

Негативни ефекти изложености становништва радону из воде за пиће

Биљана Вучковић

Сажетак: Радионуклиди у води за пиће, али и у води која се користи у друге сврхе веома су чест узрочник озрачивања људи. Мониторинг вода спроводи се с циљем мерења садржаја природних радионуклида, у првом реду радона – ^{222}Rn и његових краткоживећих потомака. Радон је једини гасовити радиоактивни продукт урановог низа и директни потомак радијума. Време полураспада радона је 3,82 дана.

Његов распад у низу прате четири потомка: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po . Због растворљивости радијума у води и његовог кретања на велика растојања долази до нагомилавања радона у воденој средини, посебно кад раствара стене богате ураном. Настали радон може ефектом узмака бити убачен у воду па подземном проточном водом бити транспортован на већа растојања и у организам се унети ингестијом.

Радон је средње растворљив у води, лако је напушта и тако повећава своју концентрацију у ваздуху у затвореним просторијама, где бива инхалацијом унет у организам. Епидемиолошке студије показале су да је радон у води за пиће секундарни извор зрачења у затвореном простору.

Цитирање: Вучковић Б (2023) Негативни ефекти изложености становништва радону из воде. У: Илић П, Говедар З, Пржуљ Н (уредници) Животна средина. Академија наука и умјетности Републике Српске, Бања Лука, Монографија LV:527–551

Cite as: Vučković B (2023) Negative effects of population exposure to radon from water. In: Ilić P, Govedar Z, Pržulj N (eds) Environment. Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Banja Luka, Monograph LV:527–551

Ризик од испољавања канцерогених ефеката услед изложености радону који се у организам уноси на различите начине представља се хроничним дневним уносом радона (CDI). Ризик се квантитативно процењује за сваки пут уноса, а прост збир свих уноса одређује укупан ризик излагања штетностима радона.

Кључне речи: Радон, подземне воде, детекција, инхалација, ингестија, процена здравственог ризика

15.1. Увод

Вода је од огромног значаја за цео живи свет, а за човека је и витални услов. Глобални проблем неједнаке распоређености воде у природи, уз пораст популације и повећање потрошње воде за пиће, постаје сваким даном већи, тако да су природна изворишта све више на цени. Подземне воде су највећи ресурс слатке воде и веома је важно истражити присуство радона у подземним водама да би се становништво заштитило од негативног утицаја радона и његових потомака (UNSCEAR 2000). Радон у води за пиће је у литератури познат и као чест секундарни извор зрачења у затвореном простору (Kendall and Smith 2002; WHO 2004; Anjos et al. 2010; Rožmarić et al. 2012; Isinkaie et al. 2021).

Након истраживања која су последњих година рађена, а на основу препоруке US-EPA (*United States Environment Protection Agency*), закључено је да је 11,1 Bq/l горња граница концентрације радона у води која се сме користити у домаћинству (USEPA 1999; UNSCEAR 2008). Међутим, према одлуци Европске комисије, дозвољена горња граница је 100 Bq/l (EURATOM 2013). Изнад ових вредности предузимају се одговарајуће мере заштите, а посебно ако је измерена концентрација радона изнад или око 10^4 Bq/l. У Србији не постоји законска регулатива која се односи на ниво радона у води, па се као дозвољена горња граница заступљености користи препоручена вредност од 100 Bq/l (EURATOM 2013).

Радон (^{222}Rn) је једини гасовити радиоактивни продукт урановог низа и директан потамак радијума (^{226}Ra). Време полураспада радона је 3,82 дана и његов распад у низу прате четири потомка: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po . Оба полонијума су α -радиоактивна, док су бизмут и олово и β - и γ -радиоактивни. Као гас продире кроз стене и земљиште и акумулира се у затвореним просторима, а у организам се уноси у првом реду *инхалацијом*. Растворљивост радијума у води и кретање кроз воду на велика растојања омогућава нагомилавање радона у води, нарочито ако раствара стене

богате ураном. Настали радон може ефектом узмака бити убачен у воду и подземном проточном водом може бити транспортован на већа растојања и у организам се унети *ингестијом*. Како се вода са природних изворишта користи не само за пиће већ и личну употребу, не може се занемарити и дермални ефекат који се тада такође јавља. Он у првом реду зависи од количине контаминента у води, времена и фреквенције излагања и површине коже која је изложена озрачивању (USEPA 2010).

Доза озрачивања која настаје уношењем радона из воде у организам много нижа је од оне настале неким другим изворима зрачења (UNSCEAR 2008; WHO 2018), свега 0,01 mSv на годишњем нивоу. Ако је становништво било изложено зрачењу не дуже од две недеље, може се говорити о акутним, односно тренутним ефектима зрачења (Vjelović et al. 2020). Када су људи били изложени зрачењу у интервалу од две недеље до седам година, реч је о субхроничним ефектима зрачења. О хроничном излагању говори се кад су здравствени ризици настали као последица излагања радону присутном у води за пиће у периоду од седам година па до краја човекова живота. Истраживање постојања здравственог ризика услед конзумације вода богатих радоном углавном се ради у етапама – прављењем краткорочних и дугорочних планова рада, а све с циљем подизања свести становништва о степену ризика и примени одговарајућих мера заштите и превенције.

15.2. Класификација вода за пиће

Вода стално кружи у природи. Само 3% питке воде у течном стању налази се у површинским слојевима земље. Остатак од 97% је испод површине земље у виду огромних подземних резервоара воде заробљене у одређеним геолошким фазама стварања земљине коре (Филиповић 2003). Са хидрогеолошког аспекта за стварање водоносних акумулација подземних вода најбитнији су порозност и водопропустљивост стенских маса. Најповољнија средина за акумулацију подземних вода су шљунковите и песковите стене. Глина, магматске и метаморфне стене су неповољне средине за акумулацију вода, осим ако у њима не постоје тектонске пукотине или пукотине изливања. Дубина на којој се налазе подземне воде зависи од особина пора у којима је лежиште воде, пошто се у врло уским вертикалним порама вода пробија много више него што јој то допушта гравитација. Услед деловања молекулских сила, између зидова пора и воде настаје капиларни ефекат, тако да вода продире у поре, а што су поре уже, висина капиларног пењања је већа. Тако да се у глиновитом терену сачињеном од ситнозрнастог материјала са узаним порама, услед

капиларног ефекта, ниво воде може повећати више од три метра. Места на којима вода слободно избија на површину су *извори*, који се могу поделити на гравитационе-силазне, артешке - узлазне и хидропнеуматске изворе, код којих се вода пење под унутрашњим притиском компримованих земних гасова. Бушењем тла испод нивоа подземне воде може се доспети до водоносног слоја, при чему настаје бунар (Кукучка и Кукучка 2013). Копани бунари су извори вода на мањим дубинама у земљи, док се артешким бунарима допире до воде у знатно већим дубинама. Бунари су извори снабдевања карактеристични за руралне пределе, док се у урбаним деловима на местима извирања воде из тла налазе јавне чесме, које се и данас користе као алтернативни извори водоснабдевања. Због честог кориштења воде из бунара и са јавних чесми веома је важно испитати исправност и квалитет воде на тим местима.

