije radona u vazduhu i samim tim praćenje varijacija nivoa radona sa vremenom. Velika prednost alfa spektrometrijskih metoda je nizak prag detekcije i mogućnost određivanja koncentracije aktivnosti pojedinačnih izotopa. Određene modifikacije mernih instrumenata koji se koriste za alfa spektroskopiju omogućavaju merenje koncentracije radona u vodi i zemljištu. Mi za merenje koncentracije radona u vodi koristimo uređaj RAD7 američke kompanije Durrige, uz uređaj koristimo i odgovarajuće dodatke za merenje radona u uzorcima vode.

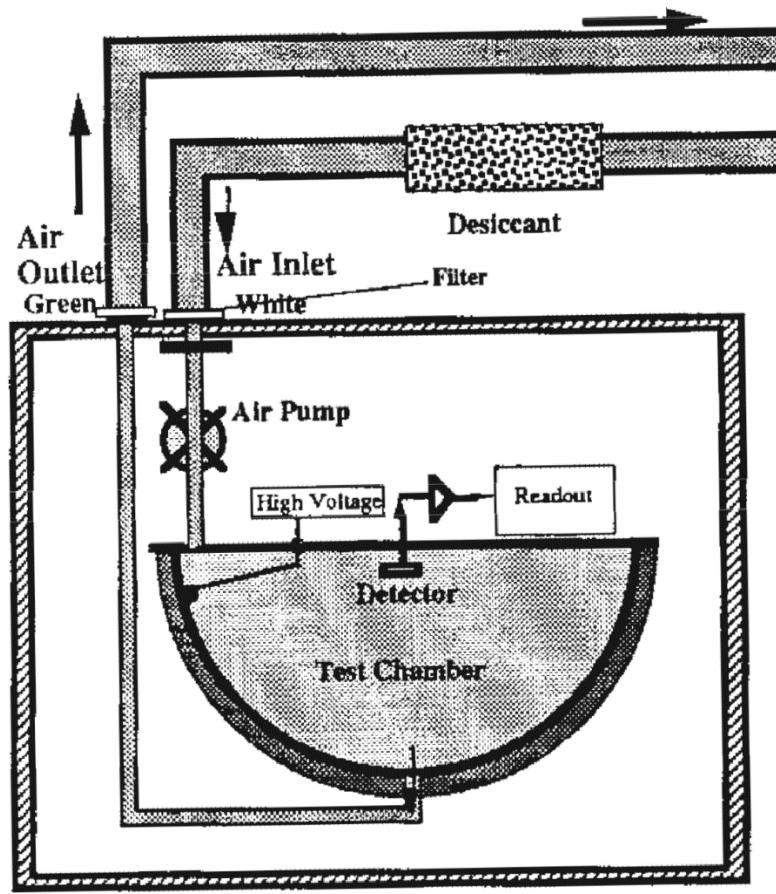
4.2. Alfa – spektrometar RAD7 (Durrige Co.)

RAD7 je alfa spektrometar koji može da se koristi za merenje koncentracije radona u vodi, vazduhu i zemlji. Zahvaljujući baterijskom napajanju i svom kompaktnom dizajnu uređaj je mobilan, tj. moguće ga je koristiti na terenu, ne samo u laboratorijskim uslovima. Što je veoma bitno za merenja koja je moguće izvoditi samo na licu mesta (koncentracija radona u tlu, podzemnim prostorijama, traženja pukotina ...).