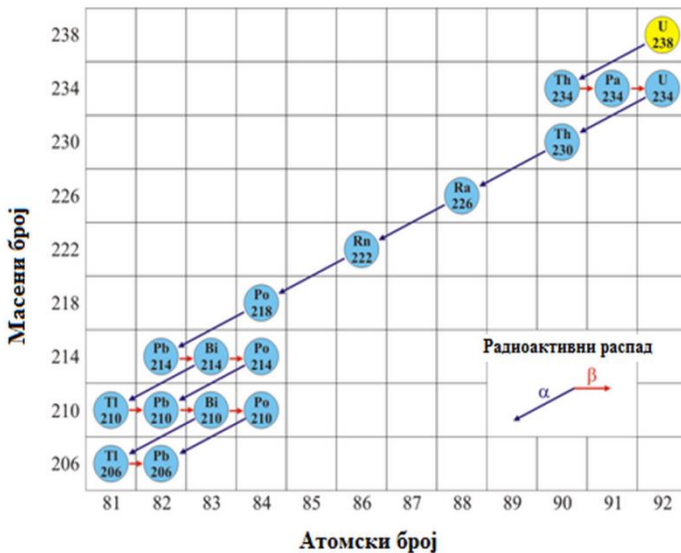
Воде које потичу из подземних слојева и долазе на површину природним истицањем – изворима или преко бушених бунара могу се класификовати на следећи начин (Службени гласник 42/98, 44/99 СРЈ и 28/2019 РС):

- *Природна минерална вода* је подземна вода намењена за људску употребу у свом природном стању и она може да се флашира само ако јој је квалитет стабилан и формиран у природним условима.
- *Природна изворска вода* је подземна вода намењена за људску употребу у свом природном стању, флашира се на самом извору или у његовој непосредној близини и задовољава захтеве квалитета прописане Правилником и захтеве везане за њену експлоатацију.
- *Стона вода* је флаширана подземна вода за пиће, која се обрађује с циљем побољшања квалитета, с тим што квалитет после обраде мора бити у складу са прописима о води за пиће.

15.3. Радон у води

У многим земљама вода из подземних извора (извори, бунари, поткопи/водоравни отвори и бушотине) користи се у домаћинству. Вода из артешких бунара садржи много више радона него из копаних. Копани бунари су, углавном, извори воде која се користи у домаћинству и на мањим су дубинама у земљи од артешких. Треба рећи да се извори радона, радијум и уранијум, не налазе увек у непосредној близини бунара и врела. Вода која се акумулира у бунарима и врелима може потицати са великих удаљености, одакле пролази кроз један или више извора радијума. Дешава се да су извори радона често веома далеко од места узорковања (Vučković et al. 2021).

Радон – ^{222}Rn је испарљив гас, без боје, мириса и укуса. Основне физичке и хемијске карактеристике радона: време полураспада од 3,82 дана и средње време живота 5,51 дан; густина од $9,73 \text{ kg/m}^3$ на 0° C и на нормалном притиску; температура топљења је -71° C , а тачка кључања је $-61,8^\circ \text{ C}$; критична температура је $104,4^\circ \text{ C}$ и критични притисак износи $63,2 \times 10^5 \text{ Pa}$ (UNSCEAR 2000). Радон настаје радиоактивним распадом радијума ^{226}Ra , односно урана ^{238}U (Сл. 15.1). Има четири краткоживећа потомка: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po . Оба полонијума су α -радиоактивна, док су бизмут и олово β - и γ -радиоактивни. Језгра настала након α и β распада обично су у побуђеном стању, одакле се деекситују емисијом гама-зрачења. Гама-зраци ^{214}Bi и ^{214}Po су највећа компонента и највећи енергетик урановог низа, а доприносе око $1/4$ од свих природних зрачења која долазе од Земље, па се зато називају и „активни талог“ (UNSCEAR 2000).



Сл. 15.1. Положај радона ^{222}Rn у распаду урана ^{238}U (UNSCEAR 2000)
 Fig. 15.1. Position of radon ^{222}Rn in the decay of uranium ^{238}U (UNSCEAR 2000)

У природи се радон посматра као изоловани атом присутан у гасовитој и течној средини, кроз које се углавном креће дифузионо у оном степену који му дозвољава време полураспада (UNSCEAR 2000). У различитим срединама радон дифузијом прелази различита растојања, међу којима постоји огромна разлика. Дифузија радона кроз земљу повезана је са њеном порозношћу, односно зависи од величине дистрибутивних зрна, степена компактности структуре и садржаја воде у земљи. Већа

порозност омогућава обимнији транспорт. Повећане концентрације радона често се налазе изнад зона фрактура стена, где су се јони урана или радијума, растворени у подземној води, наталожили на површини пукотина, одакле распадом еманирају радон. Подземне воде могу периодичним подизањем нивоа да преместе руде урана, тако да на новој локацији буде више руда него на месту порекла налазишта. Претходно и ново место минерализације стварају две области извора радона са истог рудног тела. Када је вода у директном контакту са минералним честицама које садрже радијум, настали радон може ефектом узмака да буде убачен у воду и дифузијом прелази мала растојања пре дезинтеграције (Chandhuri 2010).

Радон се добро раствара у води и у складу са малим временом полураспада може мигрирати подземним водама дуж пукотина и раседа у зависности од брзине тока флуида (Appleton 2005). Концентрација радона у подземним водама може варирати чак и на малом подручју јер геолошке разлике земљишта имају знатан утицај на његову дистрибуцију. Миграција радона из подземних вода до површине зависи од низа фактора: присуства радијума и уранијума, геолошке структуре терена (присуство раседа и пукотина), хидрогеолошких својстава стена (порозност, пермеабилност), присуства растворљивих гасова те од температуре и притиска. Радон је обично присутан у знатним концентрацијама у подземним водама које су на свом путу у контакту са гранитним стенама, гнајсом, шкриљцима, глинцима, а често и пешчарима, кречњаком или лапорцима. Највише концентрације радона углавном су измерене на подручју гранитних стена и шкриљаца са високим садржајем уранијума. Радиоактивност магматских стена расте са уделом SiO_2 у стени, па се тако мале концентрације радионуклида налазе у ултрабазичним (перидотит) и базичним (гарбо) стенама, а стене које су највише радиоактивне су киселе магматске стене (гранит). Уочене су и знатне концентрације радона у водама у околини тектонских зона, настале услед његове миграције кроз пукотине и преломе у тлу (Филиповић 2003). У великом броју случајева висока концентрација радона у води није последица знатног присуства радијума и уранијума, што упућује на закључак да се корелација између њих не може успоставити. Један од разлога је мања растворљивост Ra и U у односу на радон. Са друге стране, ниске концентрације радијума могу условити високе концентрације радона ако је радијум апсорбован на површини минералног зрна.

Примећено је и да је за време пролећа, услед већег прилива воде која на свом путу раствара стене, виша концентрација радона у води (Nikolov et al. 2015). Параметри који својом вредношћу могу утицати на концентрацију радона у води су pH вредност и температура (Kasić et al. 2016; Marković et al.

2020; Vučković et al. 2021). Вредност рН воде је параметар који указује на њену киселост или алкалност. Ниска рН вредност (испод 7) указује на појачано присуство радијума, односно радона. Повишена температура, међутим, указује на смањено присуство радона (Cothorn and Smith 1987; Thinova et al. 2004; Sharma and Sharma 2013).

15.4.1. Процес преласка радона из воде у затворен простор

Радон у гасовитом стању је средње растворљив у води. Радон је „аквафобик“ – радије би био у ваздуху него у води и тако повећава своју концентрацију у њему (USEPA 1999; EUROMAT 2013). Радон ослобођен из воде у ваздуху повећава своју концентрацију у њему са ефективним временом полураспада од тридесет минута. То је време потребно да се на површинама просторије наталоже ослобођене честице радона. Са повећањем његове концентрације повећава се и концентрација потомака. Када доспе у затворен простор, његове концентрације могу бити велике и зависе од вентилације датог простора (Вучковић и сар. 2011). Временске прилике споља утичу да ефекти вентилације буду различити. Ако је споља мала брзина ветра, нема ваздушних промена у кући и повећава се концентрација радона (Žunić et al. 2010; Vučković and Čanačević 2016). Ако се на неки начин мења однос притисака ваздуха у кућама и изван њих, долази до интензивнијег продора земног гаса у кућу, а са њим и радона. Такође, и температурне промене утичу на променљивост концентрације радона у кући. Када се начини проветравања узму у обзир, комбинацијом са одређеним вредностима коефицијента трансфера могу се добити оптималне вредности концентрација. Тако да се с правом за радон ослобођен из воде и његове потомке може рећи да су најважнији извор краткотрајног излагања организма у затвореним просторијама.

Међусобни однос концентрација радона у води и у ваздуху у затвореним просторијама дефинише коефицијент трансфера, чија се вредност креће у распону од 10^{-5} до 3×10^{-4} (UNSCEAR 2000). Током експерименталног истраживања утицај радона из воде на концентрације радона у ваздуху у кућама (уз уважавање типичних вредности за количину коришћене воде, карактеристика куће и начина вентилације) одређивао се на следећи начин (Zalewski et al. 2001; Vučković et al. 2022):

$$C_{aRn} = C_{wRn} \times W \times \frac{e}{(V \times \lambda_c)}, \quad (15.1),$$

где је: C_{aRn} допринос радона из воде укупном радону у ваздуху (Bq/m^3), C_{wRn} концентрација радона у води (Bq/l), W просечни унос воде ($0,01 m^3/h$ по

особи), е ефикасност трансфера радона из воде у ваздух (0,5), V просечна запремина просторије (20 m^3) и λ_c коефицијент промене ваздуха у просторији ($0,7 \text{ h}^{-1}$), (UNSCEAR 2000; Xinwei 2006).

Да би се на прави начин одредио допринос радона из воде укупном радону у ваздуху у затвореној просторији, концентрација радона у води уместо у Bq/l изражена је у kBq/m^3 , при чему концентрација радона у води од 1 mBq/l одговара концентрацији радона од 1 Bq/m^3 у ваздуху.

Ако се говори о дугорочном излагању радону, никако не треба занемарити појачано присуство радона у просторијама које последица његовог продирања и из земље и из самих зидова објеката (Popovic and Todorovic 2006; Vučković et al 2016).

15.4.2. Детекција радона у води за пиће

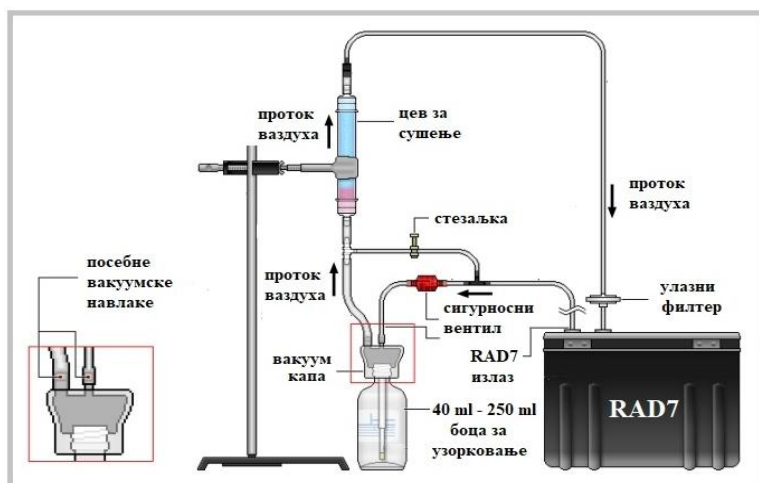
Да би се на прави начин располагало изворима подземних вода и утврдио степен радиоактивне контаминације, спроводи се мониторинг радиоактивности вода. Методе којима се одређује концентрација радона у води разликују се по начину и трајању узорковања, па се може говорити о пасивном и активном узорковању. Код пасивног узорковања радон самостално дифундује у детекцијску комору, док се при активном узорковању уноси одређена количина ваздуха у јединици времена и затим изводи мерење активности једном од метода. По трајању узорковања разликују се тренутна, континуирана и интегрална мерења. Да би се избегле несигурности и грешке мерења које потичу од саме природе радиоактивности, понекад би требало продуживати време мерења и анализе.

15.4.3. RAD7 алфа-спектрометар

Најједноставнија метода детекције радона у води је алфа-спектрометријска анализа узорковане воде системом RAD7 RAD H₂O (Сл. 15.2). Основа овог уређаја је полусферна комора запремине 0,7 l, чија је унутрашња страна обложена материјалом који је добар проводник. У центру коморе је силицијумски α -детектор (Durrige Co.). На улазу у комору налази се филтер који спречава продор радонових потомака у комору и тиме омогућава мерење само концентрације радона у њој. Унутар детекторске коморе присутно електрично поље високог напона (2000–2500 V) чини да се енергија упадног алфа-зрачења директно претвара у електрични импулс.

Радон је хемијски инертан и електронеутралан у комори, па неће бити усмерен на површину детектора. Оно што електрично поље у комори убрзава и усмерава ка детектору је ^{218}Po , чије је време полураспада три минута, а игнорише ^{214}Po са релативно дугим временом полураспада од 27 минута. У процесу мерења учествују само изотопи полонијума, који се таложе на детектору. Наталожени полонијум емитује α -честице, које са вероватноћом од 50% улазе у активну средину и производе електрични сигнал чији интензитет одговара енергији.

Помоћу RAD7 пумпе вршила се аерација узорковане воде да би радон био истиснут и преведен у комору за мерење. Ваздух циркулише кроз воду у циклусима од пет минута и континуирано екстрахује радон из ње. Процент радона који је извучен из воде је за узорке у бочици од 40 ml 99%, а 94% за узорак од 250 ml. Ефикасност екстракције радона из воде у ваздух који циркулише до мерне коморе благо зависи од температуре, али је увек већи од 90%, те се утицај температуре може занемарити. Овај систем веома брзо достиже равнотежу, већ након 20 минута (четири циклуса по пет минута) могу се добити резултати. То значи да у узорку више нема радона који би се могао издвојити. По завршетку мерења добија се штампани извештај средње концентрације радона и њене стандардне девијације за дати период мерења. Такође су иштампани и температура, влажност унутар коморе, датум и време завршетка мерења.



Сл. 15.2. RAD7 RAD H₂O систем за мерење концентрације радона у води (Durrige Co.)

Fig. 15.2. RAD7 RAD H₂O system for measuring the concentration of radon in water (Durrige Co.)

Када мерење радона у узорку воде није обављено у року од неколико сати од узорковања, потребно је добијену вредност кориговати за распад на следећи начин (Todorović et al. 2012b):

$$C_{corr} = C_o \cdot e^{-(\ln 2 \cdot t)T_{1/2}} \quad (15.2),$$

где време t дефинише време протекло од узорковања до мерења концентрације радона.