Slika 4.1 Spoljni izgled uređaja

Osnova ovog uređaja je polusferna komora zapremine 0,7 litara obložena sa unutrašnje strane materijalom koji je dobar električni provodnik. U centru polusfere se nalazi ravni silicijumski α detektor koji je jonski implantiran. Visoki napon održava razliku potencijala između unutrašnjeg provodnika i detektora od 2 kV do 2,5 kV, stvarajući na taj način električno polje unutar zapremine detektorske komore. Funkcija električnog polja je da usmerava pozitivno nanelektrisane čestice ka površini silicijumskog detektora. Automatska pumpa omogućava protok suvog vazduha brzinom od 1 l/min kroz komoru, na ulazu u komoru postoji filter koji sprečava ulazak radonovih potomaka u komoru i time omogućava merenje samo koncentracije radona u komori dok svi njegovi potomci ostaju nataloženi na filteru. Jezgra radona ^{222}Rn koja se nalaze unutar komore se raspadaju na jezgra polonijuma ^{218}Po , ova jezgra polonijuma su pozitivni joni i ona se električnim poljem navode na silicijumski α detektor na kome se talože. Nataloženi polonijum ^{218}Po se raspada α i β raspadom, α čestica se detektuje u zapremini detektora sa tačno određenom energijom α čestice koja nastaje raspadom polonijuma ^{218}Po , ta energija je 6,03 MeV. Svi nastali β raspadi se neće detektovati, a drugi α raspadi se detektuju, ali sa drugom upadnom energijom. Alfa čestice nastale raspadom radona ^{222}Rn u vazduhu unutar zapremine komore se neće detektovati, jer nastaju u vazduhu a ne na površini detektora, jer na površini se ne talože atomi radona jer su hemijski inertni i električno neutralni i ne mogu biti privučeni električnim poljem. Principijelna šema unutrašnjosti uređaja koji ćemo koristiti u našem merenju je data na sledećoj slici:



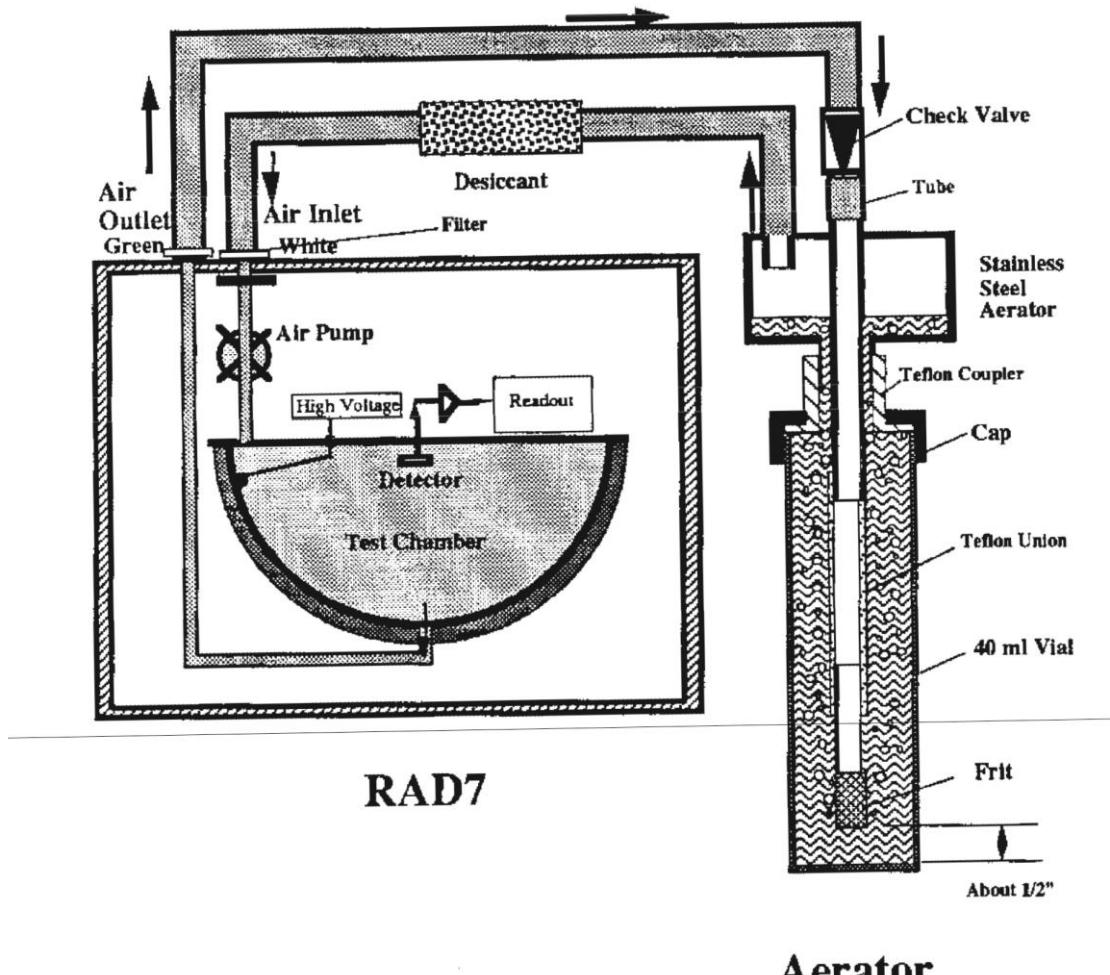
Slika 4.2 Šema komore za detekciju zračenja