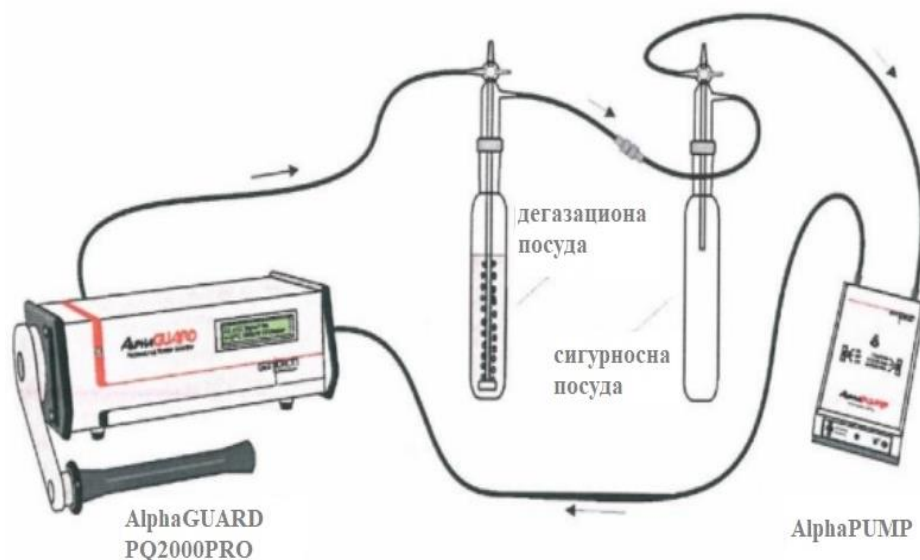
Зато што је најчешћи и најбитнији узрок добијених нереалних резултата неправилно узорковање, потребно је поштовати препоруке произвођача на следећи начин: боца у којој се врши узорковање постави се испод млаза воде, када се напуни, вода се пусти да се прелива преко боце да вода не би дошла у контакт са ваздухом, боцу затворити док је под млазом. Ако се не очекује концентрација већа од 100 Bq/l, користе се боце запремине 250 ml, при чему је ефикасност екстракције 94%. У супротном, воду треба узорковати у боцама запремине 40 ml, када је ефикасност екстракције 99%. Оно што може редуковати ефикасност сакупљања полонијума ²¹⁸Po јесте релативна влажност. Веома је важно и то да RAD7 детектор пре сваког мерења мора бити ослобођен заосталог радона и сув. То се постиже десетоминутним сушењем у одговарајућим сушилицама. Релативна влажност испод 6% у инструменту гарантује да у току наредног мерења неће прелазити 10%. На позадинске ефекте у мерном систему највише утичу одброји радонових потомака и трагови радона задржани од претходних мерења, посебно ако је у узроку била знатна концентрација радона. Да би се ти ефекти избегли, оставља се *background* узорак дестиловане воде, као *radonfree* узорак, више од четири недеље. Потом следи мерење по процедури. Минимална детектабилна активност од 0,37 Bq/l за 20 минута мерења може се добити једино ако се сав радон елиминише из система (односи се на мерење 250 ml узорка воде). Доња граница детекције уређаја је 0,37 Bq/l, док је минимална детектована вредност 0,1 Bq/l (Todorović et al. 2012b; Vučković et al. 2021). Тако ниску вредност могуће је детектовати кад се сав преостали радон и његово потомство у потпуности елиминишу из система пре следећег мерења, а релативна влажност током мерења буде мања од 8%.

15.4.4. AlphaGUARD мерни систем

Концентрације радона у узорцима подземне воде мерене су континуалном методом употребом активног радон монитора AlphaGUARD (модел PQ2000PRO) (SAPHUMO 2007). Овај детектор је изабран због доказане стабилности калибрације и брзог одговора на концентрацију и јер користи

процес јонизације при бројању импулса. Комора активне запремине 0,65 l погодна је за дуготрајну детекцију радона, у интервалу концентрације гаса радона од 2 до 2×10^6 Bq/m³. Процедура мерења заснована је на алфаспектрометрији радона и његових потомака у ваздуху који се у јонизационој комори детектују. Осим тога, уређај региструје вредности главних параметара животне средине (температура, влажност и атмосферски притисак) у време мерења.

За мерење концентрације радона у води коришћен је и систем AquaKIT (Сл. 15.3) (Alonso et al. 2015). Овај систем се састоји од контејнера од 500 ml са уређајем за дегазацију, који ради пропуштањем мехурића кроз водени узорак, пумпе (Alpha PUMP) са протоком од 0,5 l у минути и сигурносне стаклене боце, која је повезана са детектором унутар затворене петље. Филтер са активним угљем такође се користи за смањење позадине концентрације радона у систему пре сваког мерења.



Сл. 15.3. Мерење концентрације радона у води системом AquaKIT (Alonso et al. 2015)

Fig. 15.3. Measurement of radon concentration in water with AquaKIT system (Alonso et al. 2015)

Пре сваког мерења узорка воде систем се прочишћава 10 минута да би се елиминисао заостали радон и смањиле концентрације радона у детектору на позадинске вредности. Након тога вода се уноси у посуду за дегазацију и почиње процес детекције.

AlphaGUARD монитор индиректно мери активност радона у води, пошто се радон из воде избацује и разређује у ваздуху у оквиру мерне поставке. Концентрација радона у води одређује се према формули (SAPHYMO 2007):

$$C = 10^{-3} \cdot C_{AG} \cdot \left(\frac{V_S - V_U}{V_U} + k \right) + C_o \quad (15.3),$$

где је C_{AG} концентрација радона у ваздуху мерена системом AlphaGUARD, C_o концентрација у окружењу мерена пре почетка мерења, V_S укупна мерна запремина система, V_U запремина узорковане воде и k дифузиони коефицијент радона у води, који се одређује једначином:

$$k = 0.106 + 0.405 \cdot e^{-0.052T} \quad (15.4),$$

где T представља температуру на којој се врше мерења.

Коректност при одређивању концентрације радона у води зависи од непробојности мерне опреме, односа запремине узорка/мерне опреме, температуре узорка, количине радона у мерној опреми пре почетка експеримента и позадине система AlphaGUARD.

15.5. Годишње ефективне дозе ингестије и инхалације

Канцерогено деловање радона, у дугорочном смислу, открива се одређивањем укупне ефективне дозе интерног озрачивања радоном раствореним у води (E_{tot}), коју чине две компоненте: прву дефинише доза ингестије (E_{ing}), а другу дефинише ефективна доза инхалације радона (E_{inh}):

$$E_{tot} = E_{ing} + E_{inh} \quad (15.5).$$

Посебну пажњу треба обратити на дозу зрачења којој су изложена деца, јер она имају већи фактор интензивног раста костију и зато треба предузети посебне мере да се ограничи њихово излагање на било који начин (Alseroury et al. 2018).

15.5.1. Ингестија радона

Годишња ефективна доза ингестије одређује се следећим обрасцем (UNSCEAR 2000; Somlai et al. 2007; El-Araby et al. 2019):

$$E_{ing} = K \times C_{Rn} \times KM \times t = 7.3 \times C_{Rn} \quad (15.6),$$

где је: K конвертитни фактор од 10^{-8} Sv/Bq за одрасле и 2×10^{-8} Sv/Bq за децу (UNSCEAR 2000); C_{Rn} концентрација радона у води (Bq/l); KM дневни конзумациони фактор (просечно 2 l) и t период од 365 дана (WHO 2004).

Познато је да приликом конзумирања воде богате радоном радон у организам може продрети кроз зидове желуца, а затим може продрети у организам и кроз зидове трбуха, као што је приказано на Сл. 15.4.



Сл. 15.4. ПUTEВИ УНОСА РАДОНА ИНГЕСТИЈОМ (WHO 2004)
 Fig. 15.4. Routes of ingested radon (WHO 2004)

Директно уношење у организам радона и његових потомака присутних у пијаћој води носи озбиљне ризике за развој карцинома желуца, у неким случајевима и дебелог црева и јетре (Bonotto 2004; WHO 2004; Tirmarche et al. 2010; Anjos et al. 2010; Vogeltanz-Holm and Schwartz 2018). Део унетих радионуклида може остати на истим местима дуг временски период, а неки макрофаги (покретне ћелије) могу их апсорбовати и пренети до лимфних чворића. Ове ћелије могу примити дозу зрачења α -честица емитованих од радона и његових краткоживећих потомака насталих у трбушној дупљи. Домет α -честице је $50\text{--}60 \times 10^{-6} \text{ m}$ у ткиву (WHO 2004). Критични орган у коме се радионуклиди депонују и задржавају у првом реду су кости, јер унети радионуклиди прате метаболичке путеве калцијума. Осим желуца, веома осетљиви на радионуклиде унете ингестијом су и јетра, бубрези и друга мека ткива (WHO 2004). Дозе које органи, односно организам у целини прими од радона и његових потомака могу се прерачунати и приказане су у Таб. 15.1. (Kendall and Smith 2002).

Таб. 15.1. Сумирани дозни коефицијенти приликом ингестије радона и његових потомака (Kendall and Smith 2002)

Table 15.1. Summarized doses coefficients during ingestion of radon and its progenies (Kendall and Smith 2002)

	Продукти распада радона		²²² Rn	
	Коефицијент дозе Sv/Bq	Годишња доза за 1000 mSv Bq/l	Коефицијент дозе Sv/Bq	Годишња доза за 1000 mSv Bq/l
Плућа	$2,4 \times 10^{-11}$	0,01	$2,1 \times 10^{-9}$	1,26
Желудац	$1,9 \times 10^{-9}$	1,15	$8,4 \times 10^{-8}$	50,4
Танко црево	$8,5 \times 10^{-10}$	0,51	$4,3 \times 10^{-9}$	2,6
Дебело црево	$2,1 \times 10^{-10}$	0,13	$8,8 \times 10^{-11}$	0,1
Коштана срж	$4,7 \times 10^{-11}$	0,03	$1,1 \times 10^{-9}$	0,66
Покосница	$2,0 \times 10^{-10}$	0,12	$5,2 \times 10^{-11}$	0,03
Јетра	$6,4 \times 10^{-11}$	0,04	$9,5 \times 10^{-10}$	0,57
Груди	$2,2 \times 10^{-11}$	0,01	$7,4 \times 10^{-10}$	0,44
Бубрег	$4,2 \times 10^{-10}$	0,25	$8,1 \times 10^{-11}$	0,05
Гонаде	$4,0 \times 10^{-11}$	0,02	$8,8 \times 10^{-11}$	0,05
Мозак	$2,0 \times 10^{-11}$	0,01	$1,0 \times 10^{-10}$	0,06
Бешика	$3,1 \times 10^{-11}$	0,02	$8,8 \times 10^{-11}$	0,05
Мишићи	$2,5 \times 10^{-11}$	0,02	$8,8 \times 10^{-11}$	0,05
Фетус*	$2,3 \times 10^{-11}$	0,01	$1,0 \times 10^{-10}$	0,05

* Фетус се рачуна као мишићно ткиво.

15.5.2. Инхалација радона

Радон ослобођен из воде акумулира се у затвореним просторима и у организам се уноси инхалацијом. Радијациона доза у плућима потиче углавном од краткоживећих потомака радона, ²¹⁸Po и ²¹⁴Po, наталожених на површинама бронхија, а не само од радона. Радон се највећим делом враћа натраг са издахнутим ваздухом (UNSCEAR 2008). Процењено је да инхалација радона (и његових потомака) који се налази растворен у повишеним концентрацијама у води за пиће приликом конзумирања воде изазива 89% карцинома који се приписују изложености повишеним концентрацијама радона. У литератури се зато радон појављује као значајан фактор ризика за настанак карцинома плућа. Преосталих 11% карцинома

узрокованих радоном изазива ингестија воде са повишеним садржајем радона (USEPA 1999; Žunić et al. 2006; Nikolov et al. 2012). У Таб. 15.2. представљене су сумиране вредности дозних коефицијената инхалираног радона и свих његових потомака при концентрацији радона у ваздуху од 200 Bq/m^3 (Kendall and Smith 2002).

Таб. 15.2. Сумиране вредности дозних коефицијената инхалираног радона и његових потомака (Kendall and Smith 2002)

Table 15.2. Summarized values of the dose coefficients of inhaled radon and its progenies (Kendall and Smith 2002)

	Жене		Мушкарци		^{222}Rn
	Коефицијент дозе Sv/Bq		Коефицијент дозе Sv/Bq		
	Потомци радона	Годишња доза за 200 mSv Bq/m^3	Потомци радона	Годишња доза за 200 mSv Bq/m^3	
Плућа	$2,5 \times 10^{-8}$	35,8	$1,1 \times 10^{-7}$	159	1,2
Дисајни путеви	$3,0 \times 10^{-8}$	44,5	$4,9 \times 10^{-8}$	70,9	
Желудац	$1,3 \times 10^{-10}$	0,19	$5,6 \times 10^{-11}$	0,08	0,06
Танко црево	$1,2 \times 10^{-10}$	0,17	$3,2 \times 10^{-11}$	0,05	0,06
Дебело црево	$1,1 \times 10^{-10}$	0,16	$1,7 \times 10^{-11}$	0,02	0,05
Коштана срж	$1,9 \times 10^{-10}$	0,28	$2,2 \times 10^{-11}$	0,03	0,65
Покосница	$1,0 \times 10^{-9}$	1,48	$1,2 \times 10^{-10}$	0,17	0,03
Јетра	$2,9 \times 10^{-10}$	0,43	$3,2 \times 10^{-11}$	0,05	0,09
Груди	$1,0 \times 10^{-10}$	0,15	$1,2 \times 10^{-11}$	0,02	0,43
Бубрег	$3,6 \times 10^{-9}$	5,20	$3,7 \times 10^{-10}$	0,54	0,05
Гонаде	$1,0 \times 10^{-10}$	0,15	$1,1 \times 10^{-11}$	0,02	0,05
Мозак	$1,1 \times 10^{-10}$	0,15	$1,1 \times 10^{-12}$	0,02	0,06
Бешика	$1,4 \times 10^{-10}$	0,21	$1,5 \times 10^{-11}$	0,02	0,05
Мишићи	$1,0 \times 10^{-10}$	0,15	$1,1 \times 10^{-11}$	0,02	0,05
Фетус*	$4,1 \times 10^{-11}$	0,06	$4,9 \times 10^{-12}$	0,01	0,04
Кожа		25		25	

* Фетус се рачуна као мишићно ткиво.

Треба нагласити да радијациона доза у плућима потиче углавном од краткоживећих потомака радона, ^{218}Po и ^{214}Po , наталожених на површинама бронхија, а не само од радона. Радон се највећим делом враћа натраг са издахнутим ваздухом. Присуство и деловање потомака мери се и истражује у групи. Зато се не говори о њиховим појединачним концентрацијама, већ о

концентрацији потенцијалне енергије α -честица које се емитују при распаду (РАЕС) (UNSCEAR 2008). Захваљујући својим физичким особинама, пошто су јони метала, вежу се за аеросоле у ваздуху стварајући радиоактивне аеросоле и својим распадом јонизују ћелије и подстичу на неконтролисано дељење. Продукти распада се у ваздуху плућа налазе на удаљености $20\text{--}30 \times 10^{-6}$ m од ћелија и на тај начин имају већу вероватноћу да погоде језгро ћелије-мете. Заостали радон се полако раствара у ткивима и транспортује путем крви у друге органе, где заједно са продуктима распада појачава испоручену дозу радијације ткиву. Брзина дисања, величина аеросола и величина ћелије-мете битни су параметри који утичу на испоручену дозу α -честица ћелијском језгру у бронхијама.

Годишња ефективна доза инхалације одређена је на следећи начин (UNSCEAR 2000; El-Araby et al. 2019):

$$E_{inh} = C_{Rn} \times R \times D \times F \times t = 2.52 \times C_{Rn} \quad (15.7),$$

где је: C_{Rn} концентрација радона у води, R однос концентрација радона у ваздуху и концентрације радона у води и износи 10^{-4} или 10^{-1} Bq m^{-3} /Bq l^{-1} (што значи да концентрација радона у води од 10 Bq/l даје допринос концентрацији у ваздуху од 1 Bq m^{-3}), D је конверзиони фактор од nSv/h по Bq/ m^3 , F је фактор еквивалентности између радона и његових потомака 0,4 и t је временски интервал од 7.000 hy^{-1} (UNSCEAR 2000).