U našem slučaju gde merimo koncentraciju radona ^{222}Rn u uzorcima vode, osnovnom uređaju RAD7 je potrebno dodati posebne adaptere i dodatke koji omogućavaju takvu vrstu merenja. Koristi se sistem za pumpanje vazduha u posudu sa uzorkom vode. To je zatvoren sistem i u njemu je zapremina vazduha i vode konstantna i nezavisna od protoka vazduha. Konfiguracija i modifikacija uređaja RAD7 koja se koristi za merenja radioaktivnosti uzorka vode je prikazana na sledećoj slici:



Slika 4.3 Uredaj za merenje radona u uzorcima vode

Ovaj sistem veoma brzo dostiže ravnotežu, već posle 5 minuta nema više radona koji bi se mogao izdvojiti iz uzorka sa vodom. Efikasnost sistema je veoma velika i ona je oko 99% za uzorak od 40 ml i oko 94% za uzorak od 250 ml. Ono što je veoma bitno za ovo merenje je održavanje relativne vlažnosti u komori i to mora da se proverava konstantno tokom čitavog merenja. Relativnu vlažnost treba održavati konstantno ispod 10%, ukoliko relativna vlažnost dostigne veću vrednost, merenja nisu relevantna, merenje se odmah prekida i unutrašnjost uređaja se mora produvati kako bi se relativna vlažnost dovela do prihvatljivog nivoa. Principijelna šema uređaja koga smo prilagodili za merenje koncentracije radona u uzorcima vode je data na sledećoj slici:

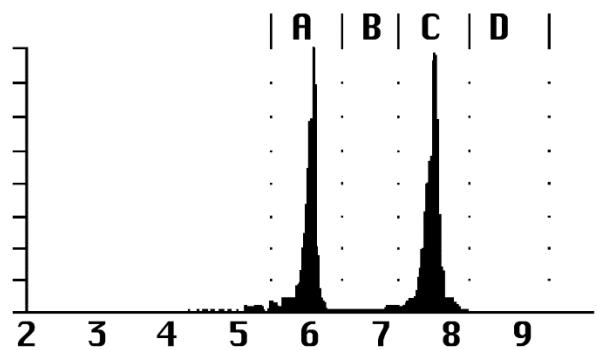


Slika 4.4 Modifikacija RAD7 uređaja za merenje uzorka vode

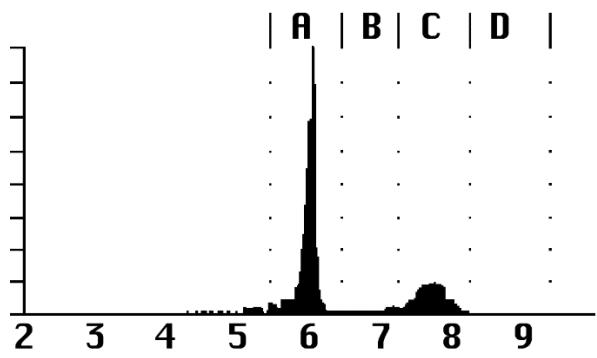
Ukoliko se merenje ne vrši odmah po uzorkovanju vode, potrebno je izvršiti korekciju rezultata merenja na raspad, jer će koncentracija radona konstantno opadati u uzorku usled raspada jezgra radona (period poluraspada 3,824 dana).

Postupci rukovanja ovakvim uređajima, kao i način uzorkovanja radona iz vode, vazduha i tla propisani su standardnim procedurama međunarodnih agencija (standardni protokol EPA 402-R-92-004).

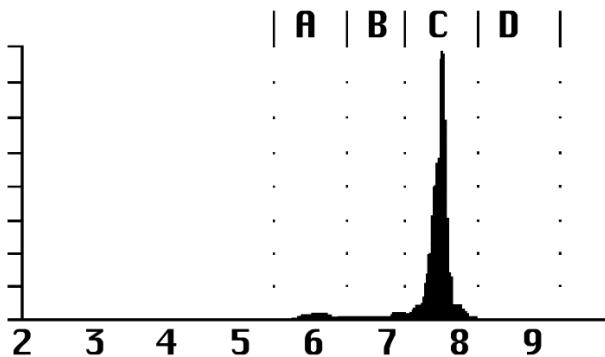
Velika prednost uređaja RAD7 je mogućnost preciznog prikazivanja alfa spektara. To je omogućeno grupisanjem izmerenih energija u osam „prozora“, od kojih svaki „prozor“ pokriva tačno određene energetske nivoje. Grafičko prikazivanje tih spektara nam omogućava jednostavno tumačenje rezultata, što se može videti na sledećim primerima spektara:



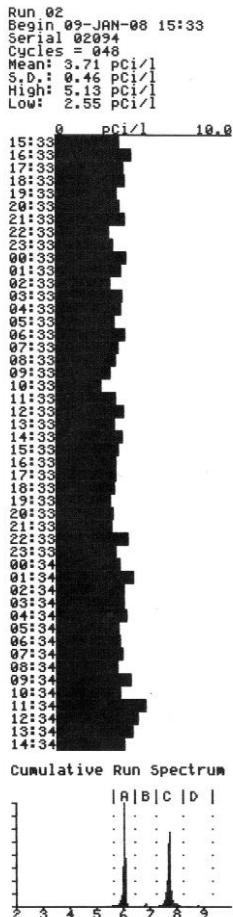
Slika 4.5 Radon u ravnoteži



Slika 4.6 Novi radon



Slika 4.7 Stari radon



Svi podaci koji su izmereni se čuvaju u internoj memoriji uređaja RAD7 do kraja merenja, tada odlučujemo hoćemo li rezultate prebaciti u računar ili ćemo ih odštampati lokalno na termalnom printeru koji dolazi uz uređaj. Na ispisanim izveštaju dobijamo između ostalog i sledeće bitne informacije [11,12]:

- Datum i vreme
- Srednja koncentracija aktivnosti radona za dati period merenja
- Standardnu devijaciju srednje koncentracije
- Najveća izmerena vrednost
- Najmanja izmerena vrednost
- Histogram srednjih koncentracija po zadatim ciklusima i
- Kumulativni alfa spektar

5. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

U ovom radu korišteni su uzorci vode uzimani sa izvora i bunara na nekoliko lokacija u Crnoj Gori. Svi uzorci su uzeti u toku jednog dana i u vremenskom razmaku od četiri časa. Merenje vrednost koncentracije radona su izmerena u vremenskom periodu manjem od dvadeset časova od uzimanja prvog uzorka, tako da nije bilo potrebe za vršenjem korekcije na raspad, jer je korekciju neophodno vršiti kada između uzorkovanja i merenja prođe više od 24 časa. U slučaju da je vremenski period bio veći, korekciju na raspad bi računali jednostavnom eksponencijalnom funkcijom sa vremenskom konstantom od 132,4 časa (period poluraspada radona ^{222}Rn od 3,824 dana izraženog u časovima), pa se korekcija vrši tako što se dobijena aktivnost pomnoži sa faktorom DCF (Decay Correction Factor), $\text{DCF} = 2^{(T/132,4)}$, gde je T vreme koje je proteklo od trenutka uzimanja uzorka.

Sva merenja su izvršena uređajem RAD7, sa modifikacijom za merenje tečnih uzoraka. Svaki uzorak je izmeren u četiri ciklusa koji su trajali nešto kraće od 5 min. Vlažnost u toku merenja je održavana na nivou ispod 10%.

U radu je razmotren samo radiacioni rizik usled internog ozračivanja kada radon rastvoren u vodi dospe u organizam inhalacijom i ingestijom. Efektivna doza $E_{\text{ingestija}}$ primljena pri ingestiji radona i njegovih potomaka odnosi se na želudačno tkivo i određuje se na godišnjem nivou:

$$E [\text{Sv}] = K \cdot C \cdot KM \cdot t$$

Gde su:

- K – konverzionalni faktor primljene doze pri ingestiji ^{222}Rn , i iznosi $10^{-8} [\text{Sv Bq}^{-1}]$ za odrasle osobe
- C – koncentracija aktivnosti $^{222}\text{Rn} [\text{Bq l}^{-1}]$
- KM – faktor konzumacije vode i iznosi 2 [1 dan^{-1}]
- t – vreme trajanja konzumiranja vode, uzima se da je 365 [dan]

U slučaju inhalacije imamo sledeću metodologiju računanja efektivne doze $E_{\text{inhalacija}}$ primljene pri inhalaciji. Uzimajući za faktor ravnoteže radona i njegovih potomaka 0,4, za faktor boravka u prostoriji 7000 h god^{-1} , zatim za dozni konverzionalni faktor izloženosti radonu $9 \text{ nSv Bq}^{-1} \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, uz pretpostavku da je odnos koncentracije radona oslobođenog iz vode u vazduh i koncentracije radona u vodi jednak 10^{-4} , dobija se da godišnja efektivna doza koju primi plućno tkivo prilikom inhalacije radona prisutnog u vodi sa koncentracijom aktivnosti 1 Bq l^{-1} iznosi $2.5 \mu\text{Sv god}^{-1}$.

RB	Kod uzorka	Lokacija	Koncentracija ^{222}Rn [Bq l ⁻¹]	E _{inhalacija} [$\mu\text{Sv god}^{-1}$]	E _{ingestija} [mSv god ⁻¹]
01	CG01	Vodozahvat gradskog vodovoda "Mareza", PG	5.8(8)	14.5(20)	0.042(6)
02	CG02	Bunar, Tološi, PG	7.8(8)	19.5(20)	0.057(6)
03	CG03	Uređeni izvor, park, Danilovgrad	4.9(3)	12.2(8)	0.036(2)
04	CG04	Uređeni izvor, izlaz iz Nikšića	2.6(2)	6.5(5)	0.019(1)
05	CG05	Uređeni izvor, Plužine	3.1(1)	7.8(3)	0.023(7)
06	CG06	Bunar, Zagorič, PG	6.7(6)	16.9(15)	0.049(4)
07	CG07	Bunar, Zabjelo, PG	6.8(5)	16.9(12)	0.049(4)
08	CG08	Uređeni izvor, izlaz iz Podgorice	5.6(5)	13.9(12)	0.041(4)
09	CG09	Javna česma, PG	10.3(7)	25.6(17)	0.075(5)
10	CG10	Gradski vodovod, PG	1.32(24)	3.3(6)	0.010(10)

Tabela 6.1 Rezultati merenja uzorka vode

Rezultati dobijeni merenjem dva uzorka su odbačeni, jer je vlažnost prilikom merenja prešla 10%, tako da rezultati nisu merodavni.