15.6. Процена здравственог ризика

Људски организам може бити оштећен путем спољне радијације (када је организам директно изложен извору радијације) или унутрашњом контаминацијом (када се у организам унесу радиоактивне материје водом или храном или удисањем). Људско тело састављено је од неорганских компоненти, воде са минералима и од органских молекула, протеина, угљених хидрата, липида, нуклеинских киселина. Дејство зрачења на људско тело своди се у основи на оштећења појединих ћелија, при чему треба нагласити да исто зрачење не узрокује исто дејство на све ћелије. Због разлике у осетљивости ћелија велика је разлика и у последицама озрачивања различитих ткива, органа и организма. Ткива која се спорије деле мање су осетљива на зрачење од оних ткива и органа који се интензивно обнављају.

Низ фактора утиче на врсту и величину радијационог оштећења. Неки зависе и од саме озрачене особе, њеног пола, здравља и старости. Ефекти

зрачења деле се на соматске ефекте и генетске ефекте (Никчевић и Анђелић 2011). Радијациони ефекти који се појављују на озраченој особи називају се соматски, а они који се јављају на потомству озрачене особе називају се генетски или наследни фактори.

Сматра се да је настајање карцинома главни соматски ризик излагања ниским дозама и то представља највећи проблем заштите од зрачења. Штетне последице дејства зрачења на човека испољавају се у различитим временским интервалима после озрачивања, па се соматски ефекти даље деле на акутне и хроничне (касне) ефекте. Ако је организам изложен високим дозама зрачења у кратком временском интервалу, не дужем од две недеље, може се говорити о акутном, односно тренутном излагању.

Када је становништво било изложено зрачењу у интервалу од две недеље до седам година, може се говорити и о субхроничним ефектима зрачења. Изложеност здравственим ризицима насталим као последица излагања радону присутном у води за пиће у периоду од седам година па до краја живота постаје хронично излагање (Vjelović et al. 2020). Период док се ефекти не појаве назива се латентни период.

Процена здравственог ризика насталог као последица излагања радону присутном у води за пиће врши се прикупљањем и анализом ових података: количина ингестије, учесталост и трајање излагања, телесна тежина и просечно време изложености, узимајући у обзир контролу квалитета података. Ризик се квантитативно процењује за сваки пут уноса, а прост збир свих уноса одређује укупан здравствени ризик. Хронични дневни унос (CDI) радона пијењем воде богатом овим радионуклидом за одраслу популацију може се израчунати на следећи начин (USEPA 2010; Vjelović et al. 2020):

$$CDI = \frac{Cw \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (15.8),$$

где је: CDI – хронични дневни унос ингестијом унетог радона; Cw – концентрација радона (Bq/l); IR – количина ингестије: 2 l дневно; EF – време изложености: 365 дана на годишњем нивоу; ED – време излагања: 70 година; BW – телесна тежина: 70 kg; AT – просечно време изложености: 70 година x 365 дана на годишњем нивоу.

Становништво не користи воду само за пиће већ и за остале потребе у домаћинству, хронични дневни унос (CDI) услед инхалације радона ослобођеног из воде за одраслу популацију може се израчунати на следећи начин (USEPA 2010; Vjelović et al. 2020):

$$CDI = \frac{C_{air} \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (15.9),$$

где је: CDI – хронични дневни унос инхалацијом унетог радона; C_a – концентрација ослобођеног радона из воде (Bq/m^3); IR – инхалациона доза: $20 m^3$ дневно; EF – време изложености: 365 дана на годишњем нивоу; ED – време излагања: 70 година; BW – телесна тежина: 70 kg; AT – просечно време изложености: 70 година x 365 дана на годишњем нивоу.

Приликом процене укупног здравственог ризика за становништво изложено радону у води за пиће не треба изоставити и постојање дермалног ефекта. Дермални ефекат се изражава као дневна апсорбована доза (ADS) и дефинише се на следећи начин (USEPA,2010):

$$ADS = \frac{C_c \times CF \times SA \times AF \times |EF \times ED}{BW \times AT} \quad (15.10)$$

Он у првом реду зависи од количине контаминента (C_c), али и од: конверзионог фактора (CF), површине коже која је изложена озрачивању (SA), фактора пропустљивости коже (AF), времена излагања (ED) и фреквенце излагања (EF), апсорпционог фактора коже (ABS), телесне тежине (BW) и просечног времена изложености (AT), (USEPA, 2010).

Здравствени ризици настали дермалним ефектом, ингестијом и инхалацијом радона и укупан ризик од настанка карцинома одређују се на следећи начин (USEPA 2010):

$$Risk = CDI \times SF; TotalRisk = \sum Risk \quad (15.11).$$

Фактор нагиба (SF) је горња граница изложености, приближна граници поузданости од 95% повећаног ризика од рака услед доживотне изложености ингестијом или инхалацијом унетог канцерогеног елемента. Ова процена примењује се у случају мањих ризика изложености, мањих од 0,01.

Ако се вредност укупног здравственог ризика од настанка карцинома налази у опсегу од 10^{-4} до 10^{-7} , ризик се дефинише као прихватљив (USEPA 2010), што би заправо значило да је вероватноћа појаве карцинома код појединца процењена као 1 на 10.000 (10^{-4}), 1 на 100.000 (10^{-5}), 1 на 1.000.000 (10^{-6}) и 1 од 10.000.000 (10^{-7}).

15.7. Методе елиминације радона из воде

Данас у свету постоје бројни начини којима се покушава снизити присуство радона у води за пиће да би се умањио његов погубан утицај на здравље становништва. Као најуспешнији издвајају су се (USEPA 1999):

- *Аерација водених система* – једна од данас најуспешнијих технологија (око 99.9%) за снижавање концентрација радона у води. Овом методом се концентрација радона у води може довести и на ниво од 11,1 Вq/l. Полазећи од општепознате особине радона да је високо испарљиви гас и да се брзо креће кроз ваздух, процес аерације је следећи: ваздух се кроз одговарајуће пумпе убацује у велике цистерне - танкове са водом и изазива узбуркавање воде, ослобођени радон напушта воду и прелази у ваздух. Ваздух се затим испушта из танка. Ваздух се у танкове може убацити или под атмосферским или под неким другим притиском, кључањем по дубини танка или распрскавањем у површинским слојевима течности. Било којом методом да се ваздух убацује, битно је изазвати узбуркавање водене масе и ослобађане радона из ње. Предност ове методе је компатибилност са осталим процесима пречишћавања вода у великим постројењима, али и у кућним условима. Не треба занемарити чињеницу да се овом методом може повећати концентрација радона у ваздуху и тиме створити други ризик од озрачивања, па треба бити опрезан приликом коришћења ове методе у кућним условима.
- *Коришћење филтера са активним угљем (Granular Activated Carbon, GAC)* – метода која је нашла велику примену у кућним условима. GAC филтери у себи садрже угљена зрнаца величине једног милиметра. Састав зрнаца може бити од угља, дрвета или кокосове љуске. Њихова ефикасност зависи од површине апсорпције контаминираних материјала - већа површина зрна већа апсорпциона моћ. Површина зрна може се повећати на три начина: загревањем до дехидратације, затим до кристализације и загревањем паром, чиме се добијају врло порозна зрна (до хиљаду пора у сваком зрну). Обично се GAC филтери инсталирају на самом улазу природних непрерађених вода у танкове. Вода се слива кроз филтере, радон се из воде у потпуности задржава унутар пора активног угља и чиста вода се даље пумпама дистрибуира по кући. Филтери задржавају радон све до распада, па се може рећи да се током коришћења ових филтера успоставља равнотежа између радона и његових краткоживећих потомака. GAC филтери по својој структури могу акумулирати и задржавати и друге радионуклиде из подземних вода. Основни проблем који се јавља у том случају јесте присуство γ -емитера ^{214}Bi и ^{214}Pb и излагање становника њиховом зрачењу. Овај проблем код коришћења наведених филтера узрокује акумулација дугоживећих радионуклида - уранијума, радијума и олова. Након дужег непрекидног рада филтера једини преостали радионуклид

који се таложи је дугоживећи ^{210}Pb , са временом полураспада од 22,3 године. Апсорпција радијума слабије је изражена јер се у води налази у облику сулфатног једињења. Ако је рН вредност воде испод седам, уран се може апсорбовати на зрнима, а ако је рН вредност воде изнад седам, апсорпција је слабије изражена. Појављује се и проблем одлагања искоришћеног контаминираниог отпада.