U tabeli 6.1 su date vrednosti izmerenih koncentracija radona ^{222}Rn u merenim uzorcima vode i procene godišnjih efektivnih doza koje primi stanovništvo pri ingestiji i inhalaciji uzorkovanih voda za piće. Prilikom računanja vrednosti efektivnih doze za ingestiju, uzima se za pretpostavku da je odrasla osoba pila istu vodu tokom godine dana i da ju je koristila odmah na mestu uzorkovanja, i to je najnepovoljniji slučaj jer koncentracija radona ^{222}Rn opada stajanjem, termičkom obradom, u dodiru sa vazduhom... Efektivna doza koju primi plućno tkivo prilikom inhalacije radona prisutnog u vodi dobijena je korišćenjem konverzionog faktora jedinične koncentracije aktivnosti radona u ravnoteži sa svojim potomcima, $2.5 \mu\text{Sv god}^{-1}$.

6. ZAKLJUČAK

Uzimajući u obzir da savremeni čovek sve više vremena provodi u zatvorenom i potpuno klimatizovanom prostoru, nije iznenadenje da smo svedoci velikog porasta kancerogenih oboljenja vezanih za veću izloženost radonu i njegovim potomcima, a pogotovo u kombinaciji sa drugim štetnim navikama i materijama. Povodom toga u poslednje vreme je evidentno povećan interes za radon, njegov štetan uticaj na ljudsko zdravlje, kao i zakonitosti njegovog prostiranja i koncentrisanja. To su upravo stvari koje smo razmatrali u ovom radu, bez obzira što smo proučavali radon u vodi koji je najmanje odgovoran za povećanu pojavu kancerogenih oboljenja, jer smo već naveli da ingestija procentualno veoma malo učestvuje u ukupnom ozračivanju za koje je odgovoran radon sa svojim potomcima.

Mora se uzeti u obzir da su uzorci uzimani u veoma nepovoljnim meteorološkim uslovima, s obzirom da je temperatura bila veoma visoka, taj dan je u Podgorici bilo čak 45°C prilikom uzimanja uzorka na vodozahvatu gradskog vodovoda. A takođe svi izvori su u izrazito kraškim predelima, tako da postoji velika mogućnost dodira vode sa vazduhom zbog postojanja mnogih podzemnih šupljina kroz koje voda protiče.

Nadam se da je ovo bilo samo prvo merenje od mnogih, jer je oblast potpuno neistražena i dosta obećava, s obzirom da se Crna Gora nalazi na velikim tektonskim pukotinama, a u svetu se već sprovode istraživanja koja pokušavaju da povežu promene koncentracije radona u zavisnosti od tektonskih poremećaja u zemljinoj kori.