- *Складиштење вода* – полазећи од чињенице да је време полураспада радона 3,82 дана, могуће је његово присуство у води умањити складиштењем у велике канистере. Познато је да се након свега 24 сата концентрација радона у води смањи за 20–40%, док након пет до шест дана она опадне и до 90%. Сам поступак смањивања концентрације радона у води може се извести и док се она распршава приликом пуњења. На први поглед, овај метод захтева најмање улагања за пречишћавање вода, али за собом повлачи питање квалитета и укупне исправности воде за пиће. Такође, проблем је и то што ослобођени радон одлази у ваздух - чиме потенцијално повећава озрачивање инхалацијом или остаје заробљен у канистерима и повећава озрачивање ингестијом.
- *Мешање површинских и подземних вода* – познато је да је концентрација радона у површинским водама нижа од концентрације у подземним водама. Тако да се у одређеним случајевима прибегава и овој методи да би се мешањем смањило присуство радона у води која се користи за пиће. У одређеним случајевима и транспорт вода од изворишта до места коришћења може имати одређеног утицаја на укупну концентрацију радона у води. У просеку током транспорта концентрација радона опада за 10–20% од првобитне.

15.8. Закључак

Природни радиоактивни гас радон ^{222}Rn познати је „аквафобик“ – радије би био у ваздуху него у води, чиме појачава своје присуство у затвореном простору и постаје најважнији извор краткотрајног излагања. Радон присутан у води може озрачити организам на два начина: екстерно – манифестује се као дермални ефекат и интерно – коришћењем воде за пиће – *ингестијом* и удисањем радона и његових потомака растворених у води – *инхалацијом*.

За процену укупног здравственог ризика услед изложености становништва радону важно је разматрати и ингестиони, и дермални и инхалациони унос. Ризик се квантитативно процењује за сваки пут од ових уноса, а простим

збиром свих уноса одређује се укупни здравствени ризик. Укупна изложеност утврђује се на основу просечне концентрације контаминента, времена контактнoг излагања, дужине и учесталости излагања, просечног времена излагања, површине изложене коже, фактора пропустљивости коже, запремине удахнутог ваздуха и телесне тежине. Ако не постоје референтне вредности степена изложености на националном нивоу, користе се међународно признате вредности. Да би се умањили погубни ефекти радона, велику пажњу треба посветити и едукацији становништва о канцерогеном деловању овог радионуклида. Важна су и сазнања о мерама превенције и заштите, првенствено о елиминацији радона из вода за пиће на различите начине: уклањање радона аерацијом воде или постављање филтера са активним угљем.

Литература

- Alonso H, Cruz-Fuentes T, Rubiano JG, González-Guerra J, Cabrera MDC, Arnedo MA, Tejera A, Rodríguez-Gonzalez A, Pérez-Torrado FJ, Martel P (2015) Radon in Groundwater of the Northeastern Gran Canaria Aquifer. *Water*. 7(6):2575–2590. doi:10.3390/w7062575
- Alseroury FA, Almeelbi T, Khan A, Barakata MA, Al-Zahrani JH, Alali W (2018) Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water. *J. Radiat. Res. Appl.* 11(4):373–378. doi:10.1016/j.jrras.2018.07.004.
- Anjos RM, Umisedo N, da Silva AAR, Estellita L, Rizzotto M, Yoshimura EM, Velasco H, Santos AM.A (2010) Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. *J. Environ. Radioactiv.* 101(2):153–158. doi:10.1016/j.jenvrad.2009.09.010
- Bijelović S, Jevtić M, Dragić N, Nikolov J, Todorović N. 2020 Radioactivity of Water in Vojvodina and Possible Health Effects. Chapter in Book: Radionuclides: Properties, Behavior and Potential Health Effects. ISBN: 978-1-53617-379-6 Nova Publisher 2020
- Bonotto DM (2004) Doses from 222Rn, 226Ra, and 228Ra in groundwater from Guarani aquifer, South America. *J. Environ. Radioactiv.* 76(3):319–335. doi:10.1016/j.jenvrad.2003.11.010
- Vogeltanz-Holm N, Schwartz GG (2018) Radon and lung cancer: what does the public really know? *J. Environ. Radioactiv.* 192:26–31. doi:10.1016/j.jenvrad.2018.05.017
- Vučković B, Čanačević S (2016) Monitoring of the absorbed dose of rates radiation in the rural areas. *Univ. thought. Publ. Nat. Sci.* 6(1):80–83. doi:10.5937/univtho6-10948
- Vučković B, Gulan Lj, Milenković B, Stajić J, Milić G (2016) Indoor Radon and Thoron Concentrations in Some Towns of Central and South Serbia. *J. Environ. Manage.* 183:938–944. doi:10.1016/j.jenvman.2016.09.053

- Vučković B, Marković S, Stević S, Mrazovac Kurilić S, Nikolić-Bujanović Lj, Todorović N, Nikolov J, Radovanović D, Srećković Batočanin D, Jokić A (2021) An overview of the radiation properties of spring water in the rural areas of Central Serbia. *J. Environ. Anal. Chem.* 1–15. doi:10.1080/03067319.2021.1890060
- Vučković B, Mrazovac Kurilić S, Nikolić-Bujanović Lj, Todorović N, Nikolov J, Živković Radovanović J, Milošević R, Jokić A (2022) Radon in drinking water from alternative sources of water supply in the north of Kosovo. *Radiat. Prot. Dosim.* 199(1):44–51. doi:10.1093/rpd/ncac222
- Вучковић Б, Гулан Љ, Милић Г, Адровић Ф, Манојловић П (2011) Истраживање концентрације активности радона у затвореним просторијама, Медицинска пракса, Српско лекарско друштво, подружница Крушевац, 35:19–22
- El-Araby HE, Solman HA, Abo-Elmagd M (2019) Measurement of radon levels in water and the associated health hazards in Jazan, Saudi Arabia. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 12(1):31–36. doi:10.1080/16878507.2019.1594134
- Žunić ZS, Celikovic I, Tokonami S, Ishikawa T, Ujic P, Onishenko A, Zhukovsky M, Milic G, Jakupi B, Cuknic O, Veselinovic N, Fujimoto K, Sahoo SK, Yarmoshenko I (2010) Collaborative Investigations of Thoron and radon in Some rural Communities of Balkan. *Radiat. Prot. Dosim.* 141:346–350. doi:10.1093/rpd/ncq258
- Žunić ZS, Kobal I, Vaupotic J, Kazak K, Mazur J, Birovljev A, Janik M, Celikovic I, Ujic P, Demajo A, Krstic G, Jakupi B, Quatro M, Bochicchio M (2006) High natural radiation exposure in radon spa areas: a detailed field investigation in Niška Banja (Balkan region). *J. Environ. Radioact.* 89(3):249–260. doi:10.1016/j.jenvrad.2006.05.010
- Zalewski M, Karpinska M, Mnich Z, Kapata J, Zelewski P (2001) Study of 222Rn concentrations in drinking water in the north-eastern hydroregions of Poland, *J. Environ. Radioact.* 53(2):167–173. doi:10.1016/S0265-931X(00)00122-3
- Isinkaye MO, Matthew-Ojelabi F, Adegun CO, Fasanmi PO, Adeleye FA, Olowomofe OG (2021) Annual effective dose from 222Rn in groundwater of a Nigeria University campus area. *Appl. Water Sci.* 11:85. doi:10.1007/s13201-021-01417-1
- Kasić A, Kasumović A, Adrović F, Hodžić M (2016) Radon measurements in well and spring water of the Tuzla area, Bosnia and Herzegovina, *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 67:332–339. doi:10.1515/aiht-2016-67-2788
- Kendall GM, Smith TJ (2002) Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *J. Radiol. Prot.* 22:389–406. doi:10.1088/0952-4746/22/4/304
- Кукучка Н, Кукучка М (2013) Физичко-хемијски састав светских природних вода, Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду, Београд.
- Marković S, Vučković B, Bujanović Nikolić Lj, Mrazovac Kurilić S, Todorović N, Nikolov J, Jokić A, Đokić B (2020) Heavy metals and radon content in spring water of Kosovo. *Sci. Rep.* 10:10359 doi:10.1038/s41598-020-67371-1
- Nikolov J, Todorovic N, Petrovic Pantic T, Kovacevic J, Stojkovic I, Krmar M (2015) Radon in Water – Hydrogeology and Health Implication (Eds: Stacks AM), Nova Science Publishers. Доступно на: <https://open.uns.ac.rs/handle/123456789/31826>, Приступљено: 10. децембра 2022

- Nikolov J, Todorović N, Petrović Pantić T, Forkapić S, Mrdja D, Bikit I, Krmar M, Vesković M (2012) Exposure to radon in the radon spa Niška Banja, Serbia, *Radiat. Meas.* 47(6):443–450. doi:10.1016/j.radmeas.2012.04.006.
- Никчевић М, Анђелић Т (2011) Радиоактивност и јонизујућа зрачења, детекција, дозиметрија и заштита од јонизујућих зрачења, ОСЦЕ, Подгорица
Доступно на: www.osce.org/files/f/documents/4/0/86634.pdf,
Приступљено: 10. децембра 2022
- Popović D, Todorović D (2006) Radon indoor concentration and activity of radionuclides in building materials in Serbia, *FU Phys. Chem. Technol.* 4(1):11–20. doi:10.2298/FUPCT0601011P
- Правилник о хигијенској исправности воде за пиће (Службени лист СРЈ, бр. 42/98 и 44/99 и Службени гласник Републике Србије, бр. 28/19)
- RAD7 RAD H₂O, Radon in Water Accessory, DURRIDGE Co., USA
- Rožmarić M, Rogić M, Benedik L, Strok M (2012) Natural radionuclides in bottled drinking waters produced in Croatia and their contribution to radiation dose. *Sci. Total Environ.* 437:53–60. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.07.018
- SAPHYMO (2007) AquaKIT user manual. In Accessory for Radon Water Measurement in Combination with the Radon Monitor AlphaGUARD; SAPHYMO: Frankfurt am Main, Germany, 2007.
- Sharma N, Sharma R (2013) Survey of radon concentration in drinking water samples of Hoshiarpur and Ropar districts of Punjab, India. *Adv. Appl. Sci. Res.* 4:226–231. doi:10.4103/0972-0464.185155
- Tirmarche M, Harrison JD, Laurier D, Paquet F, Blanchardon E, Marsh JW (2010) ICRP Publication 115. Lung cancer risk from radon and progeny and statement on radon. *Ann. ICRP.* 40(1):1–64. doi:10.1016/j.icrp.2011.08.011
- Todorović N, Nikolov J, Forkapić S, Bikit I, Mrdja D, Krmar M, Vesković M (2012a) Public exposure to radon in drinking water in Serbia. *Appl. Radiat. Isot.* 70(3):543–549. doi:10.1016/j.apradiso.2011.11.045
- Thinova L, Berka Z, Fridrichova L, Kaderova J, Cernohorska E, Pokorna T, Kosar V, Patak M, Kracmarova I (2004) The heightened activity of radon in water analysis from Lounovice area, Czech Republic. Доступно на: www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20555901, Приступљено: 10. децембра 2022
- UNSCEAR (2000) United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation Report to general assembly with scientific annexes. Appendix B, pp 97, New York. Доступно на: www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Annex-B.pdf, Приступљено: 10. децембра 2022
- UNSCEAR (2008) United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation Sources and effects of Ionizing Radiation. In Report to the General Assembly with Scientific Annexes, New York. Доступно на: www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html, Приступљено: 10. децембра 2022

- USEPA, US Environmental Protection Agency (1999) Radon in Drinking Water Health Risk Reduction and Cost Analysis. EPA Federal Register 64 (USEPA, Office of Radiation Programs) Washington, DC. Доступно на:
<https://archive.epa.gov/water/archive/web/html/hrrcafr.html>,
Приступљено: 10. децембра 2022
- USEPA/540/1-89/002, Office of Emergency and Remedial Response, US EPA, 2010.
Доступно на: <https://semspub.epa.gov/work/10/500011408.pdf>,
Приступљено: 10. децембра 2022
- Филиповић Б (2003) Минералне термалне и термоминералне воде Србије, Удружење бањских и климатских места Србије, Врњачка Бања и Институт за хидрогеологију Рударско-геолошког факултета, Београд.
- Cothern C, Smith JE (1987) Environmental Radon. New York (NY): Plenum Press.
Доступно на:
https://books.google.rs/books/about/Environmental_Radon.html?id=K7WvwZlc72MC&source=kp_book_description&redir_esc=y, Приступљено: 10. децембра 2022
- Council Directive 2013/51/Euratom of 22 October 2013 laying down requirements for the protection of the health of the general public with regard to radioactive substances in water intended for human consumption (2013) OJ L 296, 7.11.2013, pp 12–21. <http://data.europa.eu/eli/dir/2013/51/oj>
- Chandhuri H, Das KN, Bhandari RK, Sen P, Sinha (2010) Radon activity measurements around Bakerswar thermal spring. Rad. Measur. 45:143–145.
doi:10.1016/j.radmeas.2009.11.039
- WHO (2004) Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd ed. WHO Press, Geneva.
Доступно на: www.who.int/publications/i/item/9789241547611,
Приступљено: 10. децембра 2022
- WHO (2018) Management of radioactivity in drinking-water, Доступно на:
www.who.int/publications/i/item/9789241513746, Приступљено: 10. децембра 2022
- Xinwei L (2006) Analysis of radon concentration in drinking water in Baoji (China) and the associated health effects. Radiat. Prot. Dosim. 121(4):452–455.
doi:10.1093/rpd/ncl048

Negative effects of population exposure to radon from water

Biljana Vučković

Summary

The presence of radionuclides in drinking water, as well as in water used for other purposes, plays a significant role in the exposure of the population. Water monitoring is carried out in order to measure the content of natural radionuclides, primarily radon – ^{222}Rn , and its short-lived descendants. Radon is the only gaseous radioactive product of the uranium series and a direct descendant of radium. The half-life of radon is 3.82 days, and its decay is followed by four descendants: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi and ^{214}Po . The solubility of radium in water and its long-distance transport allow radon to accumulate in it, especially if it dissolves uranium-rich rocks. The resulting radon can be introduced into the water by the effect of entrainment and can be transported by underground flowing water to greater distances and entered into the body by ingestion. Radon is moderately soluble in water; it easily leaves it and thus increases its concentration in the air in closed rooms, and is taken into the body by inhalation. Epidemiological studies have shown that radon in drinking water is a secondary source of indoor radiation. The risk of manifesting carcinogenic effects due to exposure to radon, which is introduced into the body in different ways, is represented by chronic daily intake (CDI) of radon. The risk is quantitatively assessed for each entry route, and the simple sum of all entries determines the total exposure risk.

Keywords: Radon, groundwater, detection, inhalation, ingestion, health risk assessment