7. LITERATURA

- [1] Dr Ing. Dragiša M. Ivanović; Ing. Vlastimir M. Vučić: „Atomska i nuklearna fizika“, Naučna knjiga, Beograd, 1989
- [2] Dr Životije Topolac; grupa autora: „Enciklopedijski leksikon, mozaik znanja: Fizika“, Interpres, Beograd, 1972
- [3] Mr Sofija Forkapić: „Istraživanje gasovitih radioaktivnih produkata uranijuma i torijuma“, doktorska disertacija, Novi Sad, 2013
- [4] Prof. Dr Ištvan Bikit; Prof. Dr Nataša Todorović; Doc. Dr Dušan Mrđa; mr Sofija Forkapić; Nikola Jovančević; Jovana Nikolov; Jan Hansman: „Merenje radioaktivnosti zemljišta u AP Vojvodini 2010. godine“, Novi Sad, 2010
- [5] Dr Mira K. Jurić: Atomska fizika, Naučna knjiga, Beograd, 1976
- [6] Parkes, G.D. & Phil, D.: „Melorova moderna neorganska hemija“, Naučna knjiga, Beograd, 1973
- [7] Radiation damages DNA, <http://radiating.oncology.ox.ac.uk/all-about-radiation/radiation-damages-dna-1.html>, pristupljeno 20.12.2015. godine
- [8] Prof. Dr Ljiljana Mijatović; „Biološki efekti zračenja“, Kragujevac, 2009
- [9] Materijal preuzet od prof. Dr Nataše Todorović
- [10] „Ispitivanje koncentracije radona u flaširanim pijaćim vodama“
- [11] „RAD H₂O User Manual“, Durridge Company, USA
- [12] „RAD7 Manual“, Durridge Company, USA
- [13] „Sources and Effects of ionizing radiation“, UNSCEAR, 2008
- [14] Prof. Dr Miodrag Krmar; „Uvod u nuklearnu fiziku“, Novi Sad, 2013
- [15] Jowazaee, S.; „Determination of selected natural radionuclide concentration in the southwestern Caspian groundwater using liquid scintillation counting“, Radiat. Prot. Dosim., 2013
- [16] Galan Lopez M., Martin Sanchez A., Gomez Escobar V.; „Application of ultra-low level liquid scintillation to the determination of ²²²Rn in groundwater“, J. Radioanal Nucl Chem, 2004
- [17] US Environmental Protection Agency; „Radon in drinking water health risk reduction and cost analysis“, EPA Federal Register 64, Washington, DC, 1999

[18] European Commission; „Commission recommendation of 20th December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water“, Euratom, Brussels, 2001

[19] Wallstrom, M.; „Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies“, Euratom, Brussels, 2001

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije: Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa: Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada: Diplomski rad

VR

Autor: Dejan Kastratović

AU

Mentor: Prof.dr Nataša Todorović

MN

Naslov rada: Ispitivanje sadršaja ^{222}Rn u vodi

NR

Jezik publikacije: srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda: srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja: Srbija

ZP

Uže geografsko područje: Vojvodina

UGP

Godina: 2016

GO

Izdavač: Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa: Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada: 6 poglavlja/ 35 stranica/ 20 slika/ 1 tabela

FO

Naučna oblast: Fizika

NO

Naučna disciplina: Nuklearna fizika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči: Radon, radon u vodi

PO

UDK

Čuva se: Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena: nema

VN

Izvod: Radon u vodi, uticaj zračenja na zdravlje, merenje koncentracije radona u vodi

IZ

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odbrane: 25.2.2016

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik: Dr Nataša Todorović

član: Dr Mira Terzić

član: Dr Sofija Forkapić

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number:

ANO

Identification number:

INO

Document type: Monograph publication

DT

Type of record: Textual printed material

TR

Content code: Final paper

CC

Author: Dejan Kastratović

AU

Mentor/comentor: Prof. Dr Nataša Todorović

MN

Title: Examination of the contents of ^{222}Rn in water

TI

Language of text: Serbian (Latin)

LT

Language of abstract: English

LA

Country of publication: Serbia

CP

Locality of publication: Vojvodina

LP

Publication year: 2016

PY

Publisher: Author's reprint

PU

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

PP

Physical description: 5/182/32/0/71/0/3

PD

Scientific field: Physics

SF

Scientific discipline: Nuclear physics

SD

Subject/ Key words: Radon, radon in water

SKW

UC

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

HD

Note: none

N

Abstract: Radon in water, the impact of radiation on health, measuring the concentration of radon in water

AB

Accepted by the Scientific Board:

ASB

Defended on: 24.02.2016

DE

Thesis defend board:

DB

President: Dr Nataša Todorović

Member: Dr Mira Terzić

Member: Dr Sofija Forkapić